

DIRECCIÓN DE GEOLOGÍA AMBIENTAL Y RIESGO GEOLÓGICO

Informe Técnico N° A6998

**INFORME TÉCNICO ANUAL:
VIGILANCIA DEL VOLCÁN SABANCAYA,
PERÍODO 2019**

Región Arequipa
Provincia Cailloma



DICIEMBRE

2019

**INSTITUTO GEOLÓGICO, MINERO Y METALÚRGICO
DIRECCIÓN DE GEOLOGÍA AMBIENTAL Y RIESGO GEOLÓGICO
OBSERVATORIO VULCANOLÓGICO DEL INGEMMET – OVI**

Informe Técnico Nro. A6998

**INFORME TÉCNICO ANUAL:
VIGILANCIA DEL VOLCÁN SABANCAYA,
PERIODO 2019**

Equipo de Vigilancia Volcánica

Domingo Ramos Palomino
Pablo Masías Alvarez
Fredy Apaza Choquehuayta
Rafael Miranda Cruz
Yanet Antayhua Vera
Mayra Ortega Gonzales
Rosa Anccasi Figueroa
Beto Ccallata Pacsi
Carlos Luza Huillca
David Valdivia Humerez
Luis Fernando Cruz Mamani
Edu Taipe Maquerhua

AREQUIPA – PERU

Diciembre - 2019

Contenido

RESUMEN	5
1 INTRODUCCION	7
1.1 Objetivos	7
1.2 Volcán Sabancaya.....	7
1.3 Ubicación.....	8
1.4 Antecedentes	8
1.5 Técnicas de Vigilancia.....	9
1.6 Red de Vigilancia	9
2 QUIMICA DE GASES Y AGUAS.....	11
2.1 Vigilancia de Gases Volcánicos.....	11
2.2 Red Escáner DOAS:.....	11
2.2.1 Móvil DOAS:	12
2.3 Resultados de Vigilancia de flujos de SO ₂	12
2.4 Vigilancia de Fuentes Termales.....	13
2.4.1 Fuentes de Agua.....	13
2.4.2 Resultados del Vigilancia de fuentes termales.....	14
2.4.3 Resultados de temperatura de la fuente SA3	16
3 VIGILANCIA GEODÉSICA	17
3.1 Red de Vigilancia	17
3.2 Procesamiento	19
3.2.1 GPS	19
3.2.2 Inclínometría	19
3.3 Resultados.....	20
3.3.1 Deformación volcánica del Sabancaya.....	20
3.3.2 Modelamiento de la deformación volcánica.....	26
3.4 InSAR	27
4 VIGILANCIA SÍSMICA.....	30
4.1 Red Sísmica.....	30
4.2 Operatividad.....	30
4.3 Procesamiento y Análisis.....	30

4.4	Resultados	31
4.4.1	Sismos volcano – tectónicos (VT)	33
4.4.2	Sismos largo periodo (LP)	39
4.4.3	Sismos híbridos (HIB).....	42
4.4.4	Tremor volcánico espasmódico y armónico (TRE, TRA)	44
4.4.5	Explosiones	47
5	SENSORES REMOTOS.....	53
5.1	Red de Cámaras.....	53
5.2	Características de las Emisiones.....	54
5.2.1	Forma y ocurrencia.....	54
5.2.2	Dirección predominante	55
5.2.3	Imágenes representativas de emisiones fumarólica.....	56
5.3	Vigilancia satelital.....	58
5.3.1	Seguimiento del crecimiento del domo	64
5.3.2	Sobrevuelos con DRONE	65
5.3.3	Imágenes satelitales, térmicas y ópticas	68
5.3.4	Flujos piroclásticos	70
6	PRODUCTOS EMITIDOS	73
6.1	Red de cenizómetros.....	73
6.2	Muestreo de Cenizas	73
6.3	Análisis por Lixiviación.....	78
6.3.1	Metodología	79
6.3.2	Datos	79
6.3.3	Interpretación	79
6.4	Componentes y granulometría	80
6.4.1	Distribución granulométrica y análisis de parámetros estadísticos	81
6.5	Geoquímica	86
6.6	Mapa de isópacas.....	89
7	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	90
8	CONCLUSIONES	94
9	RECOMENDACIONES	97
10	BIBLIOGRAFÍA.....	98

RESUMEN

El volcán Sabancaya durante el 2019, continuó presentando cambios importantes en su comportamiento, los cuales se reflejaron a través de los parámetros de monitoreo (actividad sísmica, deformación, flujos de SO₂, anomalías satelitales y térmicas, emisiones de gases y ceniza, composición de las cenizas volcánicas, sobrevuelos con dron).

En el volcán Sabancaya la actividad que principalmente se registró fueron los sismos asociados a la dinámica de fluidos y gases al interior de los conductos volcánicos (largo periodo), seguido por sismos relacionados con el fracturamiento de roca dentro de la estructura volcánica (volcano - tectónicos) y por último por explosiones leves y moderadas que generaron columnas eruptivas de gases y ceniza de hasta 3 km de altura en promedio. La sismicidad en términos de energía incrementó significativamente a comparación del año 2018 y 2017.

La actividad asociada al fracturamiento de roca se localizó principalmente en los sectores NE, N y NO del cráter del volcán Sabancaya y en menor proporción en las fuentes sismogénicas localizadas al O y SO. Las profundidades llegaron hasta los 16 km. Las magnitudes locales estimadas oscilaron entre 0.1 y 4.1 M_L, este tipo de sismicidad, en ocasiones se presentó a manera de enjambres, indicando periodos importantes de intrusión magmática. Respecto a la actividad de fluidos al interior de los conductos volcánicos, mostró periodos de incremento tanto en número como en energía, dichos periodos posiblemente estén asociados al crecimiento del domo de lava, relacionados con la actividad de fluidos, se observaron episodios de temblor volcánico continuo, los cuales, se asociaron a la limpieza del conducto y emisiones de gases y ceniza. Por otra parte, la sismicidad de tipo híbrido a lo largo del 2019 fue muy esporádica, sin embargo, a partir de diciembre, la tasa de ocurrencia de este tipo de eventos se hizo más continua, indicando que aún continua el aporte y/o ascenso de magma; en cuanto a las explosiones, éstas se mantuvieron en un promedio de 30 explosiones por día, aunque cabe recalcar que, entre setiembre y noviembre, se registró un incremento muy importante tanto en número y energía (70 explosiones por día en promedio), este actividad se asoció a un aceleramiento en la tasa de crecimiento del domo. Este comportamiento fue confirmado mediante el monitoreo de sensores remotos, a través de imágenes satelitales (PlanetScope), imágenes térmicas (MIROVA) y el registro de las cámaras ópticas e infrarroja y además de realizarse sobrevuelos con dron a fin de conocer la evolución geomorfológica del domo de lava ubicado en el cráter activo del volcán.

Con relación a la deformación del volcán, mediante las técnicas de GPS e InSar, se observaron periodos de cambios, que básicamente evidenciaron una inflación constante a causa de la intrusión profunda de magma hacia el reservorio bajo el Hualca Hualca y desplazamientos horizontales y verticales causados por el ascenso del magma profundo hacia la superficie. Respecto a los flujos de SO₂, durante este periodo de análisis, se registraron incrementos en dichos valores, considerados como FLUJOS MUY GRANDES (> 10000 toneladas/día), dicho comportamiento estuvo asociado al ascenso magmático desde la cámara magmática principal.

Por otra parte, el análisis geoquímico de los productos emitidos por el volcán, indican que la composición de la ceniza es andesítica – dacítica, estos productos actuales presentan gran similitud con los productos emitidos durante el proceso eruptivo 1988 – 1989.

Finalmente, teniendo como antecedente la evaluación integral y permanente de los parámetros que se vigilan, durante todo el año 2019 el volcán Sabancaya continua en **NIVEL DE ALERTA NARANJA** que significa: *cambios en el comportamiento de la actividad del volcán (incremento de la actividad sísmica, alturas de las columnas eruptivas seguidas de caída de cenizas y expulsión de proyectiles balísticos en algunas ocasiones, análisis de los productos emitidos, presencia y crecimiento de un domo de lava en el cráter activo del volcán y la generación de pequeños flujos piroclásticos).*

1 INTRODUCCION

El Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET), a través de la Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico, creó el Observatorio Vulcanológico del INGEMMET (OVI) cuyo fin es determinar la naturaleza y probabilidad de ocurrencia de una erupción volcánica; evaluar los tipos de peligros volcánicos en base a estudios geológicos y análisis especializados; y proporcionar alertas oportunas a la sociedad sobre una actividad volcánica inminente, a fin de incrementar e implementar la gestión de riesgo de desastres a beneficio de la población y a su vez, reducir el mismo en el sur del país en base a la vigilancia permanente de los volcanes activos en el sur del Perú.

Cumpliendo con la función que le ha sido encomendada, el Observatorio Vulcanológico del INGEMMET, como centro de investigación y vigilancia de volcanes activos del sur del Perú, de carácter multidisciplinario, realiza la vigilancia sistemática y continua de los volcanes: Sabancaya, Misti, Ubinas, Ticsani, Tutupaca, Yucamane, etc., los cuales, se encuentran localizados en los departamentos de Arequipa, Moquegua y Tacna.

En el presente informe técnico anual de la actividad del volcán Sabancaya, correspondiente al año 2019, se compila la información obtenida a través de las redes de vigilancia multiparamétricas instaladas en los alrededores del edificio volcánico.

1.1 Objetivos

- Realizar el monitoreo multidisciplinario del volcán Sabancaya, integrando toda la información generada por las diferentes disciplinas,
- Buscar patrones relacionados con el comportamiento de la actividad del volcán.
- Informar sobre las características del proceso eruptivo del volcán y los efectos ocasionados durante el año 2019.

1.2 Volcán Sabancaya

El volcán Sabancaya es el más joven de los diez volcanes activos del sur del Perú, el cual, se ha formado en los últimos 10 mil años. Está conformado principalmente por secuencias de flujos de lava de composición andesítica y dacítica, con limitados depósitos piroclásticos (Mariño, 2012; Rivera et al., 2015; Samaniego et al., 2016).

La cumbre del volcán Sabancaya está a 5980 msnm y el edificio volcánico cubre un área de 65 a 70 km². Dicho volcán está conformado por dos estratos – conos alineados en dirección SO – NE (Figura 1.1); el más antiguo se halla en el extremo suroeste, en cuya cima se emplaza un domo – colada, mientras que el cono más reciente se halla en el extremo noreste. El cráter activo se encuentra en la cima del estrato – como NE.

1.3 Ubicación

El volcán Sabancaya se encuentra ubicado a 70 km al NO de la ciudad de Arequipa, y a 30 km al SO de la localidad de Chivay (Figura 1.1), en la Cordillera Occidental de los Andes del Sur peruano. Política y territorialmente, el Sabancaya está situado en la provincia de Caylloma, departamento de Arequipa, en las siguientes coordenadas UTM:

Longitud: 193847 Este
Latitud: 8252585 Sur
Altitud: 5980 msnm

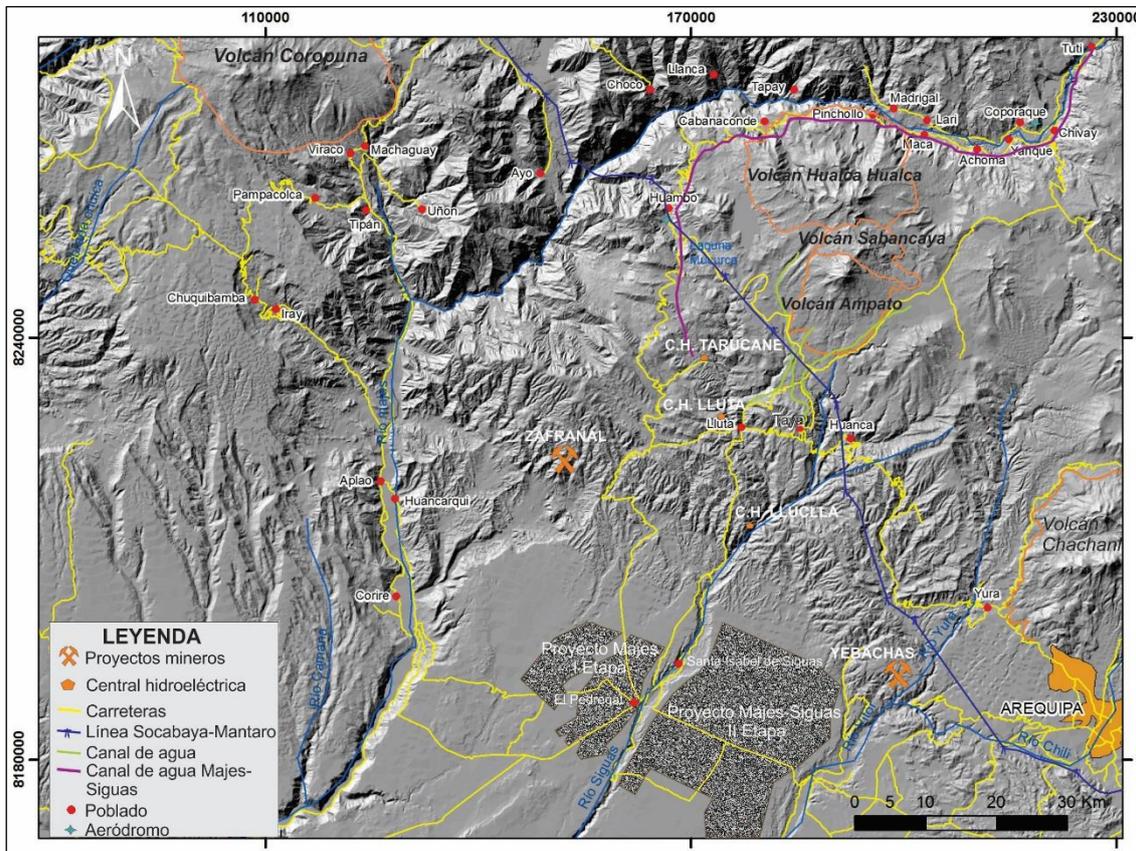


Figura 1.1. Ubicación del volcán Sabancaya que forma parte del complejo Ampato – Sabancaya, y poblados aledaños (tomado de Rivera et al., 2017).

1.4 Antecedentes

En la región del volcán Sabancaya se han realizado estudios de carácter geológico, tectónico, geofísico, etc; los cuales se mencionan a continuación:

- OVI (2017), realiza una evaluación del proceso eruptivo del volcán Sabancaya, región Arequipa.
- Ramos et al. (2016), realiza un análisis de los inicios de la actividad eruptiva 2016 del

volcán Sabancaya.

- Rivera et al. (2016), se hace una inspección geológica del volcán Sabancaya a fin de identificar e inventariar nuevas zonas con emisiones fumarólicas en los flancos del volcán.
- Samaniego et al. (2016), realizan una descripción de la cronología eruptiva del complejo volcánico Ampato – Sabancaya
- Mariño et al. (2016), realizan una evaluación de peligros, escenarios eruptivos futuros en el Sabancaya, así como una explicación detallada del mapa de peligros volcánicos.
- Benavente et al. (2012), realizan un estudio respecto al control estructural en el arco volcánico cuaternario a lo largo de aproximadamente 300 km conformado principalmente por fallas normales.
- Ramos et al. (2011) se realiza un estudio de sismicidad con la finalidad de conocer la actividad en la zona del valle del colca, además, se hizo una caracterización sísmica del volcán a fin de elaborar una línea base sobre la cual se implementaría un sistema de vigilancia.

1.5 Técnicas de Vigilancia

Desde el año 2006 el INGEMMET, venía realizando el monitoreo periódico del volcán Sabancaya, fecha en que se implementa una base de datos con muestreos temporales de aguas y gases, mediciones de deformación y además se realizó una campaña sísmica temporal (trabajo conjunto con IGP e IRD).

En febrero del 2013, a raíz de una actividad sísmica y fumarólica inusual en el volcán Sabancaya (reporte de la brigada de campo IN SITU) es que se re – inicia la vigilancia instrumental en tiempo real y la cual se ha venido implementando de forma multiparamétrica y continua, hoy en día, el volcán Sabancaya, es vigilado a través de las siguientes técnicas y/o disciplinas:

- Vigilancia química de gases y aguas.
- Vigilancia geodésica.
- Vigilancia de la actividad sismo – volcánica.
- Vigilancia a través de sensores remotos.
- Vigilancia y seguimiento de los productos emitidos por el volcán.

1.6 Red de Vigilancia

Durante el 2019, la red de vigilancia multiparamétrica del volcán Sabancaya estuvo conformada

por los siguientes equipos (Figura 1.2):

- 03 escáneres de gases SO₂ DOAS.
- 04 estaciones GPS.
- 02 inclinómetro.
- 10 estaciones sísmicas.
- 03 cámaras de video vigilancia
- 01 cámara de vigilancia térmica.
- 43 cenizómetros.
- Se han identificado 12 fuentes termales, de las cuales, 02 de ellas son monitoreadas.

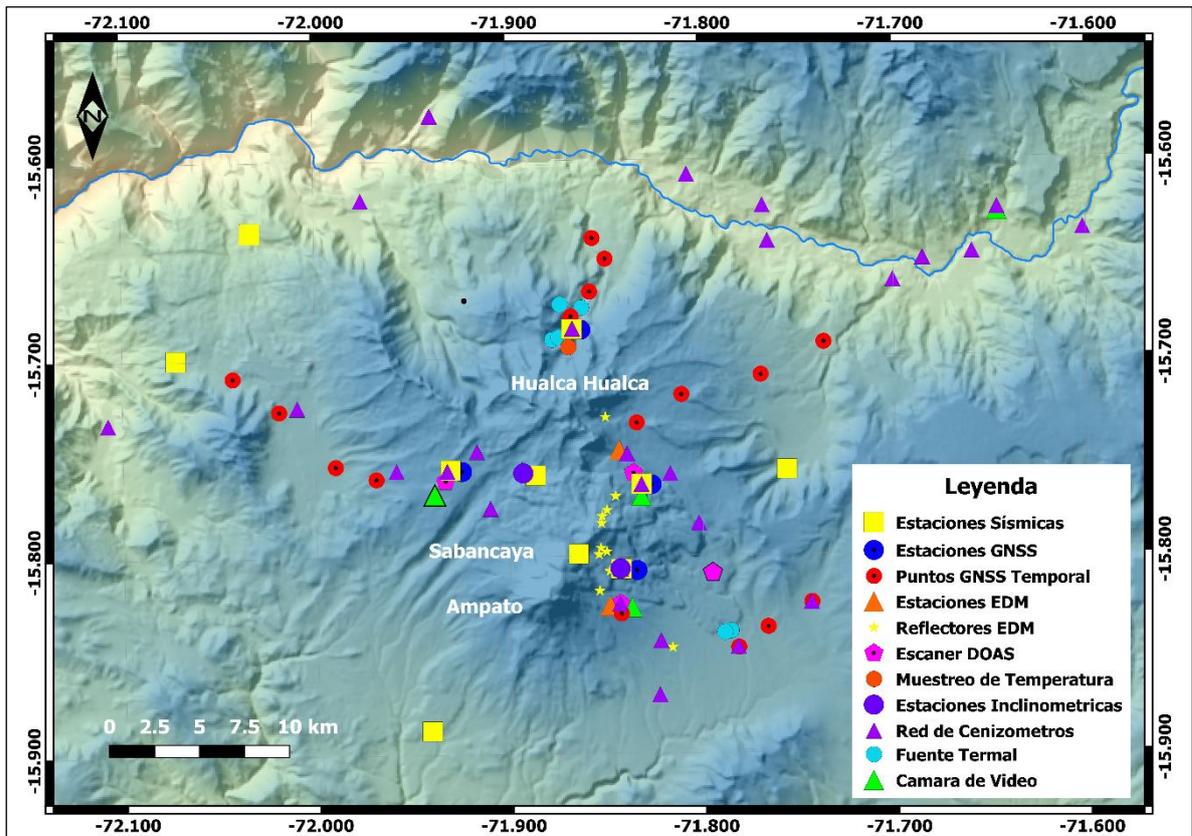


Figura 1.2. Red de vigilancia multiparamétrica del volcán Sabancaya, 2019.

2 QUIMICA DE GASES Y AGUAS

El monitoreo químico del volcán Sabancaya durante el 2019, se realizó principalmente en dos campos, la vigilancia de los gases volcánicos de origen magmático emitidos por el cráter y la vigilancia y seguimiento de las fuentes termales alrededor del complejo volcánico.

2.1 Vigilancia de Gases Volcánicos

La vigilancia de gases volcánicos, durante el 2019, se realizó aplicando 2 métodos: (1) la red NOVAC de escáner DOAS y (2) el equipo móvil DOAS, los que se describen a continuación.

2.2 Red Escáner DOAS:

Con el objetivo de medir el flujo del gas magmático Dióxido de azufre (SO₂), el cual es expresado en toneladas por días. Esta red está compuesta por 4 escáneres DOAS instalados alrededor del cráter del Sabancaya: SAD1, SAD2, SAD3, SAD5.1 (Fig. 2.1). Estos equipos escanean el cielo buscando las plumas volcánicas que pasan encima de ellas, midiendo el SO₂, información que es transmitida a INGEMMET para su procesamiento, las estaciones que mantuvieron un mayor tiempo de operatividad fueron SAD1 y SAD3 (Fig. 2.2).

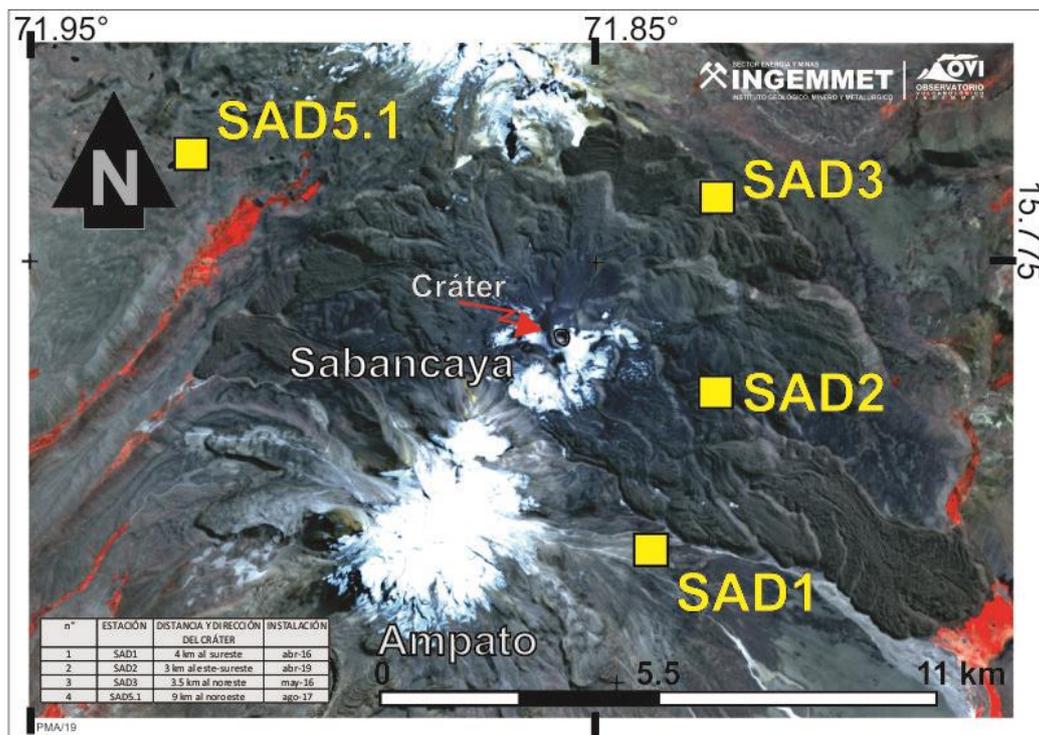


Figura 2.1. Ubicación de los escáner DOAS, instalados en los alrededores del volcán Sabancaya.



Figura 2.2. Operatividad de los equipos escáner DOAS, instalados en el volcán Sabancaya.

2.2.1 Móvil DOAS:

Este equipo es utilizado en el Sabancaya desde 2013, las mediciones se realizan pasando por debajo de la pluma volcánica, por lo general, en un vehículo.

Durante el 2019 se realizaron campañas donde la dirección de la pluma coincidió con la dirección del viento y por ende se obtuvieron buenos resultados.

2.3 Resultados de Vigilancia de flujos de SO₂

El flujo de SO₂, por lo general, se mantuvo por debajo de las 10000 toneladas/día (flujo grande) hasta mayo, a partir de esta fecha se registró un incremento superando este nivel (flujos muy grandes) en los meses de mayo, junio, julio, septiembre y diciembre. Alcanzando un flujo máximo de hasta las 12800 Ton/día el 23 de julio (Fig. 2.3).

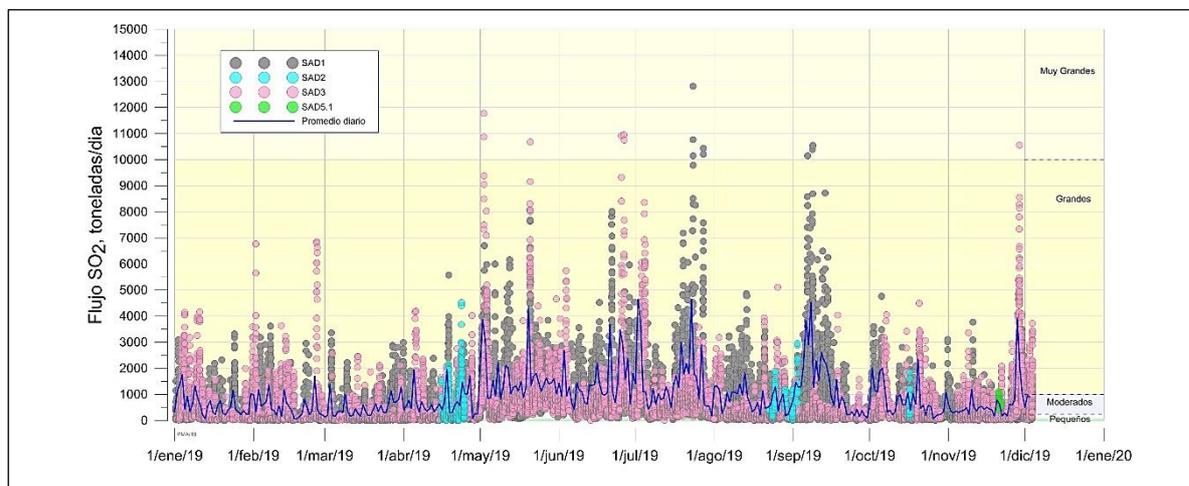


Figura 2.3. Mediciones de los flujos máximos diarios con el equipo NOVAC, escáner de las lecturas diarias (color rojo), registradas en las estaciones SAD1, SAD2, SAD3 y SAD5.1, Mediciones realizadas con el móvil

DOAS (color amarillo) para el monitoreo del gas volcánico dióxido de azufre SO₂, en la pluma volcánica del Sabancaya, durante el 2019.

2.4 Vigilancia de Fuentes Termales

La vigilancia de fuentes termales consiste en la identificación y seguimiento de la composición química del agua en el tiempo, así como de parámetros físicos como la temperatura.

2.4.1 Fuentes de Agua

Las fuentes termales vigiladas durante el 2019 fueron 6: SA2, SA3, YA1, YA2, YA3 y CAL, las que se encuentran a una distancia entre 9 y 35 km del cráter (Fig. 2.4). El muestreo se realizó por duplicado en abril y noviembre para SA2 y SA3 y en agosto para YA1, YA2, YA3 y CAL.

Los análisis se realizaron en el laboratorio de química de INGEMMET, Aniones para todas las muestras y Metales disueltos para las fuentes SA2 y SA3. Utilizando las metodologías y equipos que se enumeran a continuación:

Metales disueltos - (Na, Mg, K, Ca, Sr, Li, SiO₂, B, Fe, S) por Espectrometría de Emisión Atómica por Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-OES) marca VARIAN, modelo 735-ES. Además (Ag, Al, As, B, Ba, Be, Bi, Sr, Li, Fe, Cd, Ce, Co, Cr, Cu, La, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Sn, Th, Ti, Tl, U, V, W, Y, Zn) por Espectrometría de Masa por Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS) marca Perkin, modelo Nexion 300D.

Aniones - (F⁻, Cl⁻, SO₄⁼) por Cromatográfica Iónica marca Thermo Scientific, modelo Dionex ICS-5000. Además (CO₃⁼, HCO₃⁻) por método Titrimétrico marca Thermo Scientific, modelo Orion Versa Star. La temperatura es otro parámetro que se monitorea de manera continua en la fuente SA3, para esto se utilizaron registradores de temperatura marca Tinytag modelo TG-4100, con un rango temperatura entre -40°C y +70 °C, los cuales se mantuvieron sumergidos en el agua con un paso de registro de 15 minutos. En la fuente SA3, el registro se realizó desde enero hasta el mes de agosto.

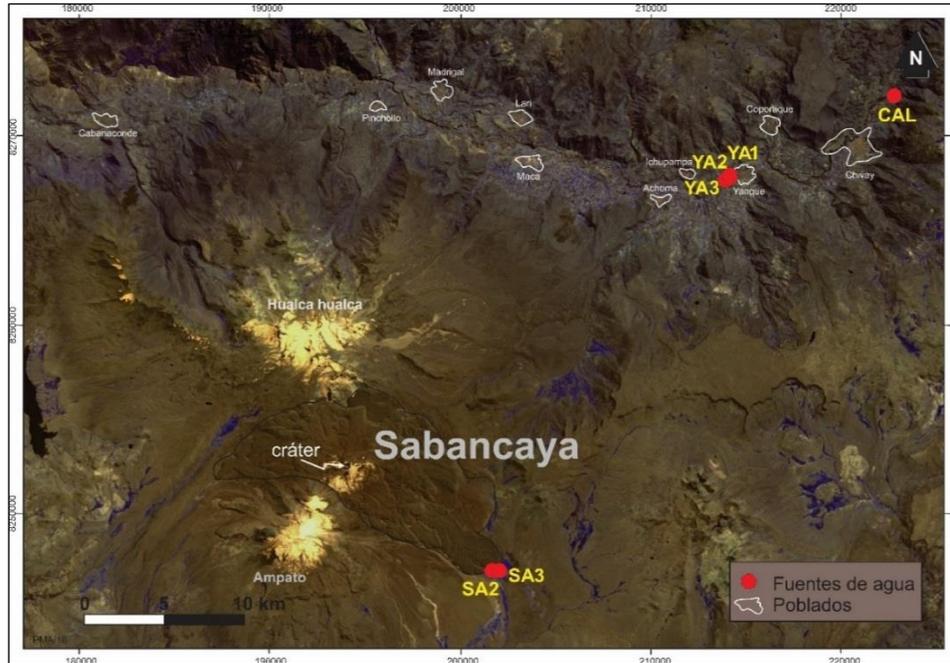


Figura. 2.4. Mapa de la localización de las fuentes de agua termales monitoreadas durante el 2019 en los alrededores del volcán Sabancaya.

2.4.2 Resultados del Vigilancia de fuentes termales

Los resultados de la vigilancia de los aniones de las 6 fuentes termales del Sabancaya (Fig. 2.6), muestra que los cambios más significativos se encuentran en las fuentes SA2 y SA3 (Fig. 2.5), Al graficarlos a parte, observamos que, aunque en la mayoría de los casos ambas fuentes mantienen la misma tendencia, es en la fuente SA3 donde se ve los mayores cambios.

Los cloruros (Cl⁻) incrementaron desde el inicio de la erupción (nov 2016); durante el 2019 se alcanzó el nivel más alto en todo el proceso eruptivo con 200 mg/L. De igual manera se observó en el caso de los sulfatos (SO₄⁻²) con 1946 mg/L, sodio (Na) con 331 mg/L, calcio (Ca) con 146 mg/L y Magnesio (Mg) con 340 mg/L. El potasio también aumentó a 59 mg/L, aunque no presento una tendencia tan marcada como los otros analitos. Esto muestra el aporte magmático al sistema hidrotermal volcánico del Sabancaya. El bicarbonato (HCO₃⁻) por el contrario muestra una tendencia a disminuir, esto posiblemente por el incremento de compuestos que van acidificando el agua. El fluoruro (F⁻) alcanzó su nivel más alto en 2015 (~ 2 mg/L), sin embargo, actualmente los niveles son los más bajos (0.8 mg/L), posiblemente éste se esté eliminando en las emisiones por el cráter. La sílice (SiO₂) presento sus niveles más altos en 2018 (~ 128 mg/L), sin embargo, actualmente se encuentra similar al inicio de la erupción (110 mg/L).

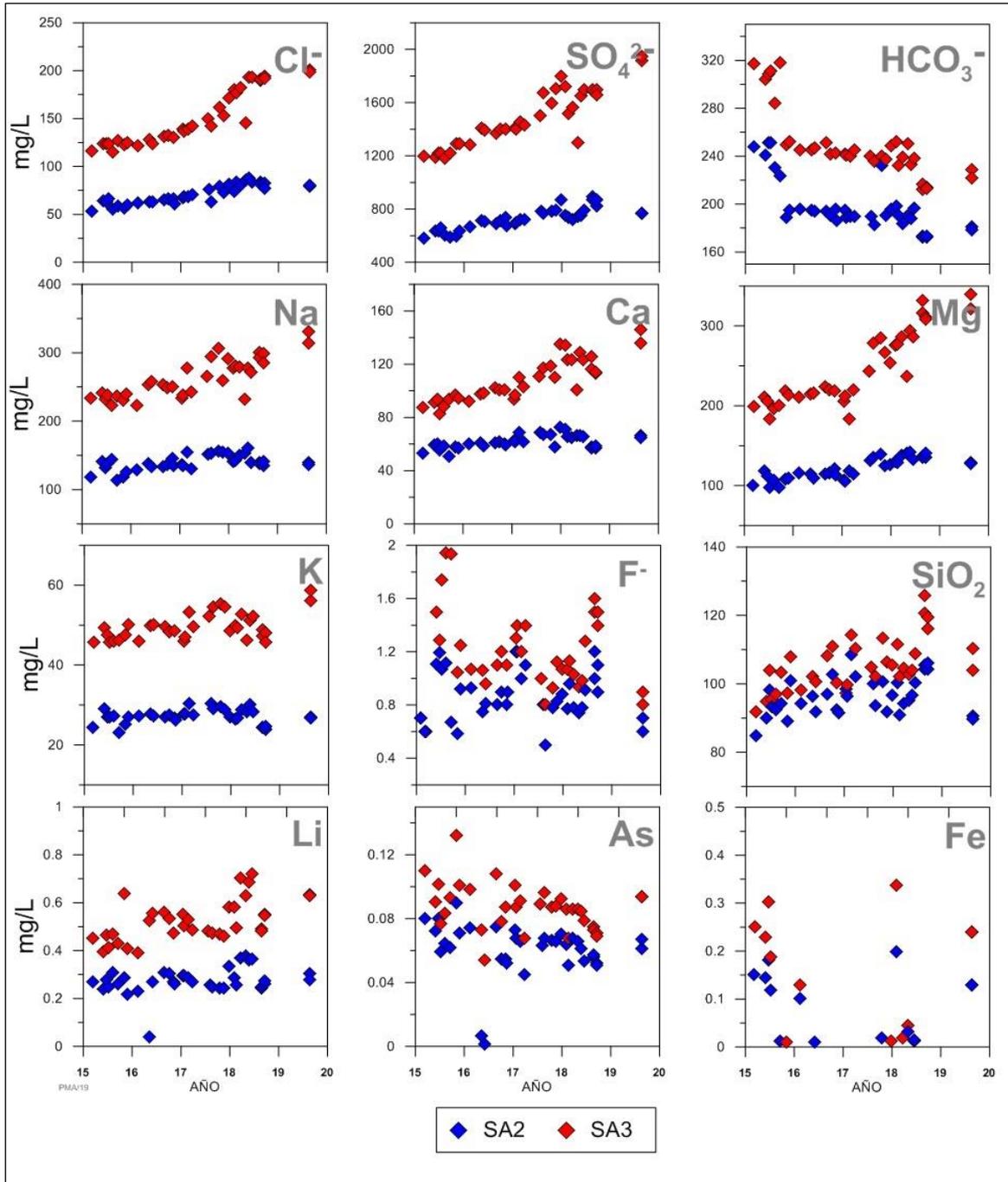


Figura. 2.5. Gráfica de los principales elementos y compuestos vigilados en las fuentes termales SA2 y SA3, entre los años 2015 al 2019.

