

DIRECCIÓN DE GEOLOGÍA AMBIENTAL Y RIESGO GEOLÓGICO

Informe Técnico N° A6951

INFORME TÉCNICO ANUAL DEL VOLCÁN SABANCAYA, PERIODO 2018

Región Arequipa
Provincia Caylloma
Distrito Achoma



OCTUBRE
2019

Elaborado por:

Área de monitoreo visual:

- Ivonne Lazarte Z.

Área de geología:

- Kevin Cueva S.
- Nélida Manrique Ll.

Área de monitoreo geoquímico:

- Pablo Masías A.
- Fredy Apaza Ch.

Área de monitoreo geodésico:

- Rafael Miranda C.

Área de monitoreo sísmico:

- Mayra Ortega G.
- Rosa Ancassi F.
- Roger Macchaca P.

Área de monitoreo acústico:

- Roger Macchaca P.

Contenido

RESUMEN	4
1.0. INTRODUCCIÓN	5
2.0. MONITOREO VISUAL	6
2.1. Cronología de los eventos	6
2.2. Características de las emisiones.....	6
• <i>Forma y ocurrencia</i>	6
• <i>Dirección predominante</i>	8
• <i>Imágenes representativas de emisiones fumarólicas</i>	9
2.3. Monitoreo satelital.....	15
• <i>Alertas de anomalías térmicas</i>	15
• <i>Alertas de ceniza en suspensión</i>	15
3.0. MONITOREO DE CENIZAS	16
3.1. Muestreo de cenizas por cenizómetros	16
3.2. Red de monitoreo de cenizómetros.....	16
3.3. Muestreo de cenizas por lixiviación	20
3.3.1. Técnica.....	21
3.3.2. Datos	23
3.3.3. Interpretación	23
3.4. Componentes y granulometría	24
3.5. Petrografía de balísticos.....	25
3.6. Geoquímica	27
3.7. Medida de espesores IN SITU.....	28
4.0. MONITOREO GEOQUÍMICO	30
4.1. Monitoreo del flujo de SO ₂	30
4.2. Resultados del monitoreo de los flujos de SO ₂	31
4.3. Monitoreo de fuentes termales	31
4.3.1. Resultados del monitoreo de fuentes termales.....	32
4.3.2. Resultados de temperatura de la Fuente SA3	34
5.0. MONITOREO GEODESICO	36
5.1. Introducción	36
5.2. Implementación de redes de monitoreo	36
5.3. Adquisición, procesamiento y evaluación primaria de datos	37
5.4. Resultados del monitoreo GPS.....	37

5.5.	Series temporales y deformaciones asociadas	38
5.6.	Procesamiento de líneas base GNSS	40
5.7.	Mapa de vectores de desplazamiento	42
5.8.	Modelos de deformación	43
6.0.	MONITOREO SÍSMICO	45
6.1.	Red sísmica de monitoreo	45
6.2.	Trabajo de campo.....	45
6.3.	Operatividad.....	46
6.4.	Procesamiento y análisis de la data sísmica.....	47
6.5.	Sismicidad del volcán Sabancaya	49
6.5.1.	Señales sísmicas representativas	49
6.5.2.	Estadística general y por tipo de evento.....	52
	55
6.5.3.	Energía sísmica diaria y acumulada.....	56
6.5.4.	Localización de las señales sísmicas volcano – tectónicas (VT)	57
7.0.	MONITOREO ACÚSTICO	59
7.1.	Operatividad de las estaciones	59
-	 Campaña marzo 2018	60
-	 Campaña julio del 2018	61
7.2.	Caracterización de las señales de infrasonido	63
8.0.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	66
9.0.	DIFUSIÓN DE REPORTES SEMANALES COLEGIADOS.....	68
10.0.	CONCLUSIONES.....	70
11.0.	RECOMENDACIONES	72
12.0.	BIBLIOGRAFÍA.....	73

RESUMEN

Durante el año 2018 la actividad del volcán Sabancaya mostró niveles de leves a moderados debido, principalmente, a cambios en los parámetros de monitoreo (actividad sísmica, emisiones de gases y ceniza, composición de las cenizas volcánicas, inflación/deflación y flujos de SO₂).

A lo largo del 2018, la sismicidad estuvo caracterizada por la ocurrencia de sismos de bajas frecuencias, asociados al movimiento de fluidos (gases, líquidos, posiblemente magma); a su vez, se registraron explosiones leves y moderadas (entre 1 y 3 MJ de energía sísmica) seguidas de actividad tremórica. Esta actividad correlacionó muy bien con la actividad superficial, ya que posterior a la ocurrencia de las explosiones se observaron columnas eruptivas de gases y ceniza de hasta 2.5 km de altura y, en periodos de mayor actividad, las columnas alcanzaron alturas de hasta 5.0 km. Las direcciones predominantes de estas emisiones fueron hacia el Noreste (NE), Suroeste (SO), Sur (S) y Sureste (SE) afectando, principalmente, a los pueblos ubicados en el valle del Colca (Cabanacocha, Achoma, Huanca y Huambo); cabe destacar que, en algunas ocasiones fue posible observar la presencia de bloques en el flanco Norte que alcanzaron distancias de hasta 1.5 km de la cumbre.

Respecto a los flujos de SO₂, se registraron tres valores importantes el 02 de febrero, 13 y 18 de julio del 2018 con mediciones que alcanzaron los 9270, 14860 y 12068 t/día respectivamente. Estos flujos, a pesar de ser considerados GRANDES, están dentro del rango de valores que indican un comportamiento normal de este volcán en proceso eruptivo y con un sistema abierto. En cuanto al monitoreo de la composición de aguas y temperatura de las fuentes termales, destacan las estaciones SA2 y SA3, donde se observaron variaciones importantes e incrementos en la temperatura, posiblemente asociados a cambios en el aporte magmático al sistema hidrotermal.

Mientras tanto, los resultados del monitoreo geodésico, muestran periodos de inflación, relativamente importantes, que estuvieron asociados a incrementos en la actividad del volcán. Respecto a los mapas de vectores de desplazamiento, éstos indican claramente la presencia de un cuerpo localizado al N – NE del volcán Sabancaya, posiblemente se trate de un reservorio de magma, que a través de un conducto secundario hace migrar el magma hacia el cráter del Sabancaya, culminando así, en explosiones energéticas. La presencia de un posible cuerpo magmático es respaldada por la localización de sismos VT, ya que durante el año 2018 y años anteriores, demuestran que la sismicidad de este tipo, generalmente, ocurre al N – NE del cráter del volcán y con profundidades que llegan hasta los 10 km en promedio, mayor a esta profundidad, el registro de eventos VT's es mínimo o nulo; por lo tanto, al no registrarse sismos es posible inferir que se trate de un medio fluido, probablemente magma.

Finalmente, teniendo como antecedente la evaluación integral y permanente de los parámetros que se vigilan, durante todo el año 2018 el volcán Sabancaya se mantuvo en **NIVEL DE ALERTA NARANJA** que significa: *cambios en el comportamiento de la actividad del volcán (incremento de la actividad sísmica, altura de la columna eruptiva mayor a los 1000 m, seguida de caída de cenizas y expulsión de proyectiles balísticos, muchas de éstas a causa de explosiones fuertes).*

1.0. INTRODUCCIÓN

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 y multidisciplinaria de los volcanes activos en el sur del Perú.*

Cumpliendo con la función que le ha sido encomendada, la Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico, a través, del Observatorio Vulcanológico del INGEMMET, como centro de investigación y vigilancia de volcanes activos del sur del Perú, de carácter interdisciplinario, realiza la vigilancia sistemática y constante de los volcanes: Sabancaya, Misti, Ubinas, Ticsani, Tutupaca, Yucamane, etc., los cuales, se encuentran localizados en los departamentos de Arequipa, Moquegua y Tacna.

El presente informe técnico anual de la actividad del volcán Sabancaya, corresponde al año 2018, y en dicho informe se compila la información obtenida a través de las redes de vigilancia instaladas en los alrededores del edificio volcánico (Fig. 1.1).

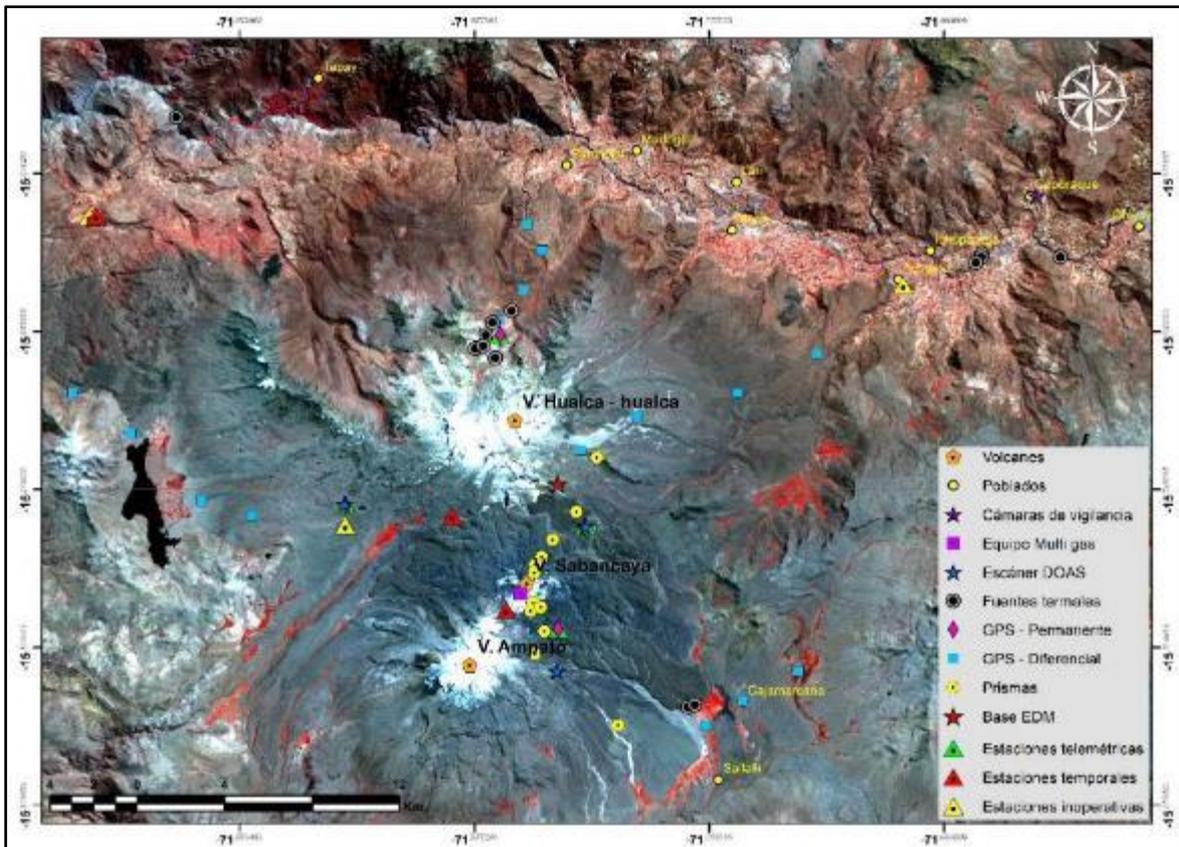


Figura 1.1. Red de estaciones de monitoreo de la actividad del volcán Sabancaya, periodo 2018.

2.0. MONITOREO VISUAL

El monitoreo visual del volcán Sabancaya se implementó desde el año 2014, con la instalación de dos cámaras de video Axis modelo 1765-LE. La cámara 1-SBCPQ está ubicada en la Municipalidad distrital de Coporaque, aproximadamente a 27 km del volcán y la cámara 2-SBSLLI está ubicada a 4 km al Sur – Sureste del cráter del volcán. Las imágenes se registran cada 30 segundos captando parámetros significativos como: altura, color, densidad, forma y dirección de desplazamiento de la columna eruptiva. Estas imágenes son transmitidas hacia las instalaciones de INGEMMET en Arequipa, las cuales, son registradas en una base de datos y pueden ser visualizadas en la página web institucional del INGEMMET.

2.1. Cronología de los eventos

Basado en los datos obtenidos del proceso eruptivo actual del volcán Sabancaya, el episodio eruptivo 2013 - 2018 se dividió en 2 fases (Cuadro 2.1):

Cuadro 2.1. Características de las 2 fases identificadas: altura de la emisión de ceniza y balísticos, distancia y dirección de la pluma y tipo de actividad ocurrida.

	Periodo	Altura de la pluma volcánica (m)	Distancia y dirección de las emisiones	Tipo de actividad	
FASE I	2013 - 2015	< 2000	Las emisiones de gases se dispersaron a más de 20 km en dirección SE- NO del volcán.	Fumarólica	
	2016 abril	< 500 (altura en los puntos)	Las emisiones de gases se dispersaron hacia el SE del volcán.	Fumarólica	
FASE II	2016	27-ago	Radio de dispersión de los gases < 10 km al E del volcán.	Explosión	
		06-nov	Radio de dispersión < 20 km al NE del volcán.	Explosiones con emisiones de cenizas.	
	24-nov	>4000	Radio de dispersión < 40 km al cono del volcán.	Explosiones con emisiones de cenizas.	
	2017	04-jul	>5000	Radio de dispersión < 60 km al E del volcán.	Explosiones con emisiones de cenizas.
	2018	09-mar	>5000	Radio de dispersión < 60 km al E del volcán.	Explosiones con emisiones de cenizas.

2.2. Características de las emisiones

- *Forma y ocurrencia*

Desde el 06 de noviembre de 2016, el volcán Sabancaya entró en un nuevo periodo eruptivo, caracterizado por presentar explosiones moderadas de gases y ceniza, como se indicó en los informes anuales 2016 y 2017.

Durante los meses de enero, febrero y marzo del 2018, a nivel superficial se presentaron emisiones considerables de cenizas y gases que alcanzaron alturas máximas de hasta 5300 m s. n. m.; sin embargo, la presencia de nubosidad en la zona, no permitió tener una buena visibilidad, pero fue posible identificar que la dirección predominante de dichas emisiones durante este periodo fue hacia el Suroeste – Noroeste (Fig. 2.1).

Entre los meses de abril y finales de agosto, la altura de las emisiones de gases y ceniza, bajaron levemente, llegando a alturas máximas de 4500 m s. n. m. aproximadamente. La dispersión de este material se produjo en un radio 60 km, principalmente, en dirección Sur, Sureste, Noreste; afectando los poblados de Cabanaconde, Achoma, Chivay, Huanca y Huambo, donde se reportó caída de ceniza. Asimismo, este periodo se caracterizó por la presencia de balísticos que impactaron muy cerca al cráter del volcán; además del aumento de gases azulinos característicos de la presencia de aerosoles de SO₂ en las emisiones (Fig. 2.1).

Desde setiembre hasta finales de diciembre de 2018, el comportamiento de las emisiones de ceniza se mantuvo con una altura máxima de 3800 m s. n. m., se dispersó con dirección Sur, Sureste, Noreste hasta 40 km de distancia. También se observó la presencia de bloques sobre el flanco Norte hasta 1.5 km de la cumbre (Fig. 2.2).

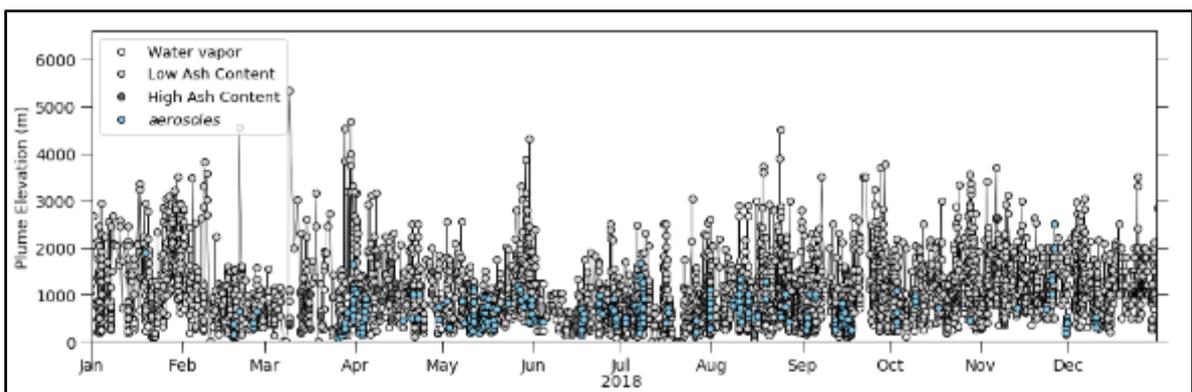


Figura 2.1. Evolución de las emisiones fumarólicas en el volcán Sabancaya, periodo 2018.

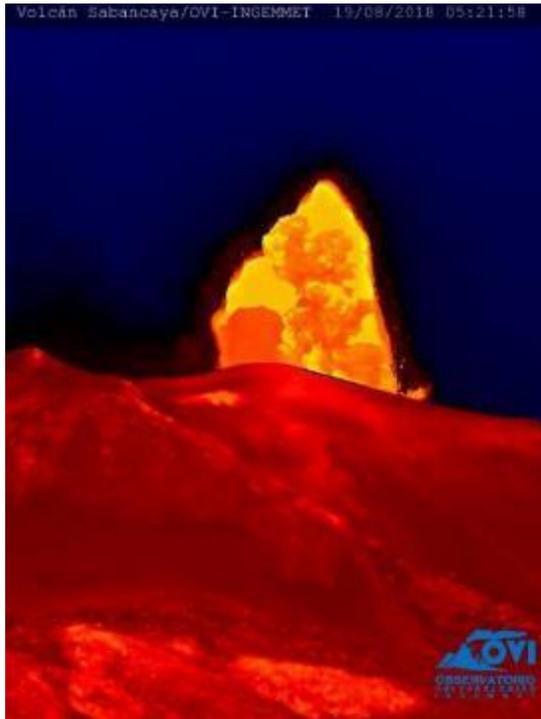


Figura 2.2. Imagen térmica del volcán Sabancaya donde se pueden apreciar los balísticos correspondiente al 19 de agosto de 2018.

- *Dirección predominante*

En la Figura 2.3, se observa las direcciones predominantes de las emisiones fumarólicas del volcán Sabancaya registradas durante el año 2018. Cabe resaltar que, las emisiones fueron preferentemente dispersadas en dirección Sur-Sureste, Noreste-Norte y eventualmente hacia el Este.

Volcán Sabancaya Dirección de desplazamiento de emisiones 2018

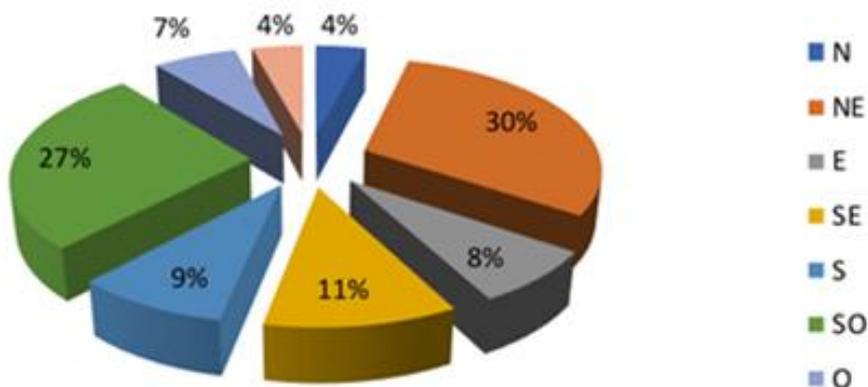


Figura 2.3. Direcciones predominantes de las emisiones fumarólicas registradas durante el año 2018.

- *Imágenes representativas de emisiones fumarólicas*

De la Fig. 2.4 a la Fig. 2.15, se observan las imágenes más representativas del volcán Sabancaya, captadas con la cámara Axis instalada en el volcán Sabancaya, además de la dispersión de ceniza que alcanzaron las columnas fumarólicas.

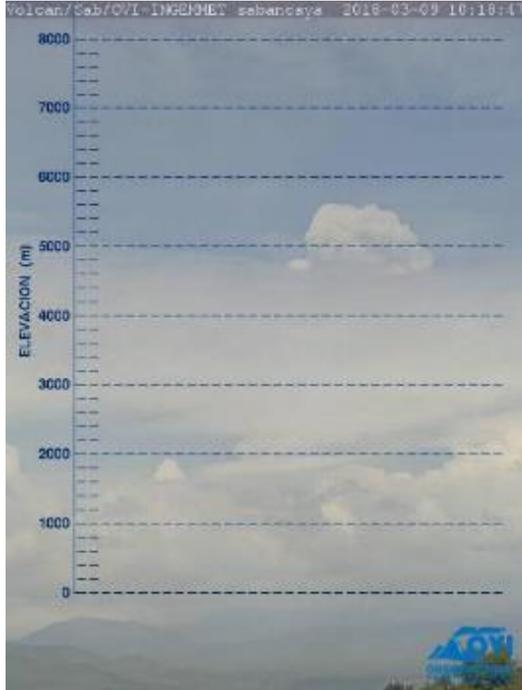


Figura 2.4. Explosión del 09 de marzo del 2018 captada con la cámara Axis modelo 1765-LE.

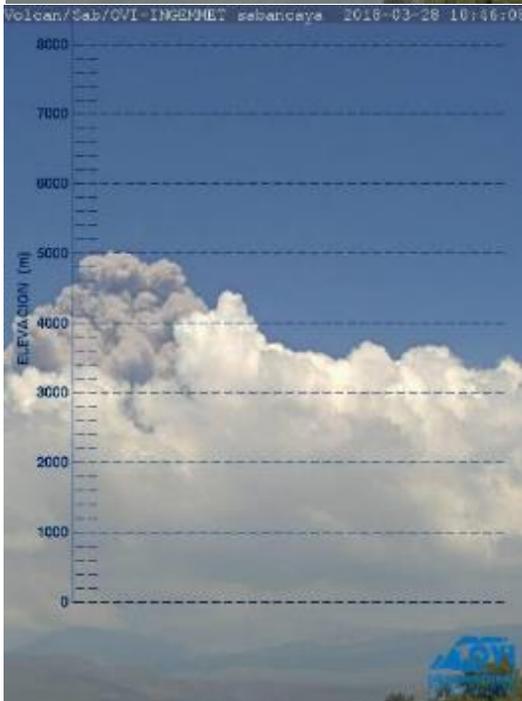


Figura 2.5. Explosión del 28 de marzo de 2018 captada con la cámara Axis modelo 1765-LE.

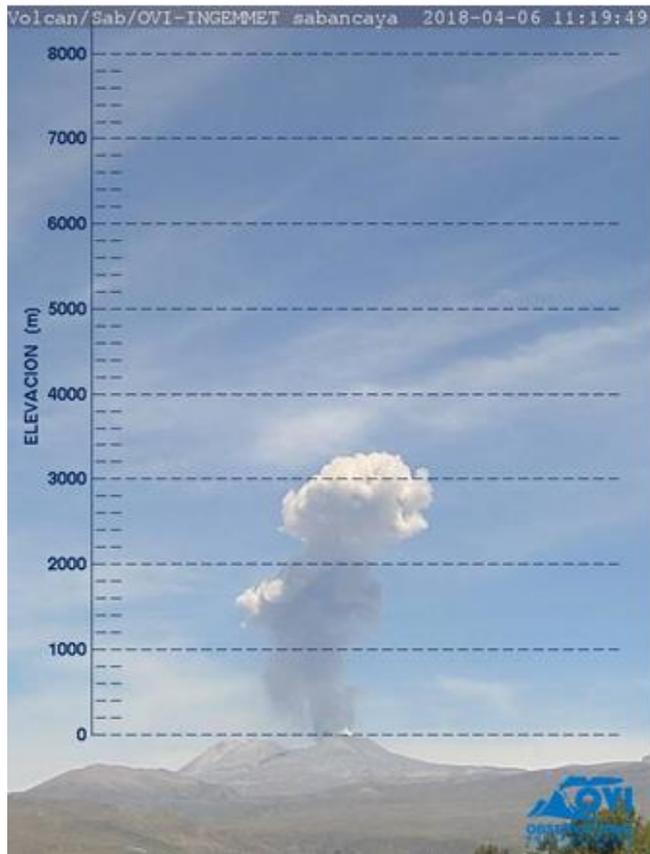


Figura 2.6. Explosión del 06 de abril de 2018 captada con la cámara Axis modelo 1765-LE.