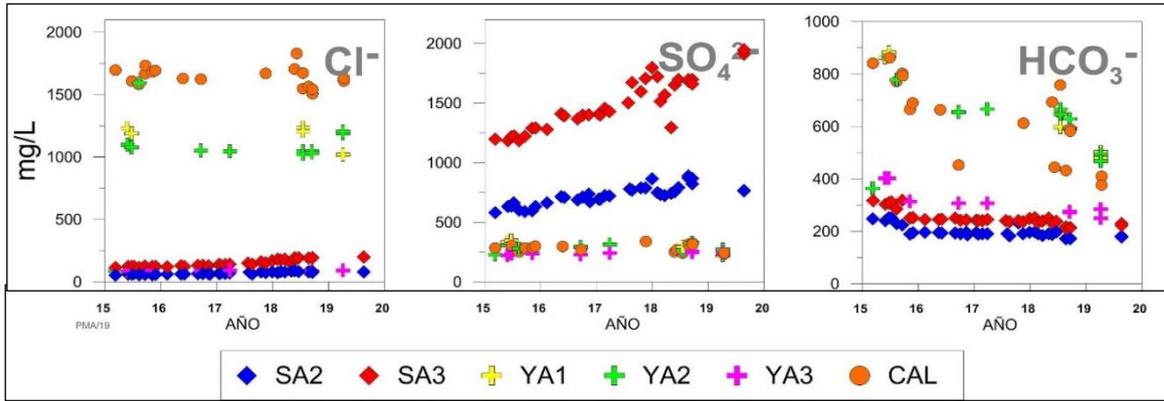


Figura. 2.6. Gráficas de los resultados de la vigilancia de los aniones de las 6 fuentes termales monitoreadas en el volcán Sabancaya (izquierda) cloruros, (medio) sulfatos, (derecha) bicarbonatos, con datos entre los años 2015 y 2019.

2.4.3 Resultados de temperatura de la fuente SA3

La temperatura del agua de la fuente SA3 (Fig. 2.7), es uno de los parámetros más interesantes, a partir de mediados de febrero, muestra el inicio de un incremento. Para mediados de junio, la tendencia se agudiza hasta mediados de junio. A partir de agosto, nuevamente se incrementa la tendencia. En este periodo de 8 meses el incremento superó los 0.5 °C de temperatura.

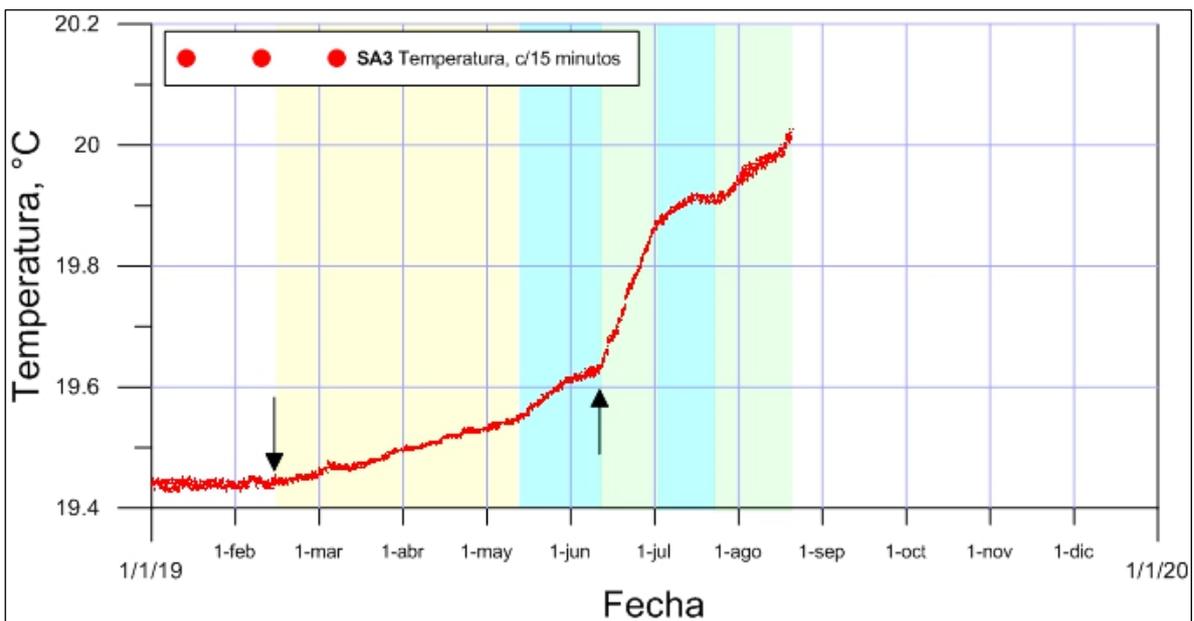


Figura. 2.7. Gráfica de la temperatura registrada en la fuente SA3 entre los meses de enero - agosto del 2019.



Figura 3.2. Estaciones GPS de la red de vigilancia geodésica del volcán Sabancaya durante el 2019. De izquierda a derecha, estación GPS SBMU, SBHO y SBSE.

Las estaciones GPS permanentes están ubicadas radialmente a la cámara magmática modelada por Pritchard et al. (2004) y Cruz (2019). La fase portadora y los demás observables registrados por estas estaciones, están muestreadas a intervalos de 30 segundos utilizando todos los satélites visibles por encima de 10° de máscara de elevación. Estos datos llegan al observatorio diariamente mediante antenas de radiofrecuencia. Bajo el mismo criterio de distribución y configuración de recepción de información, se han realizado las medidas GPS de campaña en puntos de control alrededor de las estaciones GPS permanentes.

Los dos inclinómetros de operatividad de experimental, se encuentran instalados, uno a 4 km al noroeste del cráter del volcán Sabancaya (SBIA) y el otro (SBIV, Figura 3.3) en la estación GPS SBSE y se han mantenido operativos desde mayo del 2019.



Figura 3.3. Dispositivos utilizados para el funcionamiento de prueba de los dos inclinómetros instalados en el volcán. De izquierda a derecha, el sensor y el dispositivo de registro de información.

3.2 Procesamiento

3.2.1 GPS

El procesamiento de los datos GPS se trabajó utilizando el programa científico GAMIT/GLOBK v.10.7 (Herring et al., 2010), dos programas desarrollados por el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) en colaboración con el Instituto Scripps de Oceanografía y el Centro Harvard-Smithsonian para la Astrofísica con soporte de la Fundación Nacional de Ciencias. Tanto GAMIT como GLOBK, son un conjunto de módulos, librerías y subprogramas compilados bajo un mismo entorno, trabajando de manera contigua bajo una metodología.

Para el análisis de deformación volcánica, se utilizó los resultados del procesamiento de longitud de líneas base y de las posiciones horizontales y verticales. Así mismo, se estimaron las velocidades de deformación para el modelamiento inverso de la fuente de deformación.

Las soluciones finales se estimaron utilizando las órbitas finales del IGS (Servicio Internacional GNSS). Las cuasi-soluciones se combinaron utilizando las soluciones globales diarias calculadas por el MIT. Las posiciones diarias y velocidad media se estimaron ajustando las soluciones finales a las posiciones y velocidad de la estación AREQ definida bajo el marco de referencia de Sudamérica (SOAM) definido por Altamini et al. (2012). Este ajuste permite eliminar los patrones de estacionalidad y la influencia tectónica de la placa Sudamericana. Así mismo se aplicaron las correcciones por inestabilidad del monumento (*random walk*), el error instrumental (*white noise*) y *flicker noise* utilizando las aproximaciones de Williams et al. (2004).

El procesamiento de los datos GPS obtenido por campaña, se trabajó utilizando el programa Trimble Business Center v. 3.51. Para el análisis de la deformación volcánica, se utilizó los resultados del procesamiento de las posiciones horizontales y verticales. Las posiciones precisas en cada componente se obtuvieron del procesamiento de la línea base entre cada estación de campaña y estación permanente. La velocidad de deformación se estimó mediante regresión cuadrática y se reestimó con la velocidad angular de un polo de Euler calculado para el sur del Perú.

3.2.2 Inclínometría

El procesamiento de los datos experimentales de inclinometría, se trabajó utilizando el programa: ReporteTiltSabancaya, modificado por el personal del OVI del programa Tilt (proporcionado por VDAP, 2019). Las tasas de deformación calculadas por los inclinómetros se estimaron corrigiendo los parámetros de temperatura y deriva instrumental.

3.3 Resultados

3.3.1 Deformación volcánica del Sabancaya

Se han procesado seis (06) líneas base en el volcán Sabancaya (Fig. 3.4) y las series temporales de posición para cada estación GPS permanente (Fig. 3.5).

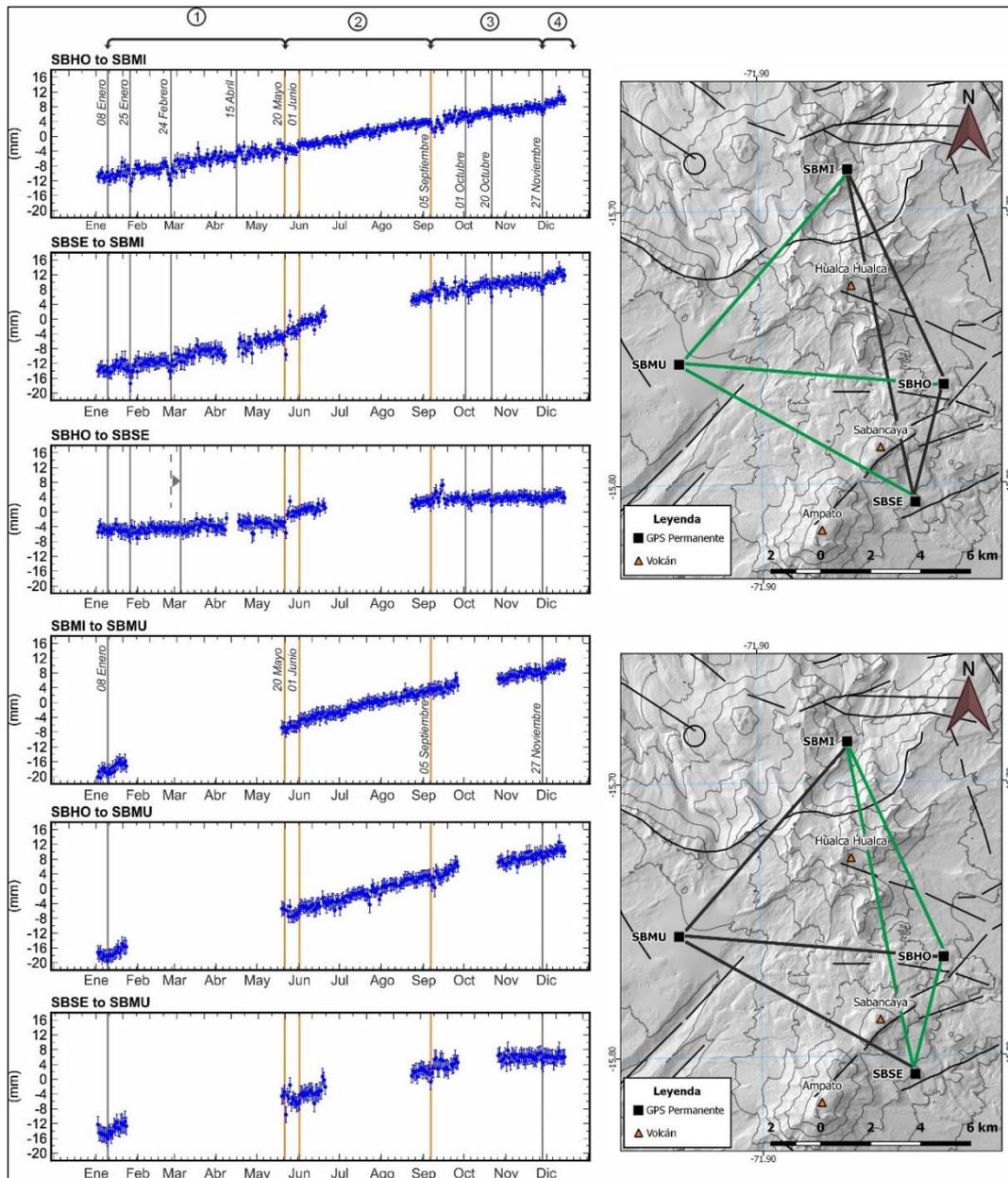


Figura 3.4. Series temporales del procesamiento de líneas base de la red de GPS permanentes del volcán Sabancaya durante el 2019. Las tres primeras series corresponden a las líneas base de color negro dibujadas en la imagen superior derecha. Las últimas tres series corresponden a las líneas base de color negro dibujadas en la imagen inferior derecha.

Los resultados de las series temporales de líneas base, muestran un proceso de inflación casi constante en todo el CVAS y el Hualca Hualca. Este proceso de inflación, es la respuesta superficial de la intrusión profunda en la cámara magmática modelada por Pritchard et al. (2004) en el proceso eruptivo anterior y Cruz (2019) en el proceso eruptivo actual. A lo largo del 2019, las líneas base han evidenciado varios periodos (días, semanas y a veces meses) de incremento en la tasa de inflación, una inflación constante subsecuente y relajación del sistema; estos periodos están asociados a la presión ejercida por la migración de volumen magmático en profundidad hasta ser liberada en superficie. Así mismo, se han registrado procesos de extensión asociados a la ocurrencia de sismos de fracturamiento cerca al volcán Sabancaya (20 de mayo, 01 de junio y 05 de septiembre).

Las series temporales de posición del volcán Sabancaya, básicamente evidencian una inflación constante a causa de la intrusión profunda de magma hacia el reservorio bajo el Hualca Hualca y desplazamientos horizontales y verticales causados por el ascenso del magma profundo hacia la superficie. Durante el 2019 se han evidenciado cuatro etapas (Figura 3.5 y 3.6):

- a. Del 08 de enero al 20 de mayo se evidencia una inflación constante. En este proceso, se observa principalmente tres episodios de aumento de presión y relajación del sistema asociados a ascenso de magma profundo hacia la superficie con un promedio de ocurrencia casi mensual.
- b. Posterior al 20 de mayo, la inflación relacionada a la intrusión profunda continua de manera constante hasta el 05 de septiembre. En este caso los episodios asociados a la migración de magma profundo hacia la superficie se produjeron de forma más periódica, cada dos semanas y hasta en cinco ocasiones. Esta etapa termina con una migración de magma hacia la superficie de manera más prolongada, un mes y medio aproximadamente.
- c. Posterior al 05 de septiembre, la tasa de inflación relacionada a la intrusión profunda en la cámara magmática bajo el Hualca Hualca, disminuye hasta el 27 de noviembre aproximadamente. Esto se asociaría a la disminución de la intrusión profunda en la cámara magmática profunda.
- d. Posterior al 27 de noviembre, la tasa de inflación se recupera, siendo indicio de que la intrusión profunda en la cámara magmática bajo el Hualca Hualca vuelve a ser intruida.

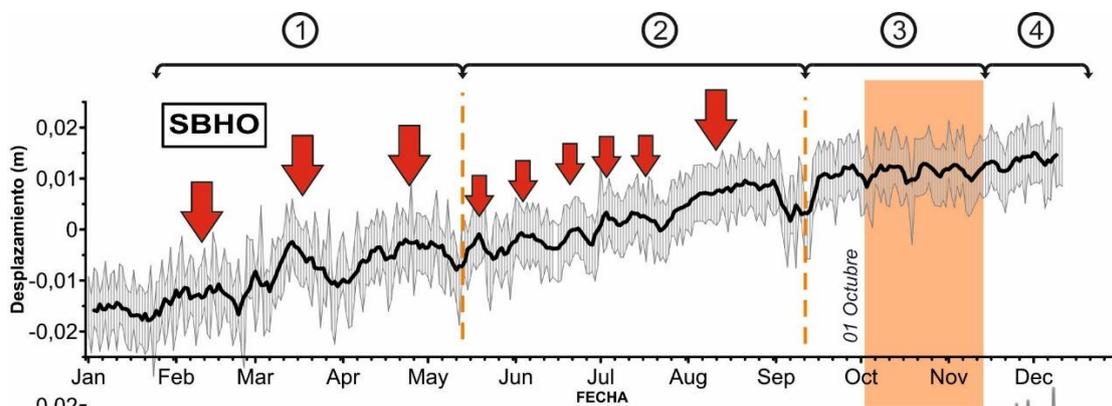


Figura 3.5. Series temporal vertical de la estación GPS permanente SBHO durante el 2019.

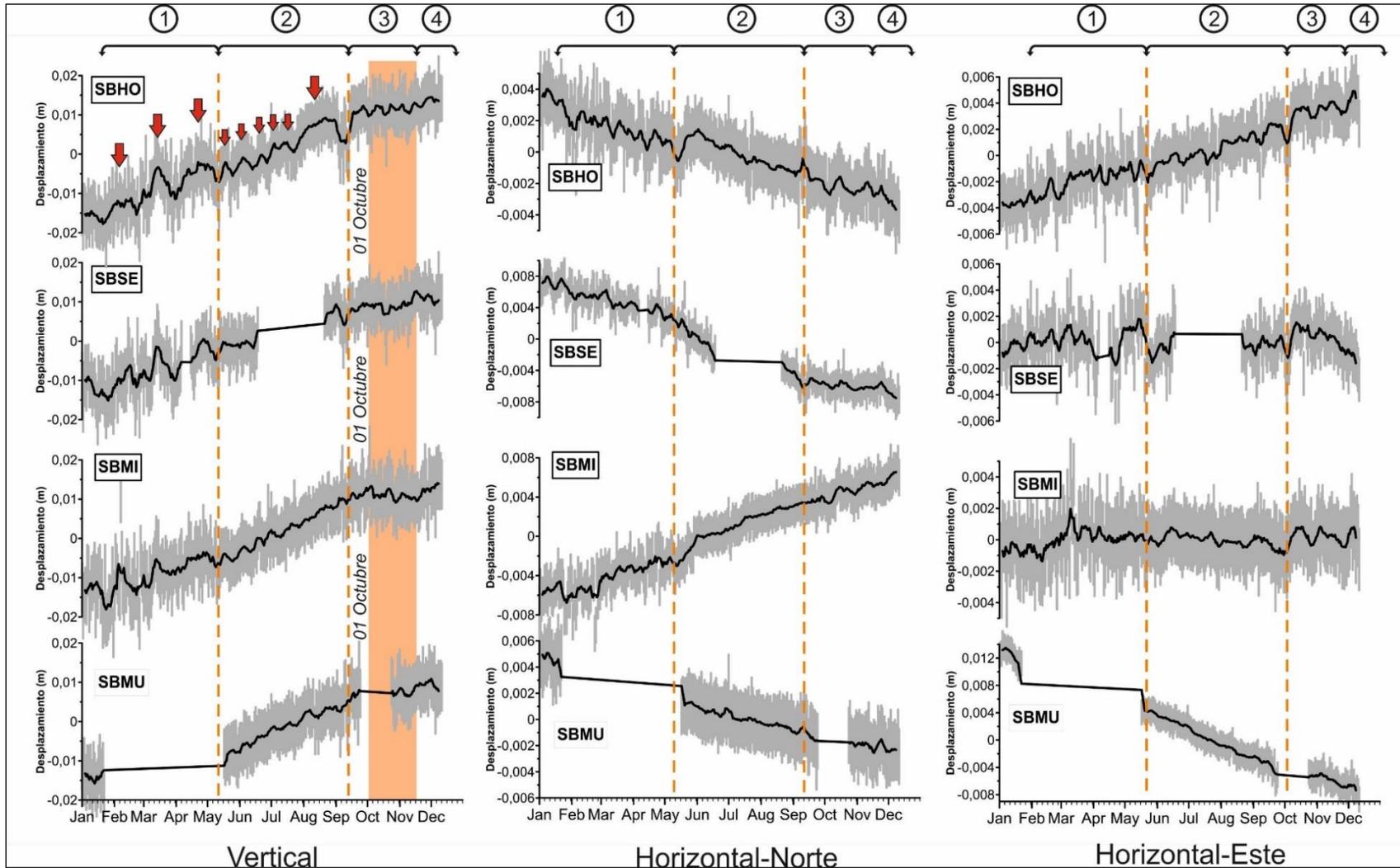


Figura 3.6. Series temporales de posición horizontal y vertical de la red de GPS permanentes del volcán Sabancaya durante el 2019.

La Tabla 3.1 resume los resultados de los GPS de campaña. En ella se detalla la posición precisa por componente (este, norte y vertical), el diferencial con respecto a la primera medición (dE, dN y dU) y su respectivo error.

Tabla 3.1. Resumen de los resultados de posicionamiento preciso de los GPS de campaña durante el 2019.

Estación	Fecha	Este (E)	Norte (N)	Vertical (U)	dE	dN	dU	Error	Error	Error
								E	N	U
SBAH	19/10/2018	196306.692	8258563.451	5077.180	0.000	0.000	0.000	0.003	0.003	0.004
SBAH	24/10/2019	196306.690	8258563.453	5077.164	-0.002	0.002	-0.016	0.003	0.003	0.004
SBCM	19/10/2018	206685.302	8263132.143	4100.111	0.000	0.000	0.000	0.004	0.004	0.004
SBCM	24/10/2019	206685.300	8263132.156	4100.100	-0.002	0.013	-0.011	0.004	0.004	0.004
SBGM	19/10/2018	203193.073	8261287.829	4411.219	0.000	0.000	0.000	0.004	0.004	0.004
SBGM	24/10/2019	203193.080	8261287.846	4411.215	0.007	0.017	-0.004	0.004	0.004	0.004
SBLH	19/10/2018	198788.951	8260156.819	4932.445	0.000	0.000	0.000	0.003	0.004	0.004
SBLH	17/05/2019	198788.951	8260156.822	4932.436	0.000	0.003	-0.009	0.003	0.004	0.004
SBLH	24/10/2019	198788.951	8260156.825	4932.444	0.000	0.006	-0.001	0.003	0.004	0.004
HHHH	17/10/2018	193797.733	8268883.018	3928.792	0.000	0.000	0.000	0.003	0.004	0.004
HHHH	23/08/2019	193797.726	8268883.031	3928.792	-0.007	0.013	0.000	0.003	0.004	0.004
HHLF	17/10/2018	194519.763	8267723.320	4062.331	0.000	0.000	0.000	0.003	0.003	0.004
HHLF	22/08/2019	194519.759	8267723.324	4062.322	-0.004	0.004	-0.009	0.003	0.003	0.004
HHJO	18/10/2018	192630.809	8264497.018	4572.224	0.000	0.000	0.000	0.003	0.003	0.004
HHJO	22/08/2019	192630.805	8264497.020	4572.225	-0.004	0.002	0.001	0.003	0.003	0.004
HHUM	18/10/2018	193661.891	8265883.895	4263.509	0.000	0.000	0.000	0.003	0.003	0.004
HHUM	23/08/2019	193661.890	8265883.899	4263.509	-0.001	0.004	0.000	0.003	0.003	0.004
SBQC	16/10/2018	181853.158	8255320.021	4652.247	0.000	0.000	0.000	0.003	0.003	0.004
SBQC	15/05/2019	181853.099	8255319.988	4652.239	-0.059	-0.033	-0.008	0.004	0.004	0.004
SBQC	16/05/2019	181853.101	8255319.991	4652.215	-0.057	-0.030	-0.032	0.004	0.004	0.004
SBQC	23/10/2019	181853.090	8255319.975	4652.211	-0.068	-0.046	-0.036	0.004	0.004	0.004
SBQL	16/10/2018	179590.623	8256004.173	4360.841	0.000	0.000	0.000	0.004	0.003	0.004
SBQL	15/05/2019	179590.572	8256004.138	4360.827	-0.051	-0.035	-0.014	0.004	0.004	0.004
SBQL	16/05/2019	179590.569	8256004.140	4360.794	-0.054	-0.033	-0.047	0.004	0.004	0.004
SBQL	23/10/2019	179590.553	8256004.136	4360.786	-0.070	-0.037	-0.055	0.004	0.004	0.004
SBPG	15/10/2018	176437.919	8259061.674	4337.776	0.000	0.000	0.000	0.004	0.003	0.004
SBPG	23/10/2019	176437.855	8259061.636	4337.747	-0.064	-0.038	-0.029	0.005	0.003	0.004
SBUC	14/10/2018	173857.353	8260909.684	4254.138	0.000	0.000	0.000	0.004	0.004	0.004
SBUC	25/09/2019	173857.369	8260909.694	4254.107	0.016	0.010	-0.031	0.004	0.004	0.004
SBUC	23/10/2019	173857.300	8260909.647	4254.120	-0.053	-0.037	-0.018	0.005	0.003	0.004
SBAM	23/10/2018	195414.504	8248429.087	5030.651	0.000	0.000	0.000	0.003	0.003	0.004

SBAM	08/04/2019	195414.488	8248429.085	5030.651	-0.016	-0.002	0.000	0.003	0.004	0.004
SBEC	23/10/2018	203639.110	8247180.986	4459.544	0.000	0.000	0.000	0.004	0.003	0.004
SBEC	08/04/2019	203639.100	8247180.978	4459.605	-0.010	-0.008	0.061	0.004	0.004	0.004
SBEC	20/08/2019	203639.122	8247180.993	4459.605	0.012	0.007	0.061	0.004	0.003	0.004
SBEC	21/08/2019	203639.122	8247180.989	4459.610	0.012	0.003	0.066	0.004	0.003	0.004
SBEC	24/09/2019	203639.120	8247180.999	4459.619	0.010	0.013	0.075	0.004	0.003	0.004
SBPJ	22/10/2018	206075.496	8248577.628	4459.574	0.000	0.000	0.000	0.004	0.003	0.004
SBPJ	08/04/2019	206075.485	8248577.619	4459.565	-0.011	-0.009	-0.009	0.004	0.004	0.004
SBPJ	14/05/2019	206075.492	8248577.634	4459.540	-0.004	0.006	-0.034	0.004	0.003	0.004
SBPJ	24/09/2019	206075.517	8248577.634	4459.581	0.021	0.006	0.007	0.004	0.003	0.004
SBPJ	22/09/2019	206075.510	8248577.634	4459.558	0.014	0.006	-0.016	0.004	0.003	0.004
SBSA	24/10/2018	202009.955	8246020.687	4444.864	0.000	0.000	0.000	0.004	0.003	0.004
SBSA	08/04/2019	202009.946	8246020.674	4444.810	-0.009	-0.013	-0.054	0.004	0.004	0.004
SBSA	21/08/2019	202009.965	8246020.684	4444.856	0.010	-0.003	-0.008	0.004	0.003	0.004
SBSA	24/09/2019	202009.963	8246020.686	4444.850	0.008	-0.001	-0.014	0.004	0.003	0.004
SBSA	22/10/2019	202009.966	8246020.687	4444.843	0.011	0.000	-0.021	0.004	0.003	0.004
SBCA	21/08/2019	207945.577	8253603.302	4666.879	0.000	0.000	0.000	0.004	0.003	0.004
SBCA	24/09/2019	207945.583	8253603.304	4666.877	0.006	0.002	-0.002	0.004	0.003	0.004
SBCA	22/10/2019	207945.579	8253603.304	4666.873	0.002	0.002	-0.006	0.004	0.003	0.004

*Los valores están en metros (m).

Se calcularon las velocidades medias de la inflación constante medida con los GPS permanentes hasta antes de la disminución de la tasa de inflación (05 de septiembre). Así mismo se calculó la velocidad media anual para los GPS de campaña con las medidas realizadas.

Los valores y errores de los datos GPS permanentes y de campaña se muestran en a Tabla 3.2. Durante este periodo, los GPS permanentes estimaron tasas de desplazamiento horizontal de 10 - 26 mm/año y tasas de desplazamiento vertical de 28 - 39 mm/año.

Tabla 3.2. Resumen de las velocidades GPS calculadas por la red de estaciones GPS de operación continua durante el 2019 hasta el 05 de septiembre. Los valores están en milímetros por año (mm/año).

Estaciones	Componente Este (E)	Componente Norte (N)	Componente Vertical (U)
GPS Permanentes			
SBSE	-1 ± 2	-18 ± 1	32 ± 7
SBHO	8 ± 1	-6 ± 1	39 ± 5

SBMI	1 ± 2	15 ± 1	34 ± 7
SBMU	-24 ± 2	-9 ± 1	28 ± 6
GPS de Campaña			
SBAH	-2 ± 3	2 ± 3	-16 ± 4
SBCM	-2 ± 4	13 ± 4	-11 ± 4
SBGM	7 ± 4	17 ± 4	-4 ± 4
SBLH	0 ± 4	6 ± 4	-2 ± 4
HHHH	-8 ± 4	15 ± 4	0 ± 4
HHLF	-5 ± 3	5 ± 3	-11 ± 4
HHJO	-5 ± 3	2 ± 3	1 ± 4
HHUM	-1 ± 3	5 ± 3	0 ± 4
SBQC	-69 ± 4	-46 ± 4	-35 ± 4
SBQL	-70 ± 4	-38 ± 4	-54 ± 4
SBPG	-63 ± 5	-37 ± 5	-28 ± 4
SBUC	-23 ± 5	-16 ± 5	-24 ± 4
SBAM	-35 ± 4	-4 ± 4	0 ± 4
SBEC	17 ± 4	13 ± 4	73 ± 4
SBPJ	23 ± 4	9 ± 4	-3 ± 4
SBSA	14 ± 4	2 ± 4	-4 ± 4
SBCA	14 ± 4	12 ± 4	-35 ± 4

Los desplazamientos horizontales de las estaciones GPS muestran una fuerte deformación superficial alrededor, no solo del volcán Sabancaya, sino alrededor del Complejo Volcánico Ampato y Sabancaya y el volcán Hualca Hualca (Figura 3.7).

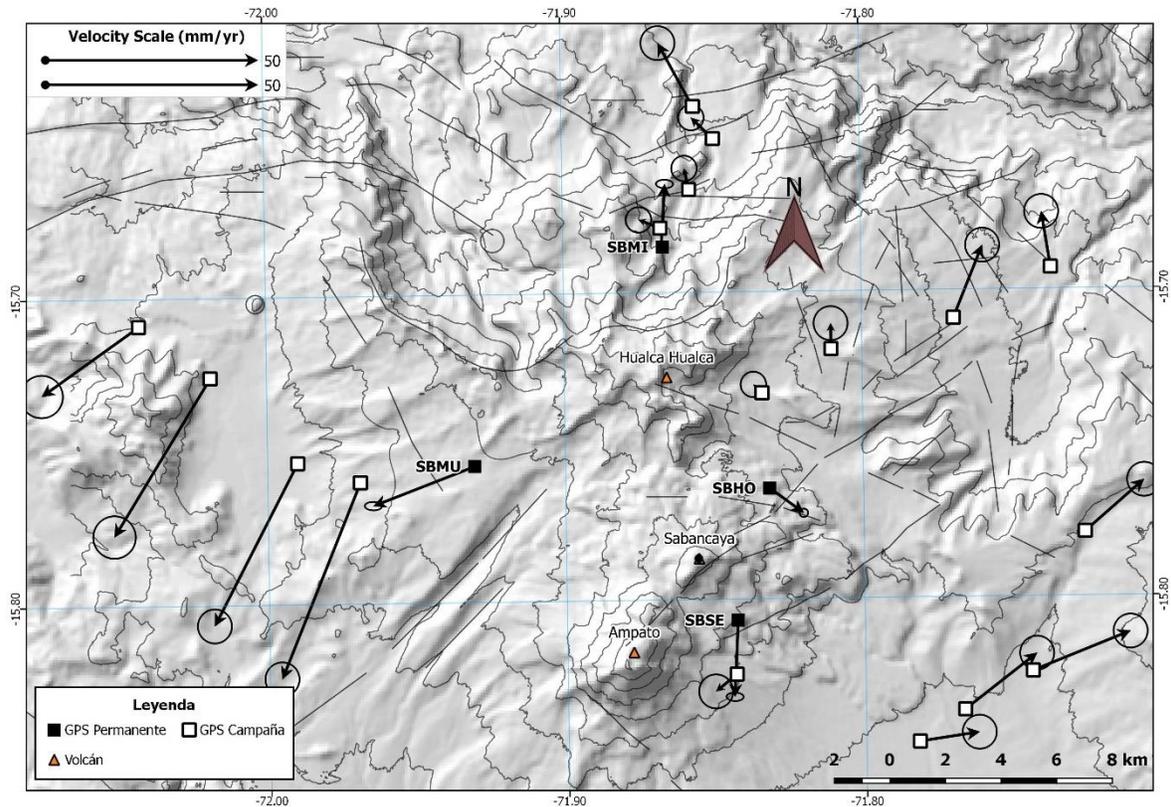


Figura 3.7. Vectores de desplazamiento medio anual (mm/año) de los GPS permanentes y de campaña durante el 2019.

3.3.2 Modelamiento de la deformación volcánica

Para el modelamiento de la deformación superficial se asumieron las expresiones de McTigue (1987) para una fuente esférica con radio definido inmerso en un semi-espacio infinito linealmente elástico e isotrópico y el de un esferoide en las mismas condiciones (Yang et al., 1988). El software de inversión utilizado es dModels (Battaglia et al., 2013), el cual hace uso de un algoritmo de ponderado de mínimos cuadrados.

El modelamiento y posterior análisis estadístico de los resultados para los parámetros de la fuente de deformación del volcán Sabancaya, para el periodo analizado, indican una cámara magmática ubicada aproximadamente entre 12 - 15km por debajo del volcán Hualca Hualca, cuyo campo de presiones se asemeja al de una esfera de 1.5 – 2.0 km de radio, con un cambio de volumen de 46.69×10^6 m³/año. Las velocidades del modelo de deformación del volcán Sabancaya (Figura 3.8, vectores rojos) resuelven un valor estadístico chi-cuadrado de 5.53, estadísticamente mejor que los resultados de un esferoide.

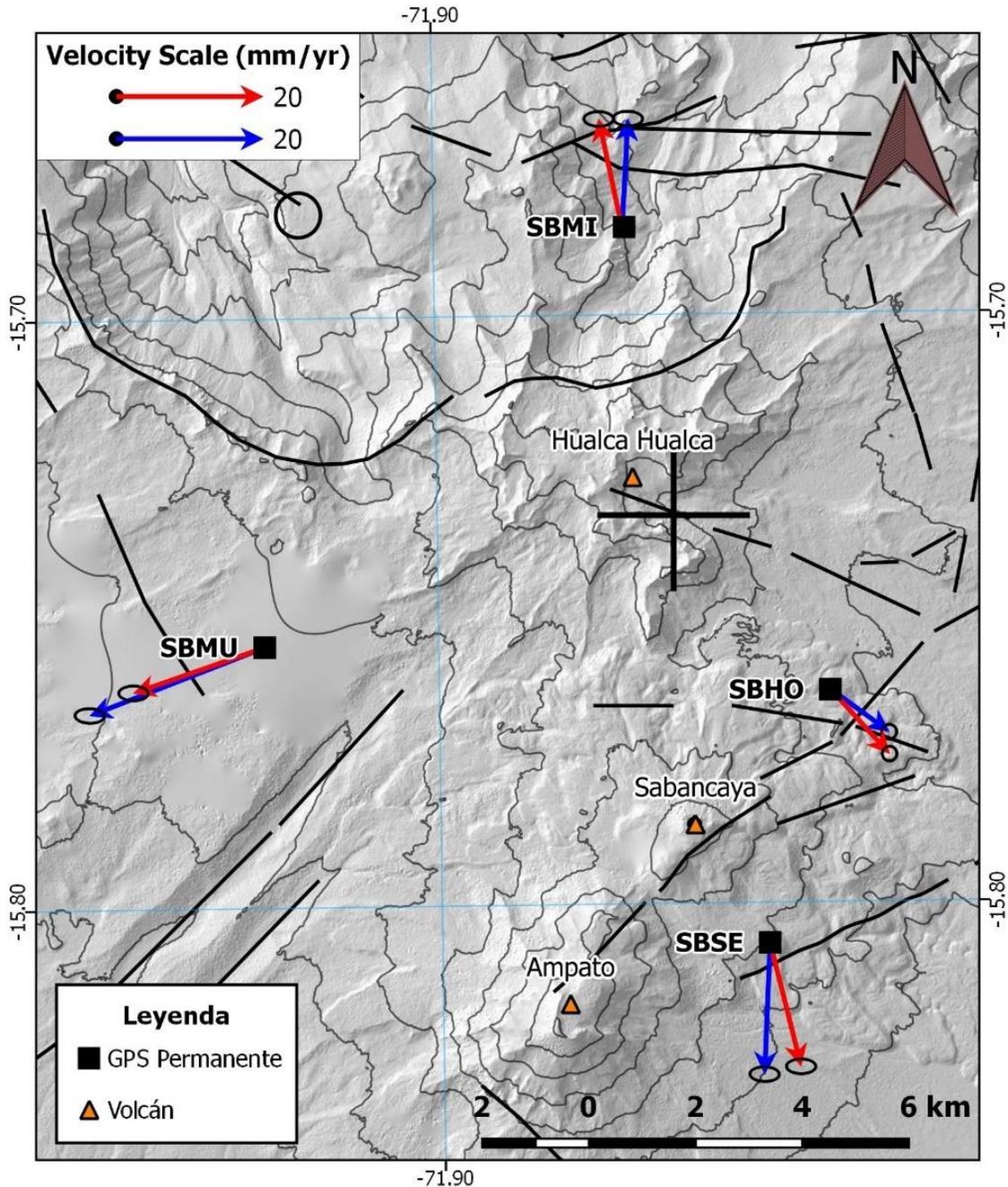


Figura 3.8. Deformación superficial medida por los GPS permanentes (vectores azules) y velocidades modeladas (vectores rojos) de la fuente (cruz de color negro) ubicada debajo del volcán Hualca Hualca.

3.4 InSAR

Durante el 2019, el Laboratorio de Teledetección del INGEMMET ha provisto de dos (02) interferogramas del volcán Sabancaya. El primero comprende entre el 22 de diciembre de 2016 y el 17 de agosto de 2019; el segundo comprende entre el 17 de agosto y 28 de septiembre de 2019. Los resultados de estos interferogramas se muestran en la Figura 3.9, en ellos resalta la componente atmosférica por sobre la deformación volcánica.