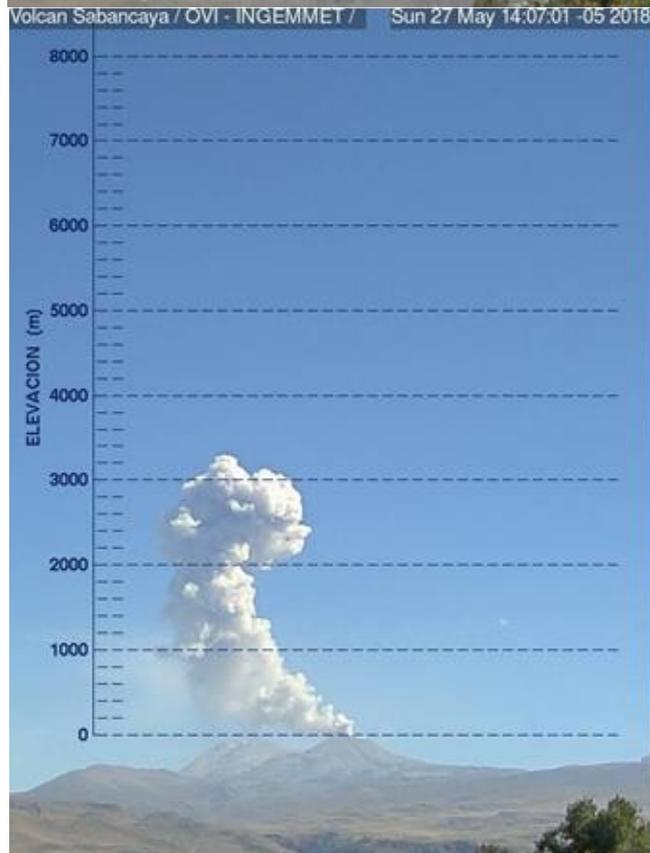


Figura 2.7. Explosión del 27 de mayo de 2018 captada con la cámara Axis modelo 1765-LE.

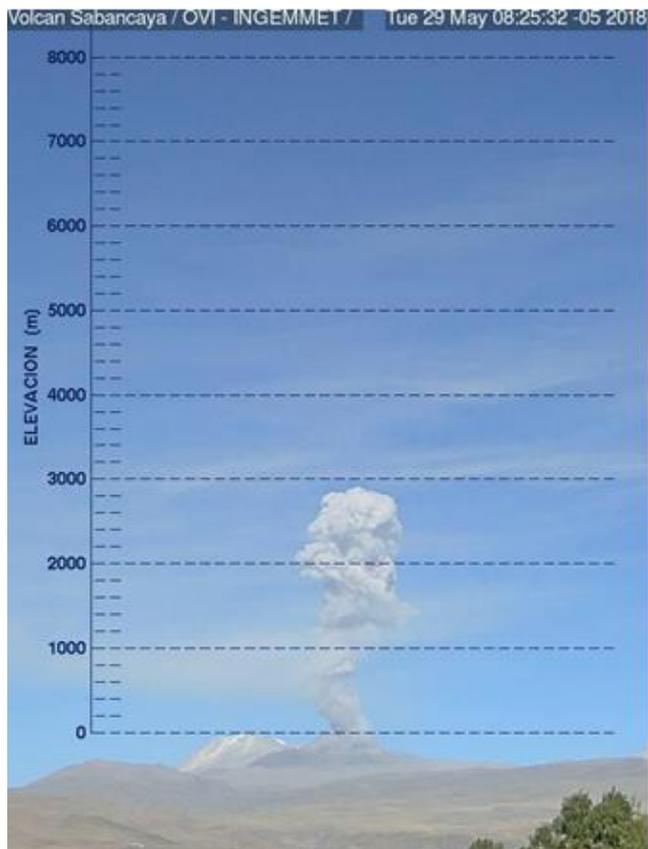


Figura 2.8. Explosión del 29 de mayo de 2018 captada con la cámara Axis modelo 1765-LE.

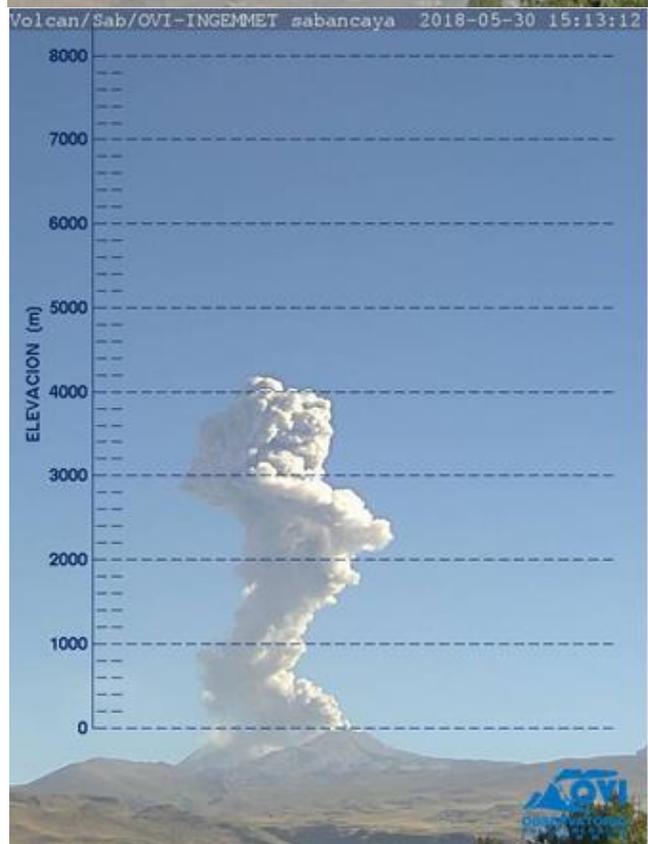


Figura 2.9. Explosión del 30 de mayo de 2018 captada con la cámara Axis modelo 1765-LE.

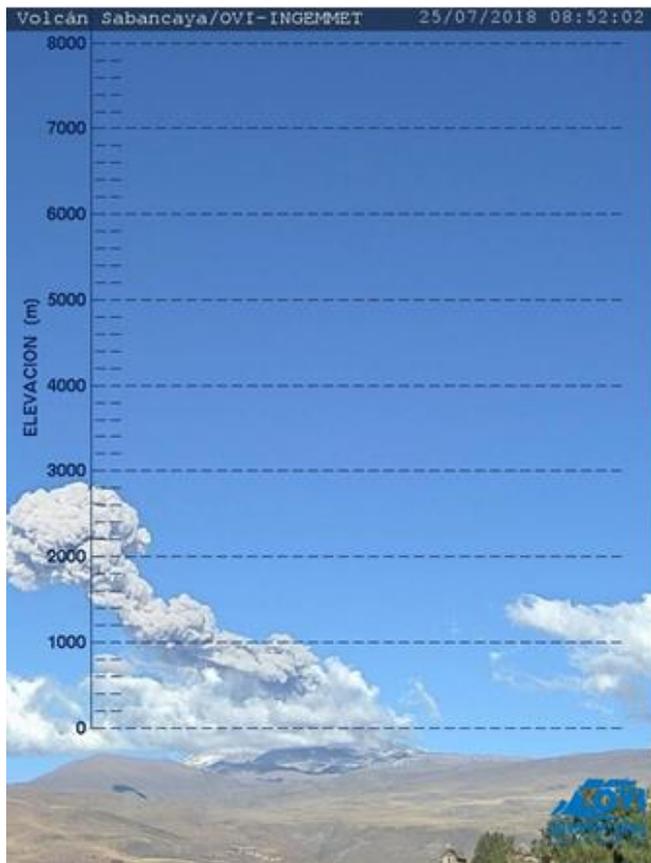


Figura 2.10. Explosión del 25 de julio de 2018 captada con la cámara Axis modelo 1765-LE.

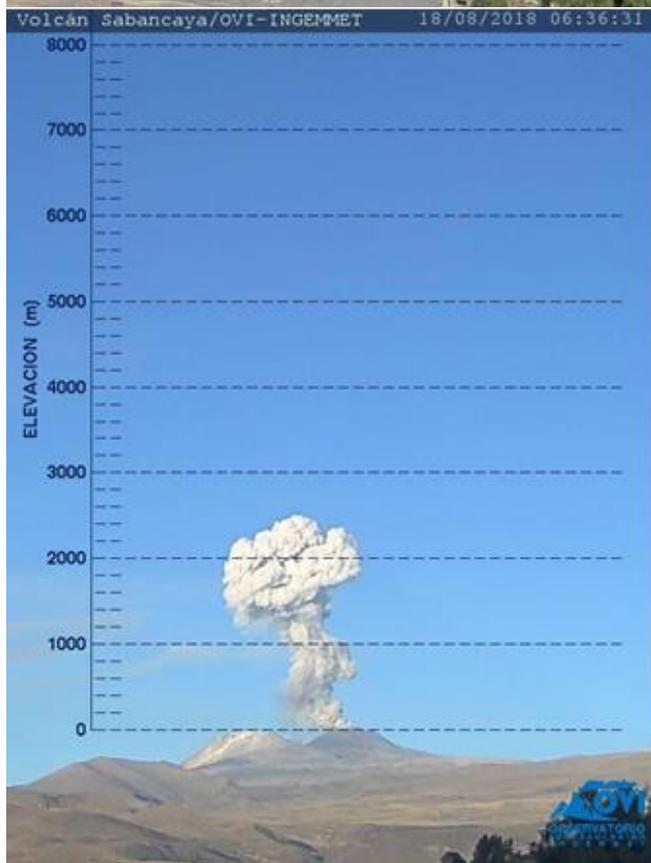


Figura 2.11. Explosión del 18 de agosto de 2018 captada con la cámara Axis modelo 1765-LE.

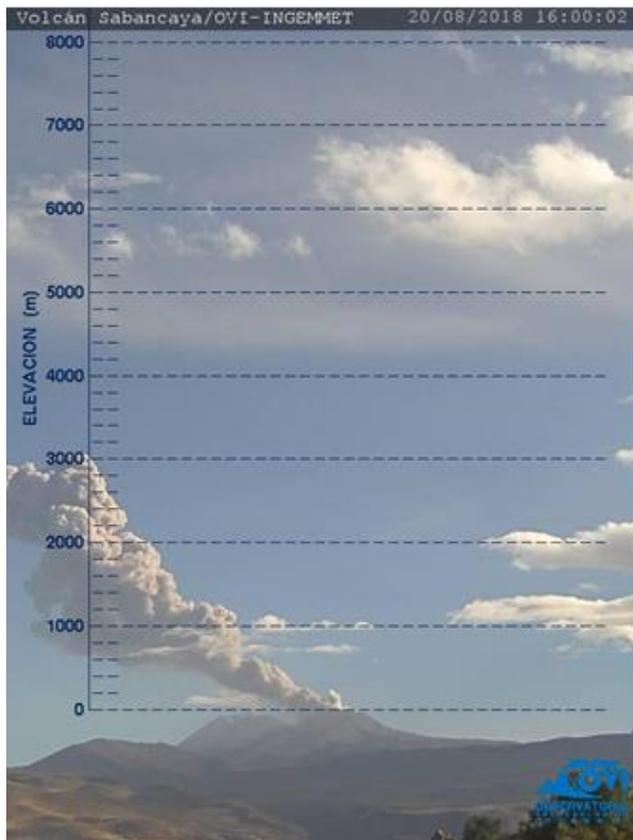


Figura 2.12. Explosión del 20 de agosto de 2018 captada con la cámara Axis modelo 1765-LE.

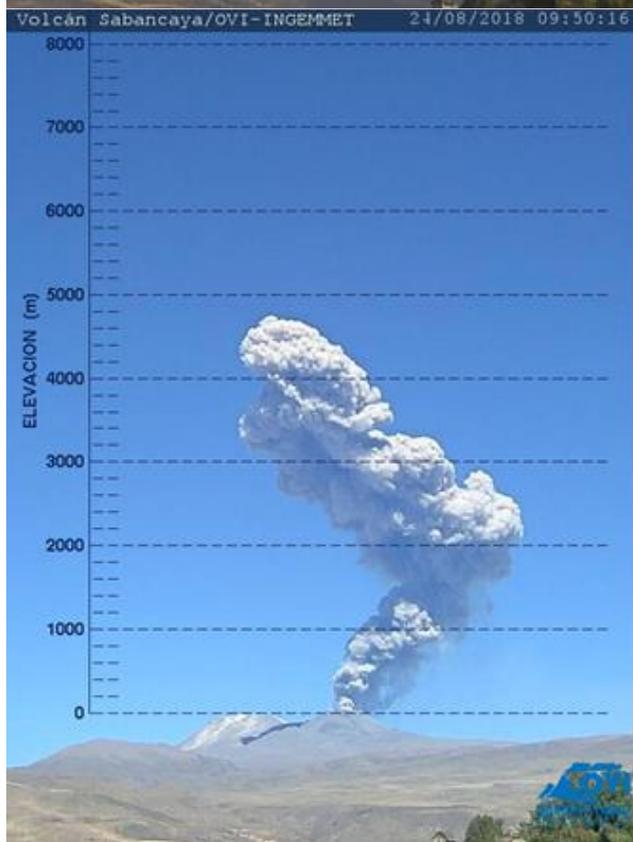


Figura 2.13. Explosión del 24 de agosto de 2018 captada con la cámara Axis modelo 1765-LE.

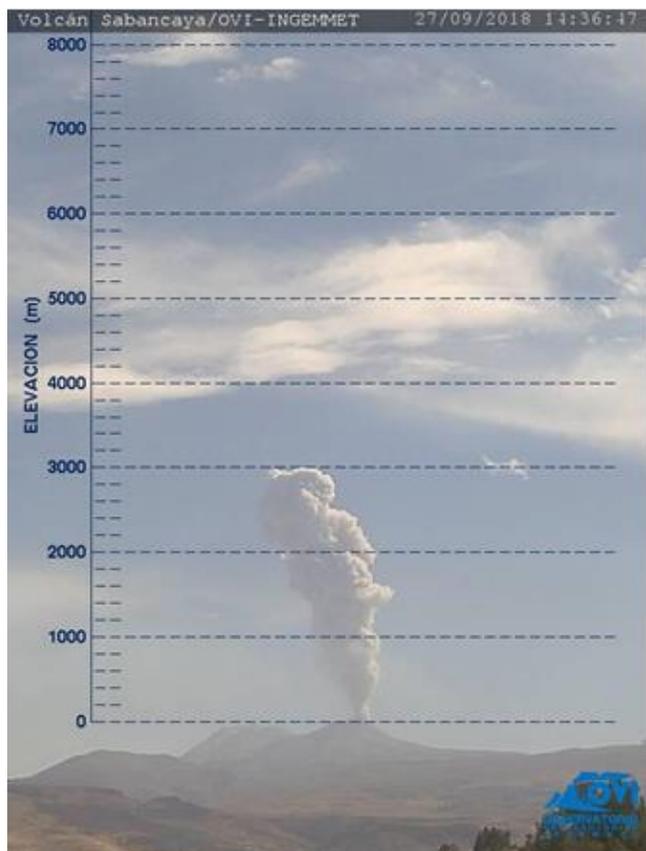


Figura 2.14. Explosión del 27 de setiembre de 2018 captada con la cámara Axis modelo1765-LE.

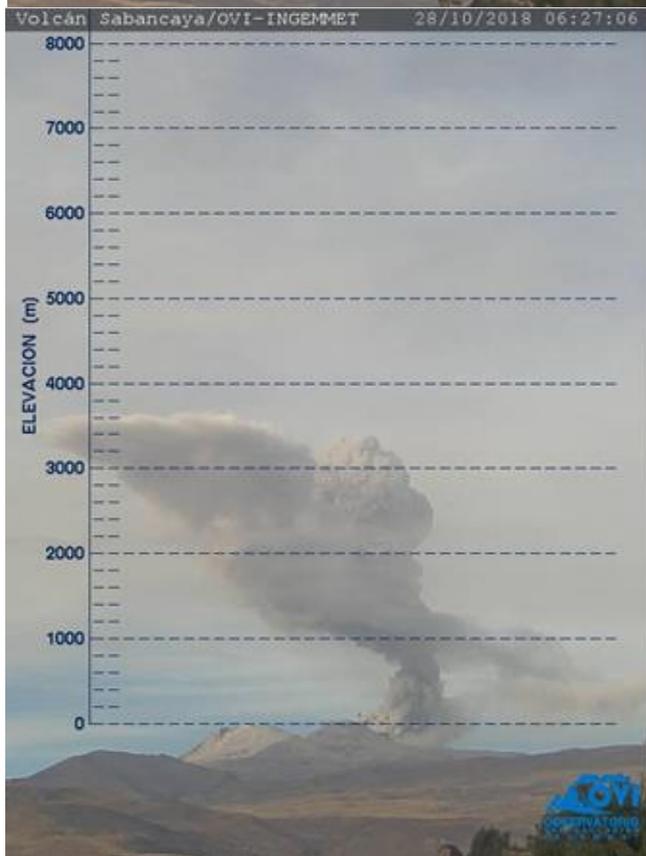


Figura 2.15. Explosión del 28 de octubre de 2018 captada con la cámara Axis modelo1765-LE.

2.3. Monitoreo satelital

- *Alertas de anomalías térmicas*

Según el monitoreo satelital de alertas de anomalías térmicas MODIS, la actividad eruptiva del volcán Sabancaya durante este año 2018, no presentó cambios significativos en su comportamiento. Desde hace varios años atrás este volcán se mantuvo en erupción continua con periodos cortos de reposo, principalmente, los últimos meses (Fig. 2.16); sin embargo, desde el año 2018 dicho comportamiento se ha caracterizado por fases de intensa actividad (de 3 a 4 meses) seguida por etapas de reposo entre 1 y 2 meses.

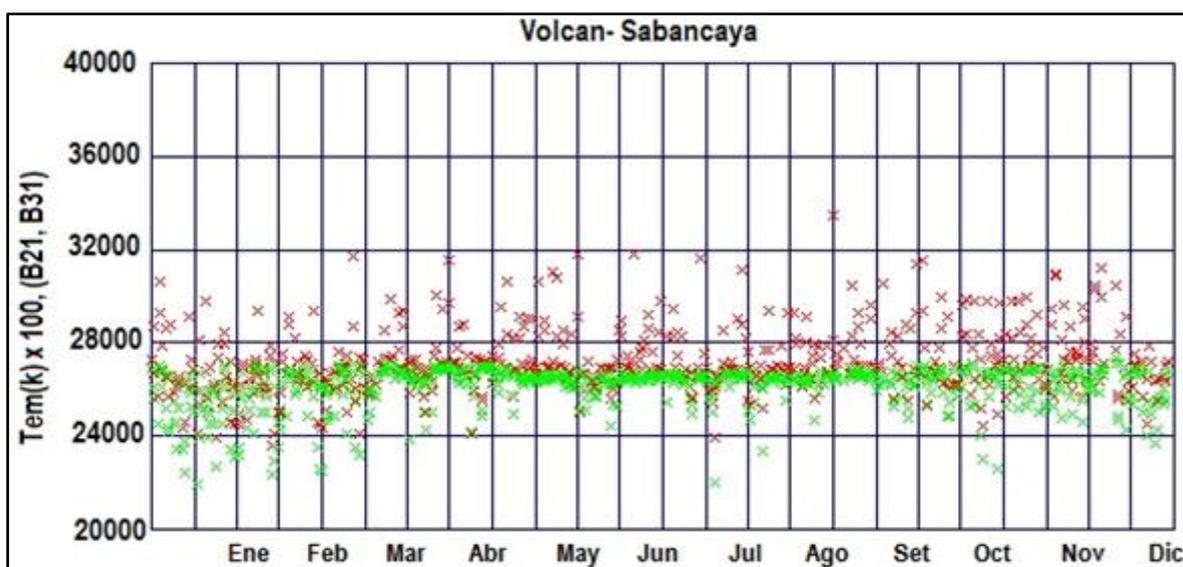


Figura 2.16. Evolución de las emisiones anomalías térmicas en el volcán Sabancaya, periodo 2018 según imágenes MODIS.

Por otro lado, el sistema MIROVA detectó anomalías térmicas asociadas con la actividad volcánica, mediante un sistema infrarrojo de radiación de calor casi en tiempo real. Así, durante el 2018 se identificaron 205 anomalías térmicas entre bajas y moderadas, con valores entre 1 MW y 87 MW de VRP (Potencia Volcánica Irradiada).

- *Alertas de ceniza en suspensión*

El Centro de Alerta de Ceniza Volcánica (VAAC) de Buenos Aires, reportó el día 22 de abril observaciones de nubes de ceniza provocadas por emisiones continuas de cenizas que alcanzaron columnas de hasta 3000 m sobre la cima del volcán, la ceniza fue dispersada hasta un radio de 50 km, cancelando así los vuelos comerciales de Avianca.

3.0. MONITOREO DE CENIZAS

3.1. Muestreo de cenizas por cenizómetros

Con el objetivo de obtener un muestreo sistemático, se estableció la instalación de una serie de colectores de cenizas alrededor del volcán. Los cenizómetros son dispositivos utilizados precisamente para medir espesores, densidad de área y densidad total de pequeños depósitos de cenizas (< 20 mm) como es el caso del volcán Sabancaya. El objetivo de dichos cenizómetros es medir el acumulado de ceniza que cae en un determinado lugar, para poder realizar un estudio posterior de dispersión de cenizas. Para realizar el muestreo de cenizas se coordinó con personas que se encargan de realizar lecturas de la cantidad de ceniza registrada durante una semana (Fig. 3.1).



Figura 3.1. a) Instalación de cenizómetros en el sector de Collpa, Suroeste del volcán Sabancaya.

3.2. Red de monitoreo de cenizómetros

El Observatorio Vulcanológico del INGEMMET (OVI) tiene una red de monitoreo y muestreo de ceniza con cenizómetros ubicados en los alrededores del volcán Sabancaya. La instalación de los cenizómetros se realizó en 2 sectores puntuales del área circundante del volcán Sabancaya: sector medial-distal por los pueblos del valle del Colca y sector proximal a 4 y 6 km del macizo. Actualmente, se cuenta con 32 cenizómetros instalados (Fig. 3.2 y 3.3), los cuales brindan información acerca de los espesores de ceniza acumulada por semana emitida por el volcán. La implementación y construcción de los cenizómetros se realizó en conjunto con el COER – Gobierno Regional - Arequipa.

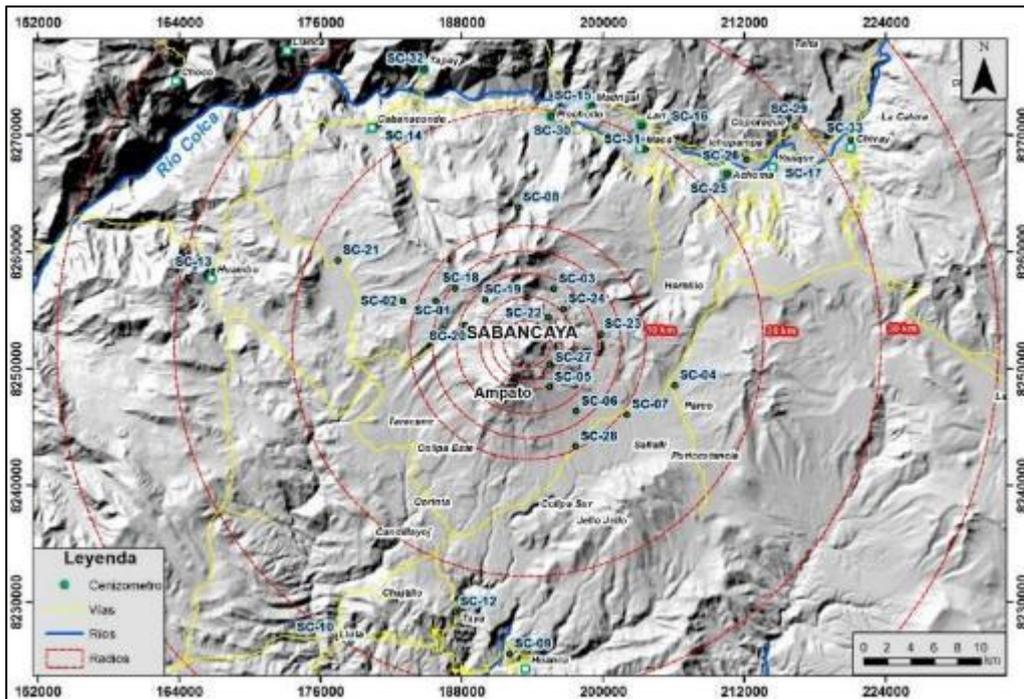


Figura 3.2. Mapa de ubicación actual de los cenizómetros en los alrededores del volcán Sabancaya. A la fecha se cuenta con 32 cenizómetros ubicados en sectores proximales, mediales y distales del macizo volcánico.