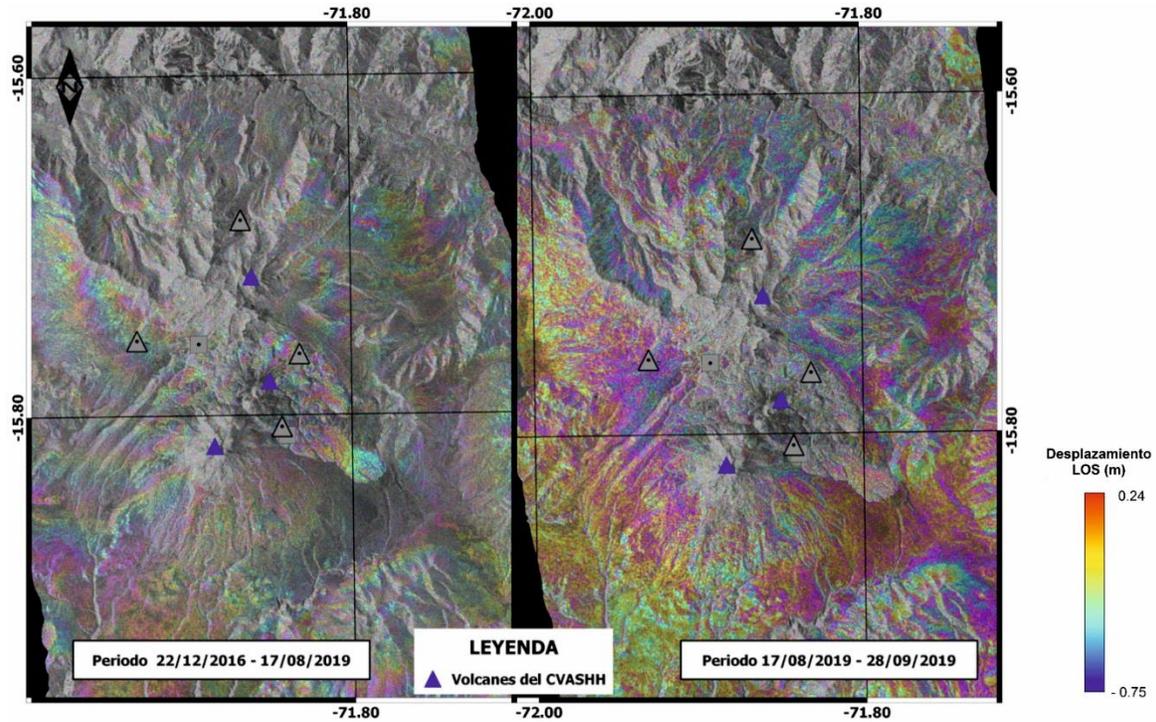


Figura 3.9. Interferograma provisto por el Laboratorio de Teledetección del INGEMMET durante el 2019.

Adicionalmente, se proveyó de un mapa de velocidades del área de estudio. Éste muestra la velocidad acumulada media anual por pixel desde el interferograma del 05 de febrero de 2015 hasta el 05 de noviembre de 2019. Los colores rojos muestran valores máximos de inflación superficial de hasta aproximadamente 36 mm/año. Del mapa se observa que la mayor inflación en dirección LOS (línea de vista del satélite) se encuentra ubicada al norte del volcán Sabancaya, aproximadamente por debajo del volcán Hualca Hualca.

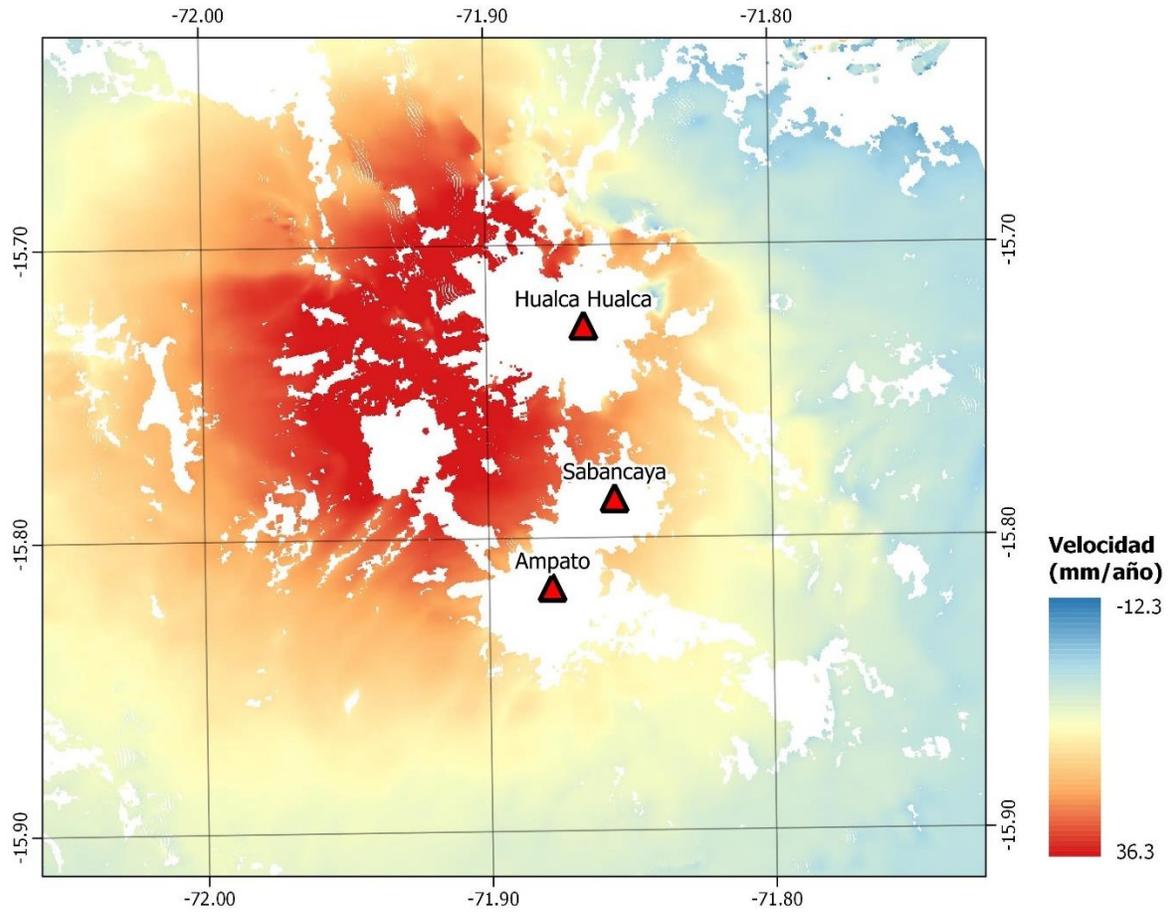


Figura 3.10. Mapa de velocidad anual obtenida tras el procesamiento de imágenes SAR del volcán Sabancaya entre 2015 y 2019.

4 VIGILANCIA SÍSMICA

4.1 Red Sísmica

La red de monitoreo sísmico del volcán Sabancaya durante el año 2019 estuvo conformada por 10 estaciones sísmicas de banda ancha (SAB04, SAB05, SAB07, SAB10, SAB11, SAB16, SAB17, SAB18, SAB19 y SAB20) y 01 estación sísmica de periodo corto (MAC3). Del total, 05 estaciones sísmicas transmiten la data en tiempo real y 06 estaciones sísmicas trabajan de manera temporal, almacenando la data en su memoria interna.

4.2 Operatividad

El porcentaje de operatividad de la Red de monitoreo sísmico del volcán Sabancaya durante el año 2019 fue del 80%. De la Fig. 4.1, se aprecia que las barras horizontales de color azul (estaciones sísmicas temporales) y naranja (estaciones sísmicas telemétricas) representan los periodos de funcionamiento; las barras horizontales de color amarillo representan periodos en que hubo pérdida de datos debido a problemas técnicos y finalmente las barras horizontales de color verde indica que en esos periodos aún falta recuperar datos de campo.

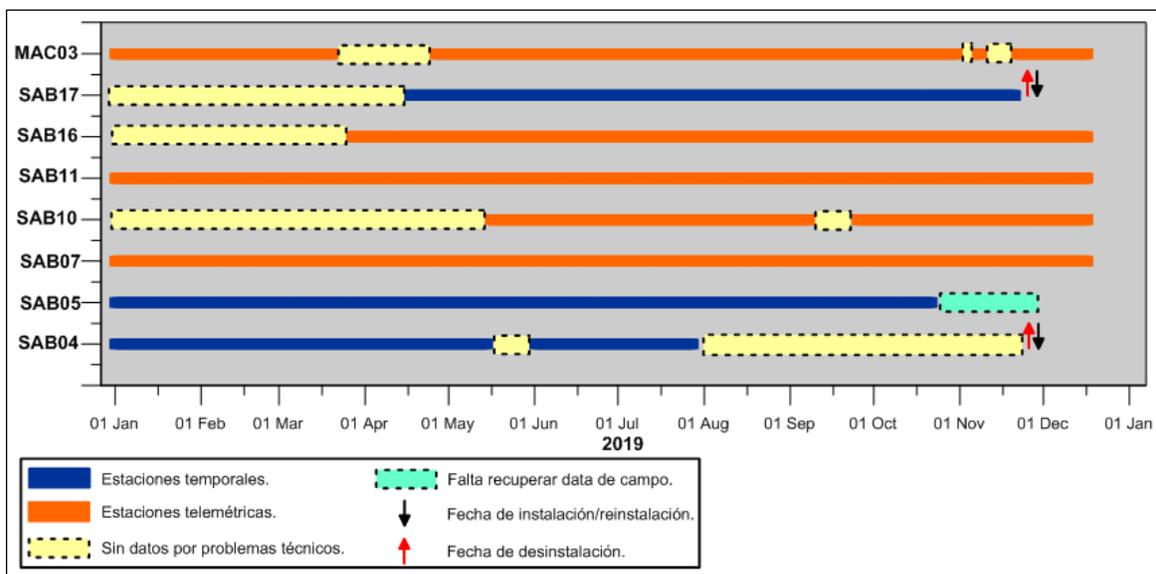


Figura 4.1. Operatividad de las estaciones sísmicas que conformaron la red de monitoreo sísmico del volcán Sabancaya – 2019.

4.3 Procesamiento y Análisis

La data sísmica es registrada en modo continuo y son almacenados en archivos de 01 hora en el

formato original del equipo sísmico (.gcf y. mseed), posteriormente se realiza el cambio de formato con el cual se trabaja (.sac)

Para el tema de vigilancia sísmica, básicamente, se hace un procesamiento primario, que consiste en extraer la información más importante para detectar cambios en la actividad sísmica. Al realizar la clasificación de las señales sísmicas (programa: Classification_v02, modificado por personal del OVI del programa Classification de Lesage, 2009), por defecto el programa extrae los siguientes parámetros:

- Hora de ocurrencia del evento sísmico.
- Amplitud máxima (cuentas).
- Frecuencia máxima (Hz).
- Duración (s).
- Energía sísmica (MJ).
- Desplazamiento reducido – DR (cm²).

Además, se realiza una localización preliminar de los eventos sísmicos de fracturamiento y cálculo de la magnitud local del evento sísmico (MI), para la localización se utiliza el programa SAC / HYPOELLIPSE.

4.4 Resultados

En el año 2019, la red de estaciones sismológicas instaladas en el volcán Sabancaya y alrededores, registró una actividad sísmica principalmente asociada a la ocurrencia de explosiones seguidas de emisiones de gases y ceniza, dinámica de fluidos al interior del conducto (s) volcánico (s) y sismicidad relacionada al fracturamiento de roca dentro de la estructura volcánica y/o actividad de fallamiento en la zona.

En total se registraron 85 094 eventos sismo – volcánicos, con un promedio de 244 eventos sísmicos por día; entre ellos se destacaron los sismos de largo periodo – LP (46 967), seguido por sismicidad volcano tectónica proximal – VT (19 203), explosiones – EXP (10 164), luego por actividad tremórica (6 336, con duraciones de hasta 12 horas por día), sismos volcano – tectónicos distales VTD (1 903), sismos híbridos – HIB (492) y por último sismos de muy bajo periodo – VLP (29), todos estos eventos con energías sísmicas variables, oscilando entre 0 y 290 MJ (Megajoules).

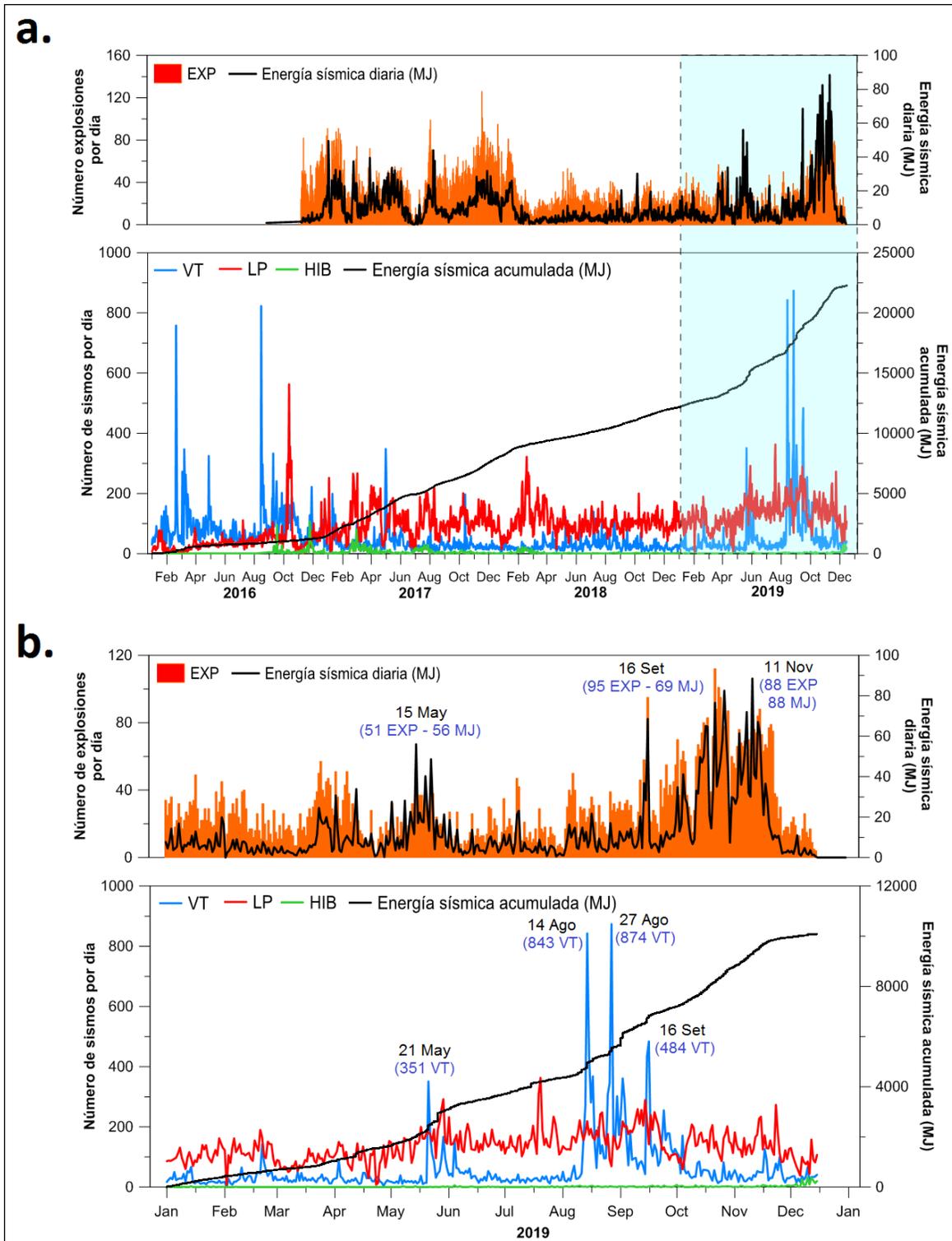


Figura 4.2. Histograma de eventos sísmo – volcánicos. **a) Superior:** número de explosiones por día y energía sísmica diaria liberada por estos eventos, **Inferior:** número de sismos por día y energía sísmica acumulada; Período 2016 -2019. **b) Superior:** número de explosiones por día y energía sísmica diaria liberada por estos eventos, **Inferior:** número de sismos por día y energía sísmica acumulada; Período 2019.

Su representación en porcentaje (Fig. 4.3) muestra que los sismos LP constituyen el 55 %, a razón de 135 sismos por día; la sismicidad volcano tectónica proximal con el 23 %; las explosiones EXP con el 12 %; la actividad tremórica TRE con el 7 %; en menor porcentaje los sismos los sismos VTD distales, híbridos y VLP con menos del 2 %.

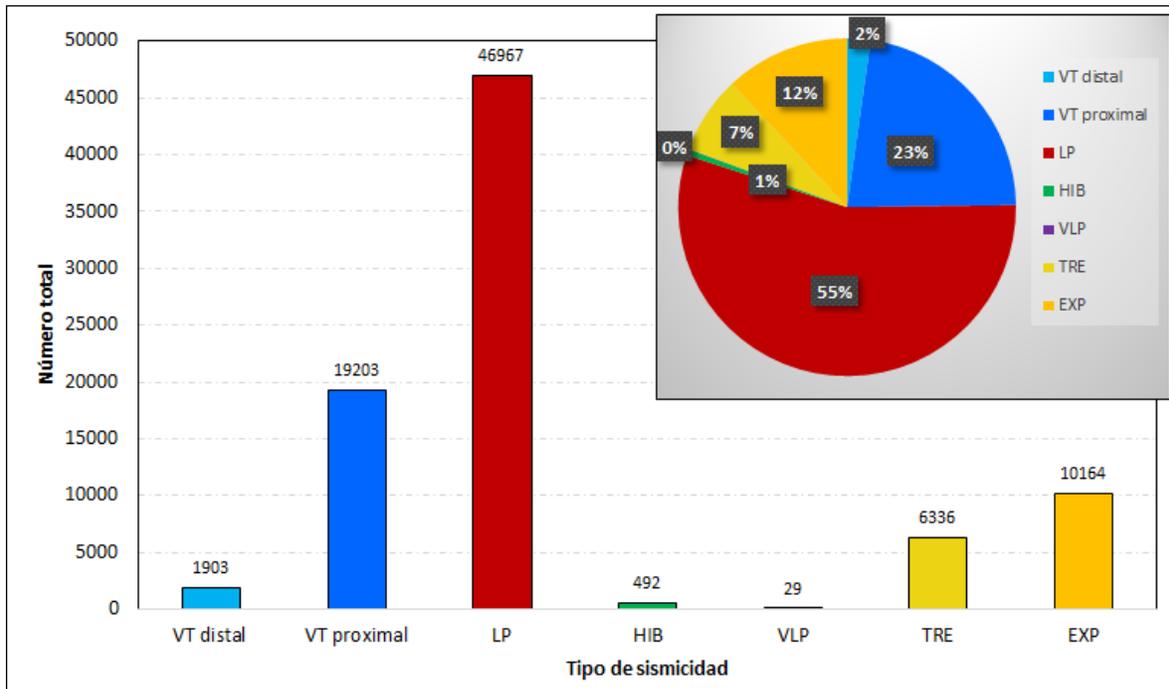


Figura 4.3. Histograma de la ocurrencia de los principales sismos registrados en el volcán Sabancaya con su respectivo porcentaje, periodo 2019.

4.4.1 Sismos volcano – tectónicos (VT)

La actividad sísmica asociada al fracturamiento de roca dentro del edificio volcánico y alrededores (actividad de fallas geológicas u otra fuente), tipo VT, en el 2019 aumentó energéticamente con respecto a los años anteriores (del 2016 al 2018), en cuanto al número de ocurrencia de sismos VT fue mayor comparado con los años 2017 y 2018 y menor que el año 2016 (Fig. 4.4).

La sismicidad de tipo VT en el volcán Sabancaya durante el 2019 mostró niveles significativos de actividad asociada al fracturamiento de roca dentro de la estructura volcánica y/o alrededores; en este periodo de análisis se observaron picos máximos tanto en número de ocurrencia como en la energía sísmica liberada, además que se registraron 04 importantes enjambres sísmicos los meses de mayo, agosto, setiembre y octubre (Fig. 4.4b), los cuales, sugirieron nuevos e considerables aportes de magma (intrusiones magmáticas).

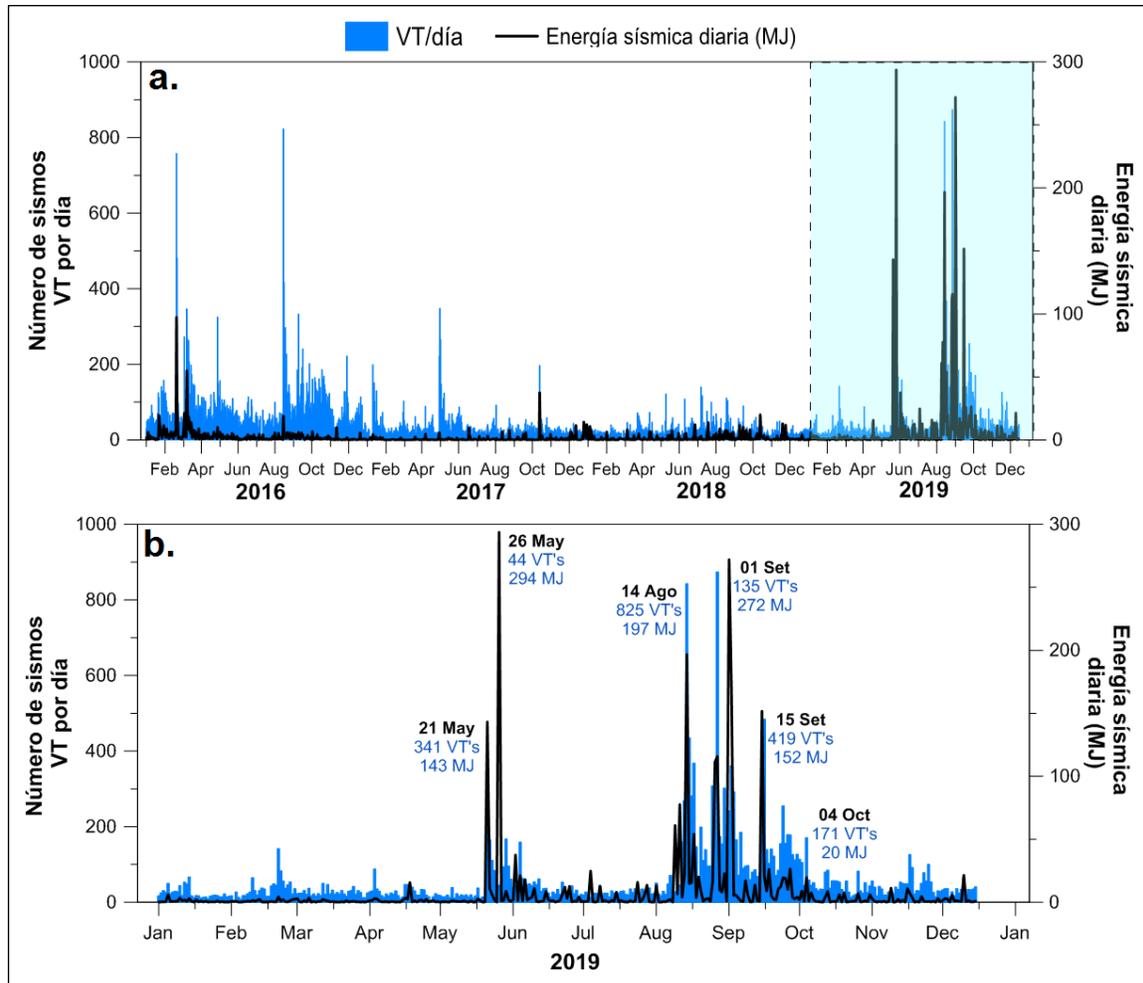


Figura 4.4. Histograma de eventos volcano – tectónicos (VT) y su respectiva energía sísmica diaria. **a)** Periodo 2016 -2019. **b)** Periodo 2019.

Por otra parte, de las 21 106 señales sísmicas de tipo VT, fue posible localizar 1873 sismos, los cuales, presentaron claras llegadas de las fases P y S (Fig. 4.5), además que se registraron entre 04 a más estaciones sísmicas.

En la Fig. 4.7, se muestra la distribución espacial y en profundidad de 1873 sismos volcano - tectónicos (VT) que se registraron entre enero y diciembre del presente año. Los errores de localización de los sismos fueron < 2.5 Km en latitud, longitud y en profundidad. En general, estas señales se localizaron, predominantemente, hacia el Noreste, Norte, Noroeste y Oeste del cráter del volcán Sabancaya a profundidades que llegaron hasta los 16 km y magnitudes entre 0.1 y 4.1 Ml. Dichas señales se asociaron a fracturamiento de roca dentro del edificio volcánico o a causa de la actividad de fallas geológicas en la zona.

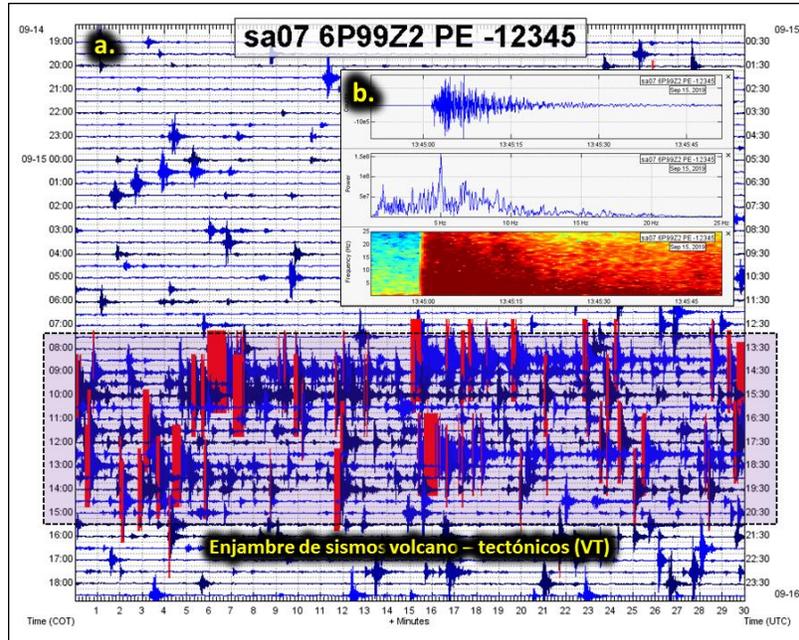


Figura 4.5. a) Sismograma de la estación SAB07 (componente vertical), correspondiente al día 15 de setiembre desde las 00: 00 hasta las 23:00 horas UTC; en dicho registro se puede apreciar que entre las 13:00 y 19:00 horas UTC, se registró un enjambre de sismos VT (419 sismos); **b)** Registro sísmico, contenido espectral y espectrograma de un sismo VT de considerable energía (209 MJ) ocurrido el 15 de setiembre a las 13:45 horas UTC, dicho evento presentó una magnitud local de 2.3 M_L y a una profundidad de 3.0 km.

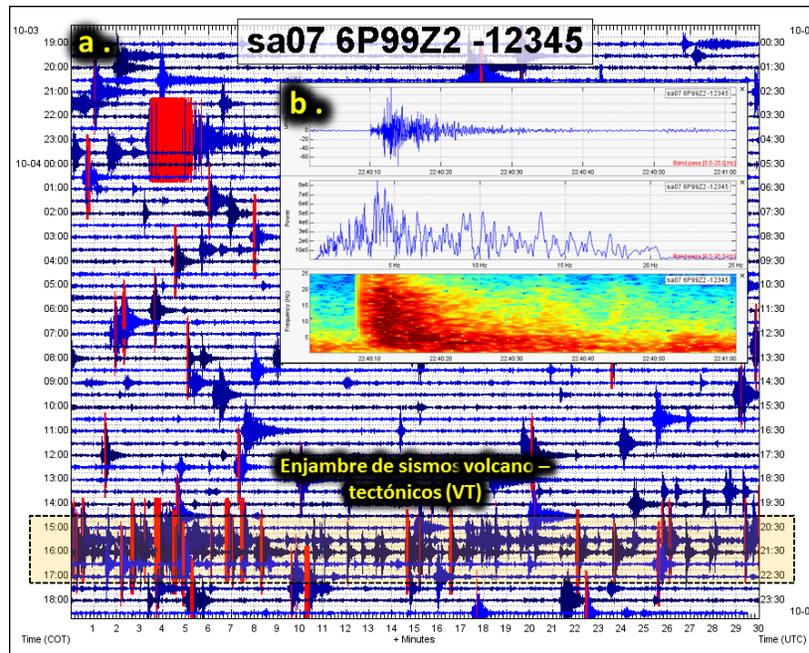


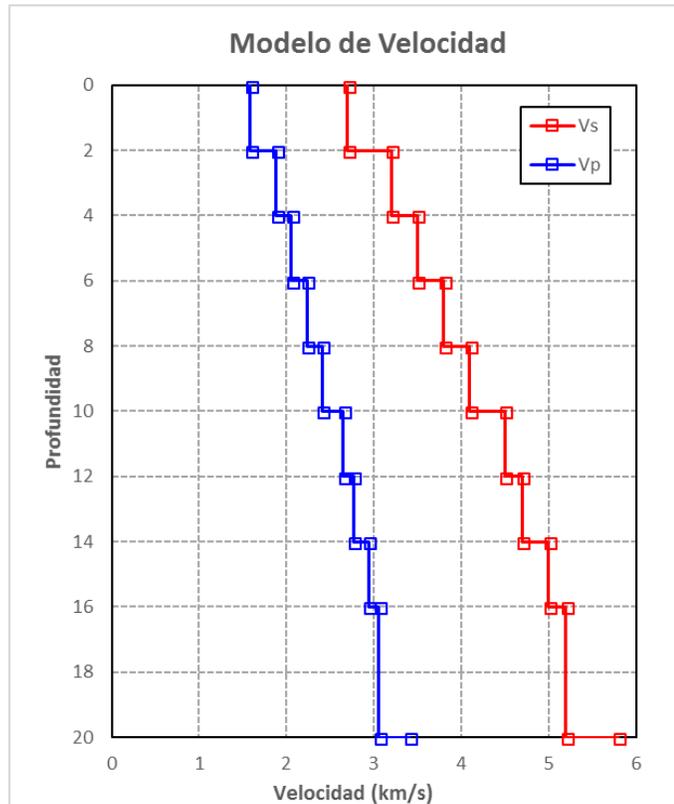
Figura 4.5. a) Sismograma de la estación SAB07 (componente vertical), correspondiente al día 04 de octubre desde las 00: 00 hasta las 23:00 horas UTC; en dicho registro se puede apreciar que entre las 20:00 y 23:00 horas UTC, se registró un enjambre de sismos VT (171 sismos); **b)** Registro sísmico, contenido espectral y espectrograma de un sismo VT de considerable energía (2 MJ) ocurrido el 04 de octubre a las 22:40 horas UTC, dicho evento presentó una magnitud local de 2.0 M_L y a una profundidad de 5.0 km.

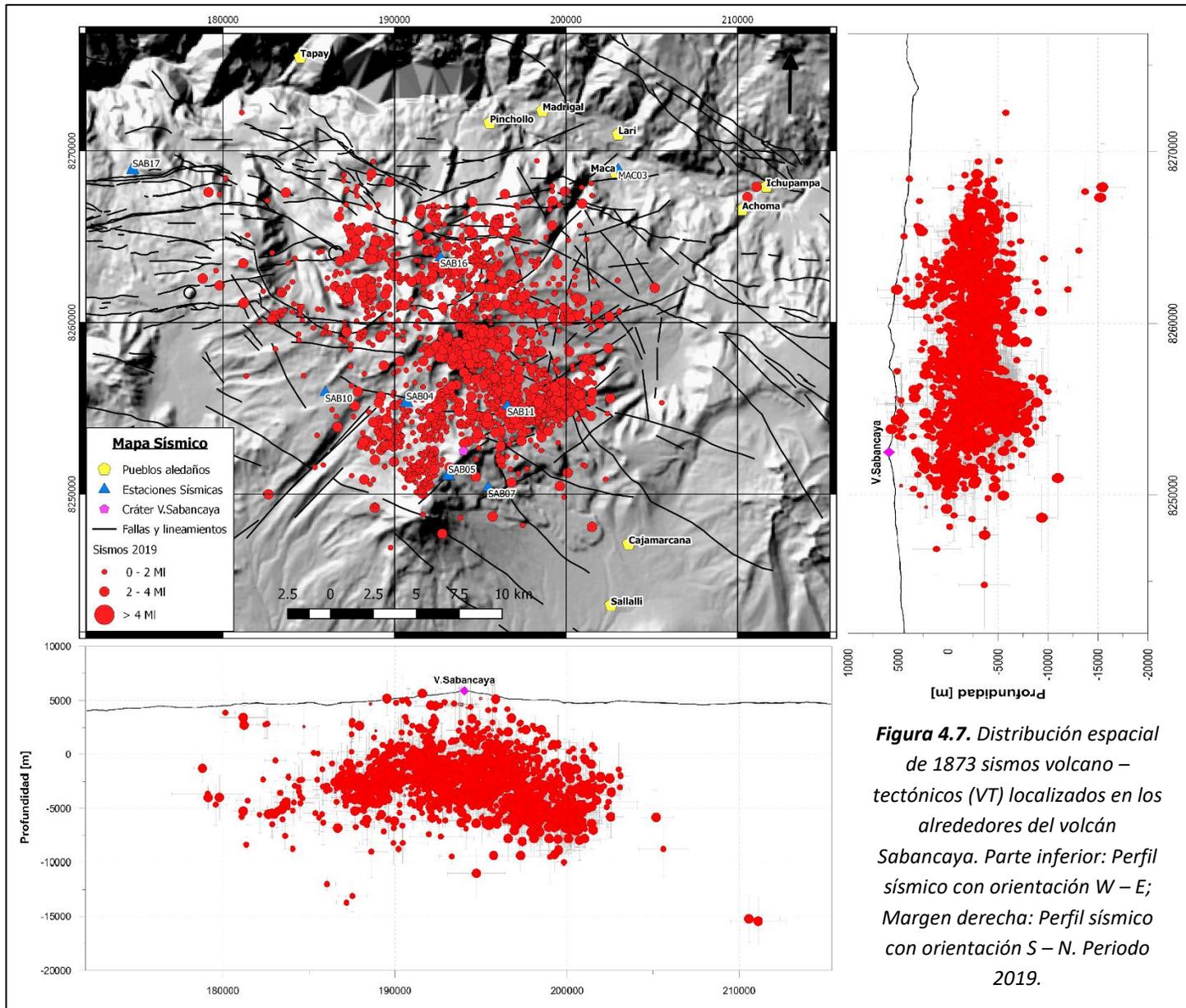
El modelo de velocidades empleado fue desarrollado por personal del Observatorio Vulcanológico del INGEMMET – OVI en el año 2018 (Cuadro 1, Fig. 4.6)

Vp (km/s)	Depth (Km)	Vp/Vs
2.7	0	1.7
3.2	2	1.7
3.5	4	1.7
3.8	6	1.7
4.1	8	1.7
4.5	10	1.7
4.7	12	1.7
5	14	1.7
5.2	16	1.7
5.8	20	1.7

Cuadro 4.1. Modelo de velocidades usado para la localización de los eventos sísmicos del volcán Sabancaya en el 2019.

Figura 4.6. Gráfico del modelo de velocidades usado para la localización de los eventos sísmicos del volcán Sabancaya en el 2019.





La Fig. 4.8 muestra la distribución espacial y temporal de los sismos VTs registrados durante el presente año en el volcán Sabancaya. La sismicidad respecto al tiempo de su registro, se ha dividido en 03 grupos; en verde: sismos entre enero y abril, dorado: sismos entre abril y julio; y rojo: sismos entre julio y diciembre. **El grupo en verde**, muestra una distribución al norte y oeste del volcán, de manera aleatoria hacia el norte y como sismos agrupados al oeste a aproximadamente 3.0 km del cráter, formando con una alineación de norte a sur, los cuales se registraron entre marzo y abril. **El grupo en dorado**, se muestra de manera dispersa al norte, pero se observa una agrupación de sismos registrados en mayo a aproximadamente 7 km al norte del cráter. **El grupo en rojo**, muestra dos agrupaciones de sismos, el primero corresponde a sismos registrados entre agosto y diciembre a aproximadamente 6 km al este del cráter, con una alineación suroeste-noreste y el segundo a aquellos registrados entre agosto y noviembre a aproximadamente 5 km al este del volcán. Por lo anteriormente mencionado, no se observa una migración clara de este tipo de sismicidad, pero si los focos sísmicos registrados durante el año.

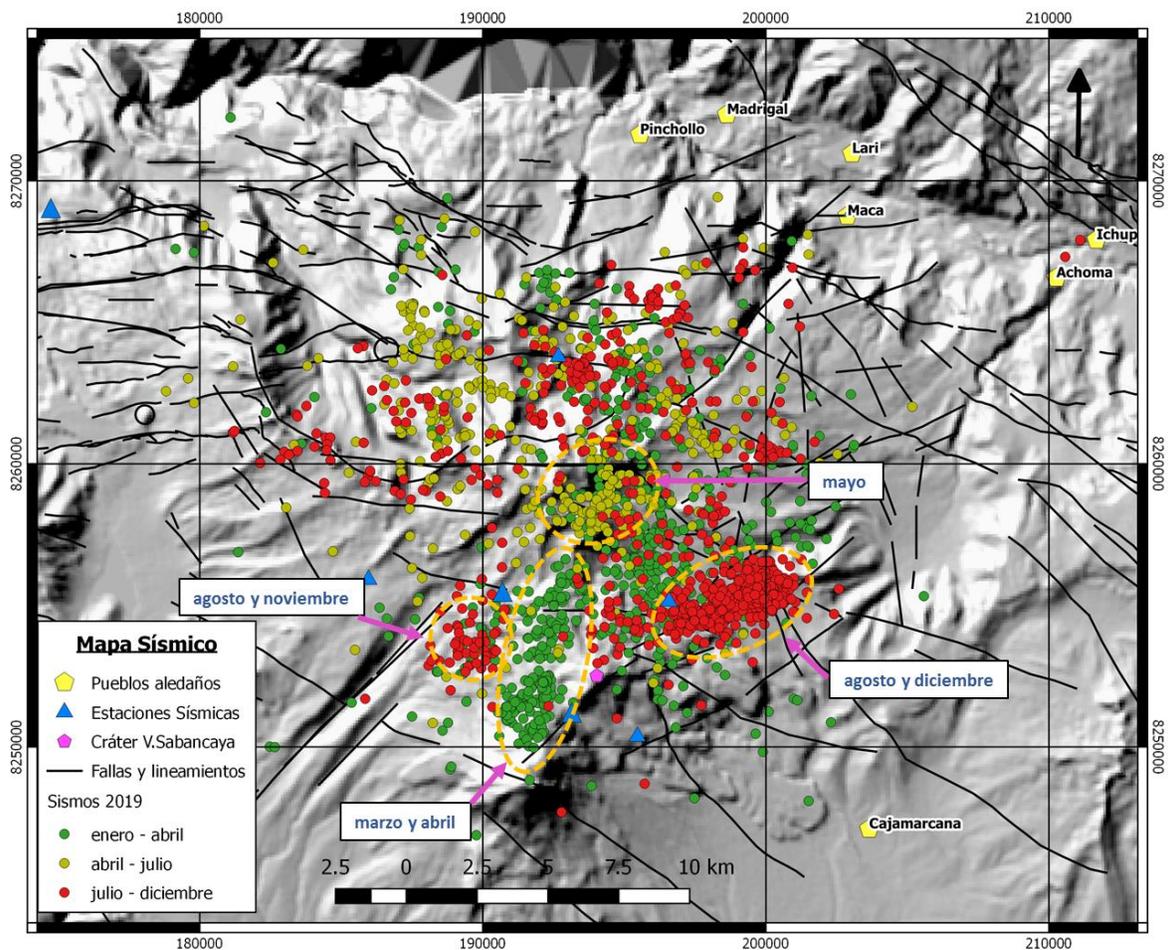


Figura 4.8. Mapa de distribución espacial y temporal de sismos VTs registrados en el volcán Sabancaya durante el 2019.

La Fig. 4.9 muestra la distribución espacial de los sismos VT y la coloración corresponde a las profundidades calculadas, del grafico se puede indicar que hay dos zonas de sismos con profundidades mayores a las demás, la primera ubicada a 6 km al noreste del volcán, la cual posee profundidades hasta 8 km y la segunda localizada a 8 km al norte del volcán, con profundidades hasta 4 km.

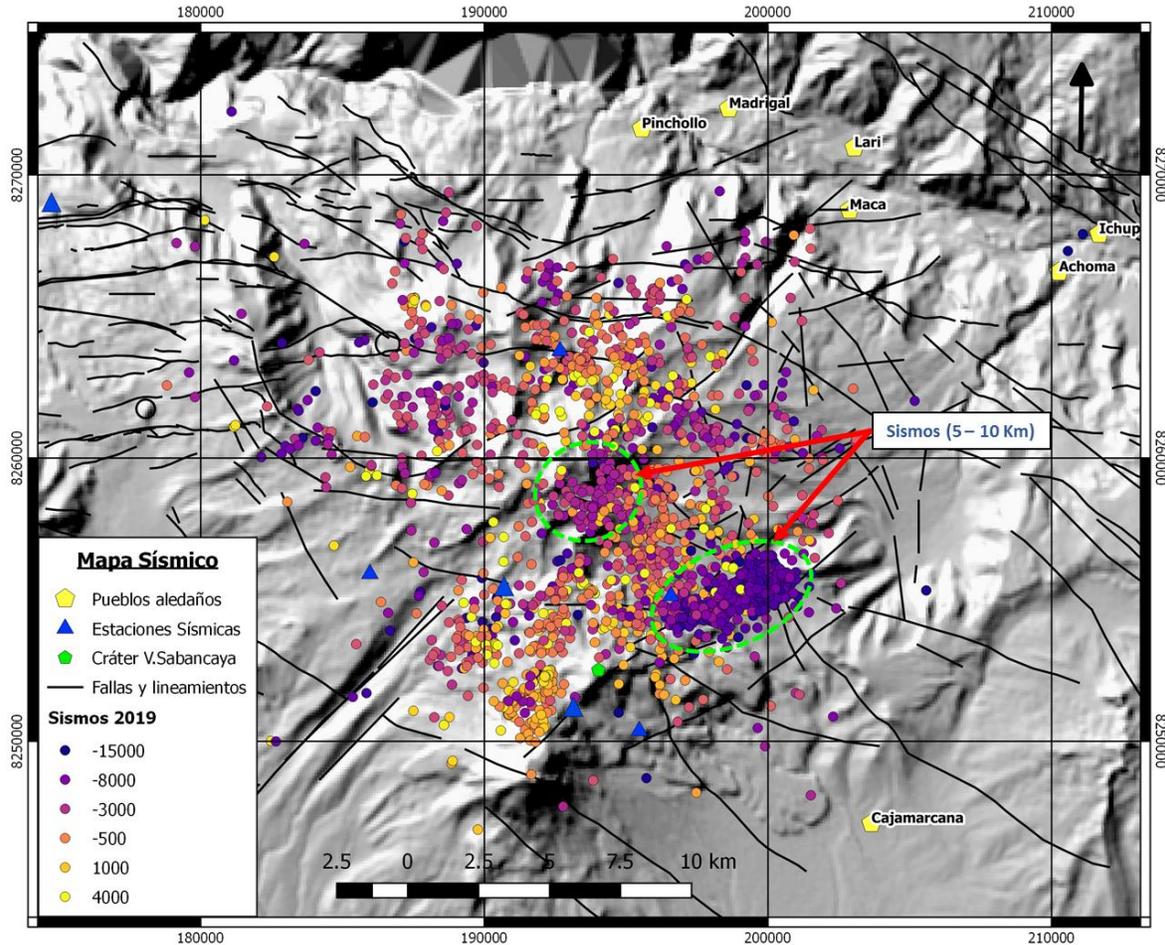


Figura 4.9. Mapa de distribución espacial y de profundidades de sismos VTs registrados en el volcán Sabancaya durante el 2019.

4.4.2 Sismos largo periodo (LP)

Durante todo el año 2019 se registró sismicidad asociada con la dinámica de fluidos y gases al interior de los conductos volcánicos, tipo LP, mostrando periodos de variaciones significativas en cuanto a la tasa de ocurrencia, así como también en la energía sísmica liberada (comparado con años anteriores: 2016 -2018); diariamente se registró un promedio de 150 eventos por día. Se destacan 03 periodos: abril, setiembre y octubre, de donde se puede apreciar picos importantes en la energía sísmica diaria liberada por este tipo de sismicidad, dichos incrementos fueron asociados a un importante movimiento de fluidos en el interior del edificio volcánico (Fig. 4.10).

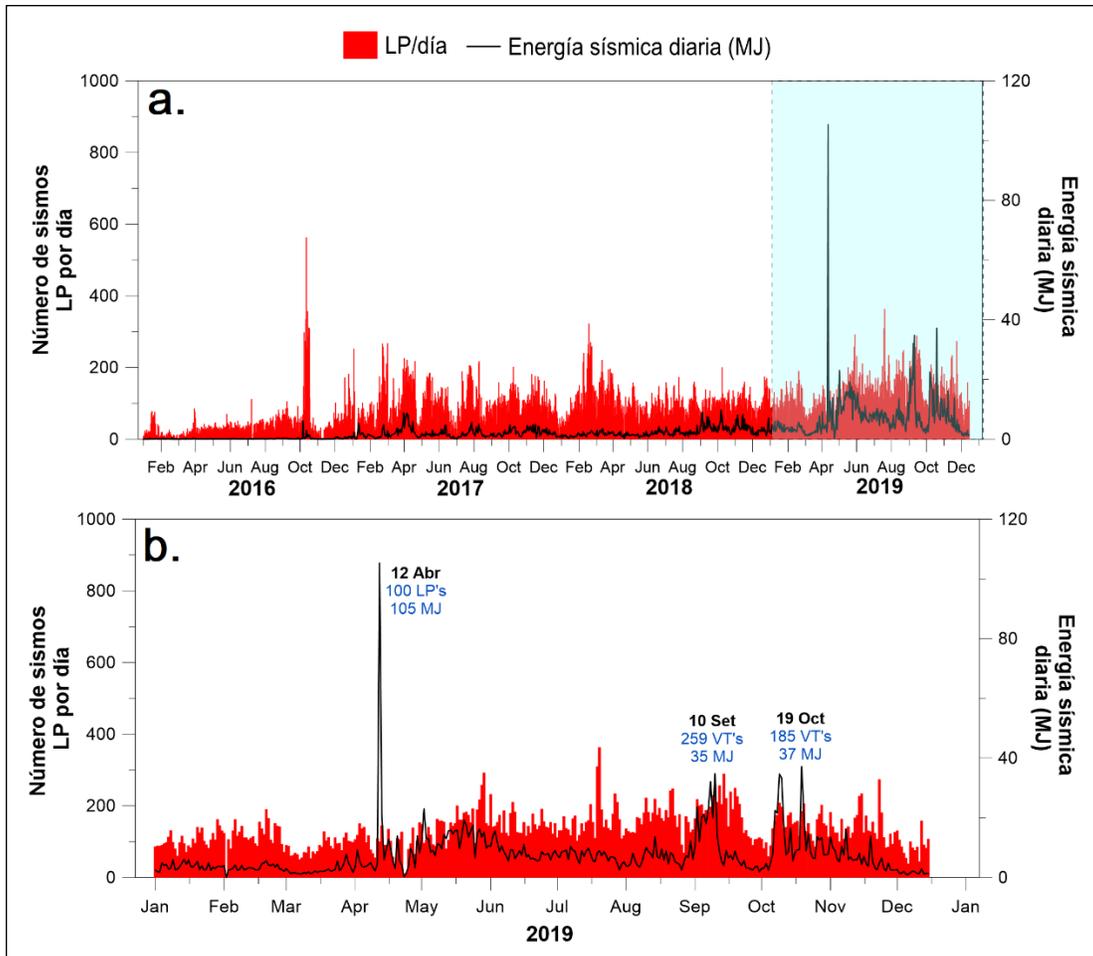


Figura 4.10. Histograma de eventos de Largo periodo (LP) y su respectiva energía sísmica diaria. a) Periodo 2016 -2019. b) Periodo 2019.

Los desplazamientos reducidos (D_r) de mayor energía sísmica liberados durante el año fueron de 235 cm^2 y 217 cm^2 correspondiente a los eventos registrados el día 12 de abril a las 16:39 y 21:53 horas UTC, cabe destacar que, estos eventos se encuentran dentro de uno de los periodos (abril) que se ha considerado hubo un importante crecimiento del domo de lava.

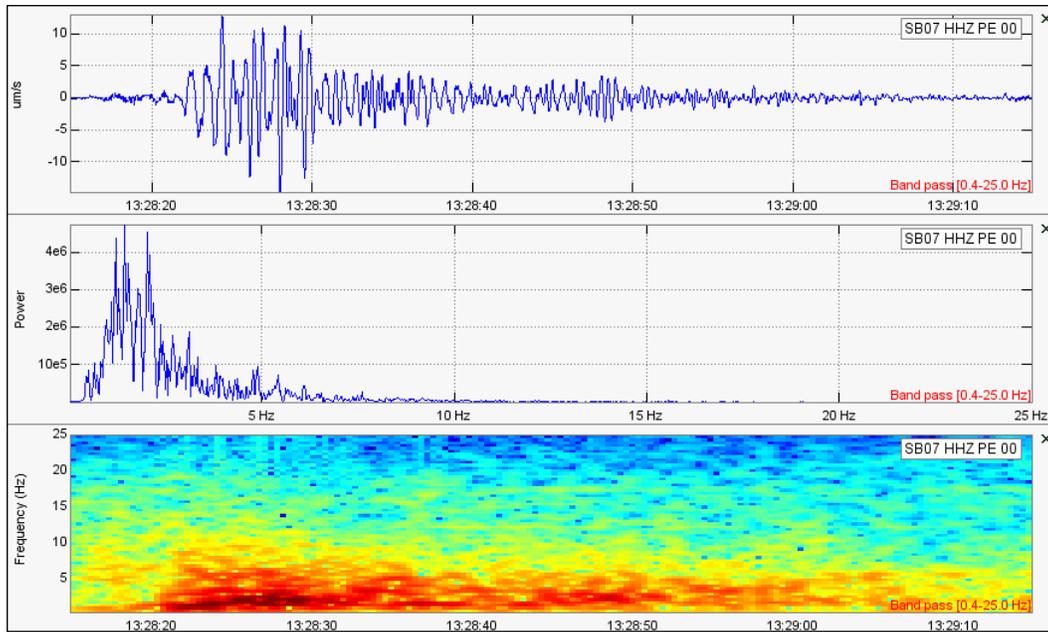


Figura 4.11. Registro sísmico, contenido espectral y espectrograma de un sismo LP (> 1 MJ) ocurrido el 13 de mayo a las 13:28 horas UTC, dicho evento presentó un D_r de 4 cm² y una duración de 78 segundos. El registro sísmico corresponde a la estación sísmica telemétrica SAB07, componente vertical.

Con relación a la duración de los eventos, éstas variaron entre 5 y 200 segundos en promedio, a lo largo de este año se notó que entre febrero y marzo los eventos mostraron menor duración, amplitud y desplazamiento reducido (Fig. 4.12), probablemente esto se deba un periodo de menor dinámica de los fluidos, posteriormente en abril se puede apreciar claramente el incremento del desplazamiento reducido y también de su amplitud, indicando movimiento importante de fluidos que estarían migrando a niveles más superficiales, en dicho periodo fue donde se registraron los desplazamientos reducidos (D_r) de mayor energía sísmica liberados durante el año, los cuales fueron de 235 cm² y 217 cm² correspondiente a los eventos registrados el día 12 de abril a las 16:39 y 21:53 horas UTC, cabe destacar que, estos eventos se encuentran dentro de uno de los periodos (abril) que se ha considerado hubo un importante movimiento de fluidos que migraron probablemente a niveles superficiales (Fig. 4.12a).

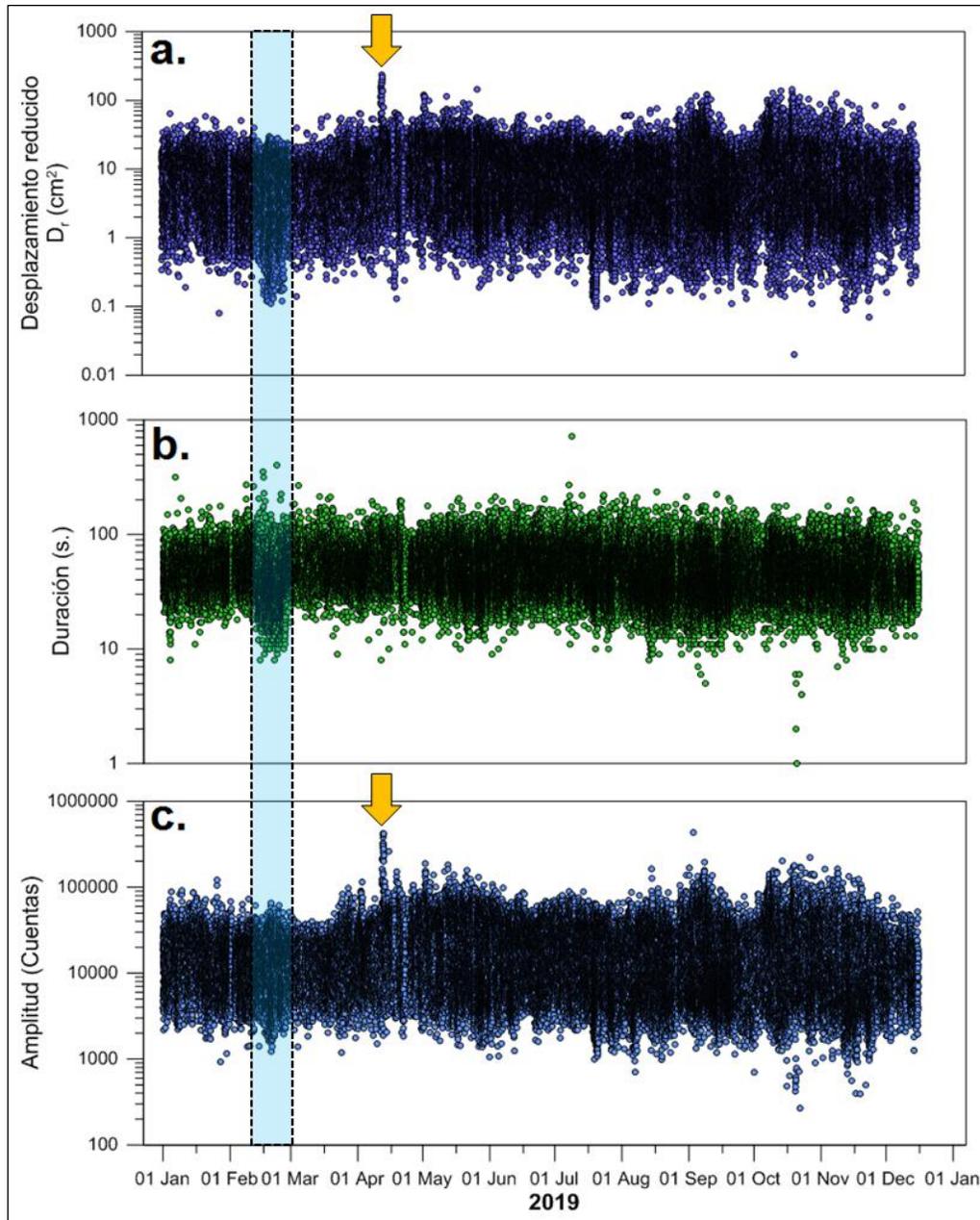


Figura 4.12. *a.* Gráfica de desplazamiento reducido (D_r) de los eventos sísmicos tipo LP registradas durante el año 2019. *b.* Gráfica de duración de los eventos sísmicos tipo LP registradas durante el año 2019. *c.* Gráfica de las máximas amplitudes de los eventos sísmicos tipo LP registradas durante el año 2019.

4.4.3 Sismos híbridos (HIB)

La actividad sísmica de tipo híbrido (HIB) en el volcán Sabancaya durante el año 2019 mostró un aumento significativo con respecto al año 2018 (Fig. 4.13a) en cuanto a número de eventos registrados y valores ligeramente mayores, en cuanto a la energía sísmica liberada (Fig. 4.13b). Un total de 492 sismos de tipo HIB fueron registrados durante el 2019; dichos eventos a lo largo del periodo analizado fueron muy esporádicos, registrándose por día de 1 a 3 eventos y con energías sísmicas menores a 1

MJ, sin embargo, este comportamiento cambió a partir de diciembre, en donde se ha comenzado a registrar entre 5 a 30 sismos de tipo HIB por día, de igual manera, la energía sísmica de dichos eventos es ligeramente alto, liberando hasta 0.5 MJ diarios.

Este tipo de sismicidad, cuando se presenta en cantidades moderadas, es asociado a una importante migración/ascenso de magma hacia niveles más superficiales. La Fig. 4.14, muestra un ejemplo de un sismo de tipo híbrido registrado el día 31 de enero a las 08:42 horas UTC.

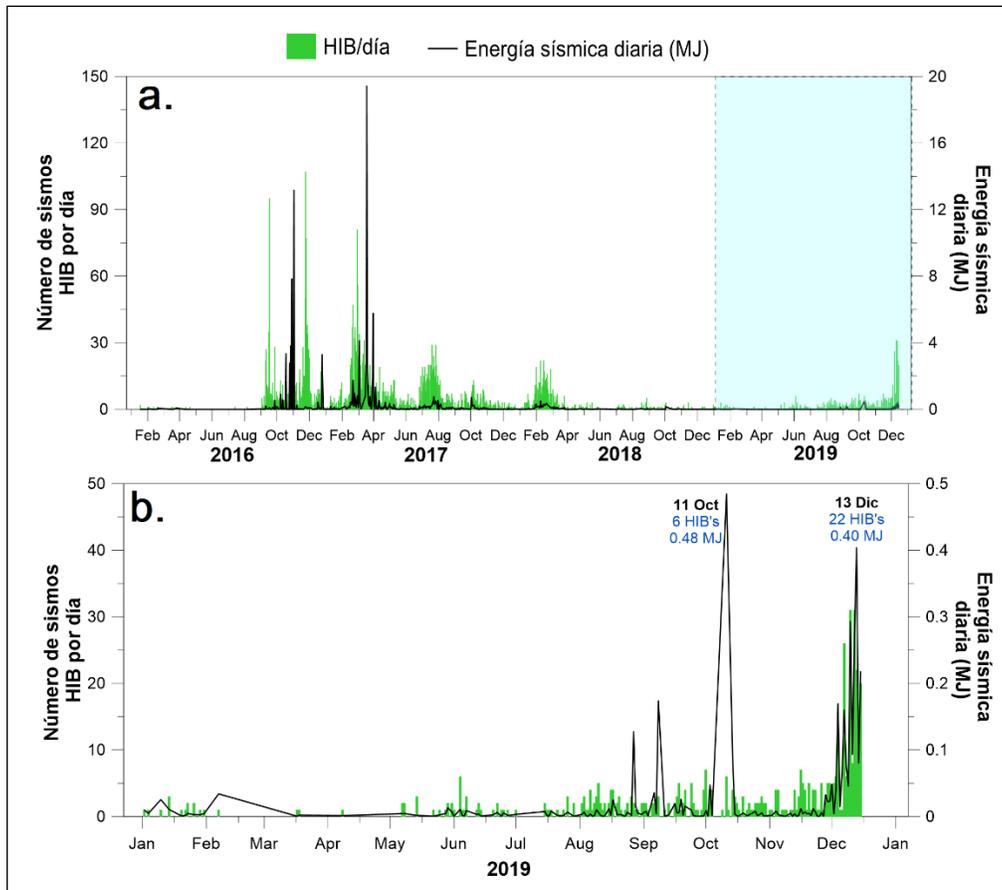


Figura 4.13. Histograma de eventos Híbridos (HIB) y su respectiva energía sísmica diaria. a) Periodo 2016 -2019. b) Periodo 2019.

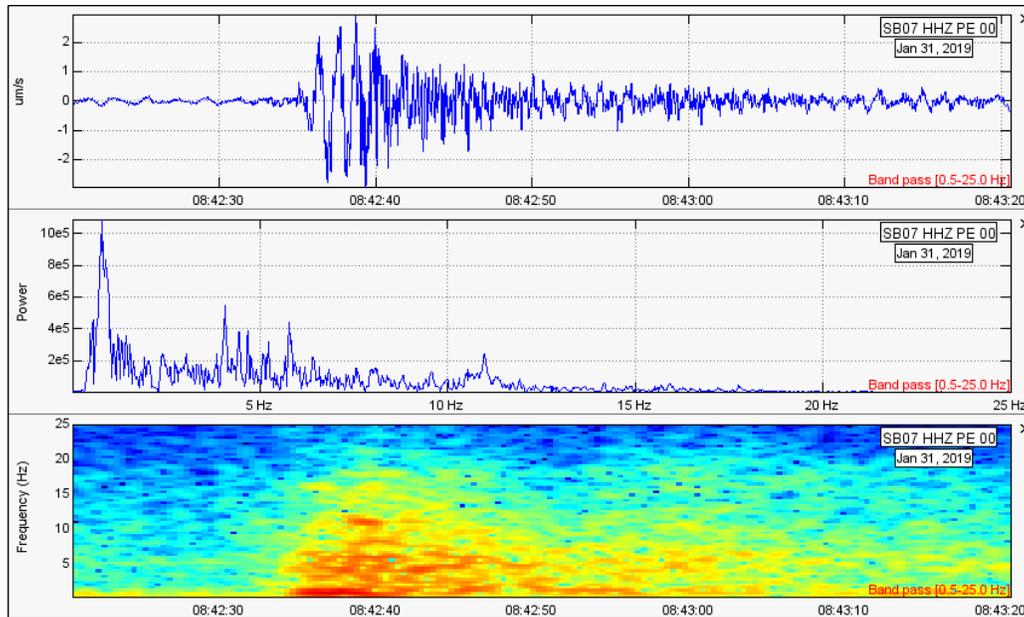


Figura 4.14. Registro sísmico, contenido espectral y espectrograma de un sismo HIB (> 1 MJ) ocurrido el 31 de enero a las 08:42 horas UTC, dicho evento presentó un D_r de 11 cm² y una duración de 36 segundos. El registro sísmico corresponde a la estación sísmica telemétrica SAB07, componente vertical.

4.4.4 Tremor volcánico espasmódico y armónico (TRE, TRA)

El tremor volcánico es otro tipo de señal sismo – volcánica asociada a la dinámica de fluidos al interior del o de los conductos volcánicos, ésta puede presentarse como pulsos, de manera continua en el tiempo o como armónicos. Durante el 2019, el volcán Sabancaya, continuó presentando este tipo de actividad, pero con niveles bajos de duración y energía a comparación de años 2016, 2017 y 2018 (Fig. 4.15a), a lo largo del periodo analizado (Fig. 4.15b) se observa un ligero incremento tanto en la duración como en la energía sísmica liberada (hasta 16 horas el día 11 de diciembre y con una energía diaria liberada de 4 MJ).

Se registraron 6 336 episodios de tremor volcánico, entre señales espasmódicas (Fig. 4.17) y armónicas (Fig. 4.18), con desplazamientos reducidos promedio entre 0.05 y 79.74 cm², respecto a la frecuencia de estos eventos fueron variables entre 0.3 y 16.9 hz, indicando las bajas frecuencias menor contenido de material particulado (ceniza) y las altas frecuencias mayor contenido de material particulado (ceniza), Fig. 4.16.

Desde noviembre a la fecha ha sido característico el tremor espasmódico continuo, mostrando aumentos y disminuciones en la amplitud y a su vez, leves variaciones en las frecuencias dominantes dando lugar a una especie de bandas (Fig. 4.19), sin embargo, no es aplicable la denominación de “Tremor bandeado”, ya que su distribución aún es muy irregular no corresponde a cambios cíclicos del sistema. En tal caso, este comportamiento posiblemente este reflejando la interacción entre el sistema magmático y el hidrotermal.

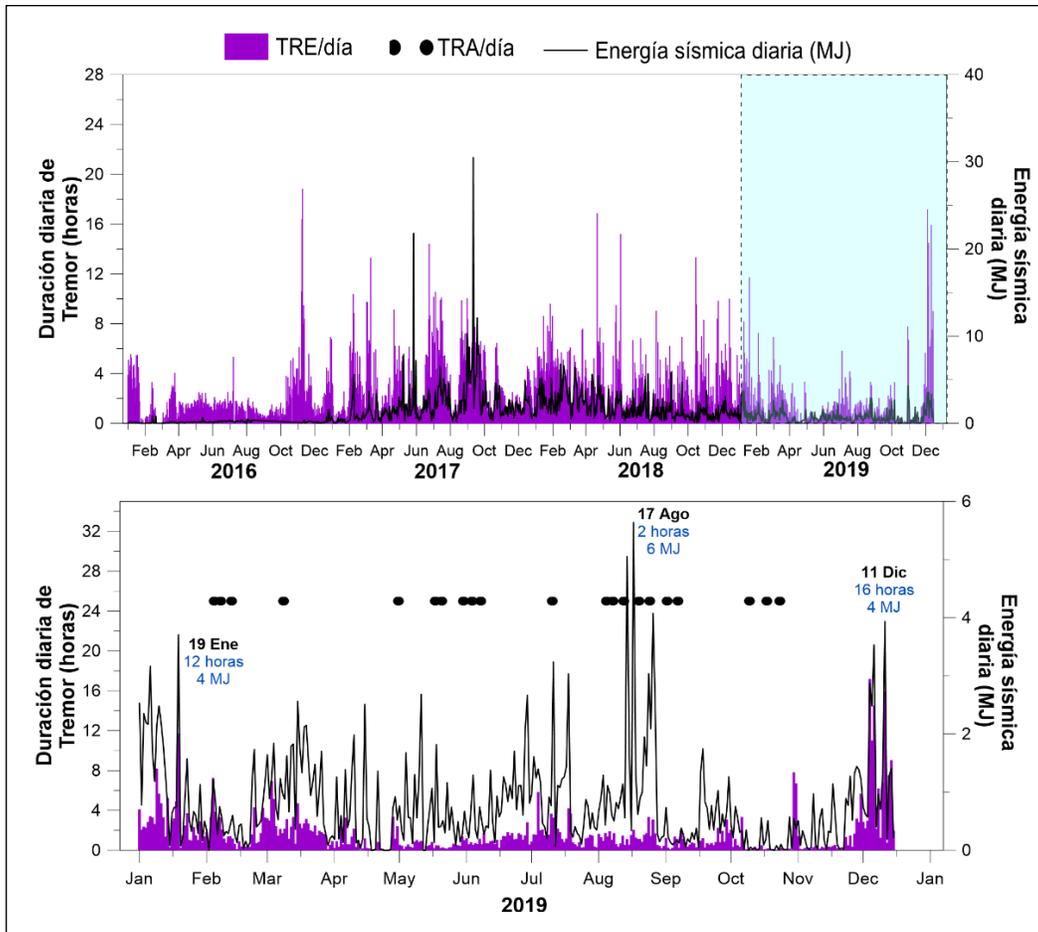


Figura 4.15. Histograma de la duración del tremor volcánico (TRE) y su respectiva energía sísmica diaria. a) Periodo 2016 -2019. b) Periodo 2019.

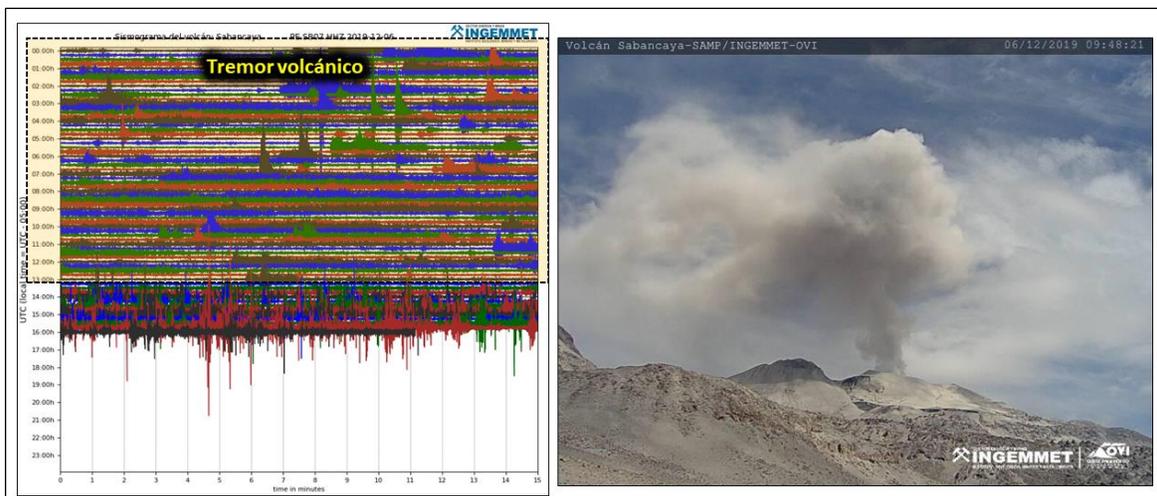


Figura 4.16. Sismograma del día 06 de diciembre del 2019, donde se refleja la intensa y continua actividad tremórica, la cual estuvo asociada a la constante emisión de gases y ceniza. La fotografía muestra la emisión de ceniza asociada a la señal sísmica. El registro sísmico corresponde a la estación sísmica telemétrica SAB07, componente vertical.

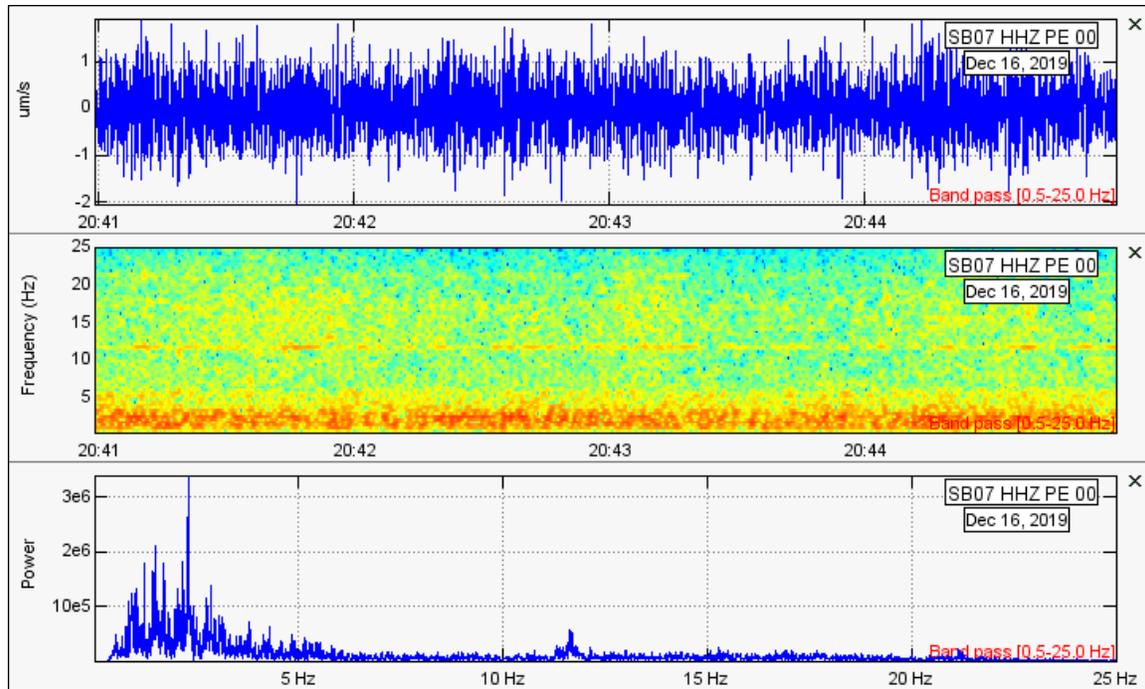


Figura 4.17. Registro sísmico, contenido espectral y espectrograma de un episodio de temblor volcánico (1 MJ) ocurrido el 16 de diciembre desde las 18:30 hasta las 21:00 horas UTC, dicho evento presentó un D_r de 15 cm^2 y una duración de 2 horas y 30 minutos apróx. El registro sísmico corresponde a la estación sísmica telemétrica SAB07, componente vertical.