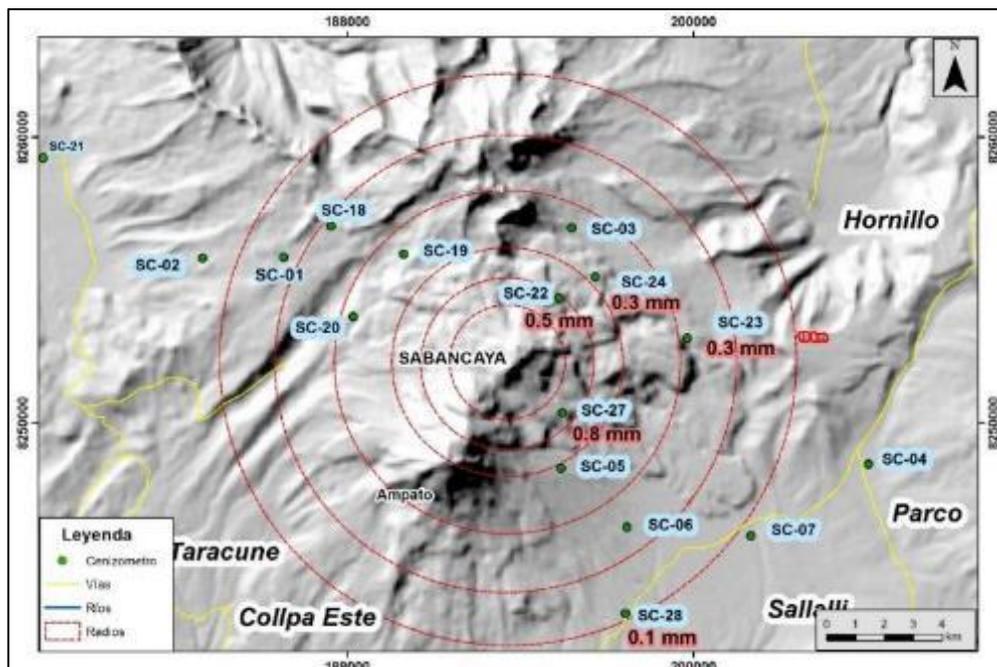


Figura 3.3. Mapa de ubicación actual de los cenizómetros localizados en los sectores proximales del volcán Sabancaya. Sombreado de rojo se presenta los espesores de ceniza acumulada de aproximadamente 2 meses en el 2017.

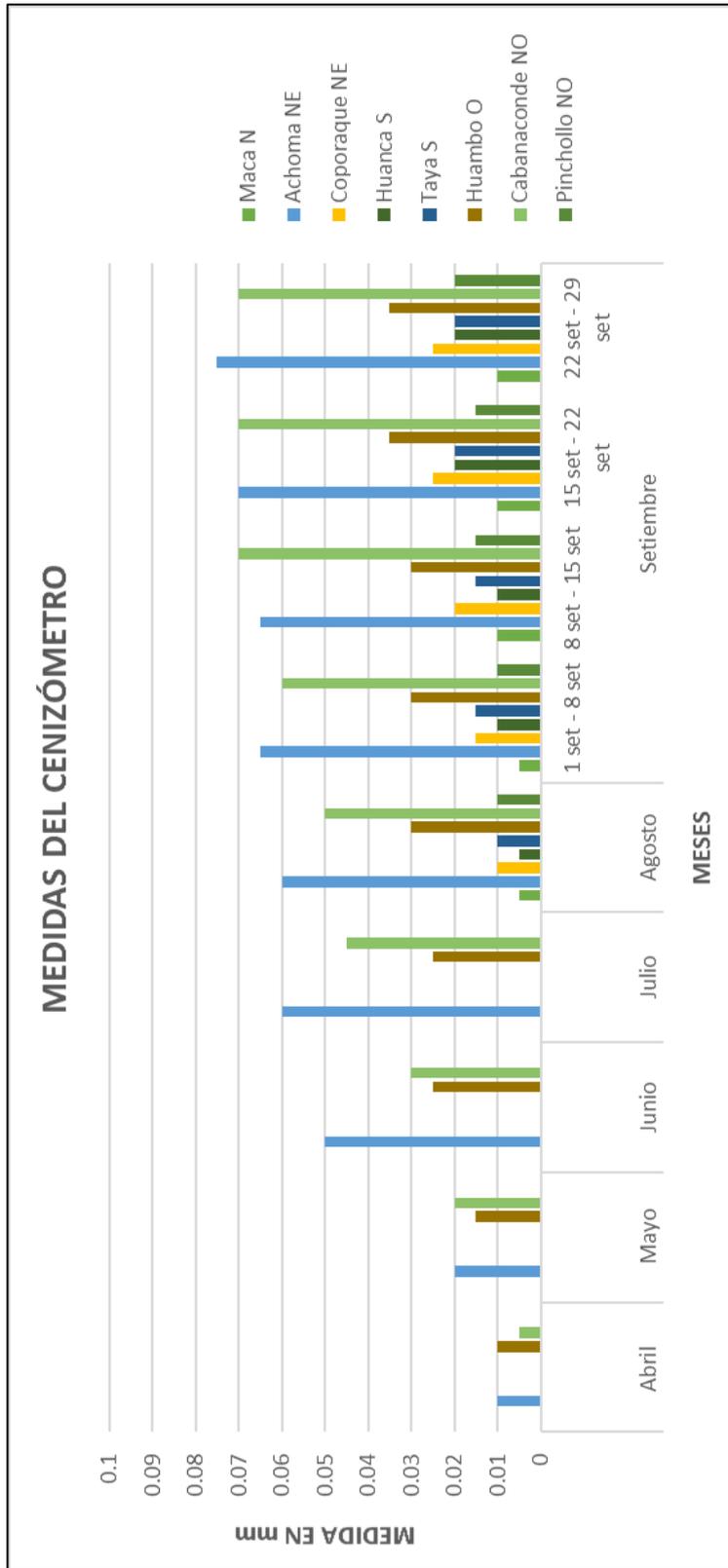


Figura 3.4. Gráfico que muestra las medidas de espesor de ceniza acumulada durante el año 2017, datos obtenidos a partir de 8 cenizómetros colocados en los alrededores del volcán Sabancaya.

Cuadro 3.1. Tabla de datos de cenizómetros ubicados en los pueblos que se encuentran alrededor el volcán Sabancaya (Instalación 2018).

Código	Localidad	2018				
		Marzo-Abril	Mayo	Julio	Agosto-Setiembre	Diciembre
SC-09	Huanca		<0.01 mm			
SC-10	Lluta	<0.01 mm	<0.01 mm			
SC-11	Taya	<0.01 mm	<0.01 mm			
SC-12	Tambo-Taya		<0.01 mm			
SC-13	Huambo	0.015 mm	<0.01 mm	<0.1 mm	<0.1 mm	
SC-14	Cabanaconde	<0.01 mm	0.01 mm	<0.1 mm		0.01 mm
SC-15	Madrigal	<0.01 mm	<0.01 mm	<0.1 mm		
SC-16	Lari		0.01 mm	<0.1 mm	0.1 mm	
SC-17	Yanque	<0.01 mm	<0.01 mm	<0.1 mm		0.04 mm
SC-21	Mucurca					0.1 mm
SC-25	Achoma	<0.01 mm	<0.01 mm	<0.1 mm	<0.1 mm	0.01 mm
SC-26	Ichupampa	<0.01 mm	<0.01 mm	<0.1 mm	<0.1 mm	
SC-29	Coporaque	<0.01 mm	<0.01 mm	<0.1 mm	<0.1 mm	
SC-30	Pinchollo					
SC-31	Maca	<0.01 mm	<0.01 mm	<0.1 mm	0.1 mm	
SC-32	Tapay	<0.01 mm	<0.01 mm	<0.1 mm		
SC-33	Chivay	<0.01 mm	<0.01 mm	<0.1 mm		0.03 mm

Cuadro 3.2. Tabla de datos de cenizómetros ubicados en las zonas proximales del volcán Sabancaya (Instalación 2018).

Código	Localidad	2018				
		Marzo-Abril	Mayo	Junio	Julio	Dic
SC-01	Sab 10	0.5 mm		0.1 mm	<0.1 mm	0.1 mm
SC-02	Subida Mucurca	0.2 mm		0.1 mm		0.1 mm
SC-03	Hornillos 4			0.1 mm	<0.05 mm	0.35 mm
SC-04	Parjo	<0.1 mm	0.1 mm	0.7 mm	0.1 mm	0.2 mm
SC-05	Estación Ampato	0.18 mm		2.0 mm	2.05 mm	1.1 mm
SC-06	Frente Ampato	0.01 mm		1.0 mm	1.0 mm	0.3 mm
SC-07	Sallalli			1.0 mm	1.0 mm	0.2 mm
SC-08	Geiser Pinchollo			0.3 mm		
SC-18	Lado Hualca Hualca			0.1 mm		0.4 mm
SC-19	Mucurca					0.6 mm
SC-20	Mucurca 2					0.8 mm
SC-22	Hornillos - Sab 11		0.5 mm	0.1 mm		1.5 mm
SC-23	Hornillos 2		0.3 mm	0.2 mm	0.15 mm	0.7 mm
SC-24	Hornillos 3		0.3 mm	0.1 mm	0.05 mm	0.5 mm
SC-27	Sallalli -Sab 07		0.8 mm	1.1 mm	1.6 mm	2.95 mm
SC-28	Sallalli 2		0.1 mm		0.3 mm	0.3 mm

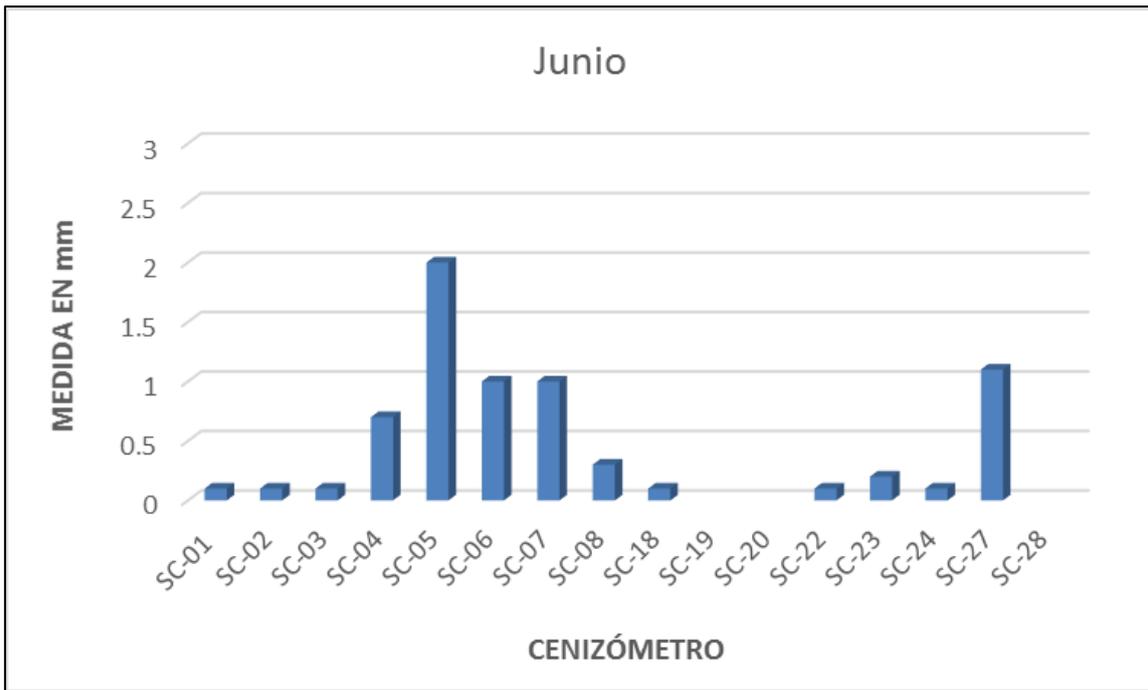


Figura 3.5. Gráfico que muestra las medidas de espesor de ceniza acumulada desde mayo a junio del 2018, provenientes de los cenizómetros más proximales al área del volcán Sabancaya.

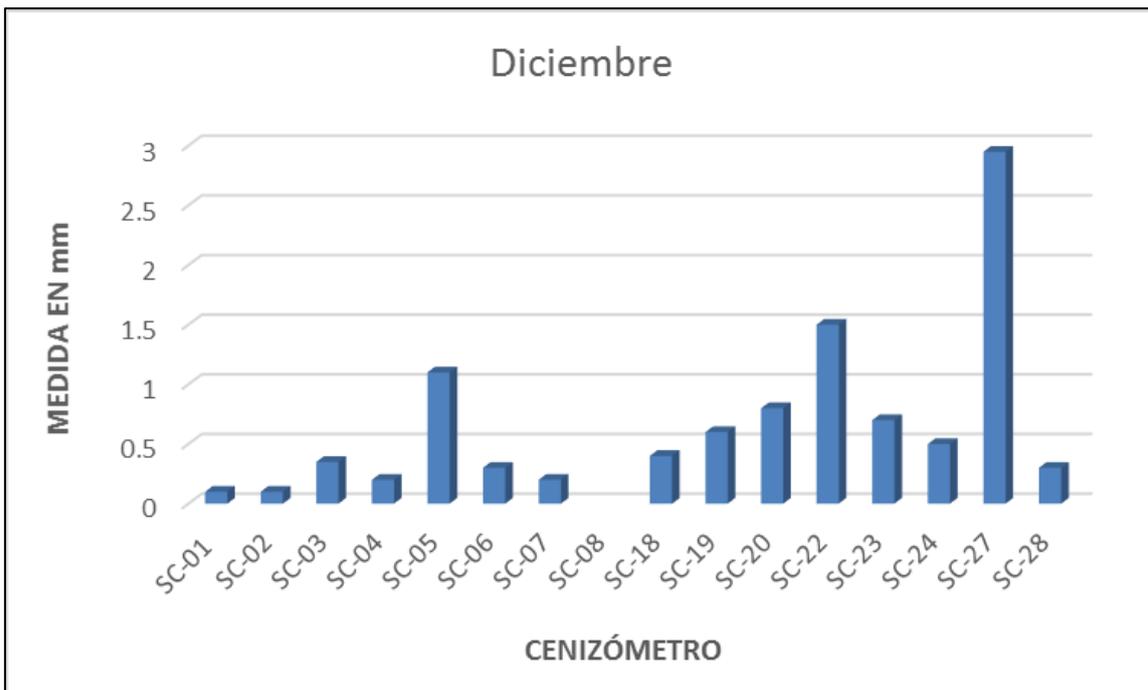


Figura 3.6. Gráfico que muestra las medidas de espesor de ceniza acumulada desde julio a diciembre del 2018, provenientes de los cenizómetros más proximales al área del volcán Sabancaya.

3.3. Muestreo de cenizas 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 los suelos y fuentes de agua, dañando así la vegetación, el ganado y personas (Witham et al., 2005).

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 utilizado como un *proxy* para las concentraciones de gases de la pluma volcánica.
- (2) Investigación de los impactos ambientales (incluidos los efectos en el suelo, los cultivos, las algas, el agua de los océanos, la nieve y la salud humana).
- (3) Investigación de la química y procesos de adsorción.
- (4) Determinar los orígenes del material adsorbido.

3.3.1. Técnica

Para realizar el muestreo de la ceniza para los análisis de lixiviación es necesario seguir los siguientes pasos, los cuales, fueron establecidos según el protocolo elaborado en dos días de taller en el Instituto de peligros, riesgo y resiliencia, Universidad de Durham, UK, junio del 2011:

- Recoger las cenizas en bandejas de plástico limpias cuando sea posible. Cuando no haya bandejas disponibles, intente recolectar desde una superficie relativamente plana, limpia, seca y dura, como peldaños descubiertos o un techo plano. Evite los lugares donde es probable que se hayan acumulado otras sales o polvo en la superficie. Tenga en cuenta la posibilidad de contaminación de las superficies de las que se tomaron muestras.
- Si puede recoger una muestra del área medida, registre el grosor de la caída de ceniza, las dimensiones del área de la muestra y el peso de la muestra.
- Si el depósito de ceniza parece heterogéneo (con respecto a características tales como el tamaño del grano, color, etc.), y si es logísticamente posible, le recomendamos que recopile varias muestras de un solo sitio, luego mezcle y homogenice las submuestras para reducir la variabilidad. La colección de submuestras comparables se puede realizar utilizando un recipiente de plástico de dimensiones conocidas.
- Trate de recolectar ceniza seca que no haya estado en contacto con el agua, si es posible. Siempre registre el estado de la muestra, particularmente si se ha mojado o no antes de la recolección.

Siguiendo con los parámetros antes mencionados se procedió a tomar muestras de ceniza en los alrededores del volcán Sabancaya durante una campaña, la cual, se realizó el 31 de julio y 01 de agosto del 2018. En total se pudieron recolectar 6 muestras, cuya descripción se observa en el siguiente cuadro:

Cuadro 3.3. Ubicación de las muestras de ceniza de lixiviación.

Muestra	Este	Norte	Fecha de inicio	Fecha de recojo	Hora de inicio	Hora de recojo	Recipiente	Ubicación
Sab-17-31	195419	8248429	25/07/2017	31/07/2017		17:00	Cenizometro	Estación Ampato, Este del Sabancaya
Sab-17-32	194405	8250046	31/07/2017	31/07/2017	13:30	15:00	Bateas	A 2.5 km del cráter en dirección Sur
Sab-17-33	194442	8250050	31/07/2017	01/08/2017	15:15	11:00	Batea1	A 2.5 km del cráter en dirección Sur
Sab-17-34	194461	8250045	31/07/2017	01/08/2017	15:30	11:15	Batea2	A 2.5 km del cráter en dirección Sur
Sab-17-35	194478	8250041	31/07/2017	01/08/2017	15:45	11:30	Batea3	A 2.5 km del cráter en dirección Sur
Sab-17-36	194494	8250050	31/07/2017	01/08/2017	16:00	11:45	Batea4	A 2.5 km del cráter en dirección Sur

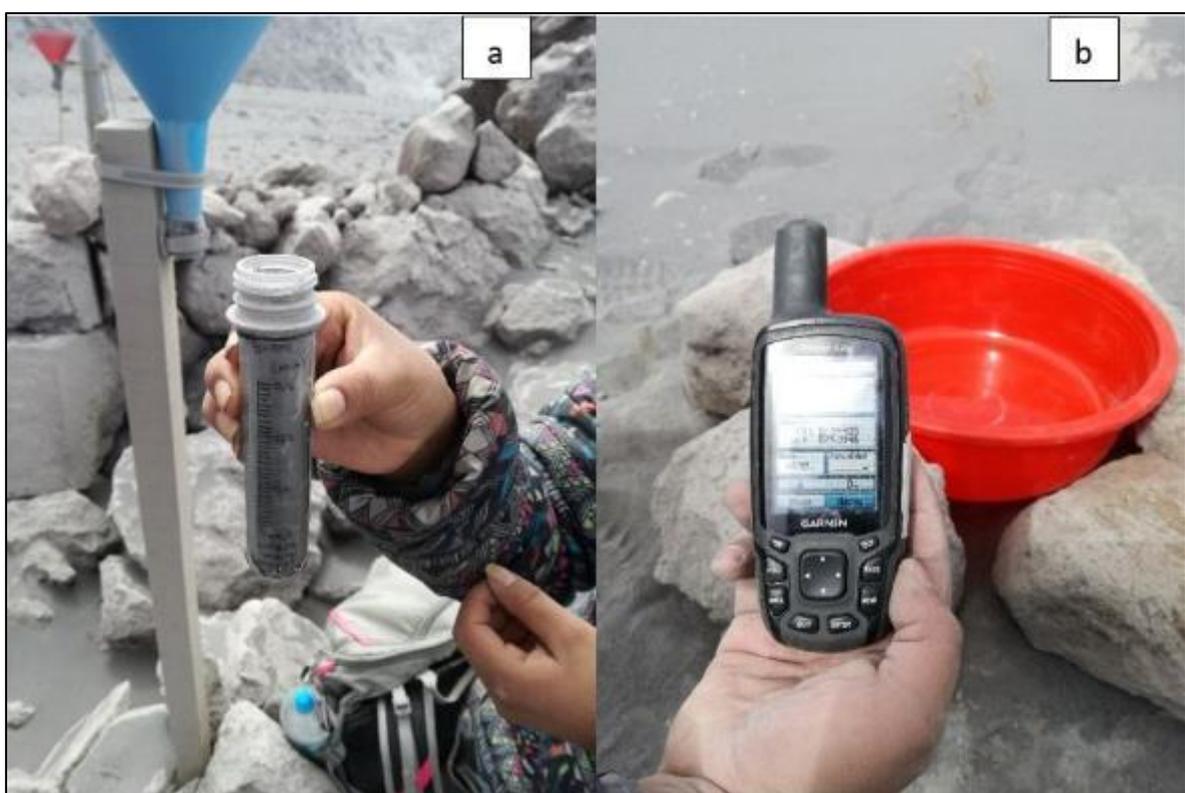


Figura 3.7. a) Muestreo del cenizómetro, b) Recipiente de plástico localizado a 2.5 km del cráter.

3.3.2. Datos

Cuadro 3.4. Resultados de 6 muestras de cenizas que fueron lixiviadas. El periodo de muestreo fue del 31 de julio al 01 de agosto.

Muestra\ Elemento	Fluoride	Chloride	Sulfate	Bromide	Nitrate	Al	As
Sab.17.31	26.40	34.02	1267.16	<0.01	2.26	11.39	< 0.03
Sab.17.32	72.86	51.62	1644.23	<0.01	2.80	29.35	< 0.03
Sab.17.33	241.30	220.11	7071.05	<0.01	3.20	110.70	< 0.03
Sab.17.34	192.26	189.19	6040.84	<0.01	4.87	86.15	< 0.03
Sab.17.35	218.44	212.91	7365.35	<0.01	3.63	94.40	< 0.03
Sab.17.36	231.67	217.25	7252.37	<0.01	4.11	115.80	< 0.03

Muestra\ Elemento	B	Ba	Be	Ca	Cd	Co	Cr
Sab.17.31	< 0.02	0.54	< 7e-05	361.50	0.11	0.08	< 0.001
Sab.17.32	< 0.02	1.01	< 7e-05	440.00	< 9e-04	< 0.003	< 0.001
Sab.17.33	< 0.02	3.91	< 7e-05	1900.00	0.05	0.14	< 0.001
Sab.17.34	< 0.02	3.22	< 7e-05	1562.00	0.04	0.10	< 0.001
Sab.17.35	< 0.02	2.60	< 7e-05	1992.00	0.78	0.14	< 0.001
Sab.17.36	< 0.02	4.13	< 7e-05	1973.00	0.03	0.14	< 0.001

Muestra\ Elemento	Cu	Fe	K	Li	Mg	Mn
Sab.17.31	1.42	30.45	20.40	0.06	36.80	1.78
Sab.17.32	1.15	32.00	37.85	0.07	62.45	2.12
Sab.17.33	0.77	58.70	120.00	0.23	218.00	6.21
Sab.17.34	0.54	50.55	104.30	0.19	192.50	5.43
Sab.17.35	0.31	46.20	111.70	0.23	224.00	6.25
Sab.17.36	0.88	57.65	124.20	0.23	219.50	6.33

3.3.3. Interpretación

Se nota un cambio geoquímico entre las muestras de los dos días que es propio de las características de las erupciones del volcán Sabancaya. Las concentraciones de fluorita, 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.

En general, las concentraciones de las muestras del 31 de julio no representan un peligro para la salud de la gente y los animales. Las concentraciones del 1 de agosto son más complicadas. La mayoría de los elementos que se encuentran allí no representan un peligro. Sin embargo, la concentración del fluoruro puede ser perjudicial en ciertas circunstancias. En lugares donde hay

muchas cenizas acumuladas de esta erupción o continuidad abundante de emisión de las mismas, quizás puede ocasionar graves problemas.

La complicación de todo es que no se conoce cuál ceniza es representativa del volcán en general. Si las concentraciones del 1 de agosto no son comunes y solo suceden raramente, quizás no hay un peligro; pero, si las concentraciones del 1 de agosto son normales, quizás puede ser un problema.

3.4. Componentes y granulometría

Las cenizas colectadas al inicio del periodo eruptivo son angulares y ligeramente redondeadas e incluyen un amplio rango de componentes que miden hasta 1 mm. Son clasificados de acuerdo a su abundancia: cristales de plagioclasa, olivino, biotita, material juvenil (líticos grises, los cuales presentan fenocristales de plagioclasa y clinopiroxeno, y vidrio volcánico de color negro), líticos hidrotermalizados y oxidados (Fig. 3.8). Las cenizas emitidas desde febrero del 2017 muestran un incremento de material juvenil, pero una disminución de cristales de plagioclasa, biotitas, olivinos y piroxenos.

Las observaciones realizadas con el microscopio binocular evidencian una menor cantidad de material hidrotermalizado al inicio; no se aprecian arcillas u otros minerales que nos indiquen actividad freatomagmática considerable. Además, el material juvenil está presente desde los primeros días de la erupción. Esto podría explicarse por: (1) El volcán Sabancaya no evidenciaba una laguna cratérica, (2) la ausencia de cobertura glaciaria en la cima y (3) que las erupciones iniciaron después de varios meses sin precipitación pluvial, lo que llevaría a una baja saturación del substrato.



Figura 3.8. Ceniza correspondiente al mes de noviembre de 2016 (inicio de la fase eruptiva), con presencia de material hidrotermalizado y oxidado, vidrio volcánico, líticos grises, cristales de plagioclasa y olivino.

3.5. Petrografía de balísticos

Se elaboraron secciones delgadas de las cenizas y bloques balísticos en el laboratorio de INGEMMET; posteriormente, fueron analizadas en el OVI con el microscopio de luz transmitida (LABOMED Lx 400P).

Se realizó un estudio del bloque emitido en mayo del 2017 (Fig. 3.9) es una andesita gris oscura, vesiculada, porfírica con 15-20 vol.% de fenocristales, 25 – 30 vol.% de micro fenocristales, 5 - 10 vol.% de vesículas y 35 – 50 vol.% de matriz vítrea. La asociación mineral está constituida por fenocristales de plagioclasa, clinopiroxeno, biotita, anfíbol, apatito y óxidos de Fe-Ti y vidrio intersticial. La pasta está constituida por microlitos (< 80 μm) de plagioclasa, clinopiroxenos y óxidos de Fe-Ti. Esta asociación mineral es similar a los bloques balísticos de composición andesítica de la erupción de 1990-1998.

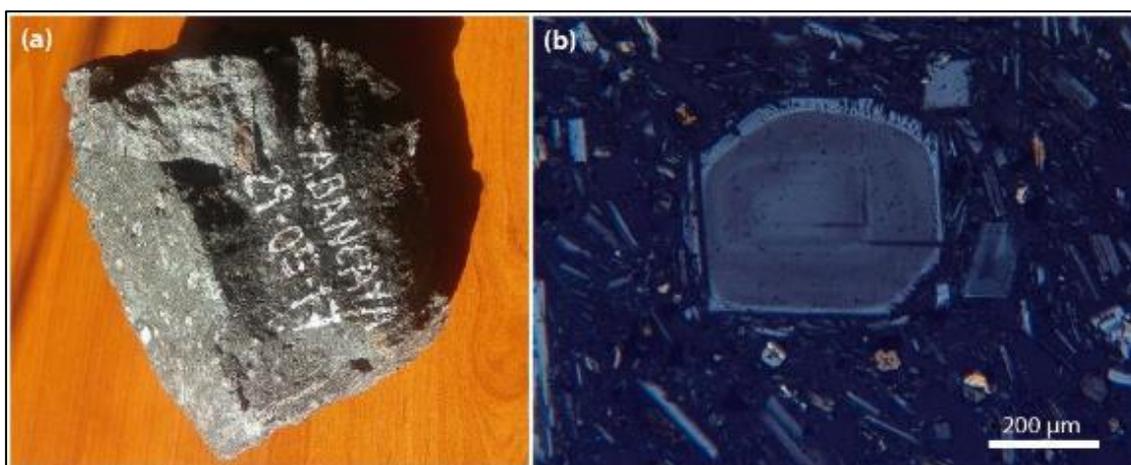


Figura 3.9. a) Fotografía del proyectil balístico color gris oscuro. b) Sección delgada del proyectil balístico.

Se ha realizado la petrografía de 4 balísticos emitidos por el volcán Sabancaya durante el 2017 y 2018, los cuales fueron tomados a 600 m del cráter en el flanco norte. Estas rocas corresponden a bloques con textura porfírica, compuestas por fenocristales de plagioclasa, biotita, anfíbol y piroxeno, en una matriz microcristalina de color gris oscuro constituida por microlitos de plagioclasa, anfíbol, clinopiroxeno y minerales opacos. Presentan una matriz intersertal donde los microlitos aciculares de plagioclasa están orientados. Los microlitos tienen un tamaño inferior a 0.2 mm, mientras que los fenocristales tienen tamaños de hasta 3 mm y componen ~25 % de la roca.

La fase mineral más abundante, representado en proporción volumétrica, en ambos casos es la plagioclasa (7-10 % en Sab-18-10/11, ~12 % en Sab-18-12), cuyos fenocristales tienen tamaños hasta de 3 mm y se encuentran de forma subhedral con corrosión interna y en los bordes, acompañado por fracturamiento interno. La mayoría de estos fenocristales tienen una textura “tamiz” en los bordes (Fig. 3.10), a veces crecida hasta el centro, que podría reflejar un proceso de resorción parcial en un magma donde el cristal no está en equilibrio.

La segunda fase más abundante es el piroxeno (5-7 %), presente en las cuatro muestras mayormente en forma de clinopiroxeno (Fig. 3.10). Los fenocristales (<0.5-1 mm) son de forma subhedral a euhedral y algunos se encuentran con una macla simple. Los ortopiroxenos

presentan comúnmente corrosión en sus bordes y sus partes internas, y la mayoría tiene bordes subredondeados. Algunos fenocristales más grandes contienen inclusiones de plagioclasa y clinopiroxeno. Los clinopiroxenos son generalmente de tamaño inferior en Sab-18-11 que en las otras secciones.

Las biotitas (3-5 vol.%) son de forma subhedral (Fig. 3.10c) y de tamaño inferior a 2 mm - 1 mm. El anfíbol (2-3 vol.%) se presenta en fenocristales inferiores a 1 mm de forma subhedral y euhedral, rómbica y acicular, con un pleocroísmo fuerte resultando en una variación de color marrón claro a oscuro. Los cristales presentan una alteración muy marcada, generalmente en forma de una corona de reacción y son parcialmente reemplazados por plagioclasa, clinopiroxeno y biotita. El cuarzo (Fig. 3.10) está presente como un mineral traza, son fenocristales anhedral que miden hasta 0.3 mm. Algunos están rodeados por coronas de reacción constituidos por fenocristales de clinopiroxeno y plagioclasa.

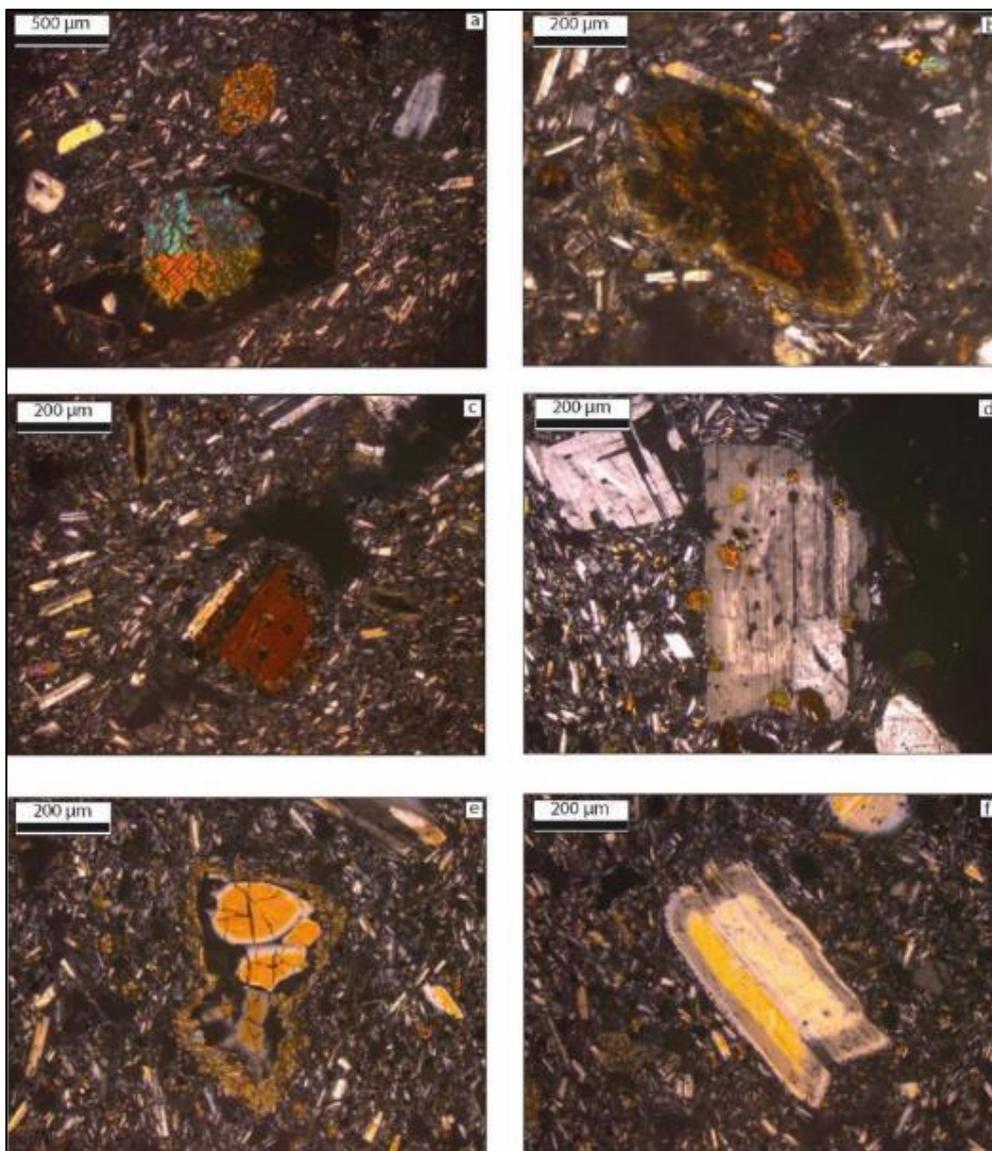


Figura 3.10. a) Intercrecimiento de fenocristal de clinopiroxeno y anfíbol, b) Corona de reacción en anfíbol, c) Fenocristal subhedral de biotita, d) Fenocristales de plagioclasa con inclusiones de anfíbol, e) Fenocristal de cuarzo con corona de reacción de clinopiroxeno, f) fenocristal de plagioclasa con textura tamiz y borde de sobrecrecimiento.

3.6. Geoquímica

Los productos emitidos durante este proceso eruptivo son clasificados como andesitas y dacitas calco-alcalinas ricas en K (Fig. 3.11), las cuales son comunes en los volcanes del sur del Perú como el Ubinas, Misti y erupciones pasadas del Ampato-Sabancaya. Se han realizado estudios de geoquímica para las cenizas y bloques durante los años 2016, 2017 y 2018. La composición de la ceniza oscila entre andesita y dacita (59.8-62.8 wt. % SiO₂; 2.41-2.76 wt. % K₂O), mientras que los balísticos tienen una composición andesítica (60.7-62.1 wt. % SiO₂; 2.49-2.67 wt. % K₂O). También se presenta un alto contenido en potasio, característico de los estrato-volcanes de la zona volcánica Central de los Andes (CVZ) y del sur peruano. En la erupción de 1990-1998 los bloques presentaron composiciones dacíticas y andesíticas también.

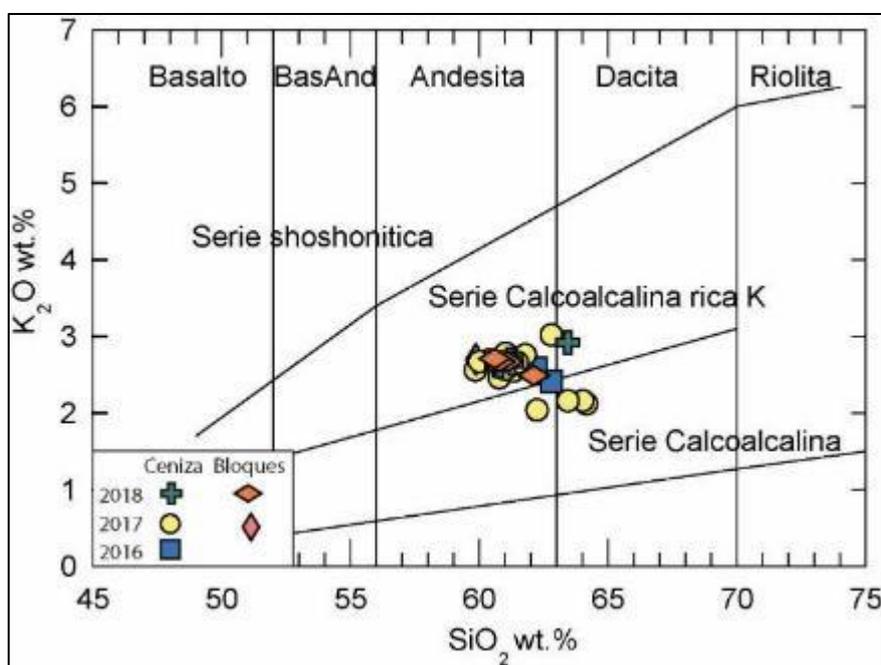


Figura 3.11. En el diagrama de K₂O vs SiO₂ (Pecerillo & Taylor, 1976) se observa que los productos del Sabancaya corresponden a la serie calco-alcalina con alto contenido de K.

En los diagramas de Harker se plotean los óxidos en función a la SiO₂, 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 TiO₂, MgO, Al₂O₃, Fe₂O₃*, Na₂O y P₂O₅ (Fig. 3.12) se puede observar tendencias ligeramente negativas con respecto al SiO₂. Para las muestras de ceniza se observa una ligera dispersión de K₂O; mientras que, para los bloques se distingue una ligera tendencia negativa de K₂O.

La disminución de Na₂O indicaría el fraccionamiento de la plagioclasa en las andesitas. La tendencia negativa del MgO (Fig. 3.12) 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 de la titano-magnetita.

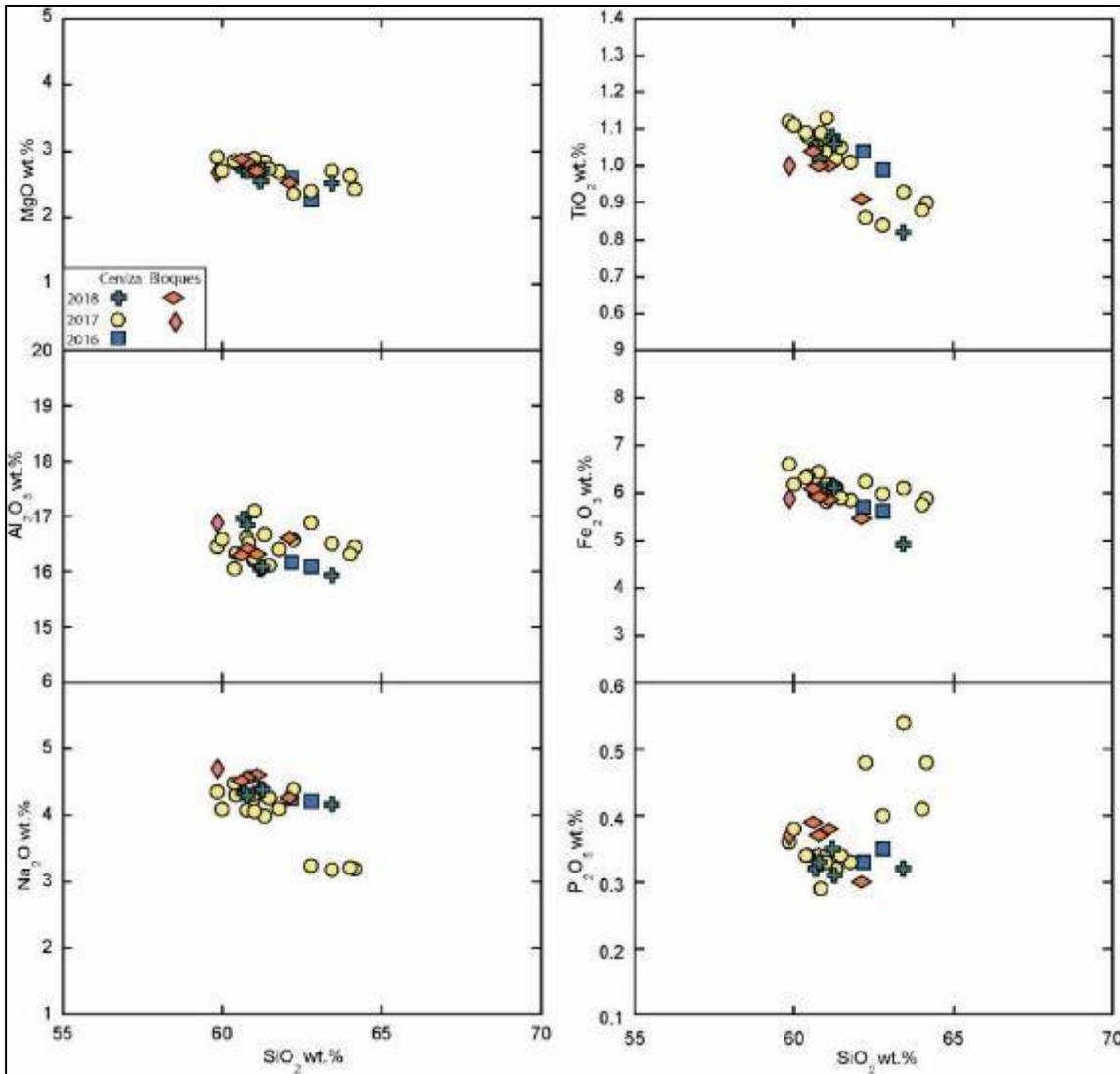


Figura 3.12. Diagramas de Harker que muestran las variaciones de elementos mayores en función de la sílice.

3.7. Medida de espesores IN SITU

Se tienen algunos datos de espesores in situ de ceniza medidos en campañas de campo durante 2016 – 2017. Según las medidas realizadas en los cenizómetros instalados en los pueblos del valle del Colca, en Achoma hasta el mes de noviembre se ha reportado 0.1 mm de espesor de ceniza. Así mismo, entre el 31 de julio y 1 de agosto 2017 se realizaron medidas de espesores de ceniza en un radio de 20 km hacia el sector Sureste y Este del volcán. Dentro de este contexto, en el sector proximal a 2.5 km del cráter se midió un espesor de 1.3 cm, en la pampa Sallalli entre 7 y 12 km, se ha medido 4 y 2 mm de espesor. Mientras que en el sector Patapampa a 25 km del volcán el espesor es inferior a 1 mm.

En el mes de setiembre se pudieron realizar medidas en la estación Ampato localizada a una distancia de 4.3 km del cráter del volcán en donde se registró hasta 1 cm de espesor y en la hacienda de Sallalli se midió 4 mm de espesor a 10 km de distancia. A fines del mes de octubre en la estación Ampato, el espesor incrementó a 1.2 cm, en Sallalli los espesores oscilaron entre 6 y 5 mm, localizados a 9 y 10 km de distancia, respectivamente y en Patapampa los espesores son entre 3 y 1 mm, a 16 y 27 km de distancia del cráter del volcán (Fig. 3.13). Es importante mencionar que, debido a la presencia de fuertes vientos en la zona, la ceniza fue retrabajada y retransportada.

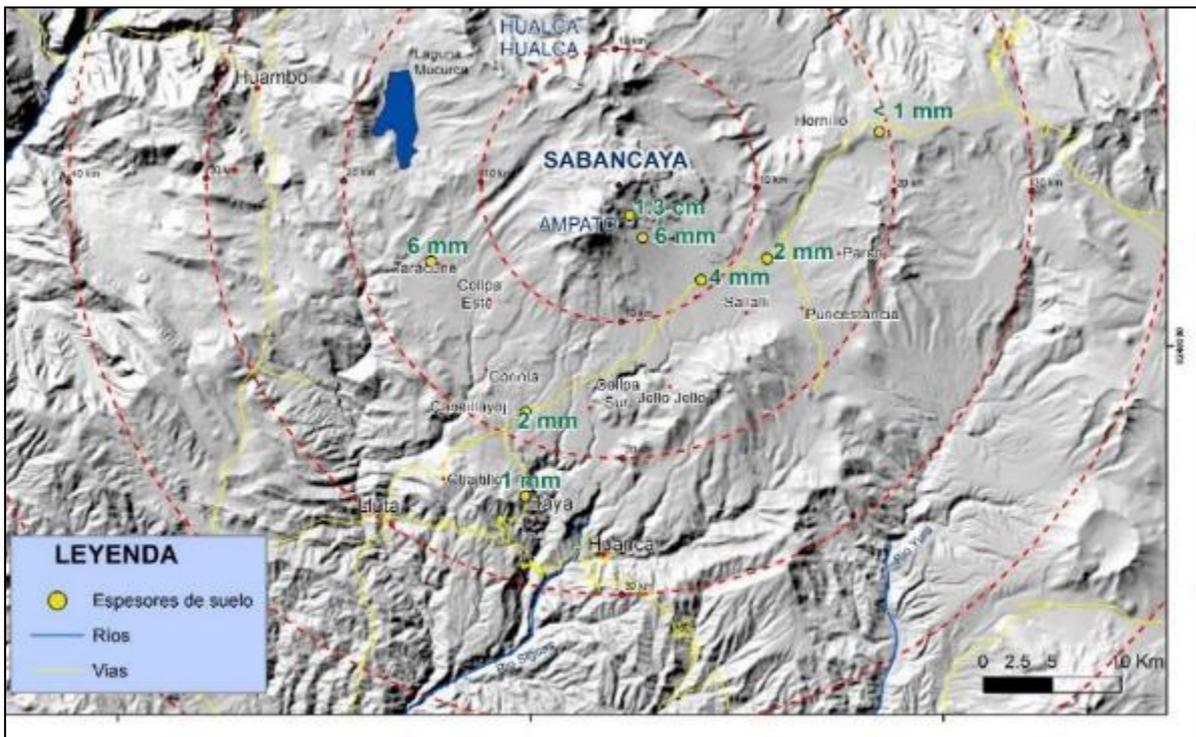


Figura 3.13. Mapa de espesores de ceniza acumulada en el suelo de los alrededores del volcán Sabancaya (2016-2017).

4.0. MONITOREO GEOQUÍMICO

El monitoreo geoquímico del volcán Sabancaya durante el 2018, se realizó con las medidas del flujo de SO_2 en las plumas volcánicas, para ello se empleó una red de escáner DOAS y móvil DOAS. También se midió la correlación de gases volcánicos (CO_2 , SO_2 , H_2O y H_2S) en las emisiones, con el equipo Multi gas y finalmente se realizó el monitoreo de fuentes termales alrededor del volcán.

4.1. Monitoreo del flujo de SO_2

Este monitoreo, durante el 2018, se realizó aplicando 2 métodos: (1) la red NOVAC de escáner DOAS y (2) móvil DOAS y se describen a continuación:

1. **Red NOVAC de escáner DOAS:** esta red está conformada por 3 escáneres instalados alrededor del cráter del Sabancaya: SAD1, desde abril del 2016, se ubica a 4 km al SE del cráter activo; SAD3, desde mayo del 2016, se ubica a 3.5 km al NE del cráter activo y SAD5.1, registrando desde agosto del 2017, se ubica a 9 km al NO del cráter activo. Estos 2 últimos equipos fueron proporcionados por el Servicio Geológico de los Estados Unidos a través del VDAP. Estos equipos escanean el cielo buscando las plumas volcánicas que pasan encima de ellas, midiendo el SO_2 , información que es transmitida a INGEMMET para su procesamiento. (Fig. 4.1).