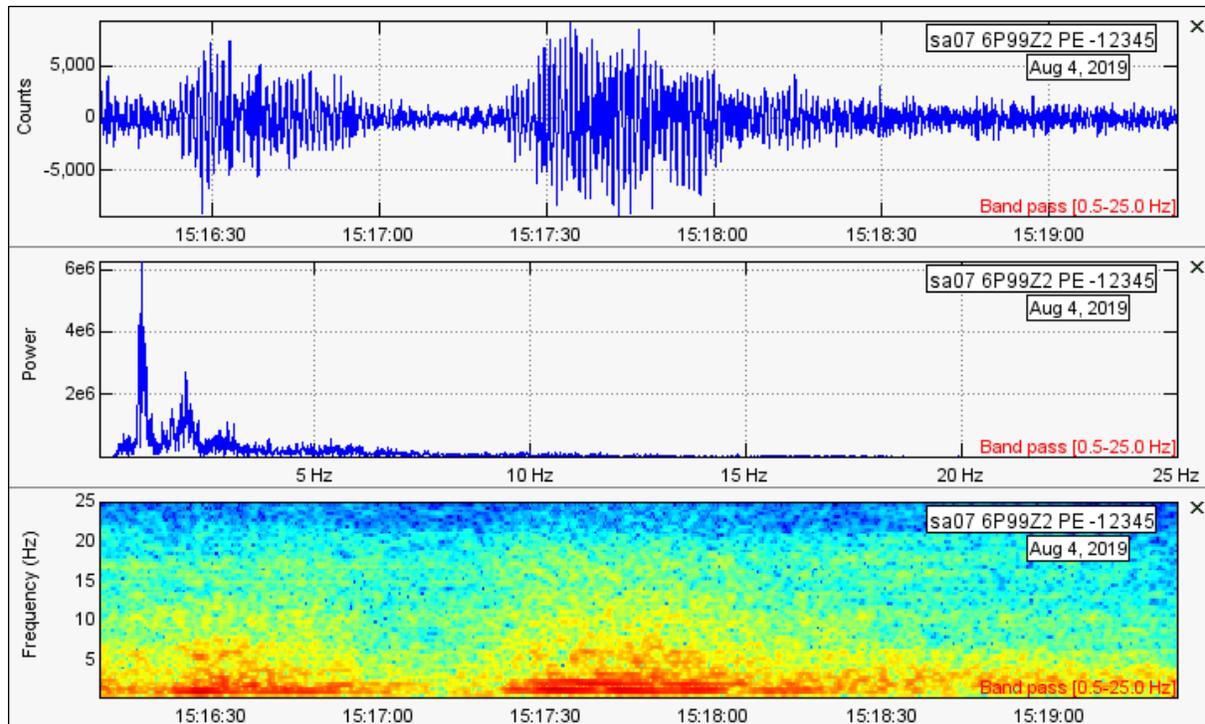


Figura 4.18. Registro sísmico, contenido espectral y espectrograma de un episodio de temblor volcánico (1 MJ) ocurrido el 04 de agosto 15:15 horas UTC, dicho evento presentó un D_r de 10 cm^2 y una duración de 120 segundos apróx. El registro sísmico corresponde a la estación sísmica telemétrica SAB07, componente vertical.

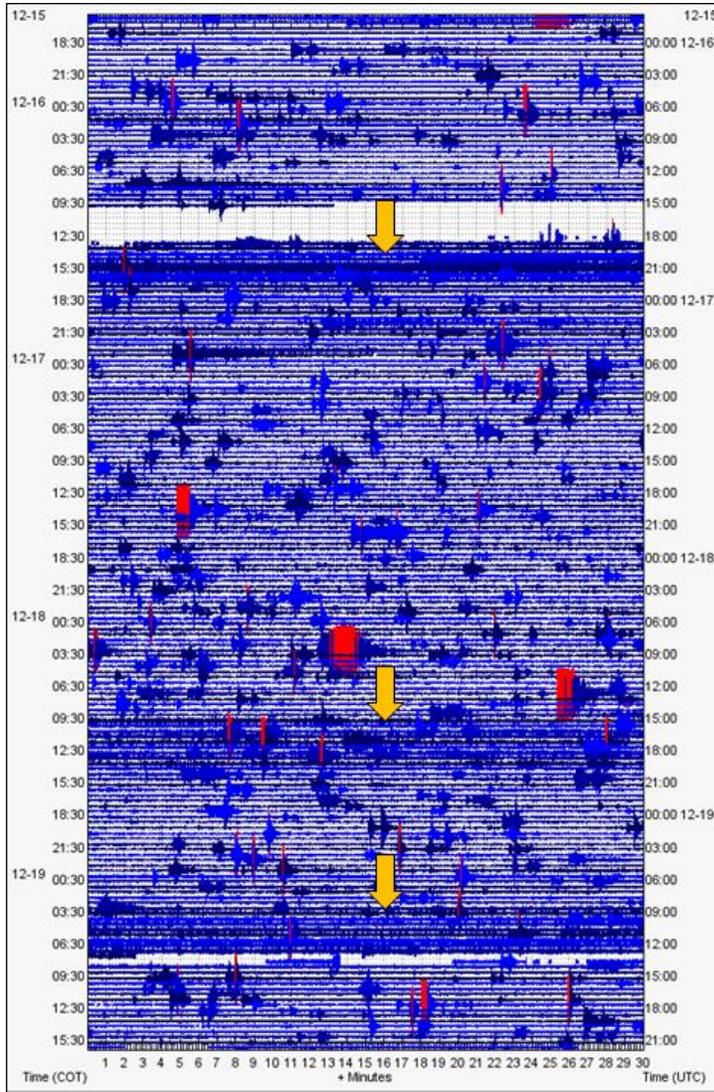


Figura 4.19. Sismograma de episodios de Tremor espasmódicos continuos desde el 16 hasta el 19 de noviembre, donde se puede apreciar el incremento tanto de su amplitud y energía. El máximo desplazamiento reducido alcanzados durante este periodo fue de 15 cm². Estación sísmica SAB07. Las flechas naranjas indican los periodos de incremento del tremor volcánico.

4.4.5 Explosiones

Las señales sísmicas correspondientes a las explosiones, se caracterizan principalmente por la liberación considerable de energía sísmica (< 1 MJ), además de presentar al inicio una componente de muy baja frecuencia (VLP), generalmente menor a 0.5 hz, lo que indica la dinámica de un fluido a cierta profundidad, en este caso el fluido vendría a ser propiamente el magma, en la mayoría de las señales de explosiones, éstas fueron seguidas por actividad tremórica, indicando la salida de la ceniza por el conducto hacia la superficie.

Durante el año 2019 la actividad explosiva mostró un incremento importante comparable con el inicio del proceso eruptivo (noviembre del 2016) y significativamente alto respecto a los años 2017 y 2018, tanto en número como en energía sísmica liberada (Fig. 4.20a), las energías que presentaron estas señales fueron de hasta 6.0 MJ y desplazamiento reducidos que oscilaron entre 0 y 273 cm² (Fig. 4.21). Como se mencionó anteriormente, se registraron periodos de incremento en la energía de dichas

explosiones, los cuales, indicaron un importante crecimiento del domo de lava, el periodo más resaltante fue identificado entre agosto y mediados de noviembre del presente año (Fig.4.20b), sin embargo, a la fecha se precia un descenso en este tipo de actividad, probablemente asociado a crecimiento del domo relativamente lento.

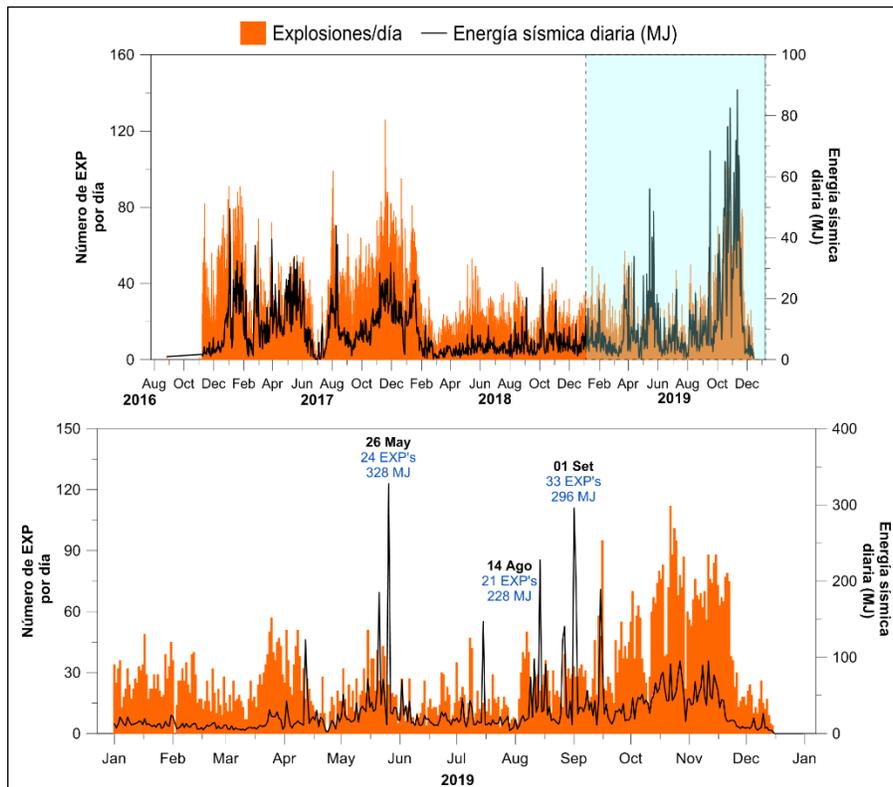


Figura 4.20. Histograma de las explosiones (EXP) y su respectiva energía sísmica diaria. a) Periodo 2016 -2019. b) Periodo 2019.

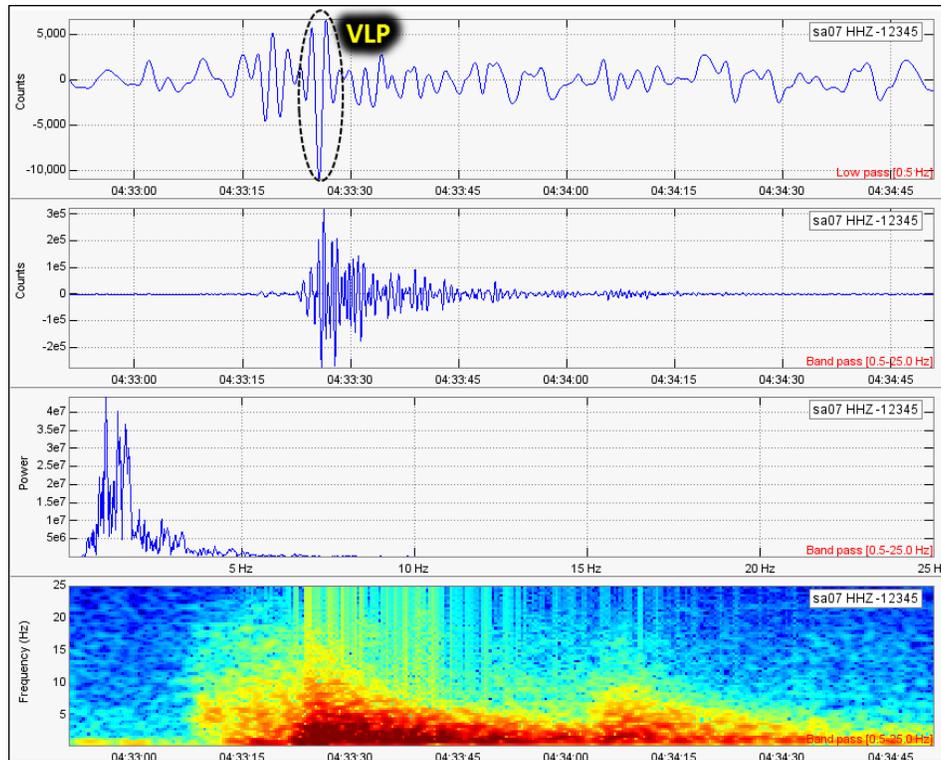


Figura 4.21. Registro sísmico, contenido espectral y espectrograma de Explosión (6 MJ) ocurrida el 08 de noviembre a las 04:33 horas UTC, dicho evento presentó un D_r de 273 cm^2 y una duración de 104 segundos. El registro sísmico corresponde a la estación sísmica telemétrica SAB07, componente vertical.

Por otra parte, las señales de explosiones han mostrado un cambio tanto en la forma de onda como en su contenido espectral, inicialmente, las explosiones eran eventos discretos con predominio en las bajas frecuencias (hasta 2 Hz) y el tremor volcánico que le seguía era de muy baja energía (> 1 MJ) y corta duración (menor a 1 minuto), sin embargo, a partir del 27 de noviembre se observaron cambios, registrando hasta dos tipos más de explosiones, en total, se tendrían 03 tipos de explosiones, siendo las descritas al principio las de Tipo 01: explosiones discretas, Tipo 02: explosiones con importante actividad tremórica y Tipo 03: explosiones acopladas (Fig. 4.22).

- Tipo 1: explosiones discretas con energías sísmicas de hasta 6 MJ, seguidas de tremor volcánico de baja energía (> 1 MJ) y corta duración (menor a un minuto), predominio de bajas frecuencias entre 0 y 2 hz, en superficie se correlaciona con una emisión importante de gases y ceniza de considerable altura (aproximadamente 3 km).
- Tipo 2: explosiones poco energéticas (hasta 3 MJ en promedio de energía sísmica), seguidas de importante actividad tremórica energética (hasta 4 MJ) y altas frecuencias (< 10 hz) y mayor duración (5 min aproximadamente), asociado a la importante salida de ceniza por el conducto hacia la superficie.
- Tipo 3: explosiones o eventos acoplados, caracterizados por estar conformados por 02 señales sísmicas de baja frecuencia, la primera con una frecuencia principal de 0.5 hz y bajas amplitudes, generalmente asociada a la ocurrencia de una explosión contenida a profundidades superficiales y la segunda señal con una frecuencia principal de hasta 2 hz y generalmente se asoció a una explosión visible. Este tipo de señales registradas, ha permitido

estimar una profundidad preliminar a la cual estarían generándose, esto en base al intervalo de tiempo entre el inicio de la primera señal (T1) y el inicio de la segunda señal (T2), es así que, la diferencia de tiempo entre estas señales ha estado oscilando entre los 10 y 50 segundos, lo cual, estaría indicando posibles profundidades entre 1 y 3 km. En la Fig. 4.23, se muestra un modelo conceptual de cómo sería el mecanismo de generación de este tipo de explosiones.

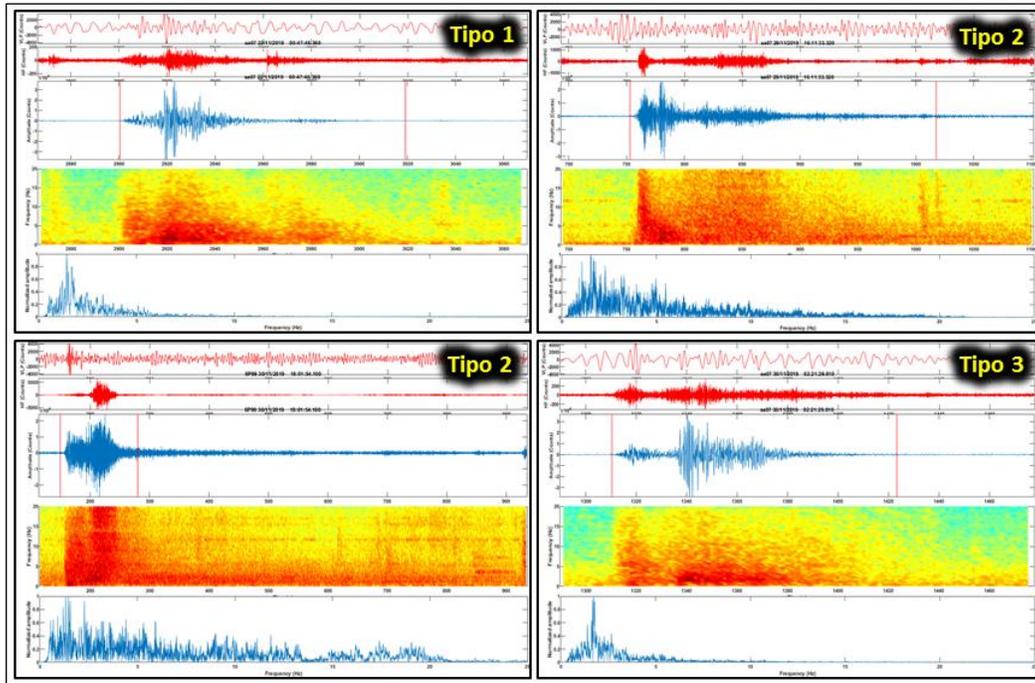


Figura 4.22. Registros sísmicos, contenidos espectrales y espectrogramas de los tipos de explosiones, datos de la estación SAB07, componente vertical.

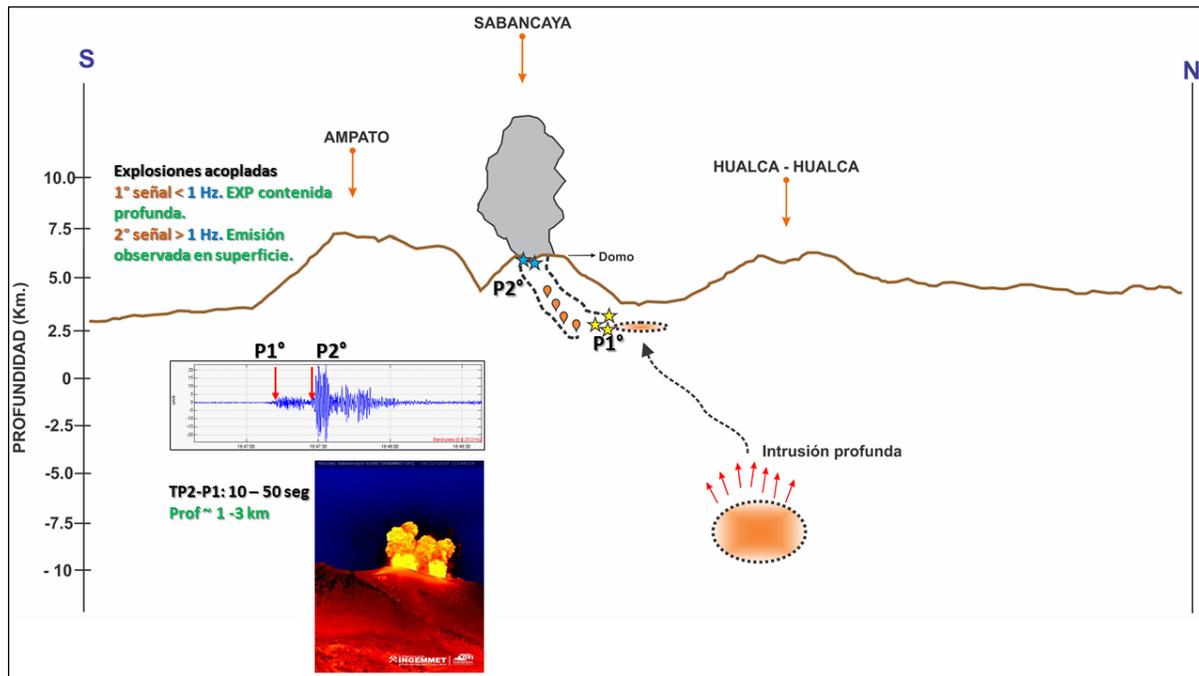


Figura 4.23. Modelo conceptual del mecanismo de generación de las explosiones/eventos acoplados, registrados en el volcán Sabancaya durante el año 2019.

Finalmente, el 11 de diciembre, en el volcán Sabancaya, se registró la ocurrencia de 06 explosiones energéticas que liberaron importante contenido de ceniza y las cuales, fueron seguidas por señales de altas frecuencias (hasta 20 Hz) que se correlacionaron con la ocurrencia de pequeños flujos piroclásticos con dirección SE y que alcanzaron distancias aproximadas de hasta 1.5 km del cráter (Fig. 4.24 y Fig. 4.25).

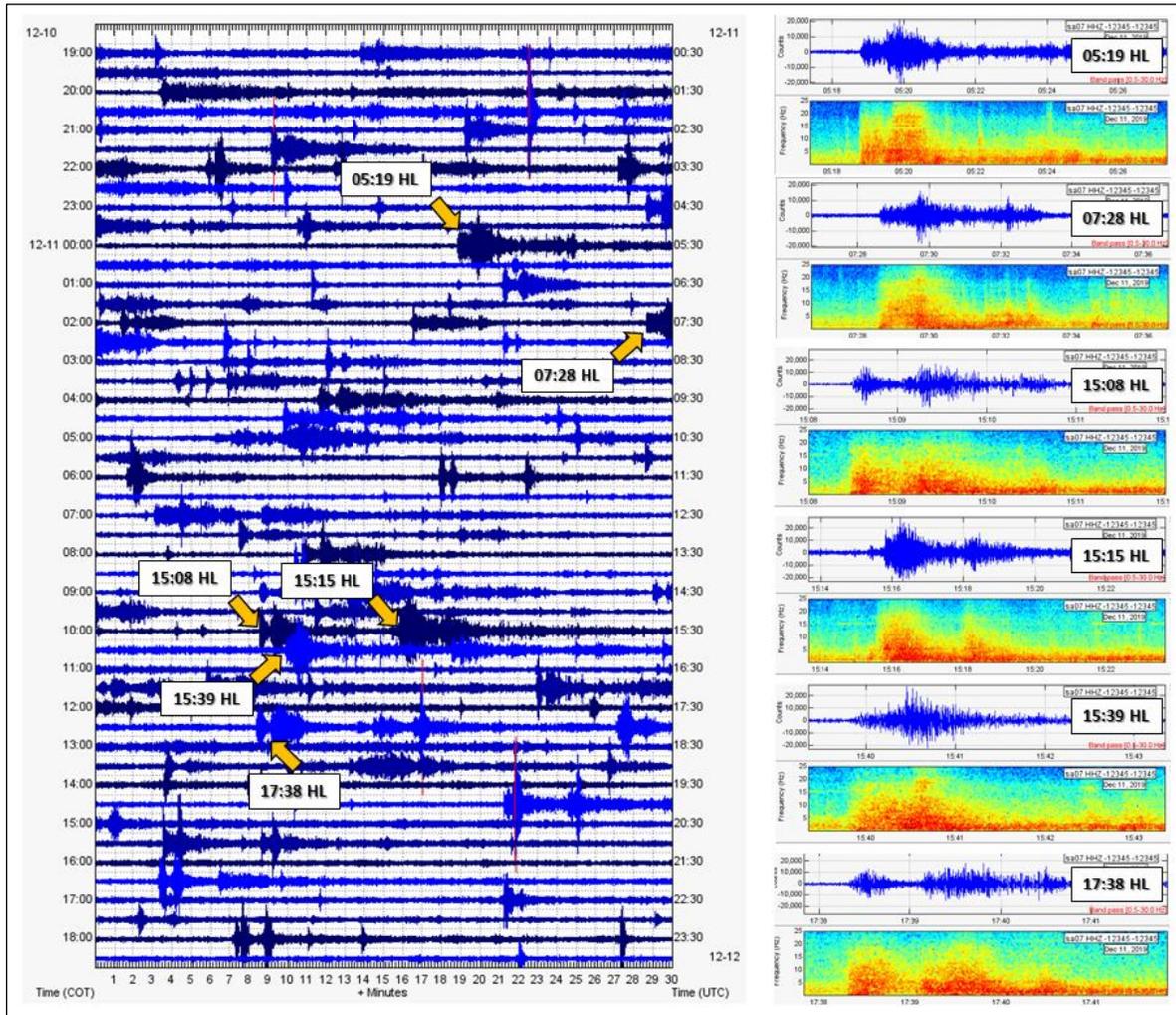


Figura 4.24. Señales sísmicas correspondientes a las explosiones y flujos piroclásticos ocurridos el día 11 de diciembre del presente año.

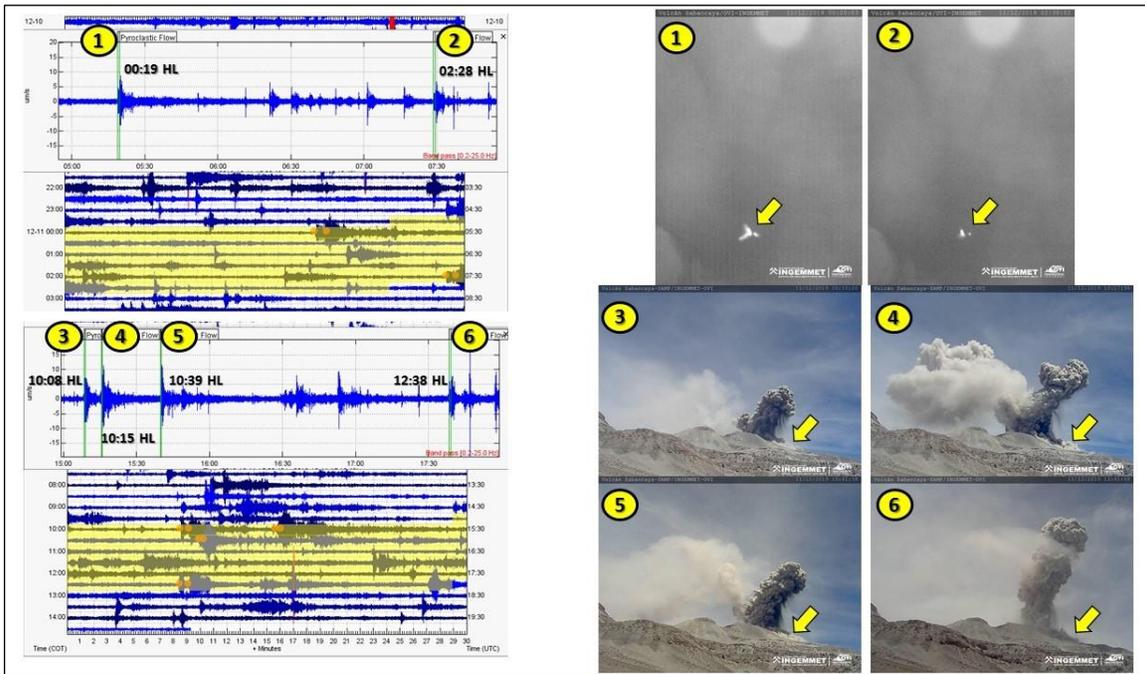


Figura 4.25. Sismograma correspondiente al día 11 de diciembre del 2019, en la cual, se puede apreciar el registro sísmico de las explosiones seguidas por señales asociadas a la ocurrencia de pequeños flujos piroclásticos que a su vez fueron corroboradas con las imágenes registradas por la cámara de vigilancia ubicada en la zona de Ampato.

5 SENSORES REMOTOS

El registro visual como herramienta en el monitoreo de los volcanes es una fuente de datos en tiempo real que nos permiten conocer y caracterizar sus productos emitidos y correlacionar estos con los diferentes parámetros como es la sísmica con fin de tener un mejor entendimiento del comportamiento del volcán Sabancaya.

5.1 Red de Cámaras

El volcán Sabancaya presenta una red de monitoreo visual desde el año 2014, que con el pasar de los años se ha ido renovando, actualmente esta red se encuentra constituida por cinco (5) cámaras de vigilancia, siendo cuatro (4) ópticas y una (1) cámara térmica que monitorean en tiempo real al volcán Sabancaya (24/7), esta red (Fig. 5.1) se encuentra distribuida en puntos estratégicos que nos permiten visualizar los diferentes productos emitidos por el volcán así como sus características físicas y la evolución de las mismas a través del tiempo.

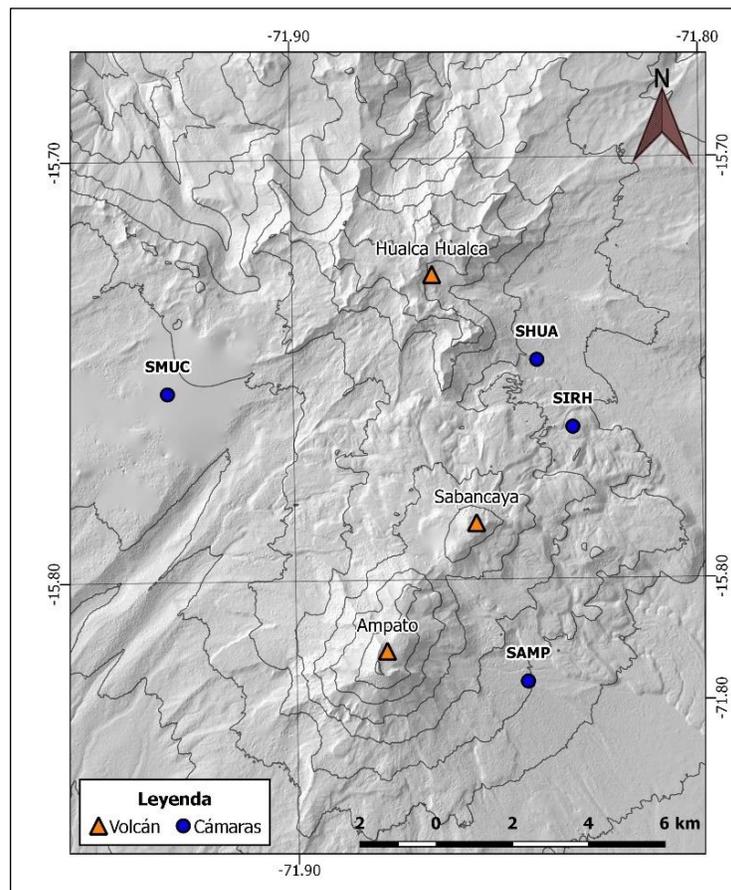


Figura 5.1. Mapa de ubicación de las cámaras ópticas y térmica en el volcán Sabancaya.

5.2 Características de las Emisiones

5.2.1 Forma y ocurrencia

El volcán Sabancaya presenta una actividad volcánica considerada como moderada con emisiones frecuentes de gases y cenizas con una periodicidad de 33 minutos, observándose un promedio anual de emisiones de 60 emisiones diarias, dichas emisiones a lo largo del año se muestran constantes, cabe resaltar que, este conteo corresponde a las emisiones de gases y de cenizas observadas por la cámara térmica, y según la corroboración con la sísmica de acuerdo con el registro de explosiones diarias visualizadas en la Fig. 5.2.

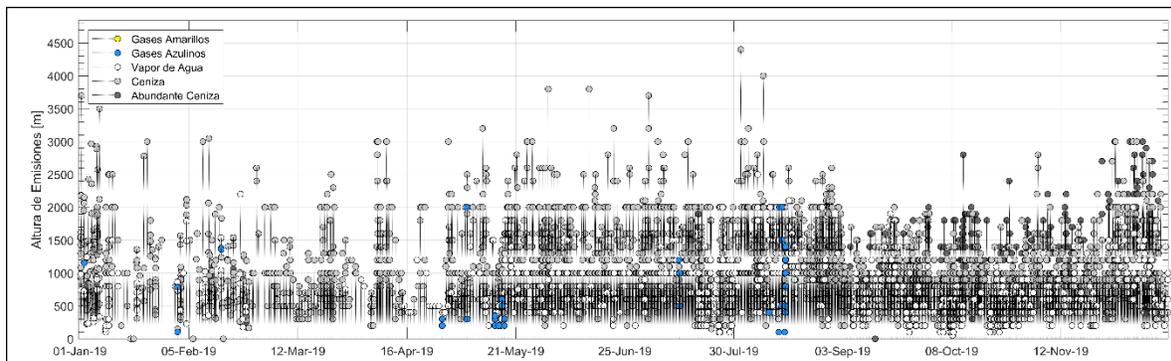


Figura 5.2. Alturas de columnas eruptivas del periodo del 2019 del volcán Sabancaya.

Realizando un resumen de las emisiones durante el presente año, tenemos que en el primer trimestre del 2019 (enero - marzo) se observaron emisiones con una altura promedio de 1000 metros sobre el cráter, alcanzando una altura máxima de 3700 metros sobre el cráter, con dirección de dispersión predominante al NE - SO, las cuales, afectaron a los pueblos de Lluta, Huambo y Huanca, y el sector de Muccurca además de los anexos ubicados en un radio de 30 km alrededor del volcán.

El segundo trimestre del 2019 (abril - junio) se observaron emisiones de 1100 metros sobre el cráter en promedio, alcanzando una altura máxima de 3800 metros sobre el cráter, las emisiones de gases y ceniza se mantuvieron constantes y fueron dispersadas por el viento principalmente en dirección SE, llegando hasta 50 km, afectando al sector de Sallali.

Durante el periodo de julio a setiembre del 2019 se han registrado columnas que alcanzan en promedio 1500 metros sobre el cráter, sin embargo, en agosto se presentó una explosión donde las columnas fumarólicas alcanzaron hasta 4400 metros sobre el cráter, teniendo una dirección de dispersión de las emisiones predominantemente al NO – SE y SO - NE alcanzando un radio de dispersión de 30 km, y afectando los pueblos del valle del Colca y Huambo.

Finalmente, entre octubre y diciembre se han registrado columnas eruptivas que han alcanzado una altura promedio de 800 metros sobre el cráter, registrándose emisiones máximas en el mes de octubre y diciembre con una altura de 2800 y 3000 metros sobre el cráter, siendo la dirección predominante

de las emisiones SE – SO y NE – NO, con un alcance de 30 km afectando a los centros poblados de Huambo, Achoma, Maca, Madrigal, Muccurca, Ichupampa y pueblos del valle del Colca.

La Fig. 5.2 muestra las alturas de las emisiones y explosiones visualizadas durante el año 2019, destacado también la coloración de las diferentes emisiones.

5.2.2 Dirección predominante

Las direcciones de dispersión de las diferentes emisiones se ven influenciadas por la dirección de los vientos, los cuales son monitoreados por el SENAMHI. Basados en esta información y la corroboración de las imágenes de las cámaras se ha podido determinar la dirección preferencial de las emisiones usando el software Dips (Rocscience) (Fig. 5.3 – Fig. 5.7).

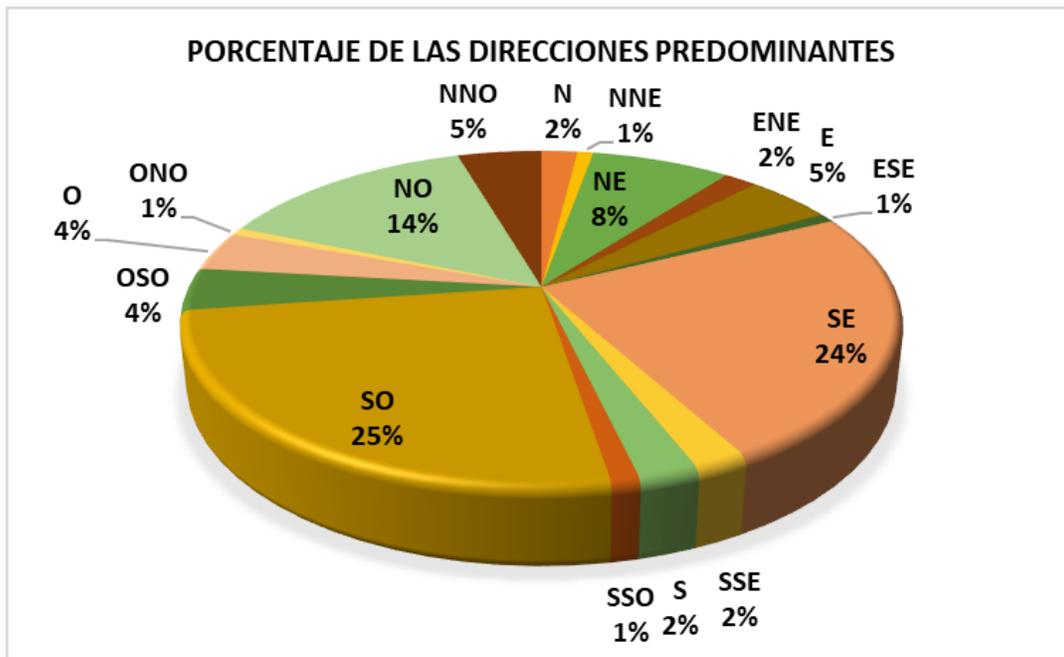


Figura 5.3. Distribución porcentual de las direcciones predominantes de emisiones.

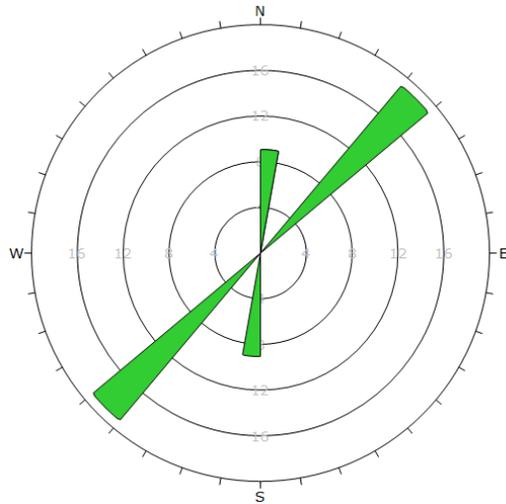


Figura 5.4. Diagrama de la dirección predominante de las emisiones en los meses de enero a marzo, siendo esta preferentemente NE-SO.

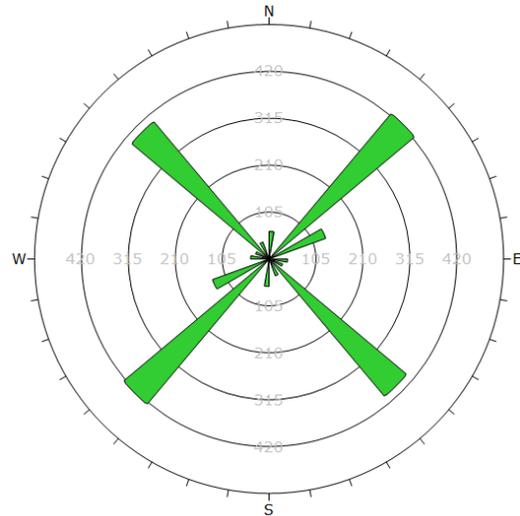


Figura 5.5. Diagrama de la dirección predominante de las emisiones en los meses de abril a junio, siendo esta preferentemente NE-SO y NO – SE.