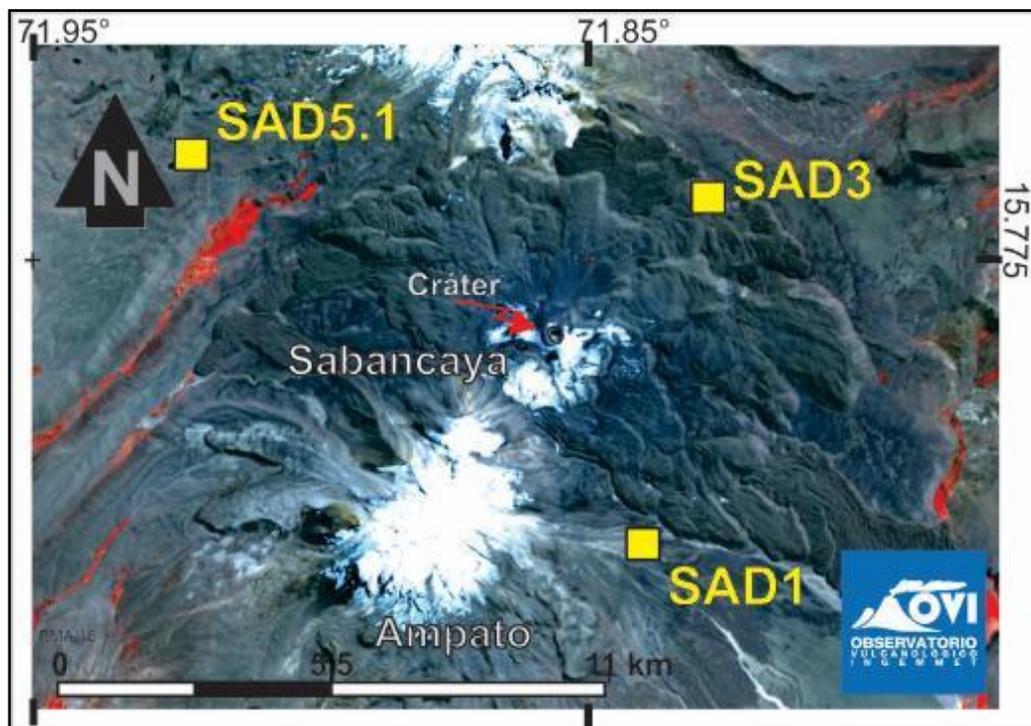


Figura 4.1. Red de sistemas escáner DOAS para el monitoreo de gas de azufre SO_2 en la pluma volcánica del Sabancaya.

2. **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 2018 (el 18 de agosto) se realizó una campaña exitosa gracias a que la dirección de la pluma coincidió con la dirección del viento y por ende se obtuvieron buenos resultados.

4.2. Resultados del monitoreo de los flujos de SO₂

El flujo de SO₂, por lo general, se mantuvo por debajo de las 6000 toneladas/día, salvo en 2 ocasiones, en febrero, donde el día 15 alcanzó las 9270 toneladas/día y en reiteradas ocasiones durante el mes de julio, el 13 de julio alcanzó un máximo de 14860 toneladas/día, el flujo más alto registrado durante todo el proceso eruptivo. Estos flujos de gases volcánicos SO₂, es normal para un volcán en proceso eruptivo, con un sistema abierto (Fig. 4.2).

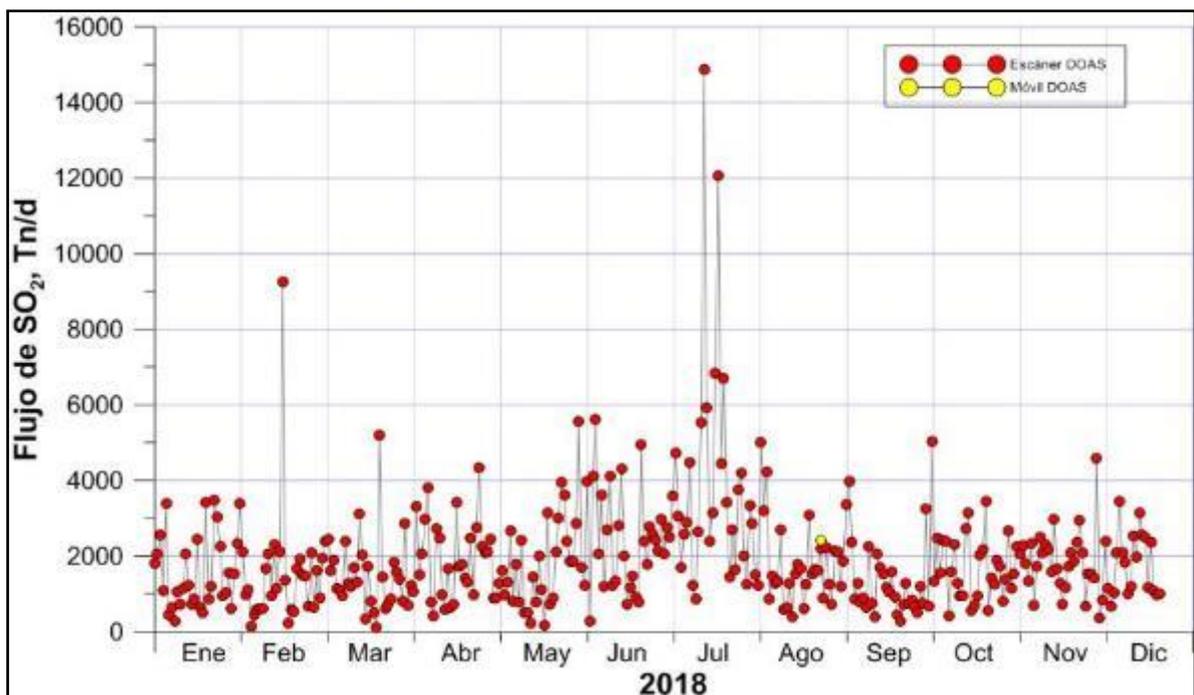


Figura. 4.2. Mediciones de los flujos máximos diarios con el equipo NOVAC, escáner de las lecturas diarias (color rojo), registradas en las estaciones SAD1, SAD3 y SAD5.1, Mediciones realizadas con el móvil DOAS (color amarillo) para el monitoreo del gas volcánico dióxido de azufre SO₂, en la pluma volcánica del Sabancaya, durante el 2018.

4.3. Monitoreo de fuentes termales

El monitoreo de los cambios en la composición química del agua, durante 2018, se realizó en 6 fuentes de agua: SA2, SA3, YA1, YA2, YA3 y CAL, adicionalmente se compararon con datos de aguas entre el 2013 y 2017, estas fuentes se ubican en un radio de 31 km del cráter del volcán (Fig. 4.3).

Se tomaron 35 muestras de agua para el análisis de 44 analitos, siguiendo la metodología descrita por Masías et al., (2010) y fueron analizados en el laboratorio de Química de INGEMMET.

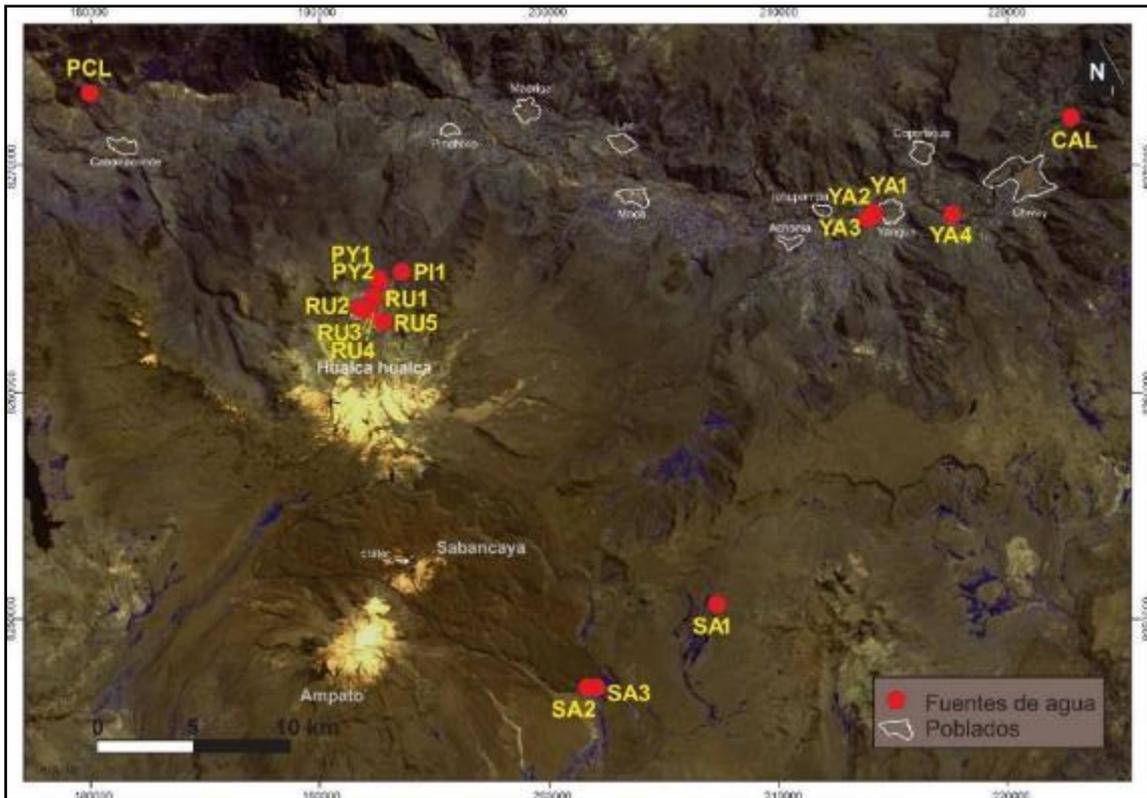


Figura 4.3. Mapa con la ubicación de las fuentes termales monitoreadas alrededor del volcán Sabancaya, entre 2013 y 2018.

4.3.1. Resultados del monitoreo de fuentes termales

Al comparar los resultados del 2018 con datos del último periodo eruptivo (2013-2017), se observa leves variaciones en analitos como: cloruros, sulfatos, bicarbonatos, sodio y potasio (Fig. 4.4); lo que se puede explicar cómo variaciones en el aporte magmático al sistema hidrotermal, esto se puede notar a mayor detalle en las fuentes SA2 y SA3, las más monitoreadas del Sabancaya (Fig. 4.5).

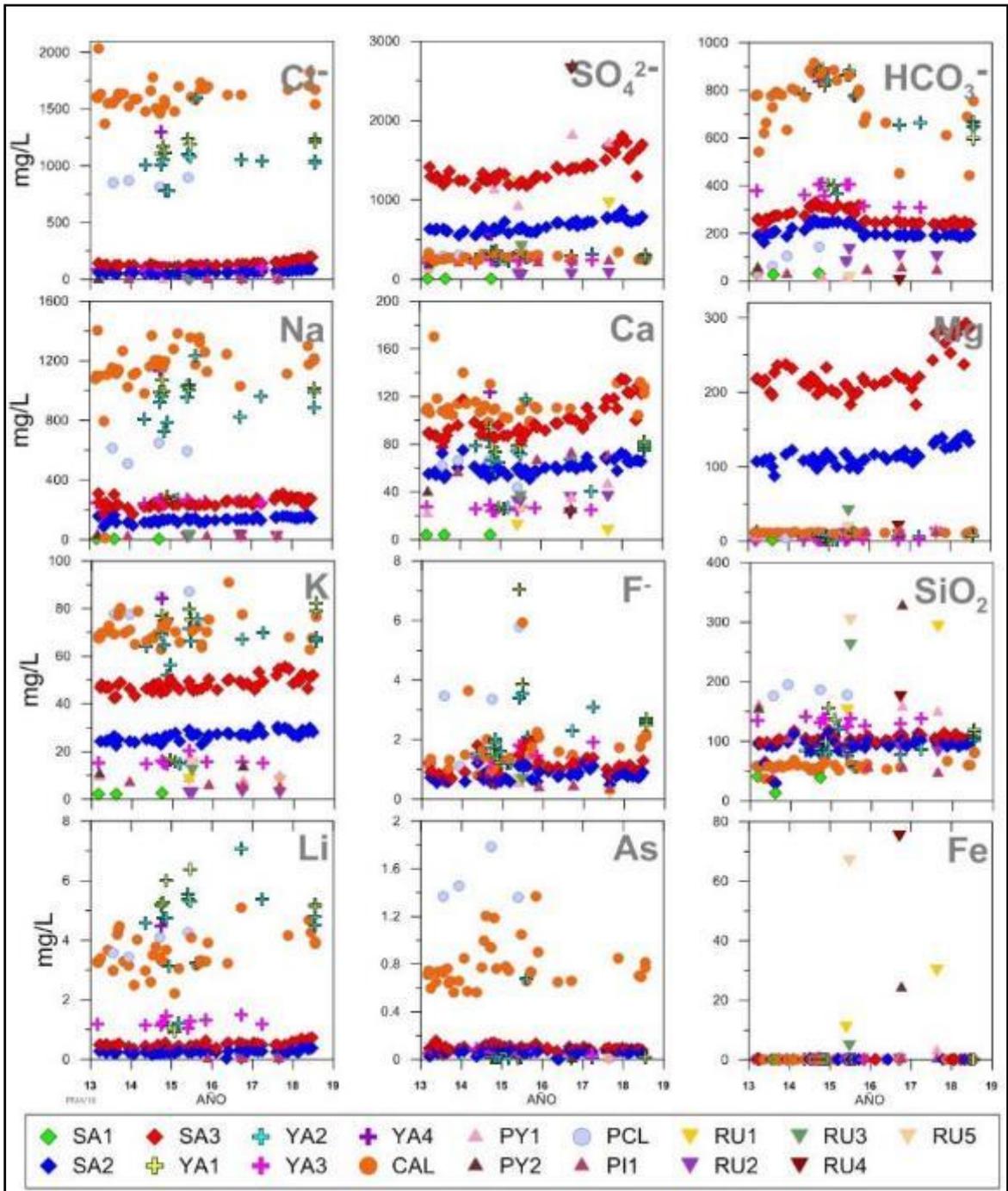


Figura 4.4. Resultados del monitoreo de las fuentes termales SA1, SA2, SA3, YA1, YA2, YA3, YA4, CAL, PY1, PY2, PCL, PI1, RU1, RU2, RU3, RU4, RU5 del volcán Sabancaya, entre 2013 y 2018.

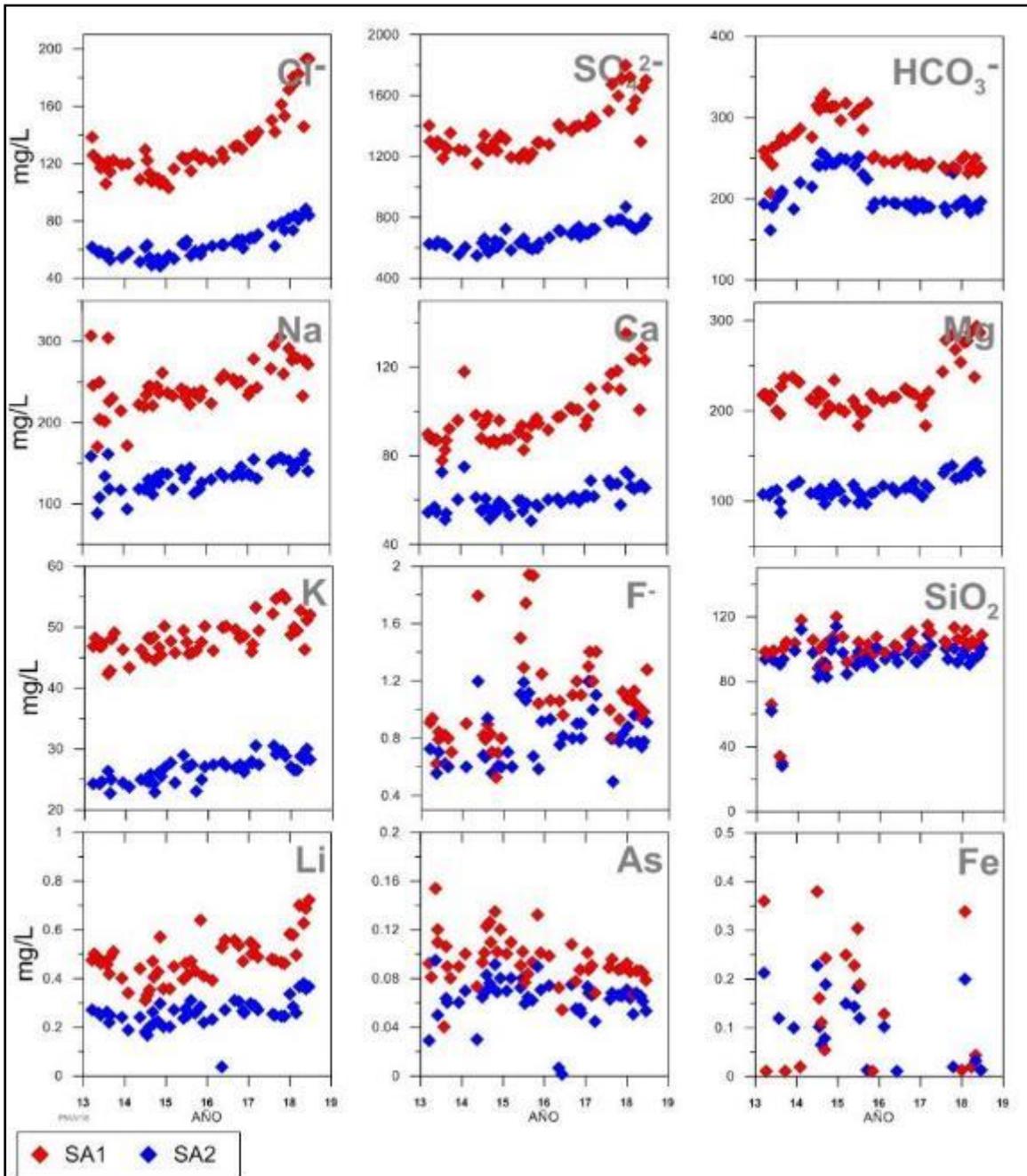


Figura 4.5. Resultados del monitoreo de las fuentes termales SA2 y SA3 del volcán Sabancaya, entre 2013 y 2018.

4.3.2. Resultados de temperatura de la Fuente SA3

La medición de la temperatura en la fuente SA3 se inició el 8 de marzo de 2013. Al observar la clara tendencia a incrementar, el 22 de octubre de 2013, se instaló una estación más robusta, con un registrador Tinytag Acuatic2 (663322) y con un paso de muestreo de 5 minutos. Este equipo se mantuvo hasta mediados del 2018. En la Fig. 4.6, se puede apreciar el registro de temperatura entre el 1 de junio del 2016 y el 20 de junio del 2018, donde se observa, claramente,

un incremento de 2.27 °C en 2 años. Además, durante este incremento, se observa periodos con cambios de pendiente donde se evidencia: (A) la parte pre eruptiva hasta fines del 2016; (B) inicio de la parte eruptiva hasta junio de 2017; (C) segunda parte del periodo eruptivo, hasta noviembre del 2017; (D) una tercera parte del periodo eruptivo, caracterizado por el incremento rápido de la temperatura, posiblemente por mayor aporte de magma hacia el sistema hidrotermal. La siguiente parte no se ha definido por falta de datos, pero inicia a principios de mayo del 2018.

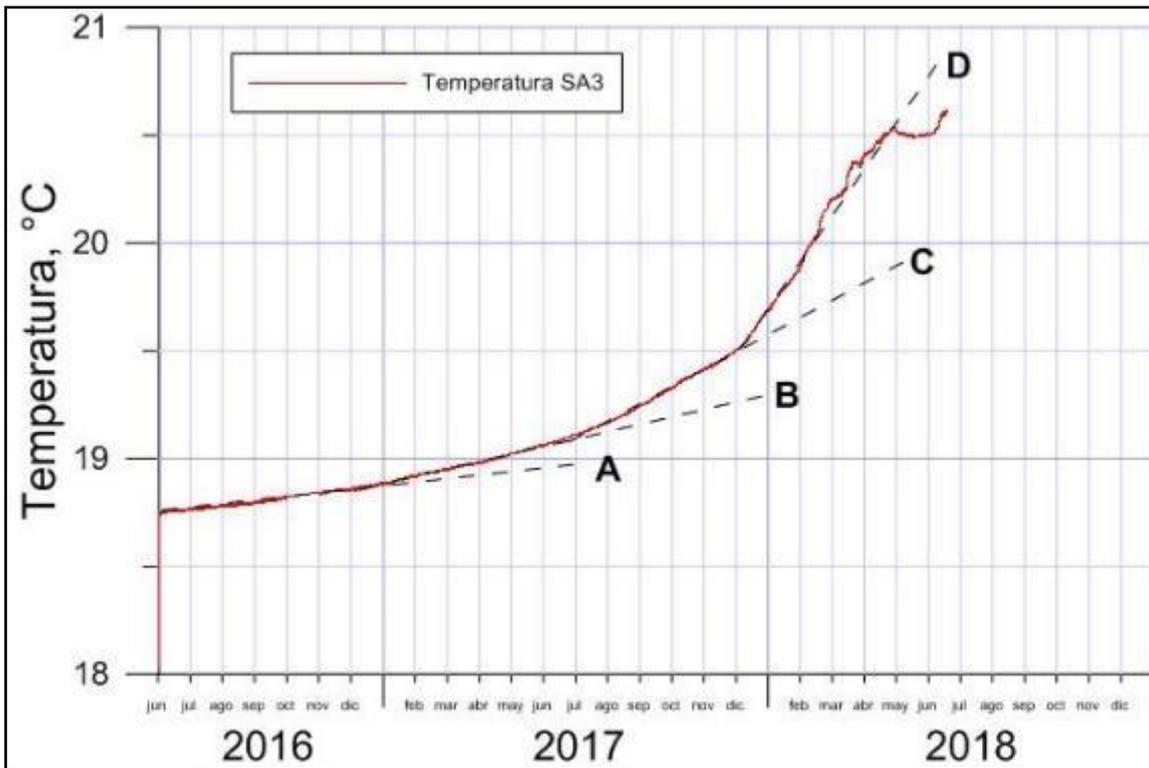


Figura 4.6. Temperatura registrada en la fuente termal SA3, entre enero y diciembre del 2018.

5.0. MONITOREO GEODESICO

5.1. Introducción

El monitoreo de deformación volcánica es una de las herramientas más importante para estudiar la actividad volcánica, lo que permite conocer cuándo y cómo ocurrirá una erupción y la posibilidad de identificar una futura erupción y el comportamiento anómalo del volcán antes, durante y después de la erupción. Las primeras mediciones GNSS corresponden a octubre del 2014, lo cual, ha permitido calcular los desplazamientos de la superficie en el volcán y a entender los movimientos de magma que ocurren debajo de la superficie. Estas observaciones se apoyan en la sismicidad volcánica, análisis de gases y otras técnicas que el OVI emplea a fin de mejorar la evaluación en situaciones de crisis volcánica.

Cada volcán presenta un comportamiento diferente en cada proceso eruptivo dada la naturaleza de cada sistema volcánico. Un episodio de deformación del edificio volcánico no siempre es un signo inequívoco de una erupción a corto plazo y mediano plazo; existen sistemas volcánicos que han mostrado nula o variaciones muy pequeñas en su morfología superficial durante procesos eruptivos (por ejemplo, Fournier et al., 2010).

El monitoreo de deformación del OVI inicia en octubre del 2014 con 03 equipos GNSS, para octubre del 2016 se implementa una estación más; actualmente se tienen 04 estaciones GNSS con transmisión en tiempo real.

Durante el año 2018, no se han tenido resultados en cuanto al método de imágenes de satélite InSAR, así como mediciones EDM debido a que la mayoría de los reflectores se encuentran cubiertos de ceniza volcánica.

5.2. Implementación de redes de monitoreo

La historia eruptiva del volcán Sabancaya hace que éste sea situado dentro del ranking del riesgo volcánico de muy alto peligro (Macedo et al., 2016), la clasificación de la peligrosidad sugiere que sea instrumentado con un cierto número mínimo de estaciones de monitoreo. En octubre de 2014 se inicia la instrumentación en base a 03 estaciones GNSS permanentes y en octubre del 2016 se implementa la 04 estación, todas con transmisión en tiempo real (Fig. 1.1), distribuidas alrededor del volcán, basado en la metodología del análisis de las variaciones de las líneas bases entre estaciones que ha permitido determinar procesos de inflación y deflación en el Sabancaya, básicamente, en las componentes horizontales ya que éstas presentan mejor precisión. Para la reducción de la velocidad de las placas se ha considerado la estación de referencia AREQ (estación IGS), ubicada lejos del edificio. Los puntos GNSS en el volcán están instalados sobre un pilar de concreto fundado sobre un afloramiento macizo de roca, con alturas de 1.2 m que permite discriminar los efectos multicamino (*multipath*).

Así mismo, se tiene una red de puntos GNSS de campañas temporales que se implementaron durante el 2018, recuperándose los datos 02 veces al año, a fin de mejorar los modelos de deformación y la cobertura espacial (Fig. 1.1).

5.3. Adquisición, procesamiento y evaluación primaria de datos

Para el volcán Sabancaya, el OVI dispone de diferentes marcas de equipos GNSS los que emplean software de procesamiento propios de cada marca. Para uniformizar el procesamiento de datos obtenidos de todos los equipos, se utilizaron los *softwares* *teqc*, *runpkr00* y el *hatanka* desarrollados por la UNAVCO y se encuentran disponibles en su página web. Asimismo, para medir las deformaciones asociadas a un proceso eruptivo, requiere emplear herramientas de alta precisión. Para eliminar la incertidumbre y generar una solución de alta precisión, el OVI emplea para su procesamiento el *software* científico GAMIT/GLOBK versión 10.7, desarrollado por el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) con colaboración del Instituto Scripps de Oceanografía y el Centro Harvard Smithsonian para la Astrofísica y que es un paquete que satisface las necesidades en el tratamiento, procesamiento y análisis de toda la información registrada por los GNSS sin importar la marca del equipo y se ejecuta en la plataforma Linux.

Los datos de deformación corresponden a un archivo diario de 24 horas, con un intervalo de muestreo de 15 s que son procesados con GAMIT/GLOBK, la cual, obtiene soluciones diarias para las posiciones de las 04 estaciones GNSS del Sabancaya, relativas a la estación AREQ (estación IGS); a su vez, esta data se procesa con las soluciones del MIT combinadas, incorporando efemérides precisas, correcciones atmosféricas, etc. Con el objetivo de mejorar la precisión de las soluciones, los resultados como los desplazamientos horizontales, son modelados mediante un software analítico como es el dMODELS que emplea diferentes parámetros de acuerdo al modelo específico (esférico, esferoidal, dique, etc.) y que permiten relacionar la posible (s) fuente (s) de deformación en correlación con otros parámetros volcánicos.

5.4. Resultados del monitoreo GPS

Los resultados corresponden al periodo de monitoreo 2018, de las cuatro estaciones GNSS permanentes, que han operado ininterrumpidamente durante todo el año, tal como se observa en la Fig. 5.1, los resultados corresponden al análisis de las series temporales, líneas bases entre estaciones y el avance en el modelamiento de la fuente de deformación.

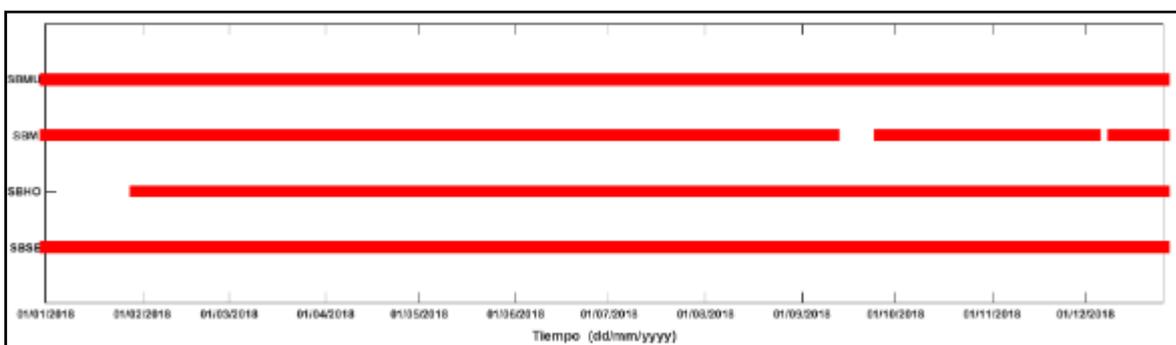


Figura 5.1. Registro de datos GNSS durante el año 2018, muestra la funcionalidad de las 04 estaciones GNSS en el volcán Sabancaya.

5.5. Series temporales y deformaciones asociadas

Durante el 2018 el Sabancaya continuó con su proceso eruptivo, la deformación fue analizada desde la serie de resultados GNSS de las 04 estaciones permanentes en las que se han determinado periodos inflacionarios y deflacionarios, en las Fig. 5.2 y 5.3 se observa desde principios de enero a junio un periodo de alzamiento de hasta 16 mm vista en la estación SBSE, esta tendencia se observa en la estación SBHO con menor magnitud, mientras que en las estaciones SBMU y SBMI se muestra un proceso deflacionario, probablemente, la fuente de deformación se encuentre cerca a estas estaciones, lo cual evidenciaría la migración del magma desde la fuente hacia el Sabancaya, posiblemente, por otro conducto secundario. Las componentes de desplazamiento evidencian este proceso, en la que estas se desplazaban a menor magnitud durante este periodo vista claramente en la estación SBSE y SBHO, mientras que en las estaciones más lejanas SBMI y SBMU la velocidad de desplazamiento es menor.

Las variaciones temporales en la deformación se registraron de junio a agosto con un alzamiento de hasta 14 mm en las estaciones SBSE y SBHO (estaciones próximas al cráter), sin embargo, en las estaciones SBMU y SBMI (estaciones lejanas) la deformación fue mínima (Fig. 5.2 y 5.3), las velocidades de desplazamiento no han registrado mayores cambios, consecuentemente se observa un proceso deflacionario de un periodo muy corto, lo cual, estuvo asociado con el incremento en la actividad explosiva del Sabancaya, otra segunda variación se observa desde mediados de agosto a setiembre de hasta 15 mm de alzamiento de magnitud mayor que la vista en junio a agosto, sucesivamente se registra una deflación de 7 mm por un lapso de un mes aproximadamente. Finalmente, se observa una última variación temporal desde mediados de octubre hasta inicios de diciembre con un alzamiento de 12 mm.

Los cambios temporales en las series GNSS han permitido observar periodos de deformación, en las cuales, la tasa de alzamiento incrementó respecto al primer periodo, lo que evidenciaría que continúo migrando magma desde la fuente de deformación hacia el Sabancaya en forma probablemente de pulsos o de forma intermitente, los cuales, concluyeron en explosiones con mayores energías que lo habitual.

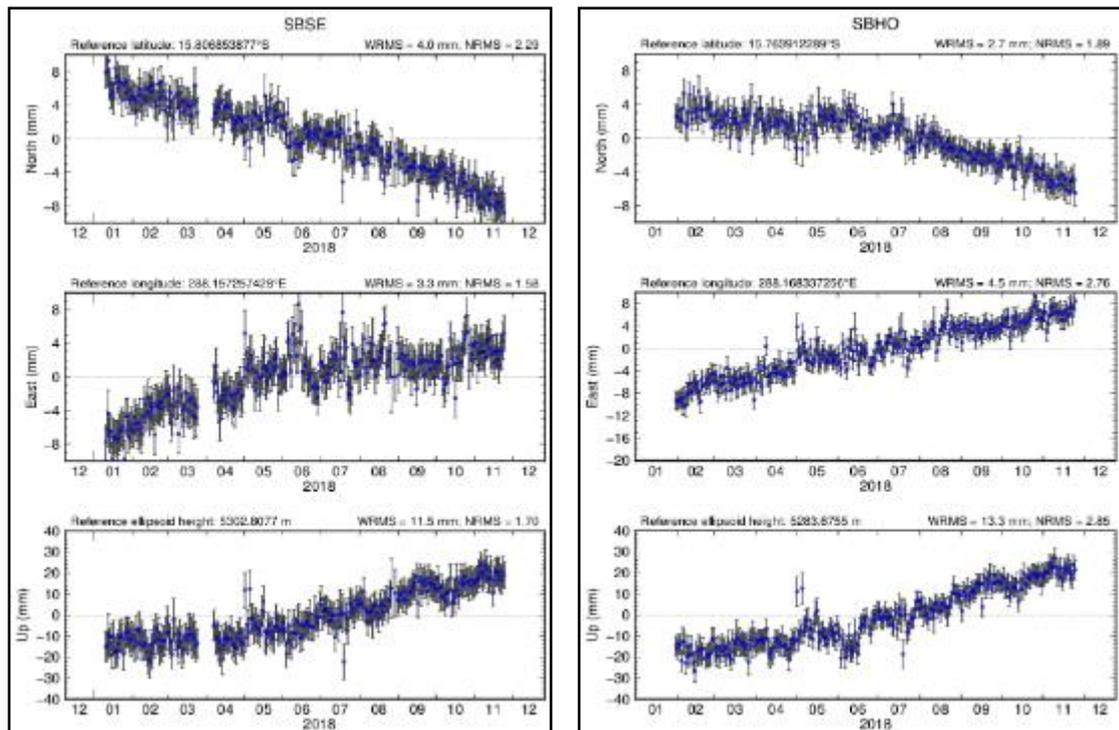


Figura 5.2. Serie temporal de las estaciones GNSS SBSE, SBHO, SBMI y SBMU, distribuidos a diferentes distancias del cráter, se observan las variaciones temporales en las 04 estaciones, en las estaciones cercanas con mayor magnitud y con un cambio en las estaciones lejanas.

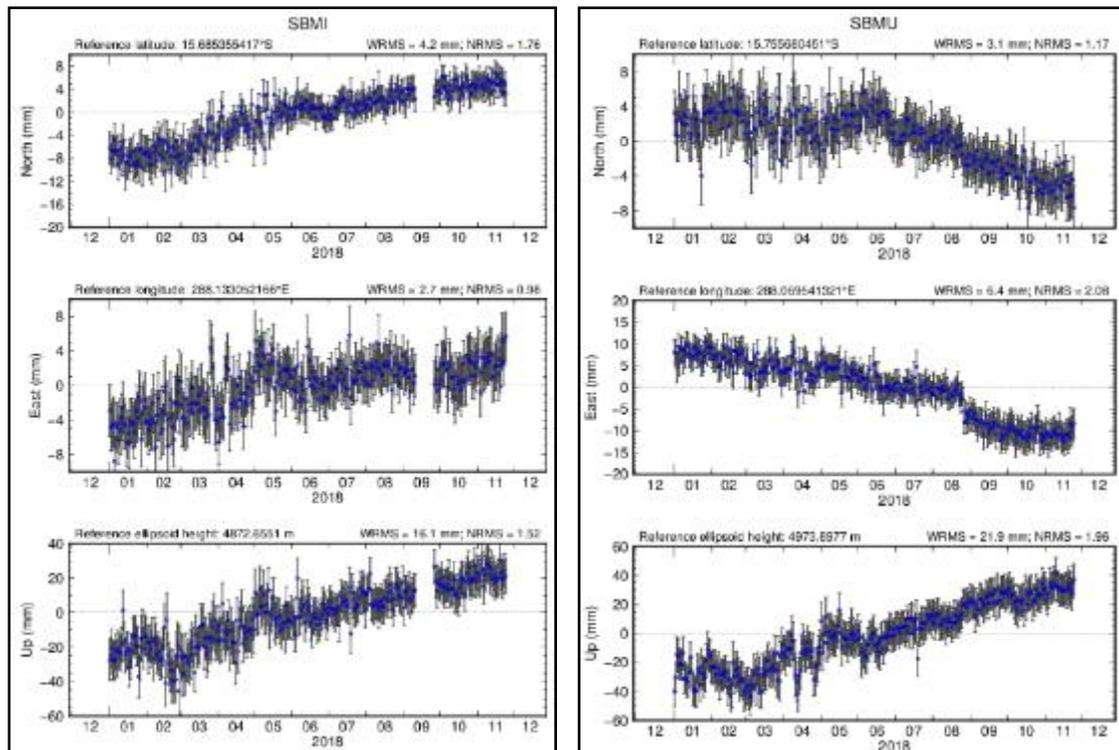


Figura 5.3. Serie temporal de las estaciones GNSS SBSE, SBHO, SBMI y SBMU, distribuidos a diferentes distancias del cráter, se observan las variaciones temporales en las 04 estaciones, en las estaciones cercanas con mayor magnitud y con un cambio en las estaciones lejanas.

5.6. Procesamiento de líneas base GNSS

Esta es una técnica que se basa en comparar las diferencias en las distancias entre dos o más estaciones GNSS para un periodo determinando (2018). Para el caso del volcán Sabancaya, estas líneas no atraviesan perpendicularmente el cono volcánico, por ello se han establecido hasta seis líneas base como se observa en la Fig. 5.4. Los resultados se muestran en las Fig. 5.5, 5.6 y 5.7.

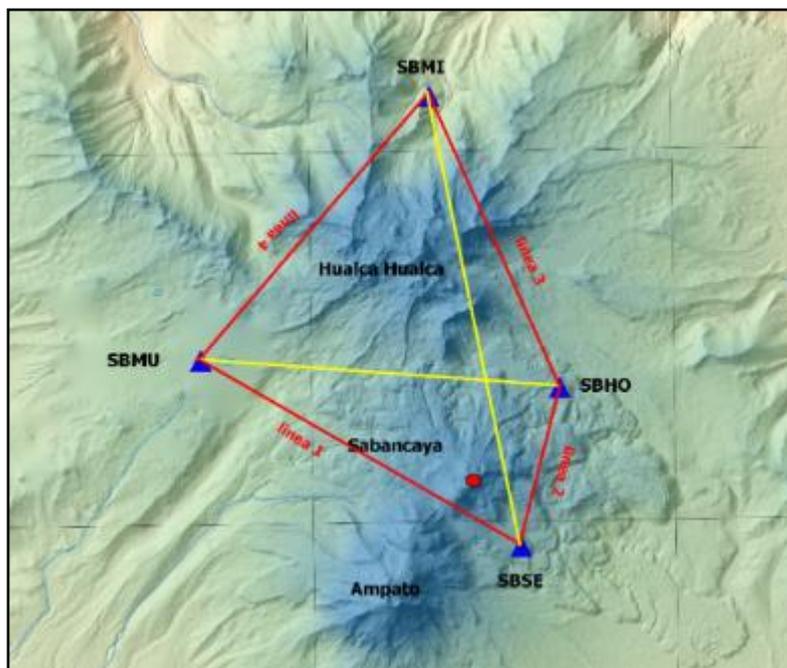


Figura 5.4. Diagrama de las líneas base entre las 04 estaciones GNSS permanentes en el Sabancaya, líneas rojas, líneas exteriores al cono volcánico y líneas amarillas son las líneas base interiores.

Línea base SBMU-SBSE: los desplazamientos en esta línea base se observan con mayor magnitud en la componente ESTE de hasta 28 mm, mientras la componente NORTE se mantuvo ligeramente estable, por otra parte, la componente vertical sufrió un hundimiento respecto a la estación SBMU de 36 mm (Fig. 5.5a). Línea base SBSE-SBHO: los desplazamientos de las componentes NORTE, ESTE y VERTICAL no han mostrado mayores cambios, ambos flancos del volcán se desplazaron a la misma velocidad sin variar en el tiempo (Fig. 5.5b). Línea base SBMI-SBHO: el mayor desplazamiento se observa en la componente NORTE, es decir, la estación SBHO se desplaza en sentido SUR respecto a la estación SBMI (Fig. 5.6a). Línea base SBMI-SBMU: la estación SBMU se desplazó hacia el SUR y OESTE, el desplazamiento se observa en ambas componentes, en general, la estación SBMU se desplazó en dirección sur-oeste (Fig. 5.6b). Línea base SBMI-SBSE: los resultados evidencian que la estación SBSE se desplazó en dirección SUR hasta 28 mm durante el año (Fig. 5.7a). En la línea base SBMU-SBHO: se registra el mayor desplazamiento entre estaciones específicamente en la componente ESTE de 36 mm, es decir, la estación SBSE se desplaza en sentido SUR.

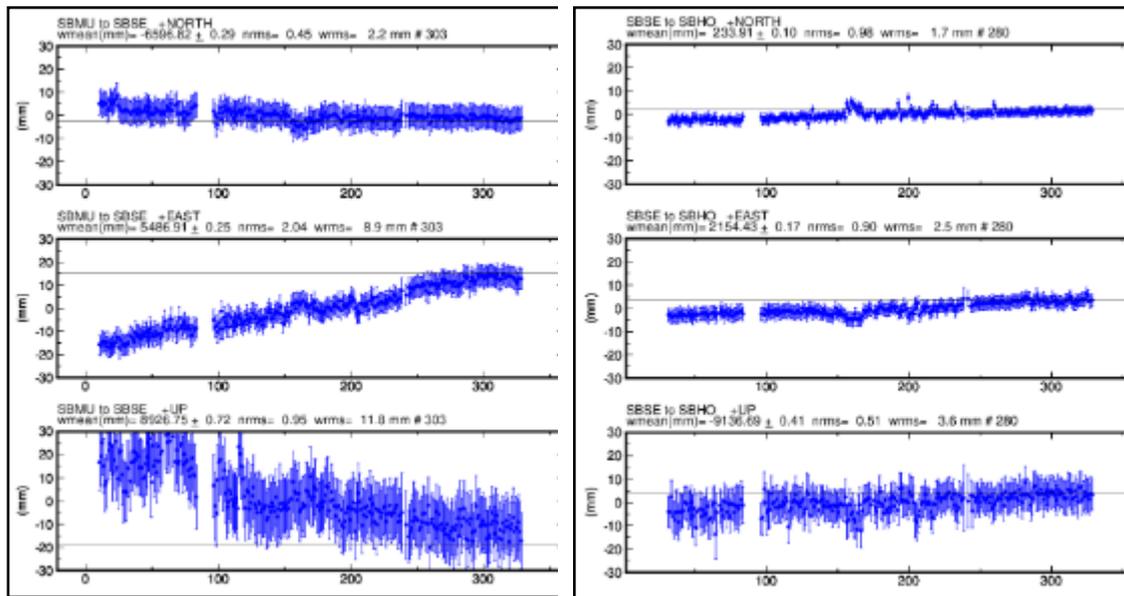


Figura 5.5 Variación temporal de la distancia entre las estaciones GNSS a). Línea base entre la estación SBMU a SBSE b). Línea base entre la estación SBSE a SBHO, la magnitud del desplazamiento de las distancias entre las estaciones es concordante con los periodos de cambios en el volcán.

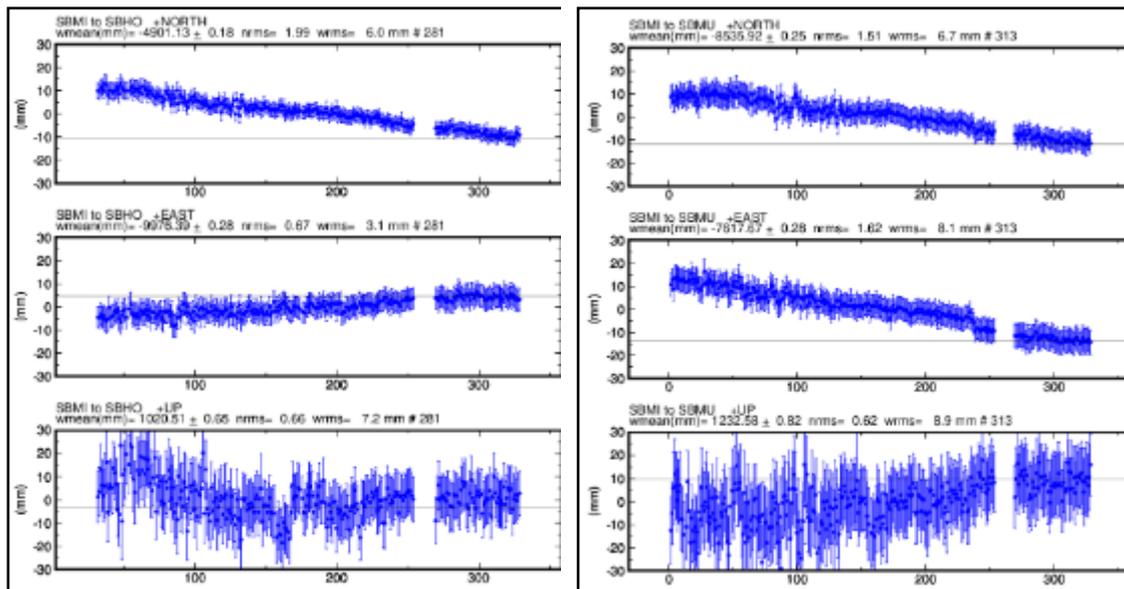


Figura 5.6. Variación temporal de las distancias entre las estaciones GNSS a). Distancia entre la estación SBMI a SBHO b). Línea base entre la estación SBMI a SBMU, la magnitud del desplazamiento de las distancias entre las estaciones es concordante con los periodos de cambios en el volcán.

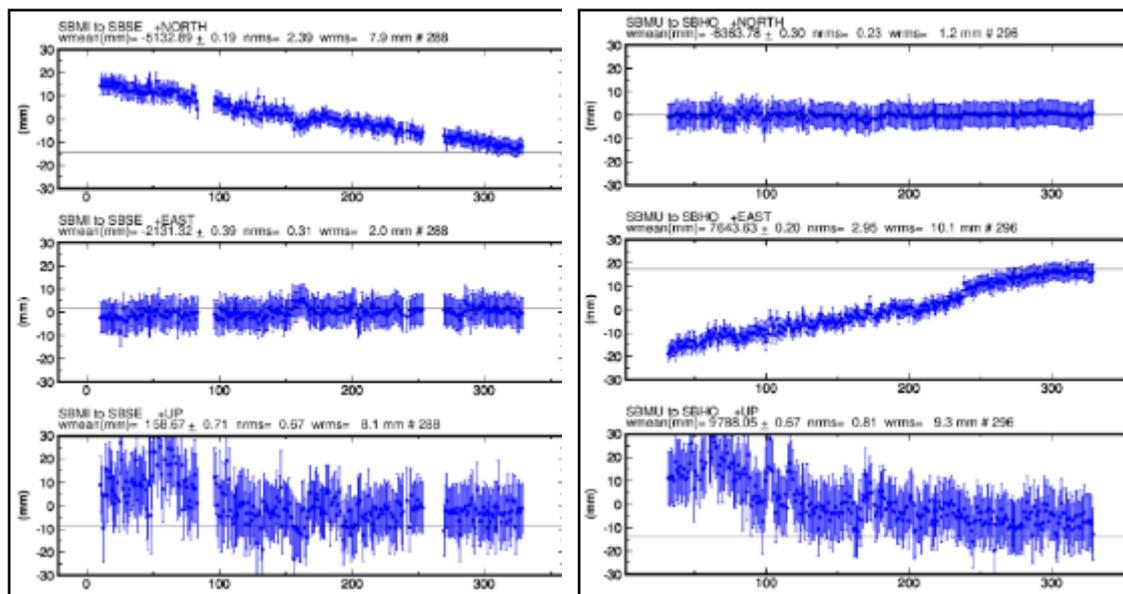


Figura 5.7. Variación temporal de las distancias entre las estaciones GNSS a). Distancia entre la estación SBMI a SBSE b). Línea base entre la estación SBMU a SBHO, la magnitud del desplazamiento de las distancias entre las estaciones es concordante con los periodos de cambios en el volcán.

5.7. Mapa de vectores de desplazamiento

El mapa de vectores permite visualizar la magnitud y la dirección de desplazamiento de las componentes horizontales y verticales de monitoreo de las 04 estaciones GNSS durante el 2018, el periodo de cálculo de los vectores de desplazamiento corresponde al periodo de mayor deformación observada en las series de tiempo para el Sabancaya, que va desde el mes de mayo a noviembre del 2018. Los resultados de los vectores muestran que los desplazamientos horizontales presentan un patrón radial hacia la fuente de deformación, que se ubica entre el Sabancaya y el Hualca Hualca, como se aprecia en la Fig. 5.8a, el mayor desplazamiento se observa en la estación GNSS SBMU a razón de 32 mm/año, mientras que las demás estaciones presentan una menor tasa de desplazamiento, como la estación SBMI a razón de 2 mm/yr. A su vez, las componentes verticales muestran un alzamiento en las 04 estaciones (Fig. 5.8b), la estación GNSS SBMU también muestra una mayor tasa de alzamiento a razón de 83 mm/yr, siendo la tasa máxima registrada, mientras que, en las demás estaciones, la velocidad de alzamiento en promedio fue de 53 mm/yr. Ambas componentes horizontales y verticales durante el periodo de monitoreo registraron un proceso inflacionario del edificio volcánico.