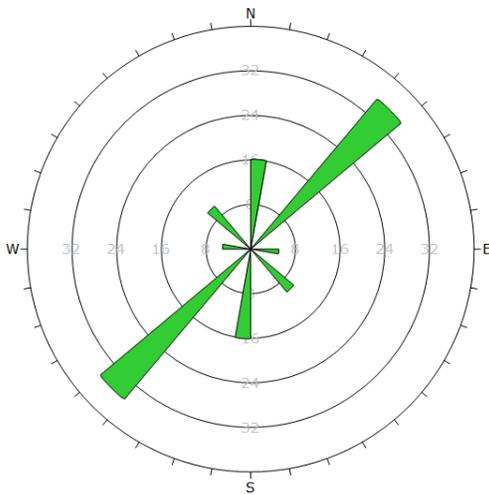


Figura 5.6. Diagrama de la dirección predominante de las emisiones en los meses de julio a setiembre, siendo esta preferentemente NE-SO.

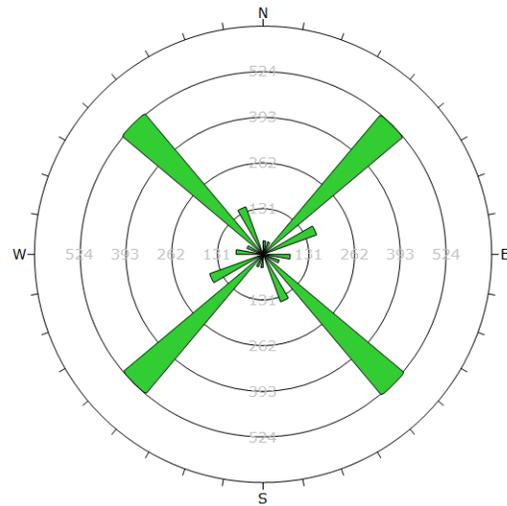


Figura 5.7. Diagrama de la dirección predominante de las emisiones en los meses de octubre a noviembre, siendo esta preferentemente NE-SO.

5.2.3 Imágenes representativas de emisiones fumarólica

Líneas abajo se muestra una línea de tiempo con las explosiones más representativas registradas en el volcán Sabancaya desde las cámaras de monitoreo visual.

VISTAS REPRESENTATIVAS DEL SABANCAYA DURANTE EL 2019

Enero - Marzo

- Altura máxima de Fumarolas fue 3700 m.s.c.
- Vista de explosión del 1 de enero del 2019 - Coporaque
- Dirección de dispersión NE - SO
- Pueblos afectados: Lluta, Huambo y Huanca
- Radio de afectación 30 Km.



Julio - Setiembre

- Altura máxima de las fumarolas 4400 m.s.c.
- Vista explosión de cenizas ocurrida el 1 de agosto del 2019 - Coporaque.
- La dirección de dispersión de las cenizas fue al NO – SE y SO - NE
- Afectando los pueblos del valle del Colca y Huambo.
- Radio de afectación 30 Km.



Abril - Junio

- Altura máxima de las fumarolas de 3800 m.s.c.
- Vista de la explosión de cenizas ocurrida el 31 de mayo del 2019 - Coporaque.
- Emisiones de gases y ceniza se mantuvieron constantes
- Dispersión de cenizas en dirección SE.
- Afectado al sector de Sallali.
- Radio de afectación 50 Km.



Octubre - Diciembre

- Altura máxima de las fumarolas 3000 m.s.c.
- Vista explosión de cenizas ocurrida el 9 de diciembre del 2019 - Ampato.
- La dirección de dispersión de las cenizas fue SE – SO y NE – NO
- Los centros poblados afectados fueron Huambo, Achoma, Maca, Madrigal, Muccurca, Ichupampa y pueblos del valle del Colca.
- El radio de afectación fue de 30 Km



5.3 Vigilancia satelital

El volcán Sabancaya en el presente año ha mostrado grandes modificaciones en la geomorfología de su cráter, debido al crecimiento de un domo (Fig. 5.8), dicho cráter presenta una dirección NO – SE con una longitud de 495.1 metros de largo y 367.2 metros de ancho.



Figura 5.8. Vista del cráter del volcán Sabancaya, 16 de mayo del 2019, imagen CNES - Airbus, Fuente: Google Earth 2019.

Mediante la visualización de imágenes satelitales se pudo monitorear su desarrollo. Siendo así que desde el 5 de febrero del 2017 las imágenes han mostrado indicios de la presencia un domo en el interior del cráter del Sabancaya, su crecimiento fue acelerado hasta junio del año 2017 donde alcanzó un área de 15124 m², no mostrando mayor crecimiento representativo hasta inicios del 2019 donde se volvió a observar un crecimiento acelerado alcanzando una superficie de 51742 m² como se observa en la curva de la Fig. 5.9, además de ello desde agosto a octubre del 2019 se observó una tasa de crecimiento de 430 m²/día.

La **Tabla 5.1** muestra la evolución de las dimensiones del domo, así como de su superficie desde febrero del 2017 a octubre del 2019 vistos a través de imágenes Planet Scope.

La Fig. 5.10 muestra una vista del cráter del volcán Sabancaya registrada el 25 de agosto del 2018, observándose un límite probable del domo, ya que se observan emisiones entorno de lo que sería el límite del domo, el cual no se muestra muy definido ya que no se observa la textura grumosa característica de los domos.

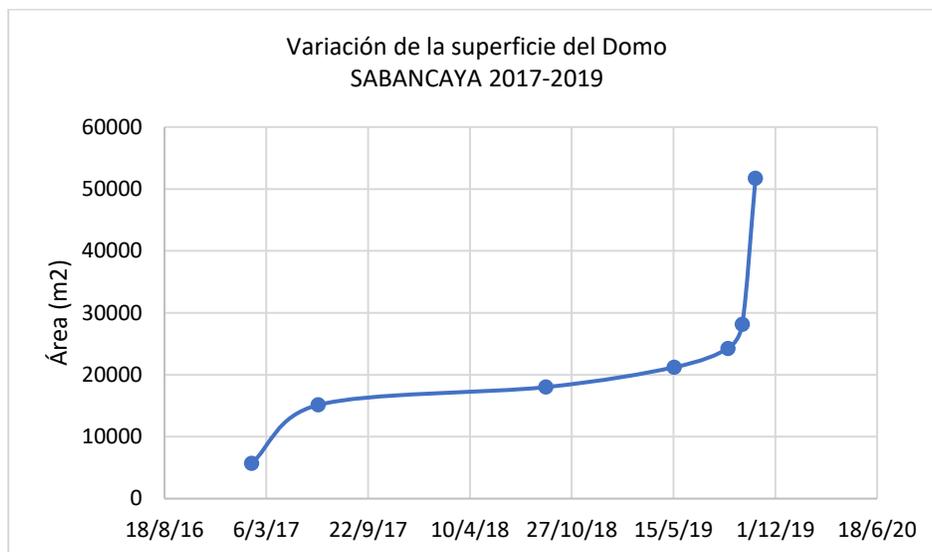


Figura 5.9. Incremento de la superficie del Domo desde febrero del 2017 a octubre del 2019, observándose mayores crecimientos entre febrero y marzo del 2017 y agosto y octubre del 2019.

Tabla 5.1. Dimensiones y superficie del Domo desde febrero 2017 a octubre 2019

Fecha	Diámetro mayor (m)	Diámetro menor (m)	Área (m ²)
05/02/2017	85	85	5674
16/06/2017	147	131	15124
06/09/2018	157	146	18003
16/05/2019	180	150	21206
30/08/2019	185	167	24265
27/09/2019	227	158	28169
23/10/2019	270	244	51742

Aproximadamente un año después, la imagen satelital del 30 de agosto del 2019 permite tener una vista del domo, el cual queda definido por la textura característica del mismo (Fig. 5.11) emplazado al NO del cráter, las emisiones se muestran atravesando el domo lo que indicaría un fracturamiento en el mismo.

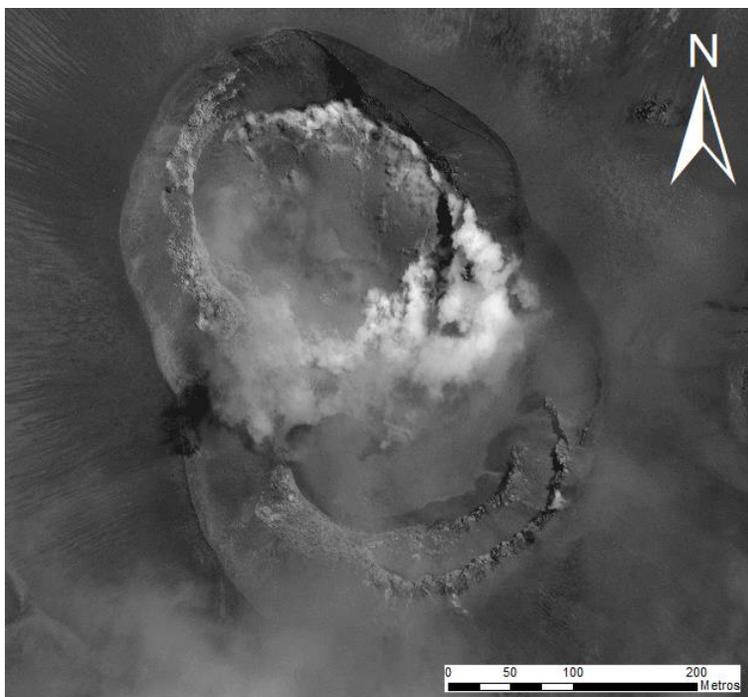


Figura 5.10. Vista del Cráter del volcán de fecha 25 de agosto del 2018, donde observan emisiones saliendo por donde sería el borde del domo, no se muestran un domo muy definido ya que no se observa muy bien la textura característica de un domo. (Fuente: EULA, imagen Digitalglobe).

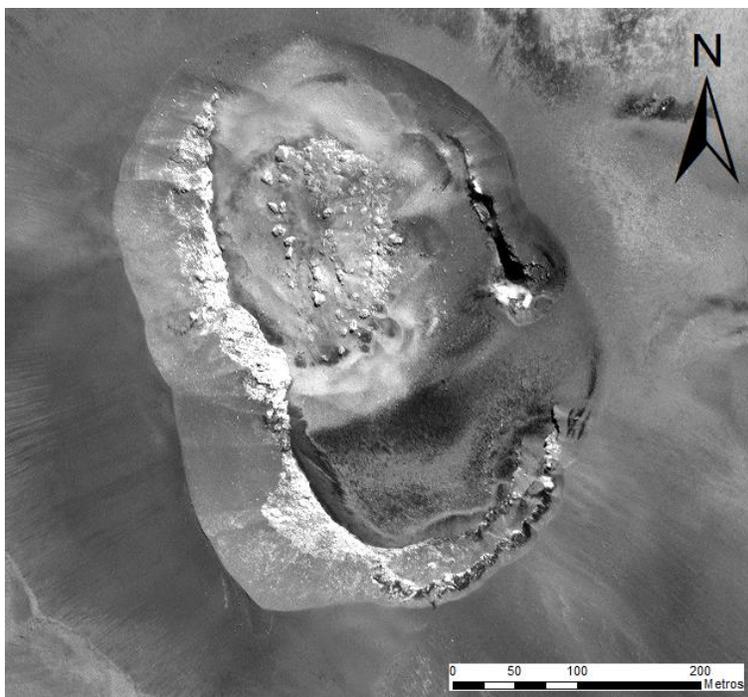


Figura 5.11. Imagen DigitalGlobe del 30 de agosto del 2019 permite observar un domo en el interior del cráter del Sabancaya, característico de una textura grumosa (fuente: EULA, imagen Digitalglobe).

De acuerdo con lo anterior, (comunicación personal Rick Wessels – USGS) hasta el 1 de diciembre se muestra que en el centro del domo de lava ha ocurrido una lenta subsidencia desde el 23 de noviembre. Además de ello el área total de la cúpula del domo ha permanecido relativamente sin cambios con una superficie aproximada de 57,000 m².

También indica que durante dicho proceso de subsidencia se han formado fracturas radiales cerca del margen externo del domo como se aprecia en la **Figura 5.12** 5.12, donde las constantes explosiones en el cráter han tallado un gran cráter de explosión en el lado Este del domo de lava.

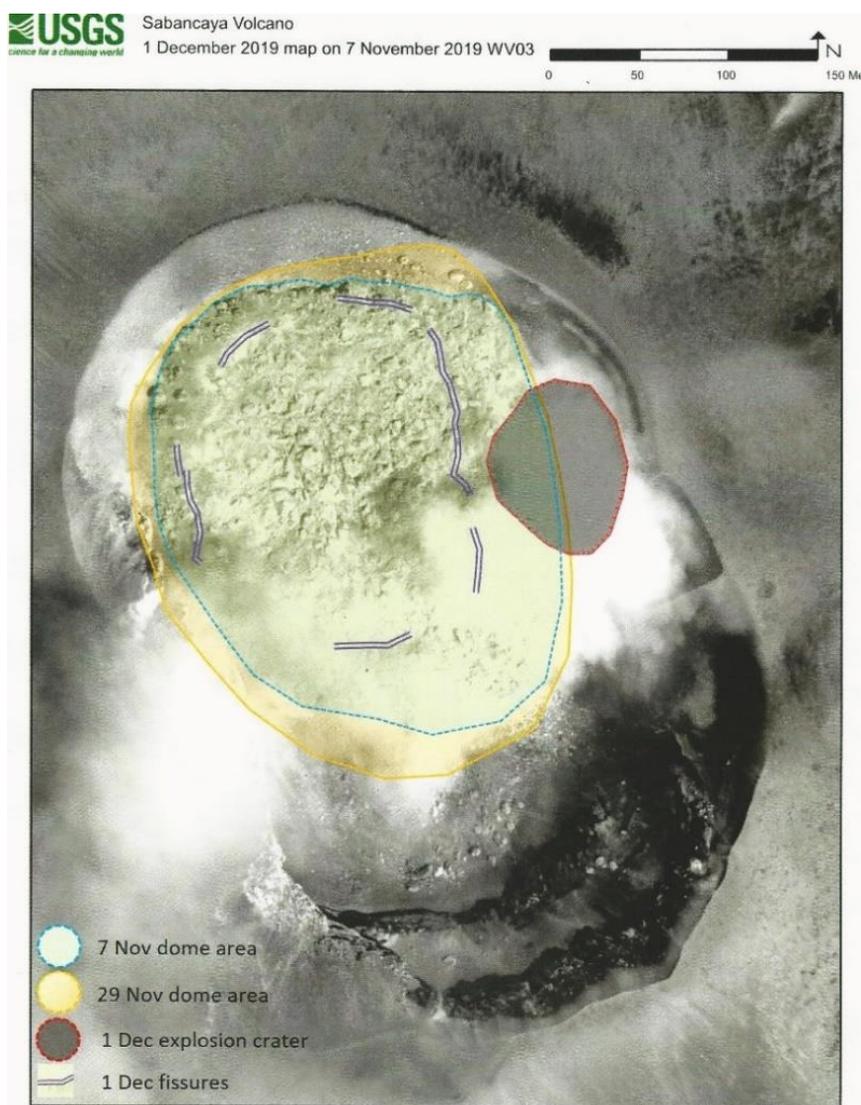


Figura 5.12. Imagen WorldView 3 del 7 de noviembre mostrando una vista del cráter del volcán Sabancaya y del domo sobre la cual se han enmarcado el área del domo correspondiente al 7 de noviembre (celeste) y 1 de diciembre (amarillo) de aproximadamente 57000 m², así como el cráter de explosión y el fisuramiento interno del domo producto de la subsidencia ocurrido en el centro del domo (Fuente: USGS).

Visualmente esta característica de fracturamiento radial se observa en las diferentes explosiones ocurridas durante el último mes del año (**Figura 5.13** 5.13), donde se aprecian explosiones saliendo por tres diferentes puntos de emisiones las cuales muestran así mismo diferentes direcciones, esto se debería al fracturamiento radial en el domo, también se observan balísticos expulsados en cada emisión, los cuales se visualizan en la cámara infrarroja (Fig. 5.14).

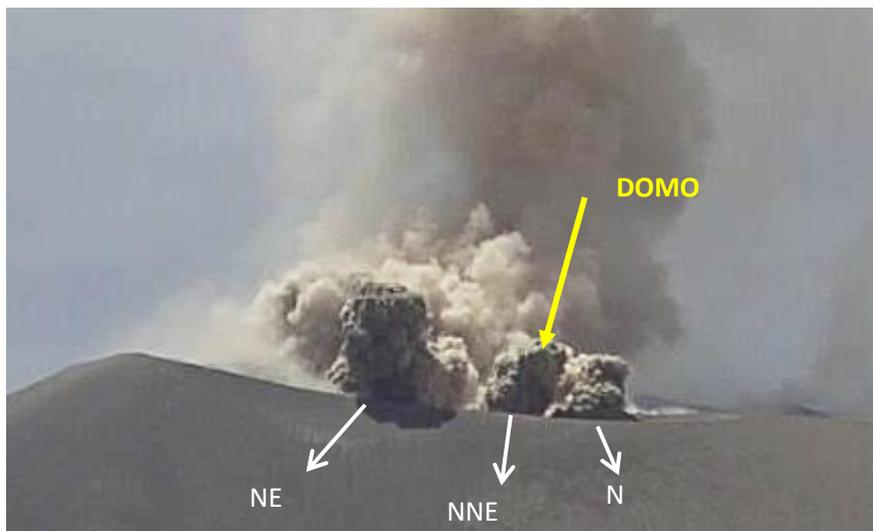


Figura 5.13. Vista del 11 de diciembre del 2019 del cráter del volcán con emisiones de color gris oscuro con direcciones diferentes NE, NNE y N.

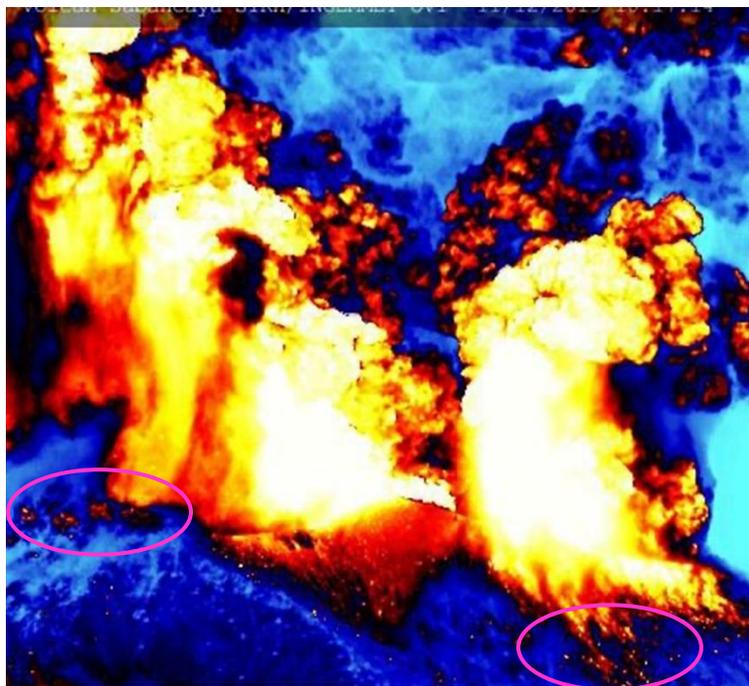


Figura 5.14. Vista de los balísticos expulsados durante las explosiones, observados a través de la cámara térmica desde el sector de Hornillos al NE del cráter (Fecha de registro 11-dic-2019).

Imágenes Terrasar-X compartidas por el VDAP (Programa de Asistencia para Desastres Volcánicos) de la USGS (Fig. 5.15), nos muestran el domo formado en el interior del cráter, el cual se ha emplazado en aproximadamente el 70% del cráter, además de ello se observa que parte del material del domo ha caído dentro del cráter antiguo ubicado el SE, este escenario del emplazamiento del domo al SE continuaría hasta llenar el cráter antiguo que fue cubierto inicialmente por material de las emisiones durante el inicio del emplazamiento del domo.

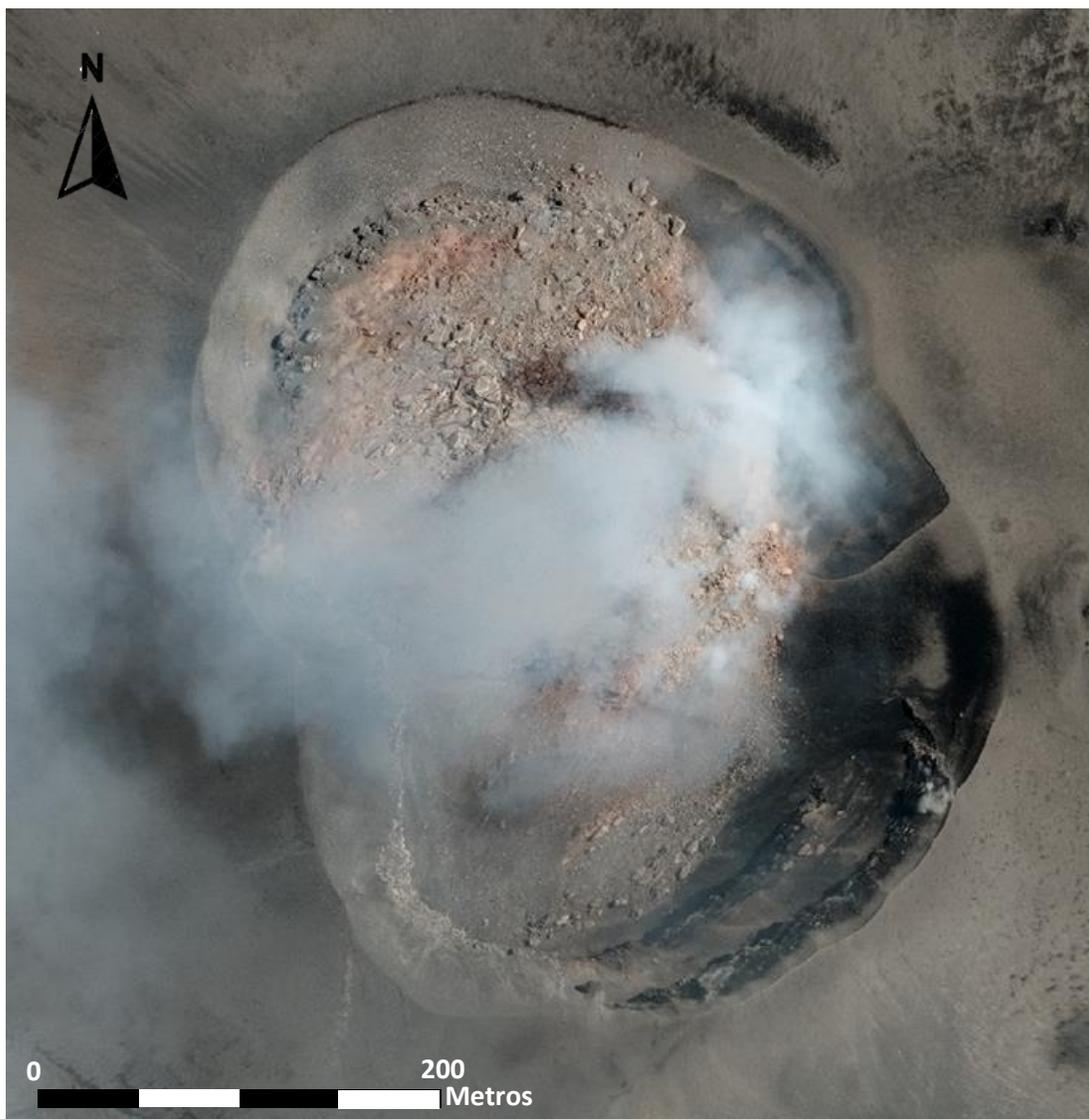


Figura 5.15. Vista del Domo sobre el cráter del volcán el cual está ocupando aproximadamente el 70% del cráter.
 (Fuente: VDAP).

5.3.1 Seguimiento del crecimiento del domo

La cámara instalada en el sector de Hualca Hualca desde el 4 de diciembre de 2019, ha mostrado en mejor detalle las explosiones, la Fig. 5.16 muestra dos vistas de las explosiones que salen por conductos diferentes y en algunos casos estas tienen coloraciones también diferentes, además de ello se ha podido observar la cúpula del domo, que viene creciendo en el interior del cráter del Sabancaya (Fig. 5.17).



Figura 5.16. Vistas de la cámara SHUA del sector Hualca Hualca, mostrando mayor detalle de las emisiones fumarólicas del volcán.

Gracias a la cámara SHUA (Hualca Hualca), se ha podido observar cambios en la geometría del domo, desde el día 6 de diciembre para el 7 de diciembre del 2019, como se observa en la **Figura 5.17** 5.17 (a), donde una porción de la cúpula del domo sector SE visible el 6 de diciembre ya no se muestra para el 7 de diciembre **Figura 5.17** 5.17 (b), la determinación del momento de la ocurrencia de este hecho es indeterminada ya que las constantes emisiones no permiten apreciarlo. Este escenario se pudo originar por la destrucción de sector SE del domo o deslizamiento del material de este sector del domo relleno el antiguo cráter.



Figura 5.17. Vistas del Domo mostrando cambios en la geometría de la cúpula debido a las constantes explosiones.

5.3.2 Sobrevuelos con DRONE

Con fin de tener una mejor visualización ya que las imágenes satelitales presentan dificultades de visualización debido a condiciones climáticas y otras, es que se programaron campañas de sobrevuelos con dron siendo realizadas el 26 de octubre y el 19 de noviembre 2019.

De las imágenes del 26 de octubre se observa un domo emplazado en más del 50% del cráter de coloración rojiza con fragmentos de rocas angulosos dando la apariencia de textura grumosa característica de los domos. Se observa un fracturamiento en el interior del todo el domo por donde los gases y cenizas son expulsados (Fig. 5.18 y Fig. 5.19), mostrando que es un sistema semi-abierto además de conductos al lado NO y SE del domo por donde las cenizas y gases son expulsados en cada explosión, ver Fig. 5.20 sectores en rojo. Estas imágenes fueron usadas para ajustar las dimensiones del domo obtenidas de las imágenes satelitales y resumidas en la **Tabla 5.1**.



Figura 5.18. vista del 26 de octubre mostrando el fisuramiento en el interior del Domo observado durante el sobrevuelo con dron.



Figura 5.19. Vista obtenido por el dron, del 26 de octubre, donde se observa que las fumarolas y gases atraviesan el domo por medio de las fisuras registradas en las imágenes captutadas por el dron.



Figura 5.20. Vista del cráter del Sabancaya obtenido por el Drone Phantom, realizada el 26 de octubre observándose un domo de color rojizo ocupando más de la mitad del cráter del volcán, en rojo se enmarcas los sectores que presentan flujo de gases y cenizas.

En la campaña del 19 de noviembre el sobrevuelo con dron permitió registrar vistas del cráter donde se observa (Fig. 5.21) que el domo está ocupando aproximadamente el 70 % del cráter del volcán y que una parte del material del domo está deslizando hacia el sector SE donde se ubica la depresión del anterior cráter. Como se mencionó anteriormente, el escenario es que esta depresión sea cubierta con material producto del crecimiento del domo.



Figura 5.21. Vista del Sabancaya obtenido por el Drone Phantom realizada el 19 de noviembre, observándose un domo de color rojizo ocupando el 70% del cráter, el sistema aún sigue semi-abierto ya que los gases aún siguen siendo expulsados por las fracturas del domo.

5.3.3 Imágenes satelitales, térmicas y ópticas

Imágenes MIROVA y SENTINEL, han mostrado sectores con anomalías térmicas y mayor radiación sobre el cráter, estas advirtieron la presencia de un cuerpo caliente cercano a la superficie (domo de lava), así como de los sectores de emisiones de gases y cenizas actuales o puntos calientes.

Las Fig. 5.22 y Fig. 5.23 muestran las anomalías térmicas registradas durante los años 2017 a 2019, donde se registra la presencia de un cuerpo caliente en el sector NE del cráter desde inicios del 2017 (de color rojo), posteriormente en el 2018 este cuerpo caliente migra hacia el sector NO, simultáneamente a él se registran nuevos puntos calientes (Hotspot) observados en ambas imágenes registrándose hasta 2 puntos calientes en el caso de MIROVA y 3 en caso de las imágenes SENTINEL.

Haciendo el análisis e interpretación de estas imágenes se tiene que el cuerpo caliente registrado correspondería al domo de lava que fue creciendo en el interior del cráter desde inicios del 2017 y posteriormente continuó emplazándose durante el 2018 y este continuó durante el 2019 donde su crecimiento fue más notable.

Los nuevos puntos calientes registrados en estas imágenes se relacionarían a la aparición de nuevos cráteres, formados después que el cráter localizado al SE fuese cubierto por material de las emisiones. Actualmente estos puntos calientes serían los conductos por donde se estarían expulsando los gases y cenizas.



Figura 5.22. Comparativa de Imágenes térmicas de MIROVA de los años 2017, 2018 y 2019, donde se observa que durante el 2017 una anomalía térmica se emplazaba al NE del cráter, el cual para el 2018 migra hacia el NO, registrándose además un punto caliente al Este por el cual se observan las mayores emisiones del volcán, en el 2019 el cuerpo caliente continua al NO pero con una mayor dimensión y dos nuevos puntos caliente se registran en el sector Este del cráter.



Figura 5.23. Imágenes SENTINEL del 2017 al 2019 que nos permite observar anomalías térmicas relacionadas al ascenso de un cuerpo caliente y aparición de nuevos puntos calientes vinculados a los puntos de emisiones de gases y cenizas.

Un análisis de la potencia volcánica Irradiada (VRP) visualizado en la Fig. 5.24 muestra que esta potencia se incrementó progresivamente hasta el mes de junio donde se alcanzó el máximo valor anual de VRP que fue 74 MW, luego se produjo un descenso a mediados de julio registrándose menos de 10 MW y posteriormente un incremento para los primeros días del mes de setiembre alcanzando 70 MW, a inicios de diciembre esta Potencia continúa decreciendo no sobrepasando los 29 MW.

En cuanto a la potencia acumulada de VRP se observa un incremento de la tasa de VRP acumulado desde el mes de junio y dicha tasa permanece constante hasta el mes de noviembre donde vuelve a decrecer con una pendiente similar al periodo entre enero y junio. Todo este comportamiento estaría vinculado al crecimiento del domo el cual ha mostrado un crecimiento abrupto desde el mes de abril hasta finales del mes de noviembre.

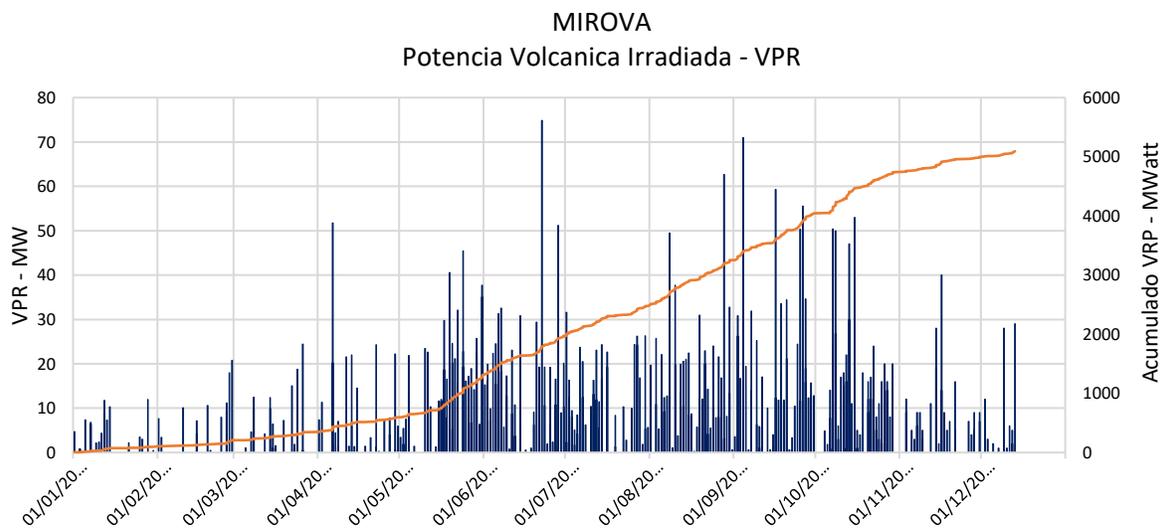


Figura 5.24. Potencia volcánica Irradiada diaria y Potencia volcánica acumulada de las explosiones del Sabancaya (Fuente: MIROVA).

5.3.4 Flujos piroclásticos

Los flujos piroclásticos o corrientes de densidad piroclástica son una mezcla muy caliente de bloques de lava, cenizas y gases volcánicos, que se mueven a altas velocidades por las laderas de un volcán, y son algunos de los fenómenos volcánicos más peligrosos.

Dichos eventos fueron percibidos hasta en seis oportunidades durante las explosiones del volcán Sabancaya el 11 de diciembre del 2019, siendo la primera vez de la ocurrencia de dichos fenómenos, los cuales pueden ser originados por el colapso de una columna eruptiva, por colapso de un domo, o por colapso de fuentes por sobre-ebullición (**boiling-over**), este último sería el que se habría presentado en el Sabancaya debido a que la mezcla de piroclastos y gas no ha atrapado suficiente aire para volverse más liviano que la atmósfera circundante y pueda seguir ascendiendo (Clake et al., 2002), estos eventos en su mayoría están asociados con erupciones vulcanianas de volumen relativamente pequeño de magmas máficos a intermedios como es el caso del Sabancaya.

De la Fig. 5.25 a la Fig. 5.29 se muestra un esquema un flujo piroclástico tipo boiling-over, así como los flujos ocurridos en al flanco SE del volcán Sabancaya los cuales no sobre pasaron 1.5 km de longitud.

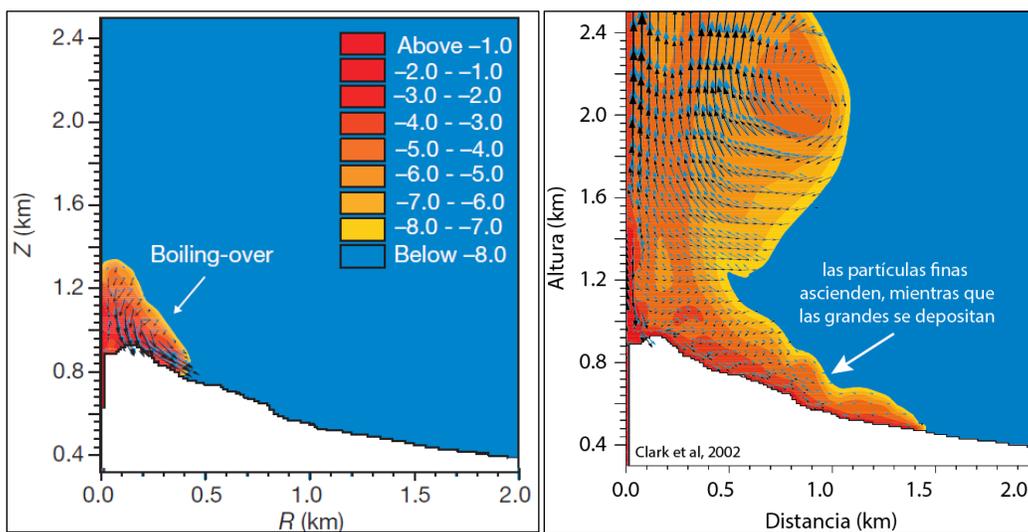


Figura 5.25. Concentración y trayectoria simulada de una explosión tipo vulcaniana mostrando el desarrollo de un flujo piroclástico tipo sobre - ebullición (Boiling – Over) (Fuente: Clarke et al. 2002).

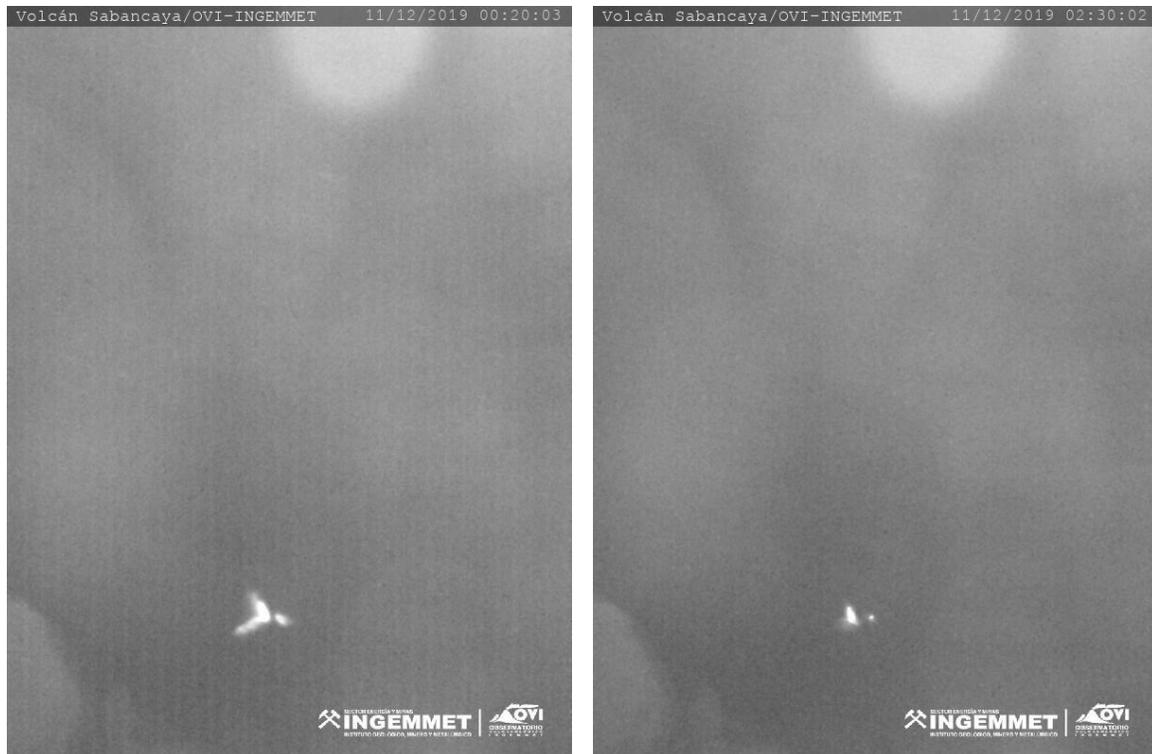


Figura 5.26. Vistas de flujos Piroclásticos caracterizados por el área de sismología, por primera vez se registran estos eventos en el volcán Sabancaya.



Figura 5.27. Vista del tercer flujo Piroclástico ocurrido el 11-12-2019 a la 10:10 horas. tipo boiling-over.



Figura 5.28. Vista del cuarto flujo Piroclástico ocurrido el 11-12-2019 a la 10:17 horas. Se muestra también un esquema del Flujo piroclástico tipo boiling-over.



Figura 5.29. Vista del quinto y sexto flujo Piroclástico ocurridos el 11-12-2019 a la 10:42 horas y 12:41 horas, ambos también son del tipo boiling-over.

6 PRODUCTOS EMITIDOS

6.1 Red de cenizómetros

El Observatorio Vulcanológico del INGEMMET (OVI) implementó una red de monitoreo y muestreo de ceniza con cenizómetros ubicados en los alrededores del volcán Sabancaya (Figura 6.1). Se instaló 33 cenizómetros en el año 2018 y se instaló 10 cenizómetros en setiembre del 2019 con el apoyo de los voluntarios de Caylloma de los pueblos del valle del Colca y PREDES-AGRA, con el fin que estos voluntarios reporten en tiempo real la caída de ceniza en el valle del Colca, los cuales brindan información acerca de los espesores de ceniza acumulada emitida por el volcán.

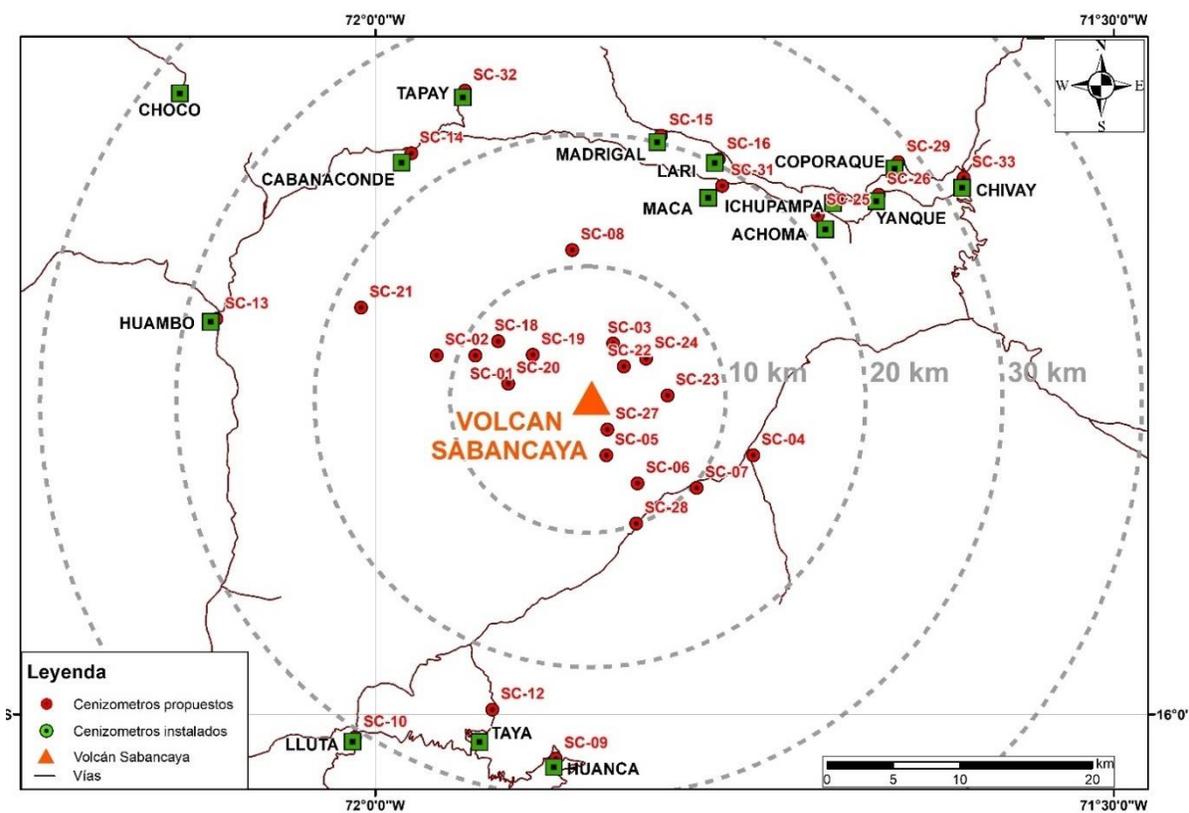


Figura 6.1. Ubicación de los cenizómetros alrededor del volcán Sabancaya

6.2 Muestreo de Cenizas

Con el objetivo de obtener un muestreo sistemático, se instaló la red de cenizómetros en los alrededores del volcán. Los cenizómetros son dispositivos utilizados precisamente para medir espesores, densidad de área y densidad total de pequeños depósitos de cenizas (< 20 mm) (Bernard, 2013) como es el caso del volcán Sabancaya. El objetivo de dichos cenizómetros es medir la

acumulación de caída de ceniza que cae en un determinado lugar (Tabla 6.1, 6.2 y Figura 6.2, 6.3), para poder realizar un estudio posterior de dispersión de cenizas.

Tabla 6.1. Datos de cenizómetros ubicados en los pueblos que se encuentran alrededor del volcán Sabancaya.

CÓDIGO	LOCALIDAD	2019			
		Abril	Mayo	Junio-Agosto	Setiembre-October
SC-09	HUANCA		<0.1mm		
SC-10	LLUTA		<0.1mm		
SC-14	CABANACONDE				<0.1mm
SC-15	MADRIGAL			0.1mm	<0.1mm
SC-16	LARI				<0.1mm
SC-17	ICHUPAMPA			<0.1mm	<0.1mm
SC-26	YANQUE	<0.1mm		<0.1mm	
SC-29	COPORAQUE	<0.1mm			<0.1mm
SC-31	MACA				<0.1mm
SC-33	CHIVAY	<0.1mm	<0.1mm	<0.1mm	<0.1mm

Tabla 6.2. Datos de cenizómetros ubicados en las zonas proximales del volcán Sabancaya.

CÓDIGO	LOCALIDAD	2019			
		Abril	Mayo	Junio-Agosto	Setiembre-October
SC-01	SAB 10	0.6mm	<0.1mm	0.1mm	0.1mm
SC-02	Subida Muccurca	0.3mm	<0.1mm	<0.1mm	<0.1mm
SC-03	Hornillos 4		0.8mm		0.3mm
SC-04	Parjo			0.2mm	0.1mm
SC-05	Estacion Ampato	0.75mm		1mm	0.4mm
SC-06	Frente Ampato	0.25mm		0.4mm	0.2mm
SC-07	Sallalli	0.1mm			
SC-18	Hualca Hualca			0.7mm	0.1mm
SC-19	Muccurca		0.8mm	1mm	0.1mm
SC-20	Muccurca2			1mm	0.2mm
SC-21	Estacion Muccurca	0.5mm	<0.1mm	<0.1mm	<0.1mm
SC-22	SAB 11		1.5mm		0.6mm
SC-23	Hornillo 2		0.6mm		0.6mm
SC-24	Hornillos 3		0.5mm		0.4mm
SC-27	SAB 07	2.3mm		2.2mm	
SC-28	Sallalli 2	0.25mm		0.2mm	0.1mm

La caída de ceniza recolectada en los cenizómetros en los poblados del valle del colca en su mayoría ha sido menor a 0.1 mm, por lo cual se concluye que la afectación por la caída de ceniza ha sido muy leve.

La caída de ceniza en los cenizómetros proximales ubicados alrededor del volcán Sabancaya muestra que el lado más afectado por la caída de ceniza fue el sector sureste (Sallalli) teniendo un espesor máximo de ceniza de 2.3 mm a 2.6 km, llegando a 0.2 mm a 12.7 km del volcán (Figura 6.2 y 6.3).

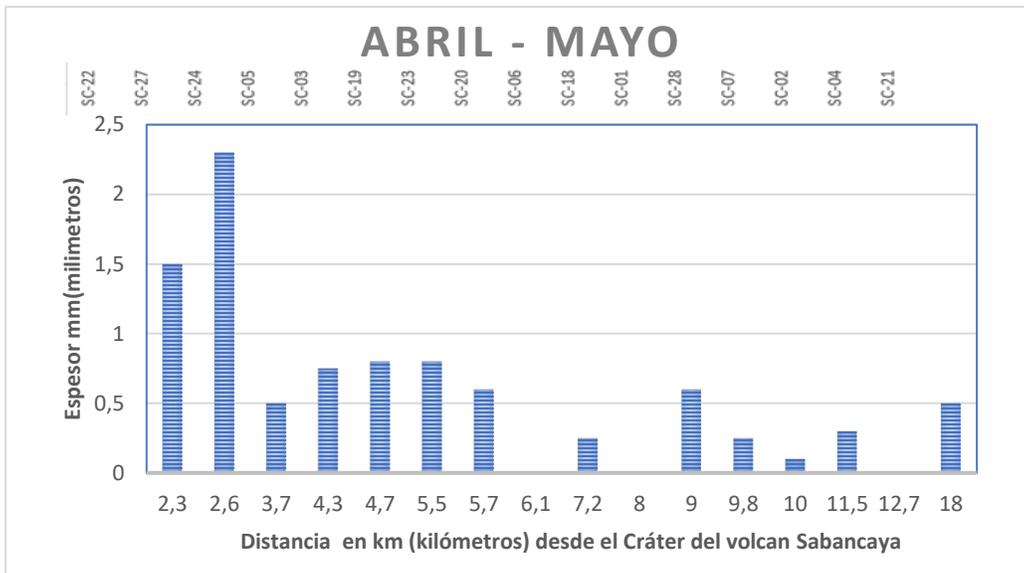


Figura 6.2. Medidas de espesor de ceniza acumulada desde abril a mayo del 2019 con respecto a la distancia en km, provenientes de los cenizómetros más proximales al área del volcán Sabancaya.

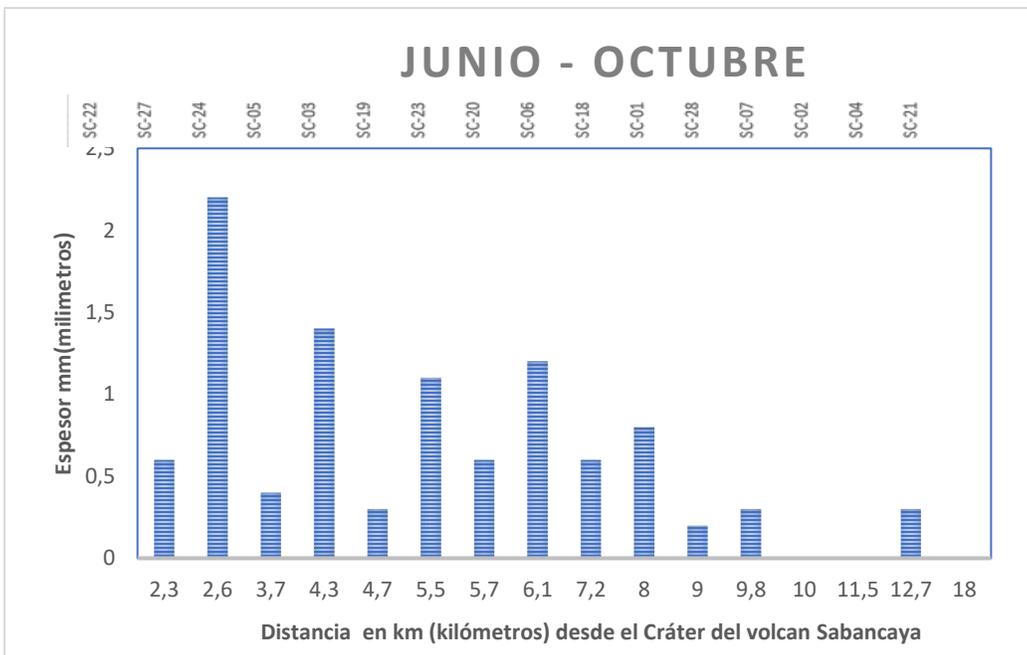


Figura 6.3. Medidas de espesor de ceniza acumulada desde junio - octubre del 2019 con respecto a la distancia en km, provenientes de los cenizómetros más proximales al área del volcán Sabancaya.

Cabe destacar que, los días 27 y 28 de noviembre de 2019 se reportó caída de cenizas en los poblados del valle del Colca; ocasionado por explosiones de altura máxima de 2200 m sobre el borde



Figura 6.3. Caída de ceniza en el colegio de Maca.



Figura 6.4. Caída de ceniza en el poblado de Maca.

Lari: la caída de ceniza ha sido leve teniendo un espesor de 0.08 mm medida y obtenida del cenizómetro SC-16 (Figura 6.7 y 6.8), esta ha sido mayormente de partículas finas de color gris claro con partículas gris oscuras (Material juvenil) y blanquecinas (material hidrotermalizado y oxidado), Tabla 6.4.

Tabla 6.4. Estudio de la caída de ceniza en el poblado de Lari.

Lari
Espesor: 0.08mm
Peso de la muestra de ceniza: 0.92gr
Densidad por área: 16.807 g/m ²
Densidad del depósito de caída de ceniza: 210.087 kg/m ³



Figura 6.5. Medida de 0.08 mm de caída de ceniza en Lari, los días del 27 y 28 de noviembre.



Figura 6.6. Caída de ceniza fina en el puesto de salud de Lari.

6.3 Análisis por Lixiviación

Las cenizas en las columnas eruptivas pueden emitir y depositar compuestos volátiles como azufre, halógeno y especies metálicas. Posteriormente, estos compuestos al ser lixiviados liberan cargas pesadas en suelos y cuerpos de agua. La lixiviación resultante pone en riesgo los medios acuáticos, vegetales y suelos, así como la salud humana y de los animales (Witham et al., 2005).

6.3.1 Metodología

El método actual para cuantificar volátiles adsorbidos en cenizas en plumas volcánicas es lixiviar las muestras de cenizas depositadas con soluciones conocidas y analizar el lixiviado en busca de iones y elementos. Según Withman (2005) los estudios de lixiviación se realizan por cuatro razones principales:

1. Para ser usadas como representativas para concentraciones de gas volcánico
2. Investigación o impacto ambiental (incluyendo efectos en suelos, cosechas, alga, aguas oceánicas, nieve y salud humana)
3. Investigación en química y procesos de absorción
4. Para determinar los orígenes del material absorbido.

6.3.2 Datos

Para determinar los orígenes del material absorbido. Se procedió a tomar muestras de ceniza en los alrededores del volcán Sabancaya durante una campaña, la cual, se realizó del 9 al 13 de abril del 2019. Se pudo recolectar 1 muestra (Tabla 6.5), cuya descripción se observa en el siguiente cuadro:

Tabla 6.5. Resultados de ceniza lixiviada. El periodo de muestreo fue del 9 al 13 de abril.

Fluorita	Clorita	Sulfato	Na	Mg	K	Ca
225	433.333	2,275.00	175	75	66.667	866.667
Sr	Li	SiO ₂	Al	AS	Cd	
5.3	0.033	41.667	87.083	0.083	0.017	

6.3.3 Interpretación

La concentración de elementos de la muestra de ceniza es propia de la característica de las erupciones del volcán Sabancaya. Las concentraciones de metales, fluoruros, sulfuros, nitratos, etc., son suficientemente altas para otorgar al agua un sabor metálico muy notorio para la gente y los animales de los alrededores del volcán, si estas cenizas entrarían en contacto con las principales fuentes de agua de la zona.

La mayoría de los elementos no representan un peligro para la salud; sin embargo, la concentración del fluoruro se encuentra en un rango máximo (Tabla 6.5) permisible por la Organización Mundial de la Salud (WHO), es por lo cual que en lugares donde hay mucha caída de ceniza, acumulación por erupción o continuas emisiones de las mismas, quizás puede ocasionar graves problemas a la salud (Fluorosis dental); por otro lado, la concentración de SO₄, es alta (Tabla 6.5) por lo cual esta

es liberada en forma de gas al momento de la caída de la ceniza afectando a las vías respiratorias por lo cual es recomendable el uso de mascarillas.

6.4 Componentes y granulometría

Las cenizas emitidas desde abril del 2019 contienen principalmente líticos juveniles de colores grises claros y grises oscuros, cristales mayormente de plagioclasa, pocos olivinos y piroxenos; y una cantidad de partículas oxidadas e hidrotermalizadas (Figura 6.9 ,6.10 y 6.11).

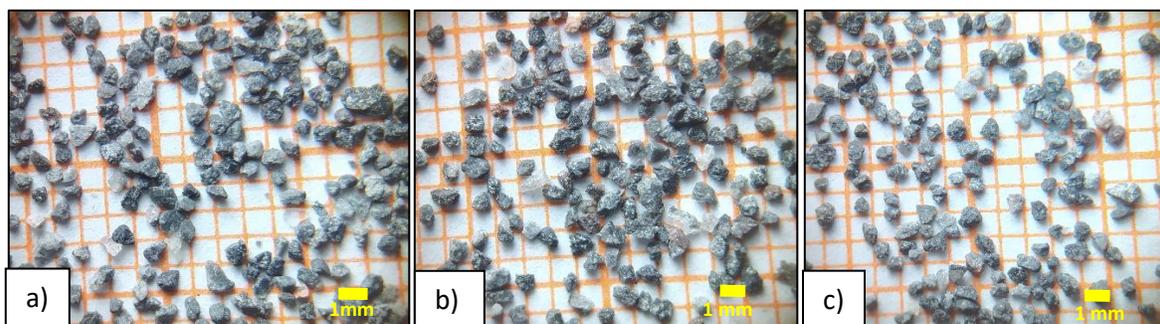


Figura 6.7. Muestras de ceniza recolectada de los periodos: a) abril-junio, b) julio-agosto, c) setiembre-octubre.

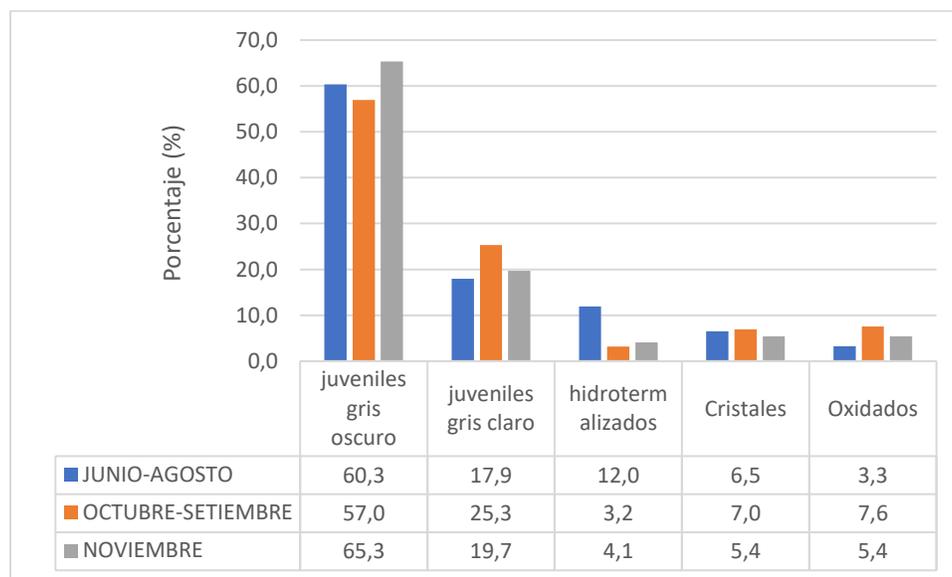


Figura 6.8. Gráfica de porcentajes de partículas de las muestras de ceniza vs componente.

Se observa un incremento de partículas hidrotermalizadas en el periodo de junio - agosto esto es probablemente debido a que en ese periodo las explosiones han alcanzado alturas de hasta 4400 m.s.c. y han extraído material del conducto; los demás periodos se mantienen con partículas hidrotermalizadas y oxidadas entre 7.6 y 5.4 %.

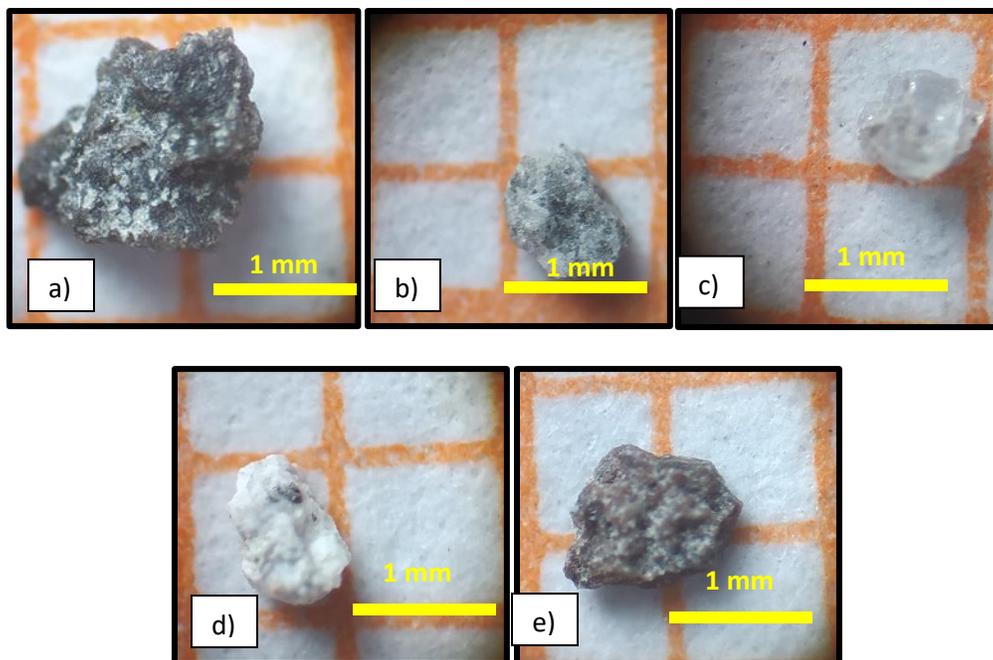


Figura 6.9. a) Lítico juvenil gris oscuro; b) Lítico juvenil gris Claro; c) Cristal de plagioclasa; d) Lítico no juvenil Hidrotermalizado; e) Lítico no juvenil Oxidado.

6.4.1 Distribución granulométrica y análisis de parámetros estadísticos

El objetivo del análisis granulométrico es conocer sus condiciones de sedimentación mediante la cuantificación de los parámetros granulométricos, que nos permiten establecer su grado de selección, distancia recorrida, niveles de energía, etc. (Spalletti, 1980).

6.4.1.1 METODOLOGÍA

El método utilizado para el análisis granulométrico, consiste en hacer pasar una muestra de 2 kg a través de una serie de mallas (tamices) con diferentes diámetros de apertura, que van desde - 31.5 mm hasta 0.032 mm. El tamizado se realizó de forma manual. Las proporciones retenidas en cada malla ("refus"), son pesadas en una balanza de precisión 0.01 g y los resultados son anotados en una libreta (Tabla 6.6). Luego los tamices son limpiados cuidadosamente para evitar contaminaciones entre muestras.

- **PRESENTACIÓN GRÁFICA DEL ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO Y PARÁMETROS ESTADÍSTICOS**

Para llevar a cabo el análisis estadístico, previamente se convierte los diámetros de las partículas expresadas en milímetros (mm) a unidades Phi (Φ). La escala phi, fue definida por Krumbein en 1934 como el Logaritmo negativo de base 2 del tamaño de grano en milímetros:

Phi (Φ). = $-\log_2 N$, donde: N = tamaño de grano en mm ó la apertura de cada malla en mm.

Los datos obtenidos son representados gráficamente en histogramas, donde el eje Y van los diámetros de las partículas que están expresadas en unidades (Φ), mientras en que el eje X van los pesos en cada fracción retenida expresadas en porcentaje (%). Para graficar los histogramas se utilizó el software SFT Kware de acuerdo con el método de fragmentación y transporte secuencial (Sequential Fragmentation SFT por su sigla en inglés).

Tabla 6.6. Ensayos granulométricos del depósito.

Tamiz (um)		Sab-19-36			Sab-19-32			Sab-19-40		
		Peso	Peso	Peso Acum.	Peso	Peso	Peso Acum.	Peso	Peso	Peso Acum.
(mm)	Phi	(gr)	(%)	(%)	(gr)	(%)	(%)	(gr)	(%)	(%)
500	1	1.52	2.12	2.12	0.79	4.81	4.81	0.00	0.00	0.00
250	2	14.31	20.00	22.12	3.06	18.61	23.42	0.01	0.72	0.72
180	2.5	13.85	19.36	41.48	3.82	23.24	46.65	0.12	8.70	9.42
125	3	12.99	18.16	59.64	3.79	23.05	69.71	0.47	34.06	43.48
90	3.5	6.24	8.72	68.36	2.18	13.26	82.97	0.40	28.99	72.46
63	4	9.45	13.21	81.57	1.32	8.03	91.00	0.24	17.39	89.86
32	4.5	12.40	17.33	98.90	1.47	8.94	99.94	0.14	10.14	100.00
<32	5	0.79	1.10	100.00	0.01	0.06	100.00	0.00	0.00	100.00
Total		71.55			16.44			1.38		

- PARÁMETROS ESTADÍSTICOS

Los parámetros estadísticos según Folk (1965) e Imman (1952), incluyen la mediana (Md), media (Mz), desviación estándar (σ), asimetría (SkG) y curtosis (KG).

Tabla 6.7. Cuadro resumen de los parámetros granulométricos de las muestras analizadas.

Código	Mediana (Md) Inman	Media (Mz) Folk	Desviación Estándar (σ) folk	Asimetría (SkI) Flok	Kurtosis (KG) Flok
Sab-19-36	2.7	2.83	1.15	0.14	0.89
Sab-19-32	2.55	2.57	1.01	0.03	1.13
Sab-19-40	3.05	3.07	0.74	0.05	0.92

Mediana (Md). Según Folk (1965), es el punto medio de la distribución o el tamaño de grano para el que el 50% de la muestra es más fina y el 50 % más gruesa.

$$Md \phi = \phi 50.$$

Media (Mz). Según Folk (1965), es el tamaño promedio-aritmético, de la distribución de granos. Para el cálculo de la media (de manera gráfica) se utiliza la siguiente fórmula:

$$Mz = (\phi 16 + \phi 50 + \phi 84) / 3$$

Desviación estándar gráfica ($\sigma\phi$). Según Folk (1965) Corresponde al coeficiente de la dispersión o sorteo, refleja la variación del tamaño de grano adentro de la población. El índice de sorteo se define mediante la siguiente escala:

Clasificación ($\sigma\phi$)	Depósito piroclástico
< 0,35	Muy bien sorteado
0,35 - 0,50	Bien sorteado
0,50 - 0,71	Moderadamente bien sorteado
0,71 - 1	Moderadamente sorteado
1,0 - 2,0	Mal sorteada
2,0 - 4,0	Muy mal sorteado
> 4	Extremadamente mal sorteado

Asimetría (Sk). Según Folk (1965) Un valor positivo indica el desvanecimiento de la curva a la derecha de la media, con un exceso de partículas finas. Un valor negativo indica un desvanecimiento de la curva a la izquierda de la media, con un exceso de gruesos. Los resultados se interpretan en base a los siguientes intervalos

Kurtosis (KG). Las curvas se denominan Leptocurticas o puntiaguda si la porción central de la curva es mejor seleccionada. Si ocurre lo contrario la curva es platicurtica o achatada. Una kurtosis con valor de 1 indica que la curva tiene distribución log normal; una aproximación a esta distribución da como resultado una curva mesocurtica.

Clasificación	Kurtosis
< 0.67	Muy platicúrtica
0.67 - 0.90	Platicúrtica
0.90 - 1.11	Mesocúrtica
1.11 - 1.50	Leptocúrtica
1.50 - 3.00	Muy leptocúrtica
>3.00	Extremadamente leptocúrtica

- RESULTADOS DE LOS PARÁMETROS ESTADÍSTICOS

Mediante los resultados de los parámetros estadísticos obtenidos, se puede evaluar las características de generación y emplazamientos de 3 muestras dentro del área de estudio.

- La muestra Sab-19-32 tiene una distribución unimodal (Figura 6.12 y tabla 6.6). La mediana (Md) presentan un valor de 2.55 ϕ , mientras que el tamaño de promedio de grano (Mz) es de 2.57 ϕ . El depósito está mal sorteado (σ), cercanamente simétrica (Sk1) y curva Leptocúrtica

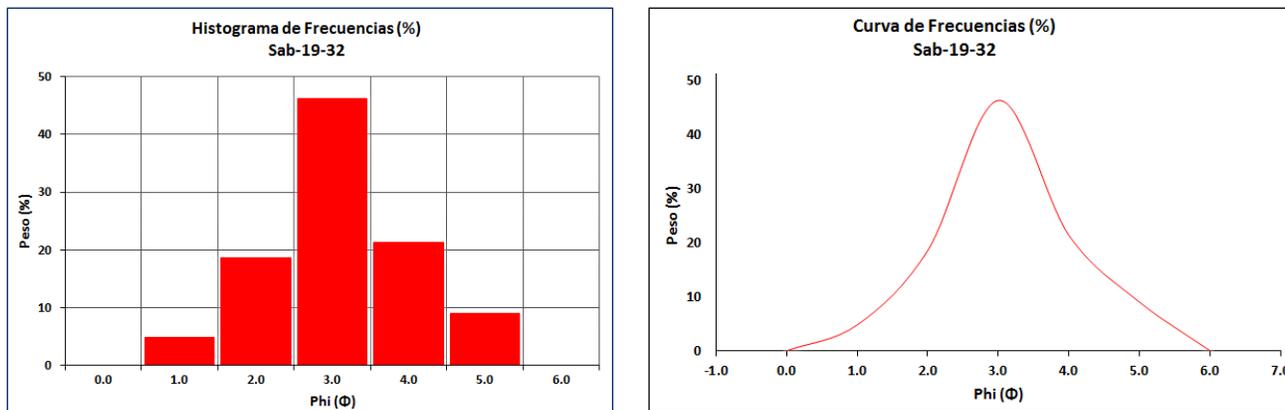


Figura 6.10. Histogramas de frecuencia y curvas de frecuencia.

- La muestra Sab-19-36 tiene una distribución unimodal (Figura 6.13 y tabla 6.6). La mediana (Md) presentan un valor de 2.7 ϕ , mientras que el tamaño de promedio de grano (Mz) es de 2.83 ϕ . El depósito está mal sorteado (σ), con asimetría positiva (Sk1) y curva Platicúrtica.

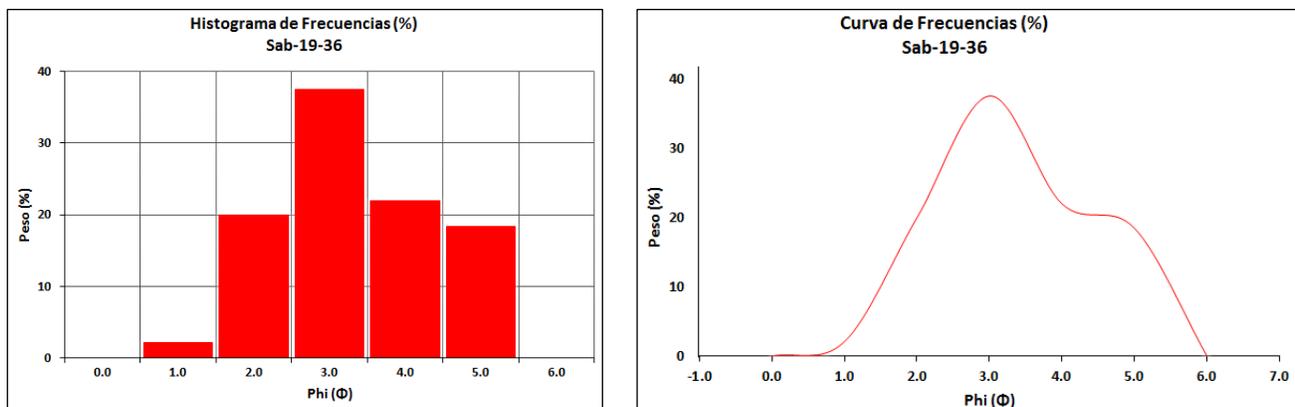


Figura 6.11. Histogramas de frecuencia y curvas de frecuencia.

- La muestra Sab-19-40 tiene una distribución unimodal (Figura x y tabla x). La mediana (Md) presentan un valor de 3.05 ϕ , mientras que el tamaño de promedio de grano (Mz) es de 3.07 ϕ . El depósito presenta un sorteo moderado (σ), cercanamente simétrica (Sk1) y curva Mesocúrtiva.

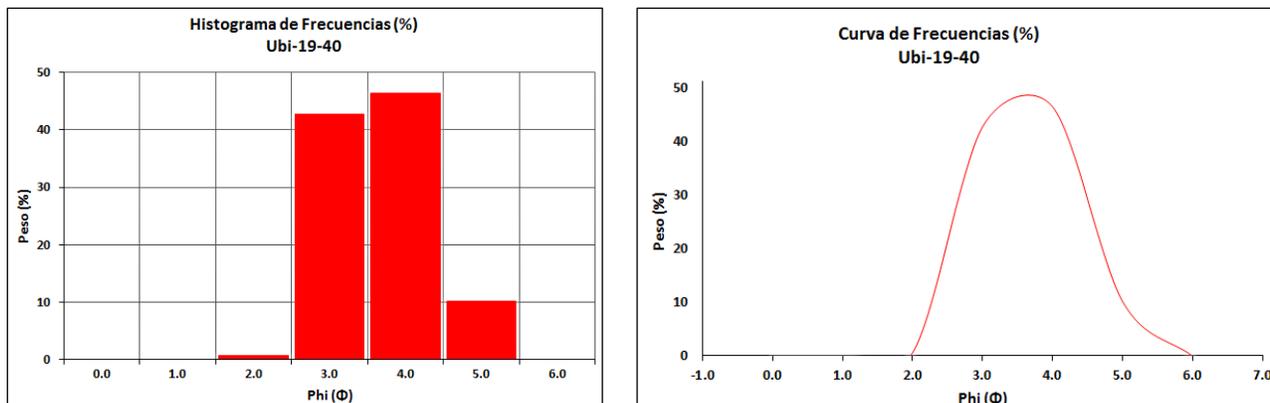


Figura 6.12. Histogramas de frecuencia y curvas de frecuencia.

6.4.1.2 INTERPRETACIÓN DE LOS PARÁMETROS ESTADÍSTICOS

Los depósitos presentan curvas con tendencia unimodal, esto indica que la sedimentación del tamaño de partículas es variable según la distancia al cráter, influenciada por la dirección del viento (Biss and Bonadonna, 2011).

La mediana (Md) presenta valores entre en 2.55 a 3.05 ϕ y la media 2.57 a 3.07 ϕ . Esto indica que mientras más alejado del cráter la mediana y media se acerca a los valores positivos (partículas finas), esto se debe a la dispersión de las partículas a causa de la dirección de viento (sotavento).

El depósito está moderadamente sorteado a mal sorteado, lo que indica un mejor ordenamiento de las partículas por acción del viento (sotavento) generando una sedimentación de partículas de forma homogénea, así también influenciada por el cambio de dirección del viento ocurrida en zona distal.

La asimetría (Sk1) en el depósito presentan un equilibrio con tendencia hacia los finos, esto debido a la densidad de las partículas, fuerza e influencia seleccionadora del viento paralela al eje de dispersión.

Las curvas presentan una variación entre platicúrtica a leptocúrtica, que indica una moderada selección del depósito.

6.5 Geoquímica

Se ha realizado el análisis geoquímico de elementos mayores y trazas de los depósitos de caída de ceniza recolectados de las explosiones y emisiones del volcán Sabancaya en el año 2019.

Los métodos empleados para el análisis de elementos mayores y trazas fueron: ICP-OES, ICP-OES/AAS e ICP-MS.