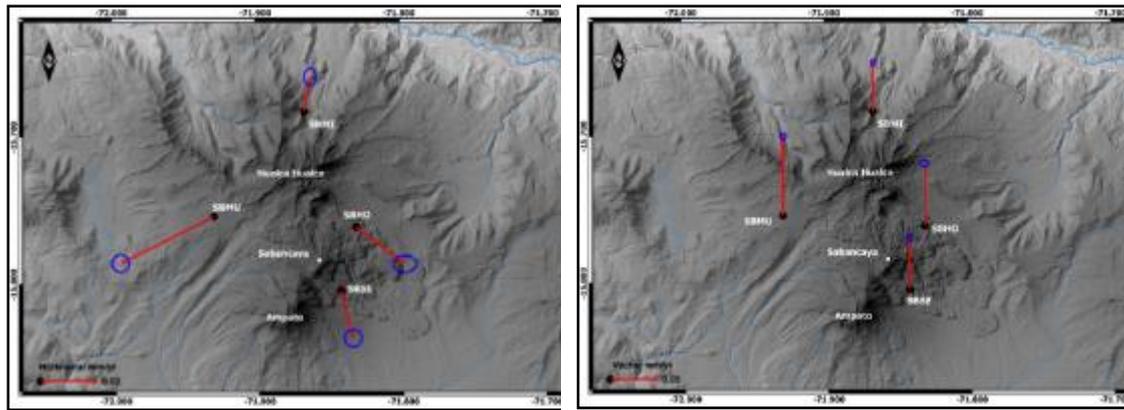


Figura 5.8. Mapa de vectores de desplazamiento horizontales y verticales registrados por la red de monitoreo del Sabancaya con sus respectivas elipses de error y la escala de los vectores se visualiza en la parte inferior. Derecha: Desplazamientos horizontales Izquierda: Desplazamientos verticales.

5.8. Modelos de deformación

Los resultados de monitoreo anuales permiten también determinar mediante modelos analíticos la posible ubicación de la fuente de deformación, esto, a través de las series de tiempo del periodo entre mayo a diciembre (periodo de mayor deformación), con los vectores de desplazamiento de ambas componentes de las 04 estaciones GNSS, las cuales, pueden ser ajustados por un cambio de volumen ($\Delta V = \Delta P \pi a^3 / G$), para una geometría empleada de tipo esférico o esferoidal (Battaglia et al, 2013), definido para un medio homogéneo y elástico (Okada, 1985; Mc Tgue, 1987), las inversiones del modelo de la fuente fueron llevados a cabo por el software Dmodels (Battaglia et al., 2013), el cual, busca mediante algoritmos de inversión el ajuste de la mejor geometría con los patrones de deformación obtenidos de las series temporales. Estadísticamente, no sería posible diferenciar entre una geometría esférica o esferoidal, etc.

Las soluciones llevadas a cabo por dMODELS sugieren que la fuente que genera las deformaciones en el Sabancaya se ubicaría entre el volcán Sabancaya y Hualca Hualca (Fig. 5.9, símbolo color amarillo), a una profundidad por debajo de los 14 km, lo cual, evidenciaría que los desplazamientos del magma hacia el volcán Sabancaya se daría por un conducto secundario, lo cual, aún se está en proceso de modelamiento para confirmar dicha teoría. El mejor modelo de ajuste fue el modelo de una fuente esférica (Fig. 5.9), donde los vectores de desplazamiento horizontales y verticales obtenidos con GNSS y las del modelo coinciden espacial y temporalmente.

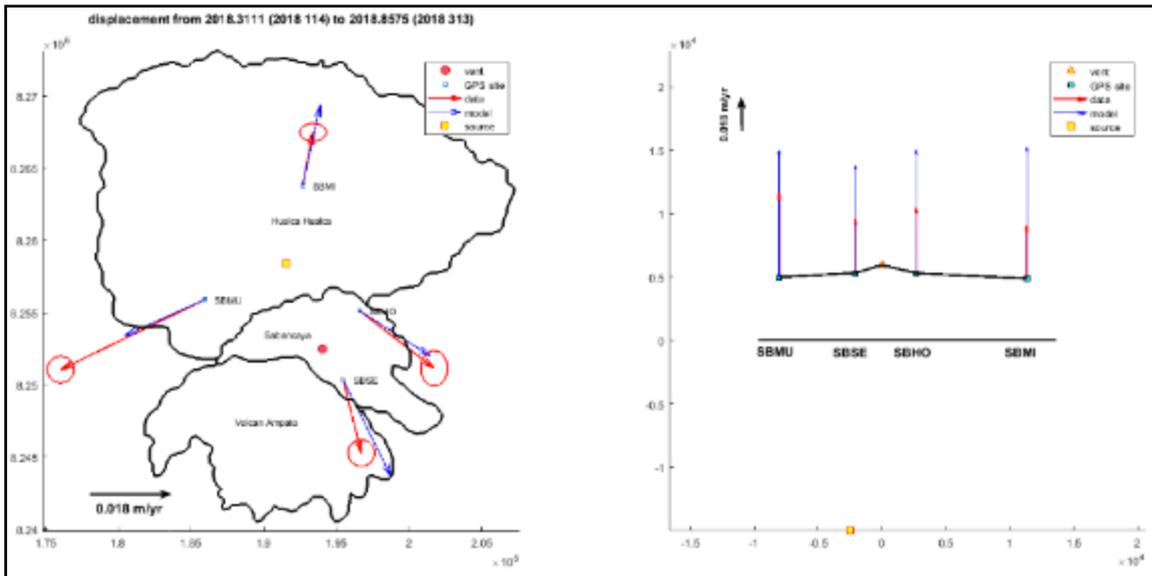


Figura 5.9. Determinación de la fuente de deformación para el volcán Sabancaya, generado por el software dMODELS, para los desplazamientos de las 4 estaciones GNSS, que determinan la fuente de las posibles deformaciones (símbolo cuadrado amarillo).

6.0. MONITOREO SÍSMICO

6.1. Red sísmica de monitoreo

La red de monitoreo sísmico del volcán Sabancaya durante el año 2018 estuvo conformada por 09 estaciones sísmicas de banda ancha: 04 estaciones sísmicas con transmisión de datos en tiempo real (SAB07, ISB10/SAB10, SAB11 y SAB16) y 05 estaciones sísmicas con almacenamiento de datos en su disco interno (SAB04, SAB05, SAB14, SAB15 y SAB17), Fig. 1.1

6.2. Trabajo de campo

Durante este año, se realizaron diversas comisiones de servicio al volcán Sabancaya (Fig. 6.1 y 6.2), con la finalidad de:

- Instalar dos nuevos sensores sísmicos cercanos al volcán (SAB04 y SAB05).
- Desinstalar el sensor sísmico SAB14.
- Cambio de sensores sísmicos debido a problemas con los equipos (SAB15 por SAB17, SAB10 por ISB10).
- Realizar el mantenimiento de las estaciones sísmicas a fin de mejorar las condiciones de instalación.
- Realizar la descarga de la data sísmica tanto de las estaciones temporales (SAB17, SAB04, SAB05) como de las estaciones telemétricas (ISB10, SAB07, SAB11 y SAB16).

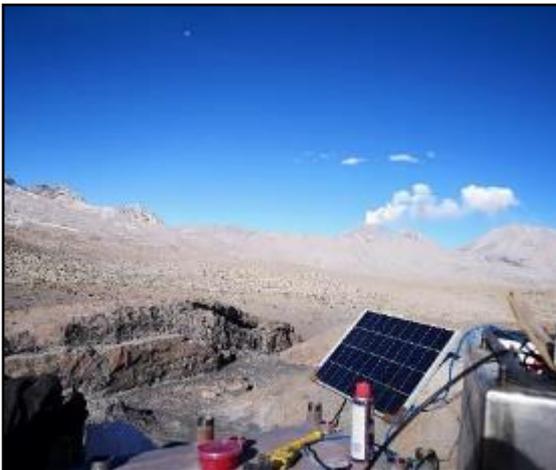
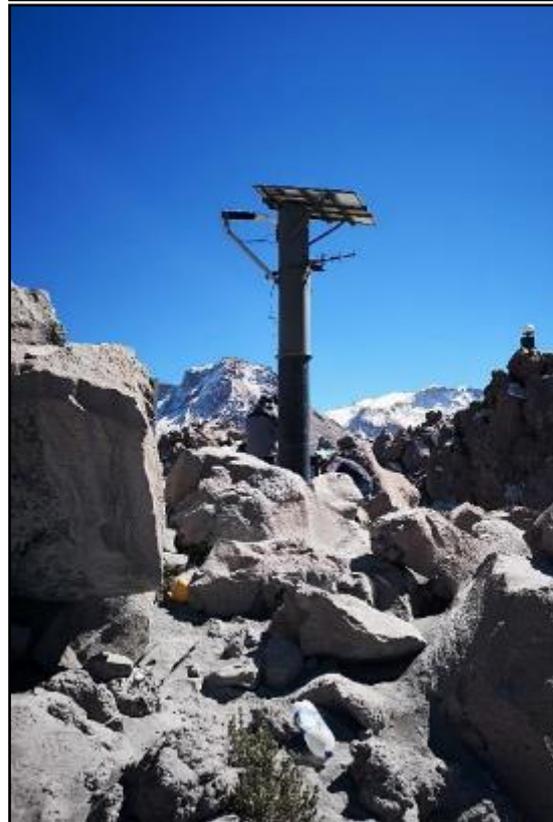


Figura 6.1. Descarga de la data sísmica de la estación telemétrica SAB10.

Figura 6.2. Descarga de la data sísmica de la estación telemétrica SAB11.



6.3. Operatividad

En la Fig. 6.3, se aprecia la operatividad de todas las estaciones sísmicas que conformaron la Red de monitoreo sísmico durante el año 2018. Las barras horizontales de color azul (estaciones sísmicas temporales) y naranja (estaciones sísmicas telemétricas) representan los periodos de funcionamiento de las estaciones sísmicas; 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.

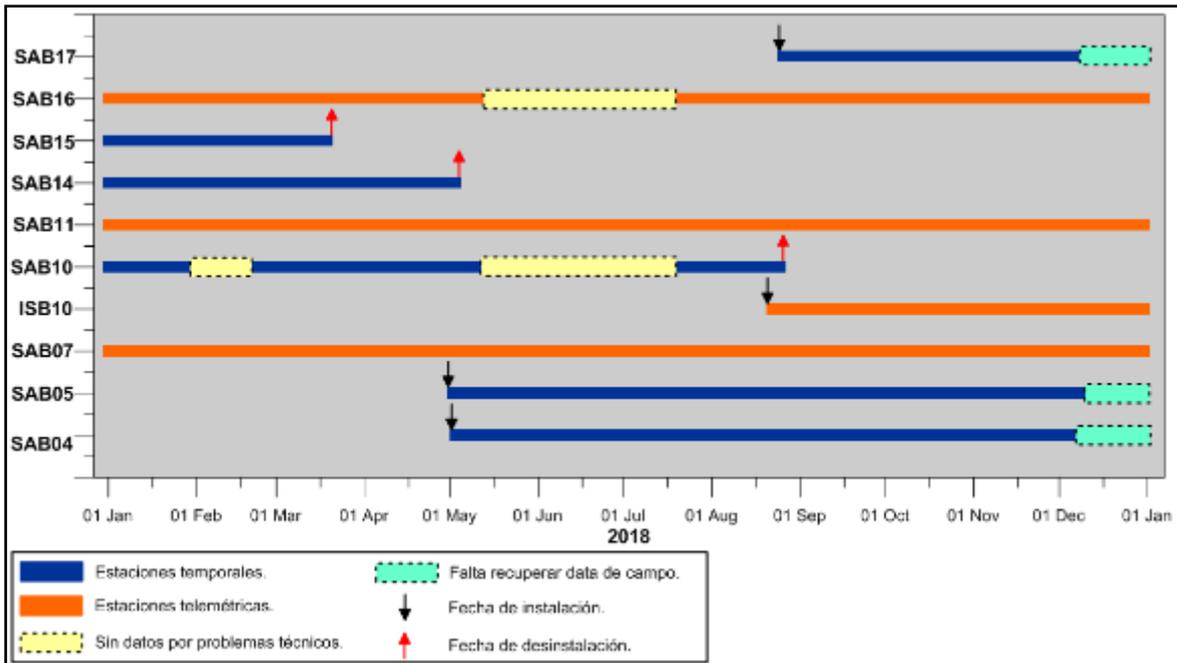


Figura 6.3. Operatividad de las estaciones sísmicas que conformaron la Red de monitoreo sísmico del volcán Sabancaya – 2018.

6.4. Procesamiento y análisis de la data sísmica

La data sísmica es registrada en modo continuo y son almacenados en archivos de 1 hora en el formato original del equipo sísmico, en este caso, en formato .GCF, y a su vez, en formato .SAC

Al realizar la clasificación de las señales sísmicas, 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)
- Localización preliminar de los eventos sísmicos de fracturamiento.
- Magnitud local del evento sísmico (MI).

Todo este procesamiento se realiza a través del programa *Classification_v02* (modificado por personal del OVI del programa *Classification* de Lesage, 2009) y el programa SEISAN versión 10.4 (Otemoller et al., 2016), Fig. 6.4 y 6.5

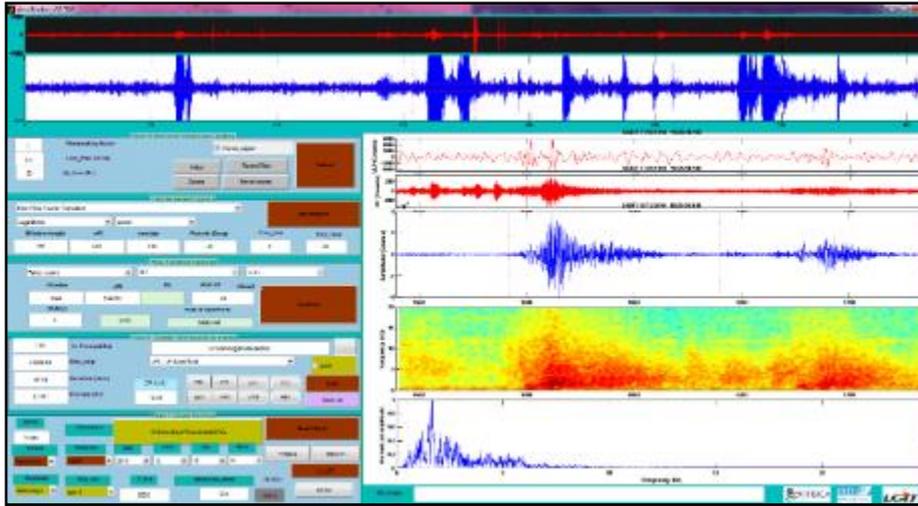
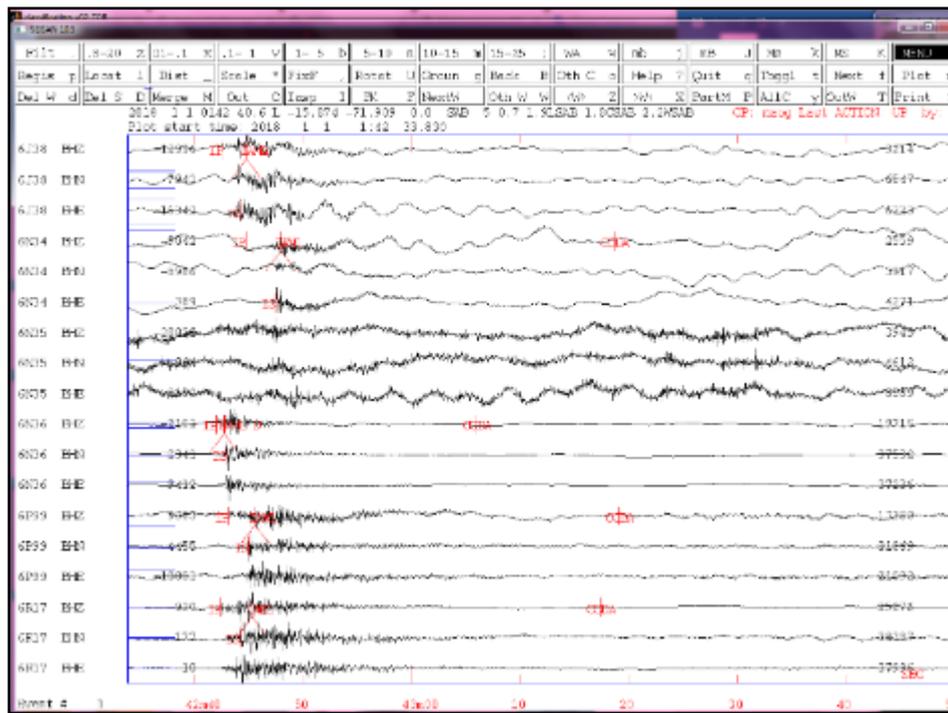


Figura 6.4.
Ventana principal del Programa Clasificación_V0, usado para el análisis de las señales sísmicas registradas en el volcán Sabancaya.

Figura 6.5.
Ventana principal del Programa SEISAN, usado para la localización de las señales sísmicas de fracturamiento o registradas en el volcán Sabancaya.

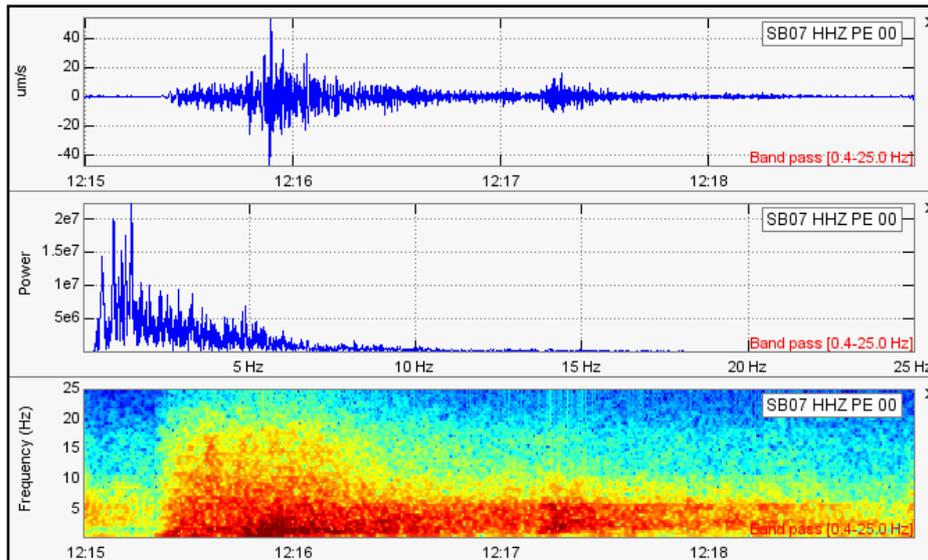


6.5. Sismicidad del volcán Sabancaya

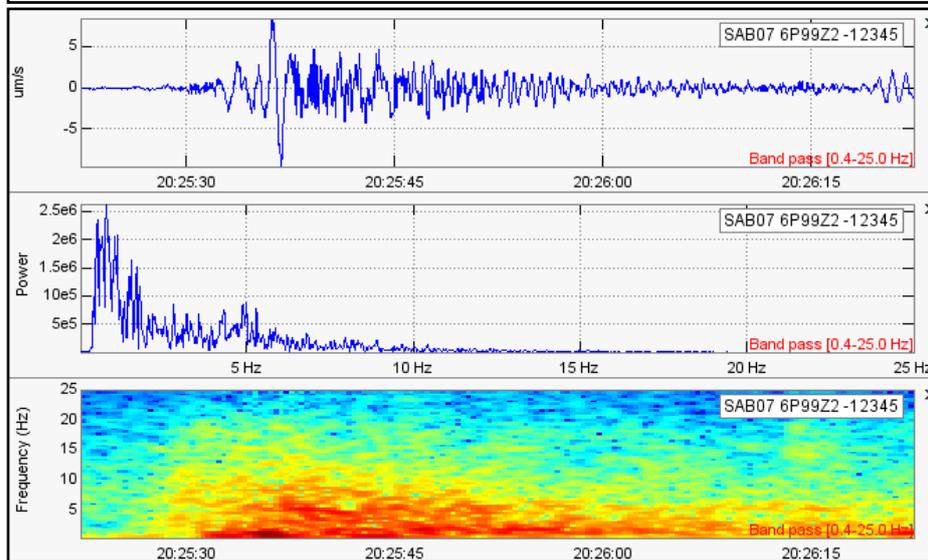
6.5.1. Señales sísmicas representativas

Durante el 2018, se registraron, principalmente, las siguientes señales sísmicas (Fig. 6.6):

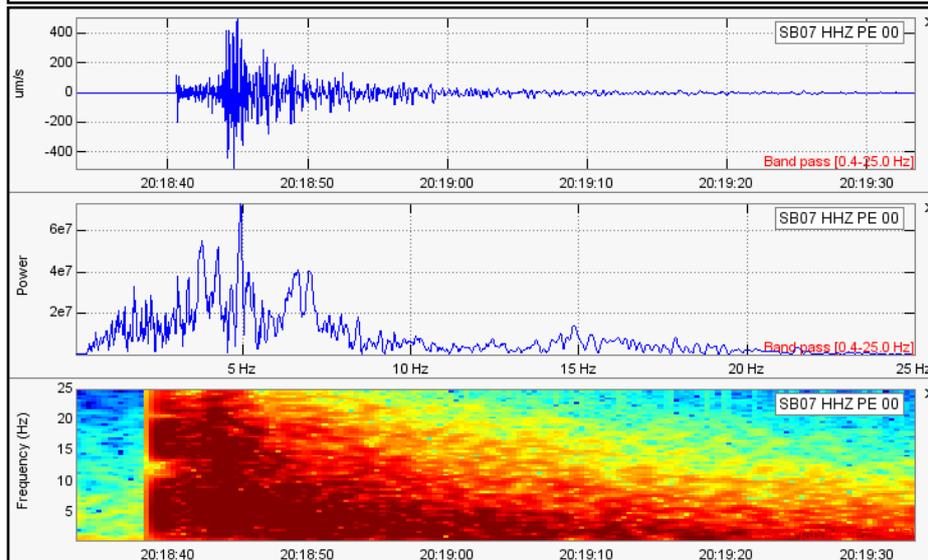
- a. *Explosiones (EXP)*: estos eventos se caracterizaron por presentar una onda de muy baja frecuencia (VLF) la cual se asoció al movimiento de fluidos en profundidad (frecuencia dominante en 0.9 Hz) y enseguida se registraba la ocurrencia de tremor de altas frecuencias (16 Hz), dicho tremor se asoció propiamente a la salida del material particulado, en este caso sería la ceniza. Las energías que presentaron estas señales fueron de hasta 3.3 MJ y desplazamientos reducidos que oscilaron entre 0 y 119 cm² (Fig. 6.6a).
- b. *Sismo Híbrido (HIB)*: estos eventos asociados al ascenso de magma hacia la superficie, se caracterizaron por presentar frecuencias dominantes en 1 y 5 Hz, duraciones de hasta 134 segundos, energías de hasta 0.3 MJ y desplazamientos reducidos entre 0 y 90 cm². De la Fig. 6.6b se aprecia que, durante el periodo analizado, solo se presentó una etapa importante de este tipo de sismicidad (entre febrero y abril); posteriormente, los sismos híbridos se presentaron muy esporádicamente y de baja energía (< 0.5 MJ).
- c. *Sismo volcano tectónico distal (VTD)*: estos eventos principalmente se asociaron a la actividad de sistemas de fallas y lineamientos en los alrededores de la zona del volcán (Fig. 6.6c), se caracterizaron por presentar fases impulsivas P y S; con frecuencias dominantes entre 2 y 9 Hz, duraciones de hasta 168 segundos y energías considerables de hasta 1049.0 MJ.
- d. *Tremor volcánico (TRE)*: el tremor espasmódico se asoció principalmente a la emisión de gases y ceniza y se caracterizó por presentar frecuencias dominantes entre 0 y 11 Hz, con duraciones de hasta 3600 segundos, las energías de estas señales alcanzaron hasta 1.4 MJ y desplazamientos reducidos entre 0 y 60 cm². Por otra parte, se identificaron 16 episodios de tremor armónico, asociados al movimiento y/o ascenso de magma a la superficie, con frecuencias dominantes de hasta 3 Hz, duraciones de hasta 210 segundos, energías sísmicas hasta de 0.09 MJ y desplazamientos reducidos que oscilaron entre 1 y 6 cm² (Fig. 6.6d).
- e. *Sismo volcano tectónico (VT)*: estos eventos asociados al fracturamiento de material rocoso en el interior del edificio volcánico (Fig. 6.6e), se caracterizaron por presentar en su mayoría fases impulsivas P y S; con frecuencias dominantes entre los 4 - 15 Hz, duraciones de hasta 200 segundos y energías de hasta 11.6 MJ. Principalmente este tipo de sismicidad se registró a manera de enjambres al Norte del volcán, por la zona del volcán Hualca – Hualca.
- f. *Sismo Largo Periodo (LP)*: estos eventos asociados al movimiento de fluidos y/o gases (Fig. 6.6f), se caracterizaron por presentar formas de ondas regulares; con frecuencias dominantes entre 0 y 6 Hz, duraciones de hasta 655 segundos, energías de hasta 1.2 MJ y desplazamientos reducidos entre 0 y 102 cm². Es importante resaltar que, entre setiembre y noviembre, la energía de estos eventos incrementó ligeramente sugiriendo una mayor presencia de fluidos que hicieron incrementar la actividad explosiva en el volcán.