La composición química de los productos emitidos (Ceniza) por el volcán Sabancaya, de acuerdo a la clasificación internacional, el diagrama de Total de alcalinos vs Sílice, de Le Bas et al., 1986 (TAS), se observa la composición de la ceniza es andesítica-dacita (60-65 wt. % SiO₂; 6-8 wt. % K₂O) (Figura 6.15), este resultado ha sido comparado con la composición del periodo eruptivo 1988-1989 del volcán Sabancaya (Rivera et. al., 2015), indica que los actuales productos presentan una similitud con los productos emitidos en ese periodo eruptivo (Figura 6.15)

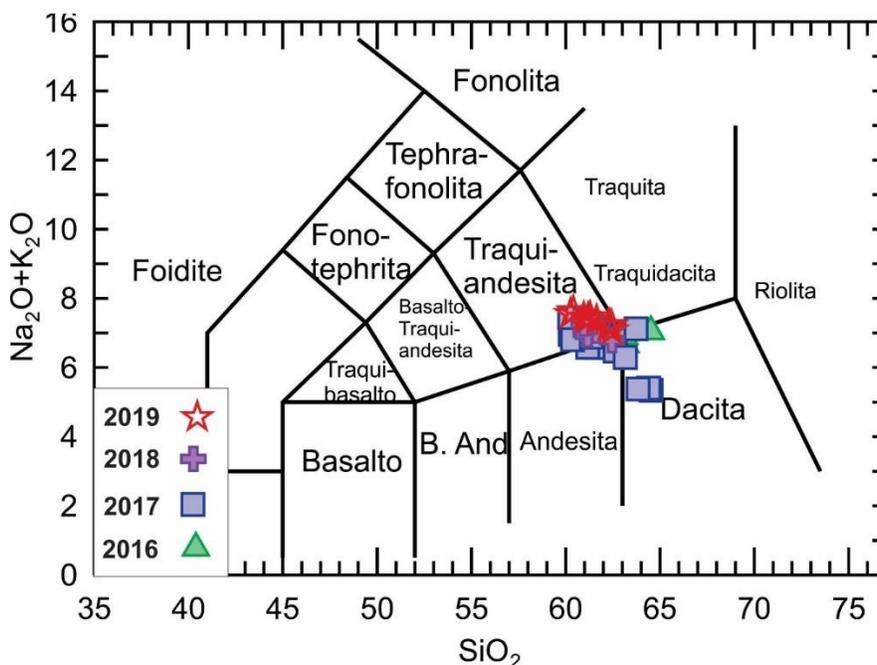


Figura 6.13. Diagrama de clasificación de los productos emitidos (ceniza) en 2019 por el volcán Sabancaya. Le Bas et. al., (1986).

Por otro lado, en el diagrama K₂O en función de SiO₂ de Pecerrillo y Taylor (1976), se observa que la ceniza emitida por el volcán Sabancaya pertenecen a la serie Calcoalcalina rica en potasio (Figura 6.16), dando como resultado una composición andesítica - dacítica.

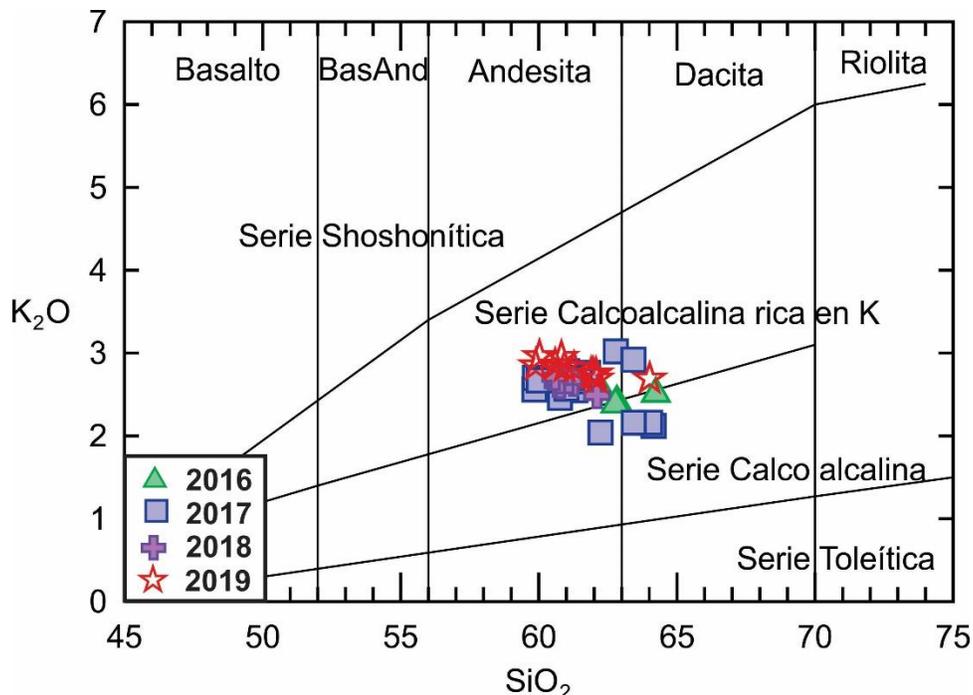


Figura 6.16. Composición química de la ceniza a lo largo del proceso eruptivo de los años 2016, 2017, 2018 y 2019.

En los diagramas de Harker se plotean los óxidos en función a la SiO_2 , el cual, muestra un espectro homogéneo de composición y permite observar claramente las variaciones geoquímicas. Además, estos diagramas permiten poner en evidencia los procesos que controlan la evolución magmática como la cristalización fraccionada o la mezcla de magmas.

Con respecto a los elementos mayores, el TiO_2 , MgO , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , Na_2O y P_2O_5 se puede observar tendencias ligeramente negativas con respecto al SiO_2 . Para las muestras se observa una ligera dispersión de K_2O (Figura 6.17).

La disminución de Na_2O indicaría el fraccionamiento de la plagioclasa en las andesitas. La tendencia negativa del MgO y CaO (Figura 6.17) sugeriría la cristalización del clinopiroxeno, ortopiroxeno y anfíbol desde las andesitas a dacitas. Mientras que, la disminución de Fe_2O_3 puede estar asociada al fraccionamiento del titanio-magnetita.

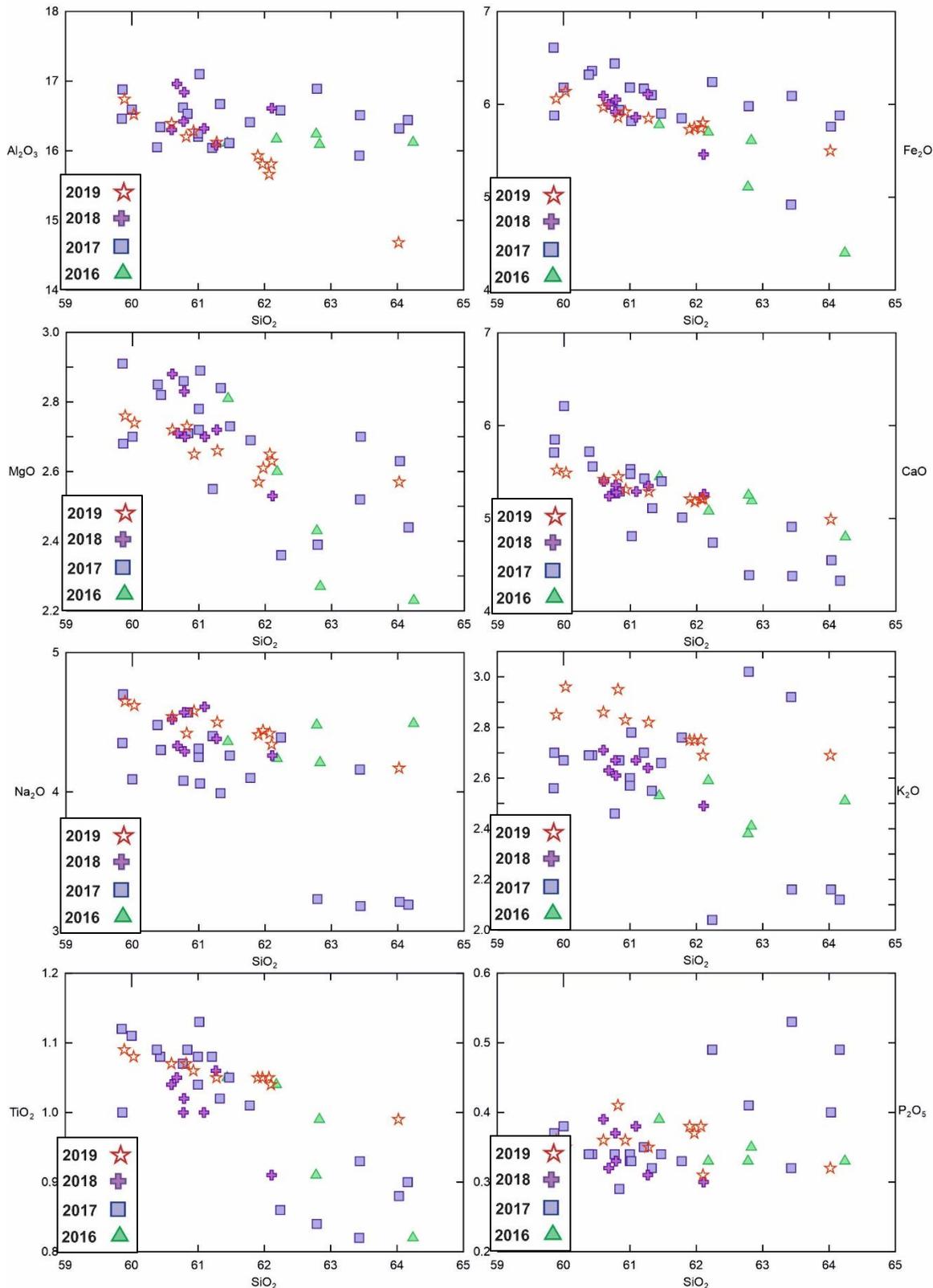


Figura 6.14. Diagramas de Harker que muestran las variaciones de elementos mayores en función de la sílice.

6.6 Mapa de Isópacas

Desde enero hasta octubre del presente año se han realizado medidas de espesores de caída de cenizas en el sector sureste del volcán Sabancaya determinando que entre 2 a 10 km, hay espesores de 4.7 a 1.0 mm, y a 13 km espesores de 0.3 mm.

Estos resultados han permitido elaborar un mapa de Isópacas (líneas que unen puntos de igual espesor de un depósito) de la ceniza acumulada desde enero hasta el mes de agosto, el cual, indica que la dirección predominante de la dispersión y caída de ceniza fue hacia el sureste (Figura 6.18).

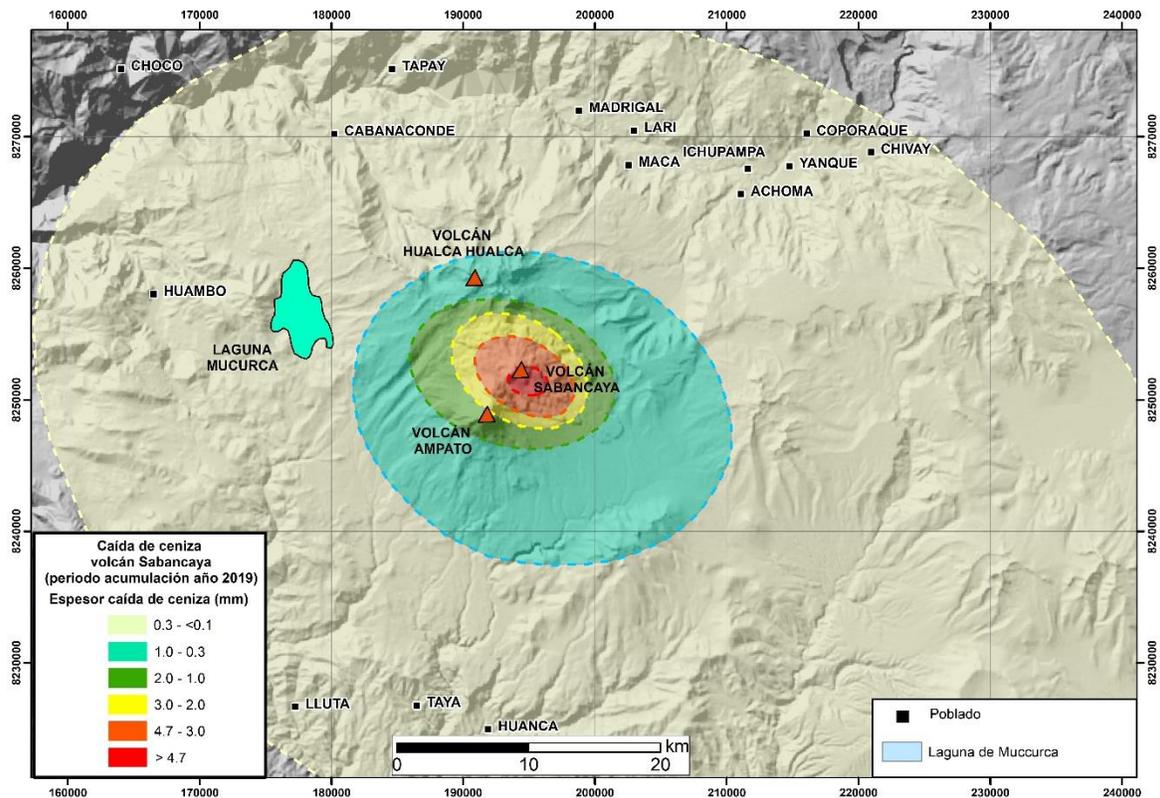


Figura 6.15. Mapa de Isópacas de la caída de ceniza producidas por el volcán Sabancaya durante el 2019; Las elipses representan los espesores de isópacas medidos en los cenizómetros.

7 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En la Figura 7.1, se puede apreciar el comportamiento de cada parámetro monitoreado en función del tiempo: actividad sísmica (a, b y c), flujos de SO₂ (d), deformación superficial (e), altura de emisiones (f) y anomalías térmicas (g); los cuales, mostraron claros e importantes patrones asociados a procesos de intrusión magmática e importante extrusión del domo de lava ubicado en el cráter activo del volcán Sabancaya.

Se han identificado 04 periodos:

1. 01 enero – 21 mayo; se evidencia un proceso de inflación constante, ocurrencia de 01 enjambre de sismos volcánico – tectónicos (el 21 de mayo con 341 sismos), ambos parámetros indicaron el aumento de presión debido a un importante aporte de magma profundo hacia la superficie, los valores de flujos de SO₂ se mantenían moderados y algunas anomalías térmicas indicaron ya la presencia del magma muy cerca de la superficie que finalmente terminaron con la ocurrencia de explosiones constantes y energéticas que fueron seguidas por emisiones continuas de gases y ceniza alcanzando alturas promedios de 1.5 km. Por otra parte, en este periodo se aprecia un pulso importante en la energía de los sismos de largo periodo – LP (> 100 Megajoules) asociados a la dinámica de fluidos que reflejaban el continuo crecimiento del domo de lava.
2. 22 mayo – 05 setiembre; la inflación asociada a la intrusión de magma profunda continúa de manera constante, a su vez, en este periodo se vuelve a registrar 02 enjambres de sismos volcánico – tectónicos (14 de agosto con 825 sismos y el 01 de setiembre con 135 sismos), indicando nuevos aportes de magma que se produjeron de forma más periódica, estas migraciones de magma hacia la superficie se reflejaron en los registros de anomalías térmicas con valores moderados y a su vez valores altos de flujos de SO₂ (> 10 000 toneladas); durante este periodo, las emisiones de ceniza fueron mucho más continuas con alturas promedios de 2 km aproximadamente. Respecto al crecimiento del domo, la energía sísmica liberada por los sismos de largo periodo fue baja (< 10 Megajoules) indicando posiblemente un crecimiento relativamente lento del domo de lava.
3. 06 setiembre – 15 noviembre; en este periodo la inflación asociada a la intrusión profunda disminuye, por otra parte, se registraron 02 pequeños enjambres de sismos volcánico - tectónicos (el 15 de setiembre con 419 sismos y el 04 de octubre con 171 sismos), indicando pequeñas intrusiones magmáticas, sin embargo, en este periodo se vuelve a registrar picos de incremento en la energía de los sismos de largo periodo (~40 Megajoules) y además se observa un claro incremento en la energía sísmica de las explosiones, lo cual, se asoció a un proceso de aceleramiento en el crecimiento del domo; durante este periodo se observó un ligero descenso en la altura de las emisiones, probablemente a causa del importante cuerpo de lava que obstaculiza el conducto no permitiendo que las emisiones de gases y ceniza

salgan en su totalidad sino parcialmente; las alturas promedio registradas fueron de 1.5 km aproximadamente.

4. 16 noviembre – 15 diciembre; la tasa de inflación se recupera, indicando el inicio una nueva intrusión, así mismo, el flujo de SO₂ alcanza la 10 000 toneladas el día 28 de noviembre, sin embargo, el registro de los sismos volcánico – tectónicos (< 100 sismos por día) aún indican que son pequeños aportes de magma; por otra parte, la sismicidad asociada a la dinámica de fluidos (LP) y la actividad explosiva en este periodo han mostrado una disminución importante en su energía sísmica, sugiriendo que nuevamente nos encontramos en un periodo donde el crecimiento del domo de lava es relativamente lento.

El intervalo de tiempo de los eventos acoplados registrados en este periodo, estarían indicando que las explosiones se estarían generando a profundidades someras entre 1 – 3 km, lo cual, explicaría el incremento en la altura de las emisiones con respecto al periodo anterior (alturas de hasta 3 km apróx).

Con base en la información generada a través del monitoreo multidisciplinario, los resultados indican que el comportamiento del volcán Sabancaya permanece en un contexto de una erupción moderada, relacionada con periodos de intrusión magmática, importante crecimiento y destrucción parcial de un domo de lava ubicado en el cráter activo, cuya dinámica interna genera una actividad explosiva con periodos de incremento y descenso de emanación de material particulado (ceniza) y en ocasiones proyectiles balísticos alrededor del cráter; todo lo anterior sugiere el accionar de posibles reservorios magmáticos superficiales (2-3 km de profundidad aproximadamente) (Fig. 7.2).

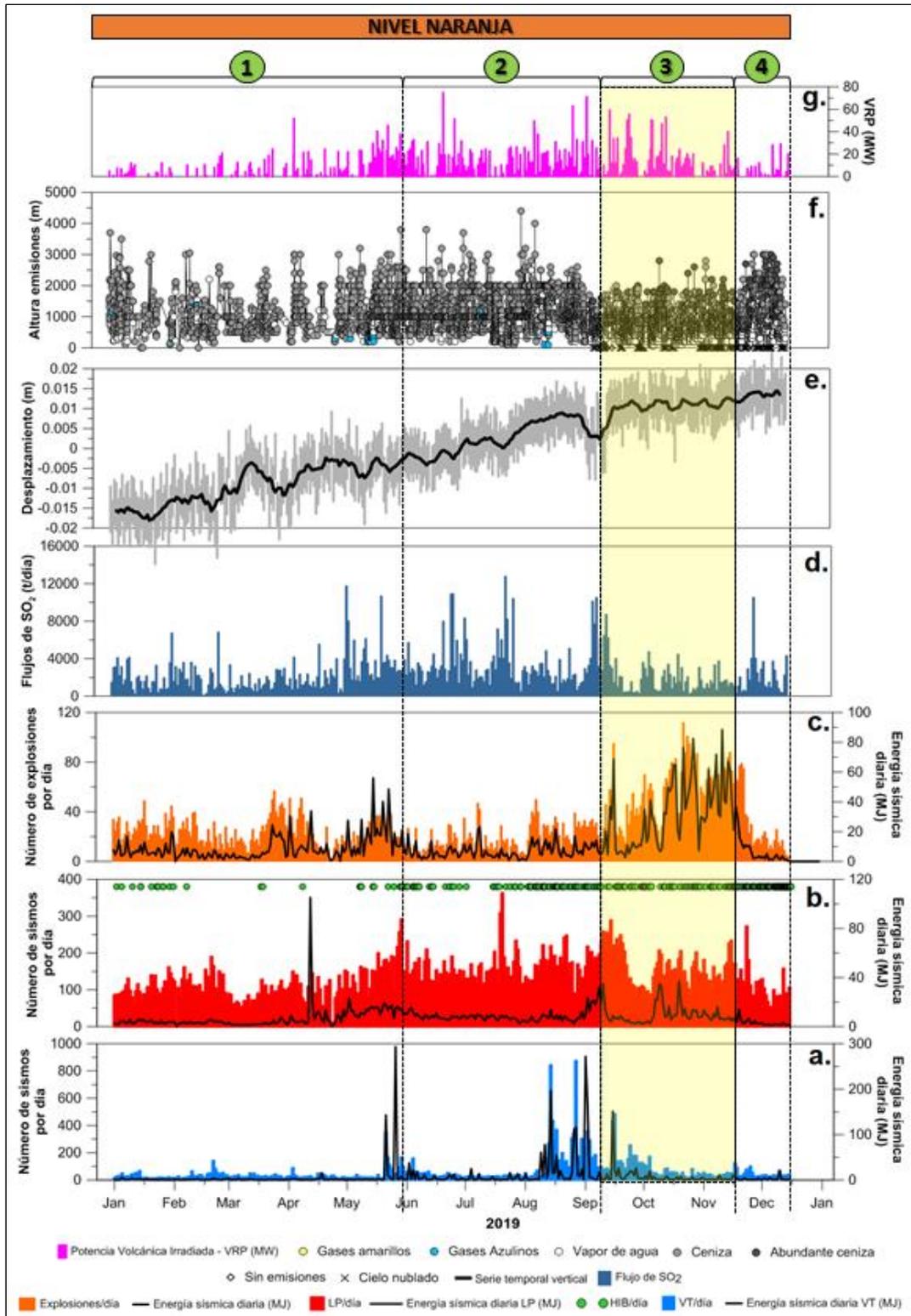


Figura 7.1. Evolución temporal de la actividad explosiva en base a los parámetros de monitoreo: **a.** Número de sismos VT por día y su energía sísmica diaria; **b.** Número de sismos LP por día y su energía sísmica diaria; **c.** Número de explosiones por día y su energía sísmica diaria; **d.** Valores de flujos de SO₂ registrados a diario; **e.** Serie temporal vertical correspondiente a la estación SBHO; **f.** Altura y coloración de las emisiones y **g.** Valores de las anomalías térmicas registradas en MIROVA.

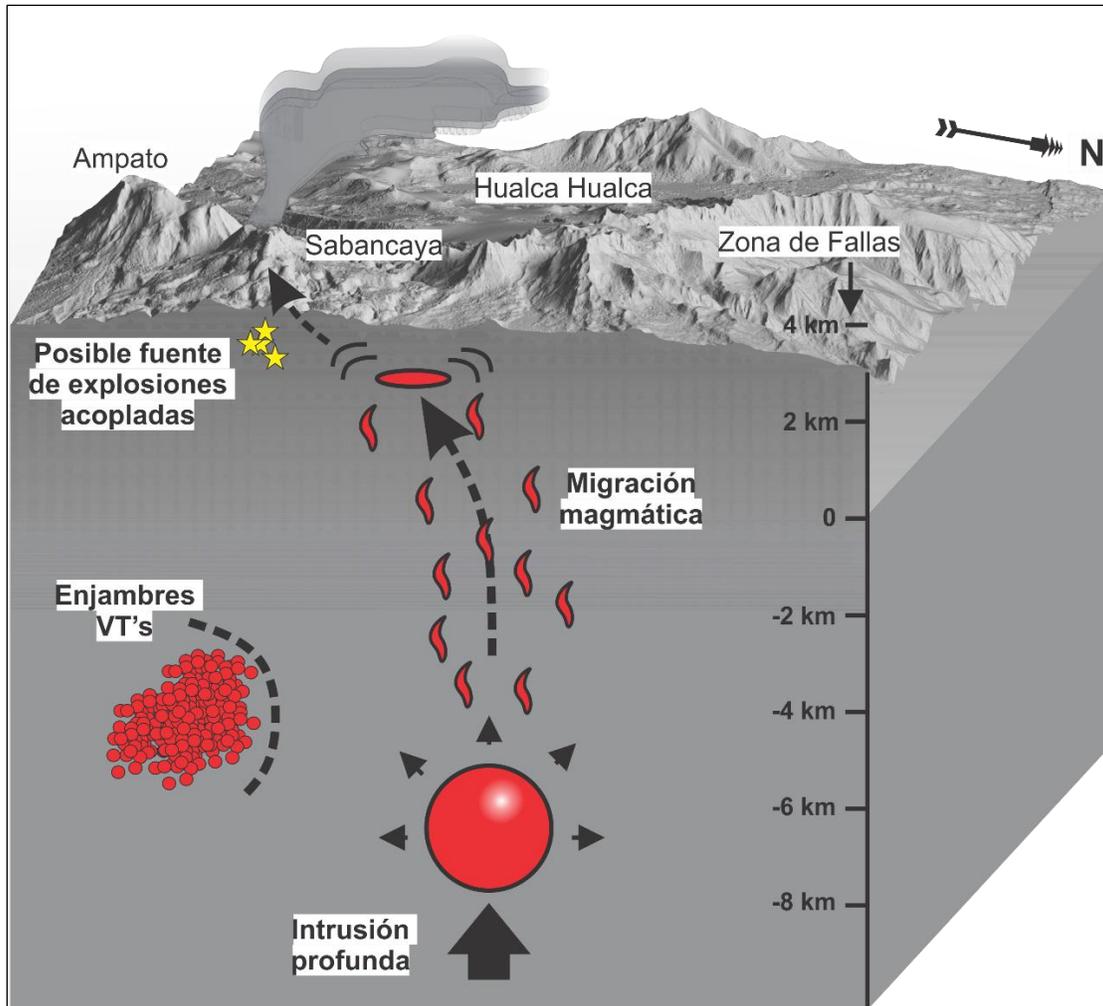


Figura 7.2. Esquema del modelo conceptual de la interacción magmática para el volcán Sabancaya (Modificado de L. Cruz, 2019).

8 CONCLUSIONES

- Las variaciones del sistema hidrotermal del Sabancaya, se ha evidenciado en el aumento de la temperatura e incremento de los compuestos del agua. Esto tiene un origen en el mayor aporte de magmático.
- El seguimiento del gas magmático (SO₂) muestra periodos de incremento, los que están asociados al ascenso magmático desde la cámara magmática principal. Estos incrementos alcanzaron la denominación de flujos muy grandes (> 10000 toneladas/día) entre los meses de mayo a septiembre y además diciembre.
- La vigilancia de deformación volcánica ha evidenciado dos procesos de deformación; el primero está relacionado a la inflación (aproximadamente 1 – 3 cm/año en la componente horizontal y 3 – 4 cm/año en la componente vertical) en todo el complejo volcánico Ampato Sabancaya hasta el norte del volcán Hualca Hualca y el segundo está asociado a las intrusiones del magma profundo hacia la superficie.
- El modelamiento inverso de los datos GPS sugieren que la inflación principal es producto de la intrusión de un magma profundo hacia una cámara magmática ubicada 12 – 15 km por debajo del volcán Hualca Hualca, con un cambio de volumen anual aproximado de $46.69 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$, cuyo campo de tensiones se asemeja al de una esfera de 1.5 – 2.0 km de radio.
- El mapa de velocidades de deformación obtenido con imágenes InSAR ubica que la mayor área de deformación superficial se encuentra al norte del volcán Sabancaya, aproximadamente por debajo del volcán Hualca Hualca. Esto corrobora el modelamiento de la fuente de deformación con datos GPS.
- El volcán Sabancaya durante el año 2019 continuó presentado una actividad moderada con respecto al año 2018, se registraron señales sísmicas asociadas al fracturamiento de rocas en el interior el edificio volcánico y la actividad de fallas geológicas en la zona, en este periodo de análisis, se registraron 04 enjambres de sismos volcano – tectónicos (21 mayo, 14 agosto, 15 setiembre y 04 octubre) indicando periodos de intrusión magmática de una cámara profunda a una más superficial.
- Se han localizado 1873 sismos de ruptura (VT) durante el 2019, los cuales se ubicaron principalmente al Noreste, Norte, Noroeste y Oeste del volcán, con profundidades que llegaron hasta los 16 km y magnitudes entre 0.1 y 4.1 MI. Se han observados focos sísmicos, localizados entre 3 y 7 km del volcán y registrados entre marzo-abril, mayo y agosto – diciembre.
- Los sismos de largo periodo (LP) relacionados con la dinámica de fluidos y gases al interior del o de los conductos volcánicos, se asociaron en ciertos periodos al crecimiento de un domo de lava en la superficie del cráter.
- Entre setiembre y noviembre del 2019 se registró un incremento en la actividad explosiva tanto en número y energía, inclusive niveles más altos a los registrados al inicio del proceso eruptivo (noviembre del 2016), este comportamiento probablemente este sugiriendo un aceleramiento en la tasa de extrusión del domo de lava.

- Se registraron hasta 03 tipos de explosiones: discretas, seguidas de tremor volcánico y eventos acoplados, estos últimos indican que la diferencia de tiempo entre el inicio de la primera señal y la segunda, es proporcional a la profundidad, en tal sentido, este tipo de explosiones se estarían generando a profundidades superficiales entre 1 y 3 km por debajo del cráter.
- Se registraron periodos de tremor volcánico de tipo espasmódico asociado a emisiones de gases y ceniza, se pudo determinar que frecuencias altas del tremor indicaban mayor contenido de ceniza, por el contrario, bajas frecuencias indicaron poco contenido de ceniza en las emisiones. Por otra parte, se apreciaron aumentos y disminuciones en la amplitud y sugiriendo que este comportamiento posiblemente este reflejando la interacción entre el sistema magmático y el hidrotermal.
- El 11 de diciembre, se registró la ocurrencia de 06 explosiones energéticas que liberaron importante contenido de ceniza y las cuales, fueron seguidas por señales de altas frecuencias (hasta 20 Hz) que se correlacionaron con la ocurrencia de pequeños flujos piroclásticos con dirección SE y que alcanzaron distancias aproximadas de hasta 1.5 km del cráter.
- El volcán Sabancaya actualmente viene siendo monitoreado por cinco cámaras, las cuales han permitido determinar alturas máximas en cada proceso eruptivo, siendo de 4400 metros sobre el cráter la máxima altura anual registrada el 1 de agosto el 2019, pero durante todo el año se registraron columnas de fumarolas con alturas entre los 3000 y 3800 m.s.c., además la dirección predominante de la dispersión de las cenizas fue al SO.
- El crecimiento de un domo de lava desde el 2017 al norte del cráter, ha sido visualizado mediante diferentes tipos de imágenes satelitales, este domo tiene un área de aproximadamente 57000 m² y ha presentado una tasa de crecimiento superficial de 430 m²/día.
- Los sobrevuelos con dron muestran que el domo se ha emplazado en el cráter del Sabancaya ocupando ya el 70 % del mismo presentado un fracturamiento radial con cambios sustanciales en su morfología debido a las continuas emisiones de han desplazado parte del domo hacia el SE cubriendo el cráter antiguo.
- La ocurrencia de la Flujos piroclásticos del tipo Boiling – Over en el flanco SE del volcán fueron registrados por primera vez por las cámaras, desplazándose aproximadamente casi 1.5 km hacia abajo, este fenómeno se repitió hasta en 6 ocasiones, permitiendo al área de sismología caracterizar este tipo de eventos a través del registro de señales sísmicas.
- Se cuenta con 43 cenizómetros ubicados en los sectores proximales, mediales y distales del volcán Sabancaya, los cuales, nos permiten cuantificar la caída de ceniza en el lugar.
- Según el mapa de isópacas se demuestra que la dirección predominante de la dispersión de cenizas fue hacia el sector sureste del volcán Sabancaya. La medida de espesor máximo acumulado se estimó en el cenizómetro SC-37 ubicado en la SAB-07 esta fue de 4.7 mm.
- En general, los componentes de las cenizas no representan un peligro para la salud de las personas y los animales. Sin embargo, la concentración del fluoruro y sulfatos pueden ser perjudiciales en ciertas circunstancias, especialmente en lugares donde hay mucha ceniza acumulada, quizá puede ocasionar graves problemas a la salud.

- La composición de la ceniza muestreada durante el periodo 2019, oscila entre andesita y dacita (60-65% wt. % SiO₂; 2.5-3 wt % K₂O), mientras que en el diagrama de Peczerillo y Taylor (1976), se observa que la ceniza emitida por el volcán Sabancaya pertenecen a la serie Calcoalcalina rica en potasio.

9 RECOMENDACIONES

Tras un permanente y arduo trabajo de campo y gabinete se recomienda lo siguiente:

- Continuar con el monitoreo del volcán Sabancaya de manera constante, periódica y multidisciplinaria, con la finalidad de establecer continuidad en los registros de la data obtenida a través de las disciplinas (sísmica, visual, deformación, geoquímica).
- Se sugiere implementar el análisis de deformación utilizando imágenes satelitales de radar de apertura sintética, con el fin de validar la ubicación de la cámara magmática modelada.
- Se sugiere implementar el análisis de deformación utilizando los inclinómetros una vez se culmine con la operatividad experimental.
- Mantener el nivel de alerta en NARANJA.
- No acercarse a un radio menor de 12 km del cráter.
- Informarse permanentemente de la situación del volcán a través de los reportes diarios, de actividad y semanales emitidos por el OVI.

10 BIBLIOGRAFÍA

- BATTAGLIA, M.; CERVELLI, P. F. & MURRAY, J. R. (2013b). dMODELS: A MATLAB software package for modeling crustal deformation near active faults and volcanic centers. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 254, 1-4.
- BIASS, S.; BONADONNA, C.; CONNOR, L. & CONNOR, C. (2016). TephraProb: a Matlab package for probabilistic hazard assessments of tephra fallout. *Journal of Applied Volcanology*, 5(1). doi:10.1186/s13617-016-0050-5.
- CLARKE, A. B.; VOIGHT, B.; NERI, A. & MACEDONIO, G. (2002). Transient dynamics of vulcanian explosions and column collapse, *NATURE*. vol 415.
- CRUZ, L. (2019). Análisis de deformación del volcán Sabancaya como herramienta útil en el pronóstico de erupciones periodo 2012-2017.
- DVORAK, J. J. & DZURISIN, D. (1997). Volcano geodesy: The search for magma reservoirs and the formation of eruptive vents. *Reviews of Geophysics*, 35(3), 343-384.
- DZURISIN, D. (2003). A comprehensive approach to monitoring volcano deformation as a window on the eruption cycle. *Reviews of Geophysics*, 41(1).
- FOLK, R. L. (1966). A review of grain size parameters. *sedimentology* 6, 73 - 93 p.
- INMAN, D. L. (1952). Measures of describing the size distribution of sediments. *Jour. Sed. Petrol*, 22, 125 – 145 p.
- HERRING, T.; FLOYD, M.; KING, R. & MCCLUSKY, S. (2010). Introduction to GAMIT/GLOBK. Massachusetts Institute of Technology.
- KRUMBEIN W. C. (1934). Size frequency distribution of sediments. *Jour Sedim. Petrol*. Vol-1, 65 - 77p.
- LE BAS, M.J.; LE MAITRE, R.W.; STRECKEISEN, A. & ZANETTIN, B., (1986). A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram: *Journal of Petrology* 27, p. 745–750.
- MARIÑO, J. (2012). Escenarios eruptivos y mapa de peligros del complejo volcánico Ampato-Sabancaya. Tesis Maestría, Universidad de Nice, Francia, 87 p.
- MCTIGUE, D. F. (1987). Elastic stress and deformation near a finite spherical magma body: resolution of the point source paradox. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 92(B12), 12931-12940.
- PECCERILLO, P. & TAYLOR, S.R. (1976). Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area. Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 58, 63–81.
- PRITCHARD, M. E. & SIMONS, M. (2004). An InSAR-based survey of volcanic deformation in the central Andes. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 5(2).

- RIVERA, M.; MARIÑO, J.; SAMANIEGO, P.; DELGADO, R. & MANRIQUE, N. (2015). Geología y evaluación de peligros del complejo volcánico Ampato - Sabancaya (Arequipa), INGEMMET. Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica, 61, 122 p., 2 mapas.
- RIVERA, MARCO.; AGUILAR, R.; MANRIQUE, N. (2017). Propuesta técnica para la implementación de miradores geoturísticos alrededor del volcán Sabancaya, Región Arequipa. INGEMMET. Informe técnico N° A 6777.
- SAMANIEGO, P.; RIVERA, M.; MARIÑO, J.; GUILLOU, H.; LIORZOU, C.; ZERATHE, S.; DELGADO, R.; VALDERRAMA, P. (2016). The eruptive chronology of the Ampato-Sabancaya volcanic complex (Southern Peru). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. Vol. 323, p. 110-128.
- SPALLETTI, L.A., (1980). Paleoambientes sedimentarios en secuencias silicoclásticas. Serie B Didáctica y Complementaris Nro. 8. Asoc.Geol.Arg. 175 pags.
- WILLIAMS, S.; BOCK, Y.; FANG, P.; JAMASON, P.; NIKOLAIDIS, R.; PRAWIRODIRDJO, L. & JOHNSON, D. (2004). Error analysis of continuous GPS position time series. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 109(B3).
- WITHAM, C.S.; OPPENHEIMER, C. & HORWELL, C.J. (2005). Volcanic ash-leachates: A review and recommendations for sampling methods. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 141, 299-326.
- YANG, X. M.; DAVIS, P. M. & DIETERICH, J. H. (1988). Deformation from inflation of a dipping finite prolate spheroid in an elastic half-space as a model for volcanic stressing. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 93(B5), 4249-4257.