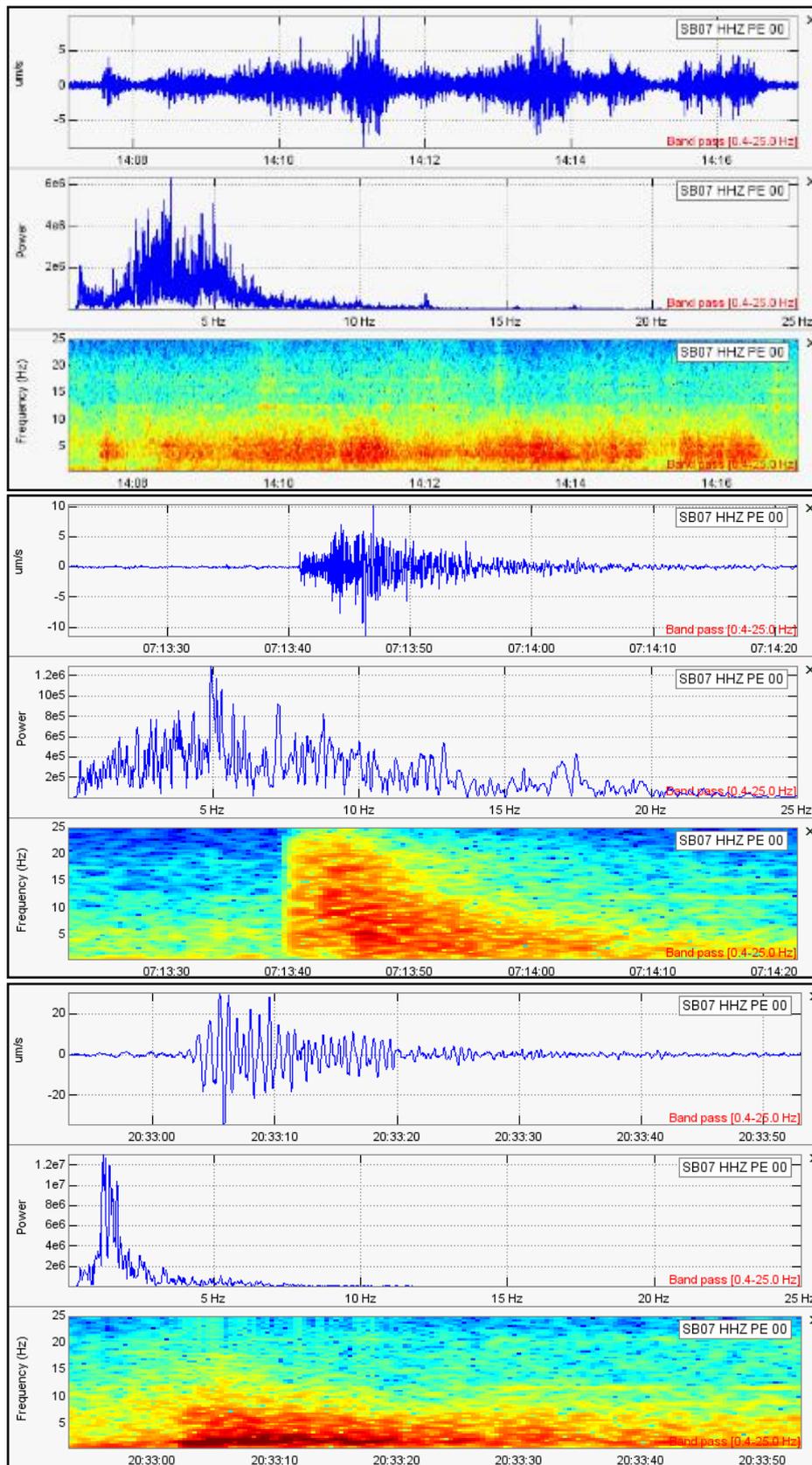
a) Señal sísmica de explosión - EXP, registrada el 31 de enero a las 12:15 UTC.



b) Señal sísmica de tipo HIB (híbrido), registrada el 06 de febrero a las 20:25 UTC.



c) Señal sísmica de tipo VTD (volcano - tectónico distal), registrada el 03 de abril a las 20:18 UTC.



d) Señal sísmica de tipo TRE (tremor espasmódico) registrada el 15 de julio a las 14:07 UTC.

e) Señal sísmica de tipo VT (volcano - tectónico proximal) registrada el 28 de julio a las 07:13 UTC.

f) Señal sísmica de tipo LP (largo periodo) registrada el 13 de setiembre a las 20:33 UTC.

Figura 6.6. Señales sísmicas registradas en el volcán Sabancaya, durante el año 2018.

6.5.2. Estadística general y por tipo de evento

La estadística general de los sismos volcánicos en el Sabancaya registrados durante el 2018, mostró una intensa actividad sísmica, contabilizándose un total de 76 573 señales de origen netamente volcánico, con un promedio de 223 sismos por día.

La Fig. 6.7, muestra los tipos de eventos identificados en el volcán Sabancaya durante el año 2018; donde se aprecia, claramente, que la actividad sísmica de este volcán estuvo dominada por la ocurrencia de sismos de largo periodo – LP (38 874), seguido por actividad tremórica – TRE (18 970 episodios, haciendo un total de 1 192 h), explosiones – EXP (8 472), luego sismos volcano – tectónicos proximales VT (8 639), sismos volcano – tectónicos distales VTD (1 051), sismos híbridos – HIB (542) y por último sismos de muy bajo periodo – VLP (25).

Su representación en porcentaje (Fig. 6.7) muestra que los sismos LP constituyen el 51 %, a razón de 113 sismos por día; la actividad tremórica TRE con el 25 %; las explosiones EXP y los sismos VT proximales con el 11 %, en menor porcentaje los sismos los sismos VTD distales, híbridos y VLP con menos del 2 %.

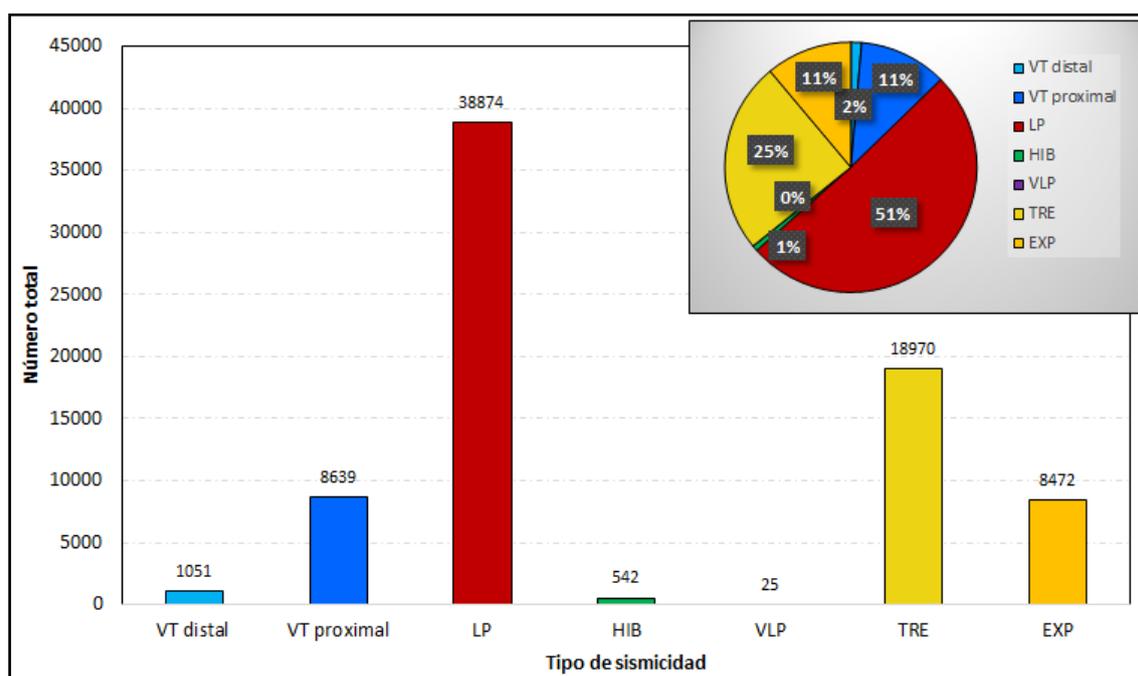


Figura 6.7. Histograma de la ocurrencia de los principales eventos sísmicos registrados en el volcán Sabancaya con su respectivo porcentaje de ocurrencia, periodo 2018.

A continuación, en la Figura 6.10 se puede apreciar la evolución temporal de la sismicidad del volcán Sabancaya que presentó a lo largo del 2018 dominada, principalmente, por sismos de bajas frecuencias, tales como:

- **Sismos de largo periodo - LP;** registrándose en promedio la ocurrencia de 106 sismos LP/día y los cuales indicaban principalmente el tránsito de fluidos dentro del edificio volcánico (Fig. 6.10c), a su vez, se realizó un análisis de la frecuencia principal, amplitud, energía sísmica y desplazamiento reducido de estos sismos (Fig. 6.8) y durante el año 2018 se aprecia que las

frecuencias principales oscilaron en promedio entre los 2 y 3 Hz, el predominio de estas bajas frecuencias nos indica que a lo largo del año 2018 la fuente estuvo dominada por un sistema magmático y esto se corrobora con la actividad superficial, en donde se registraron explosiones y/o emisiones que expulsaron cantidades moderadas de ceniza. Por otra parte, a partir del 01 de setiembre hasta fines de año, se observó un incremento en todos los parámetros analizados para los sismos de largo periodo, lo cual, se interpretó como una etapa precursora a un incremento en la actividad del volcán, básicamente, se registraron mayor número de explosiones energéticas y también mayor duración en los episodios de tremor volcánico, ambos eventos asociados a las emisiones de gases, ceniza y vapor de agua.

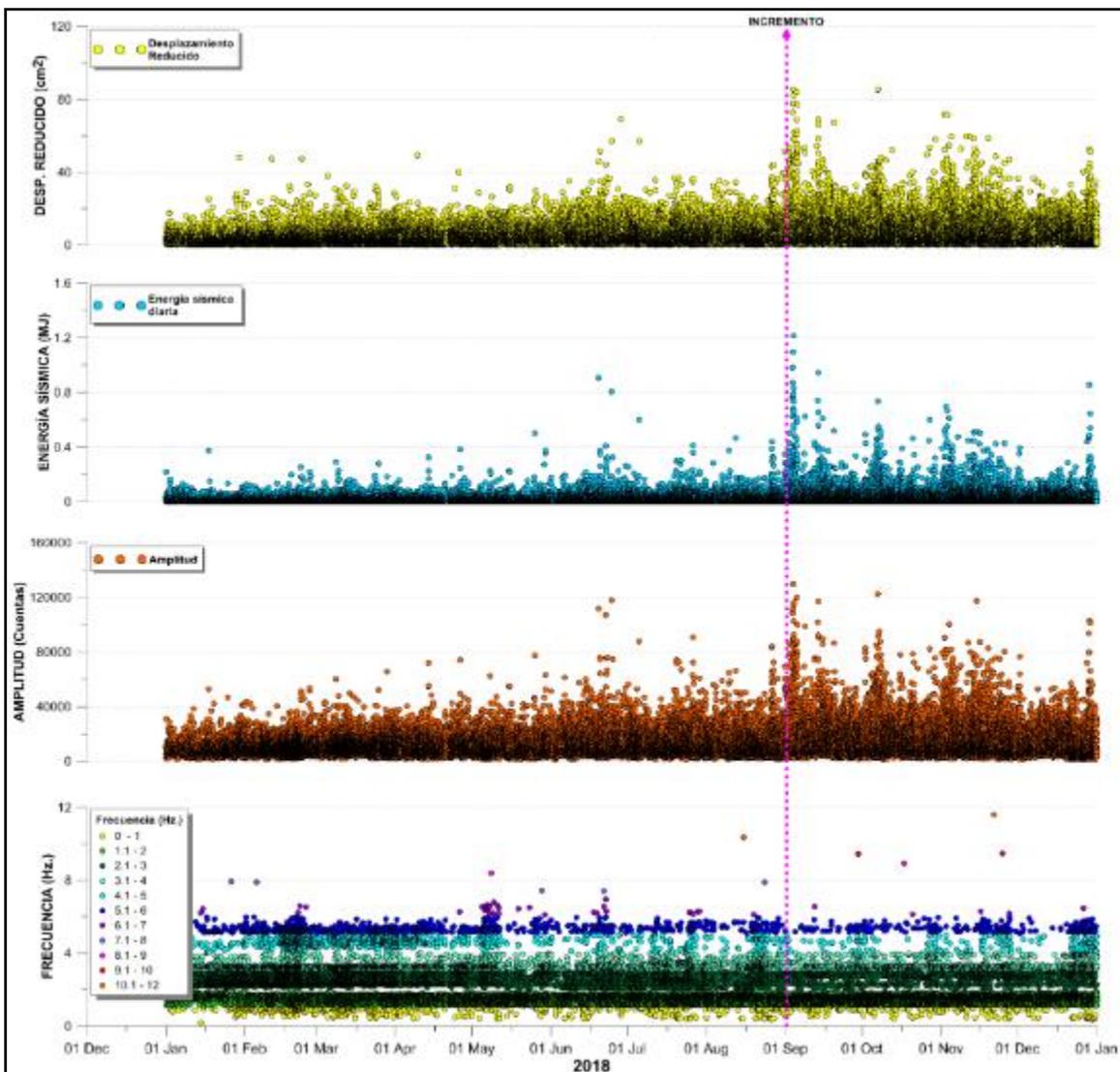


Figura 6.8. Paámetros analizados de los sismos LP registrados en el volcán Sabancaya, periodo 2018.

- Durante el año se registraron varias señales sísmicas de **tremor volcánico**, asociados a explosiones y/o emisiones de gases y ceniza. Se registraron episodios de mayor duración en la actividad tremórica debido, probablemente, a la continua expulsión de material particulado (ceniza) hacia la superficie (Fig. 6.10f), un claro ejemplo fue el día 21 de abril donde se tuvo una intensa actividad tremórica haciendo un total de 16 h de tremor y fue asociada a la continua emisión de gases y cenizas (Fig. 6.9)

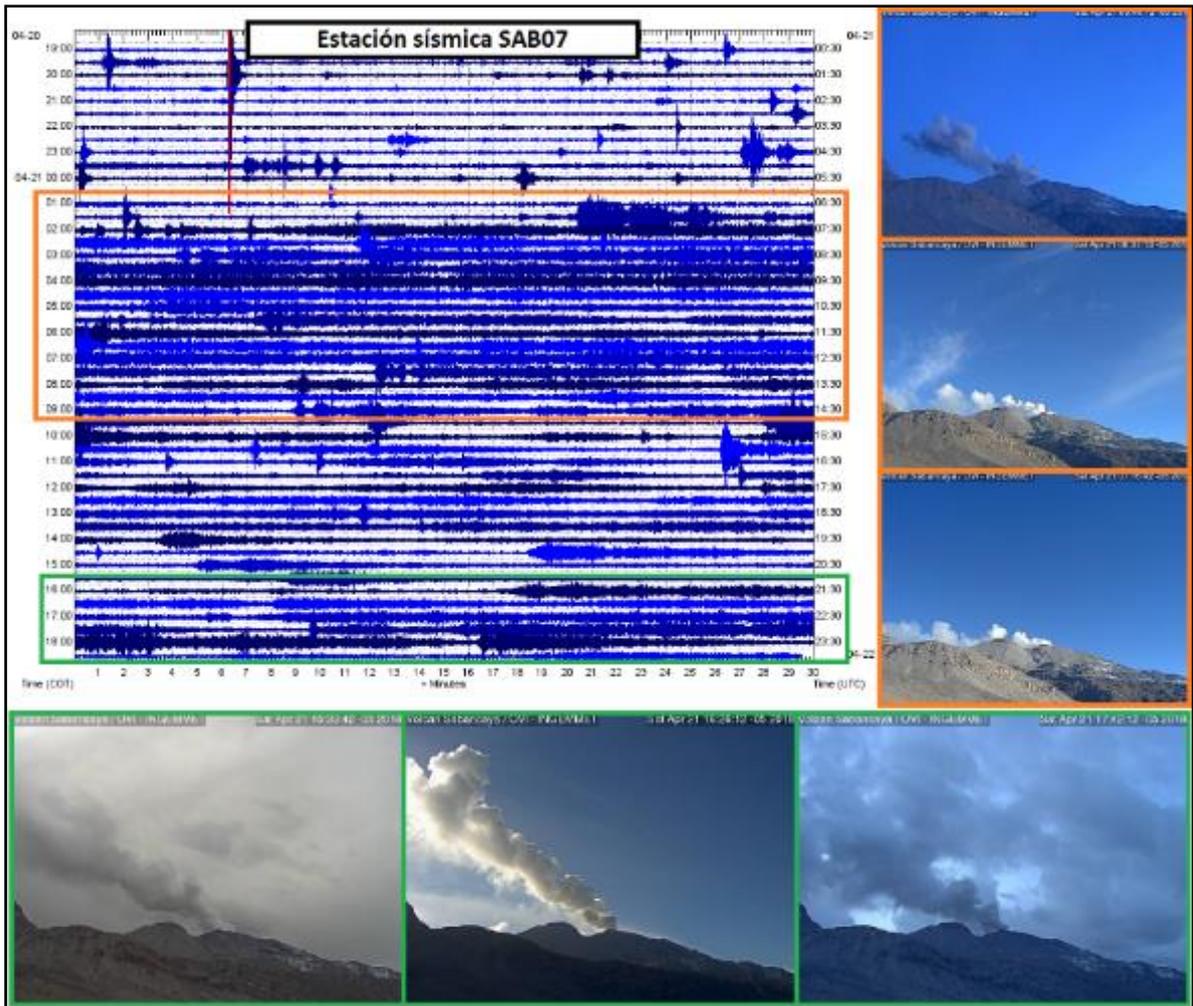


Figura 6.9. Tremor espasmódico registrado el día 21 de abril con una duración de 16 horas, dicha actividad se asoció a la continua emisión de gases, ceniza, pero principalmente vapor de agua.

- **Sismos híbridos** (asociados al ascenso de magma), a lo largo del 2018 solo se tuvo una etapa en donde la tasa de ocurrencia de este tipo de sismicidad fue continua (enero - marzo), registrándose hasta un promedio máximo de 22 híbridos los días 9 y 15 de febrero; sin embargo, la energía liberado por estos sismos fue menor a 1 MJ (Fig. 6.10d), dicha etapa posiblemente indicó un ligero aporte de magma hacia la superficie. Posteriormente, desde abril hasta fines de año, estos sismos se presentaron muy esporádicamente y a su vez, los niveles de energía ocasionados por dichos sismos fueron muy bajos (0.1 MJ).

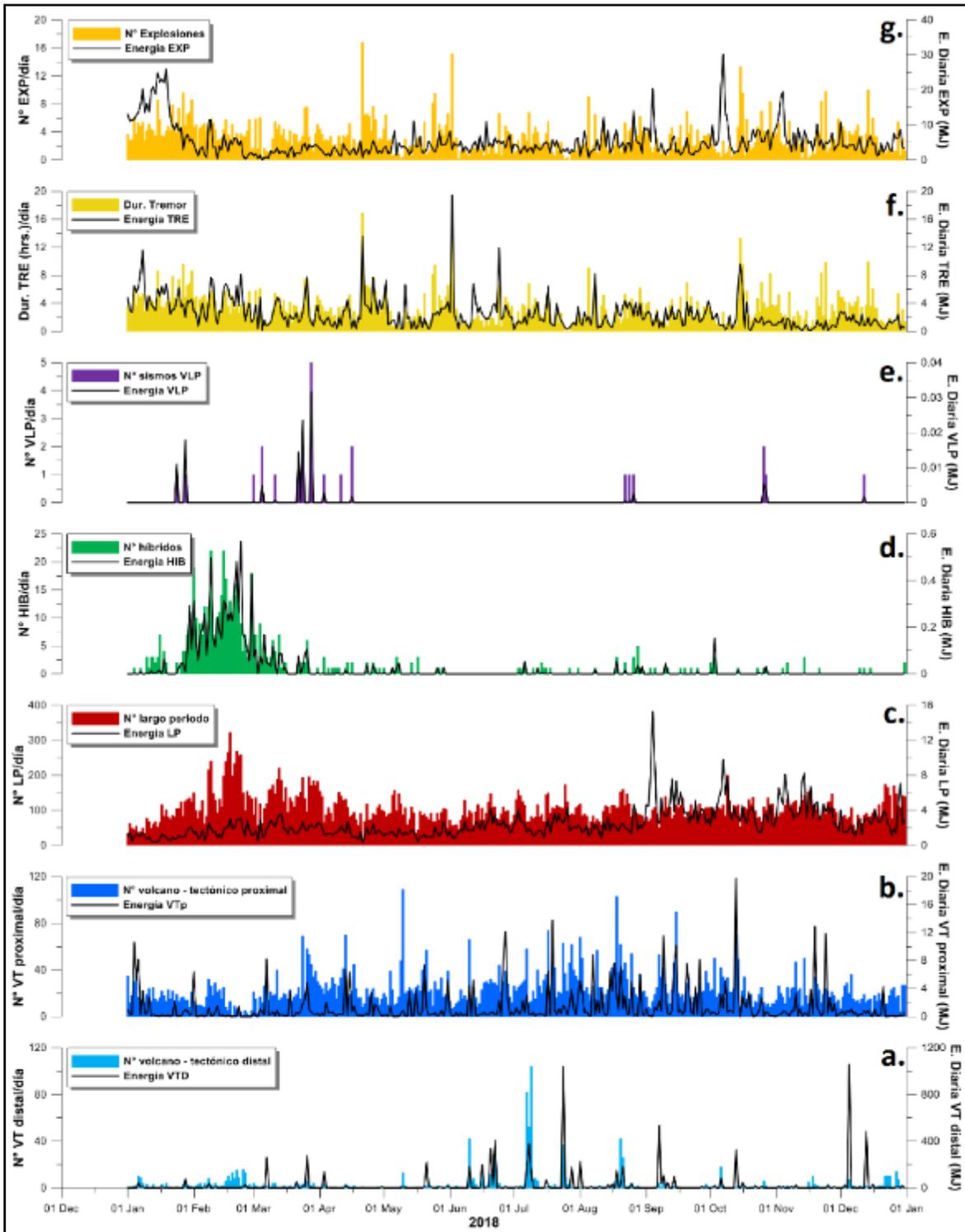


Figura 6.10. Evolución temporal de la actividad sísmica de volcán Sabancaya por tipo de evento identificado para el periodo 2018.

- Las **explosiones** durante el año 2018 mostraron un comportamiento de moderado (explosiones de 2 a 3 MJ) a leve (explosiones < 2 MJ), dichas explosiones generaron importantes columnas eruptivas de ceniza, gases y vapor de agua. Sísmicamente, la explosión más importante durante el año se registró el día 01 de enero a las 02:26 h, con una energía de 3.3 MJ y un desplazamiento reducido de 102 cm². Asimismo, se aprecia que

en el mes de enero presenta mayor tasa de ocurrencia de explosiones, registrándose un promedio de 47 EXP/día; posterior a esta fecha, desde febrero hasta fines de año, la actividad explosiva disminuye, registrándose en promedio 21 EXP/día y con energías menores a 1 MJ en promedio (Fig. 6.10g y 6.11).

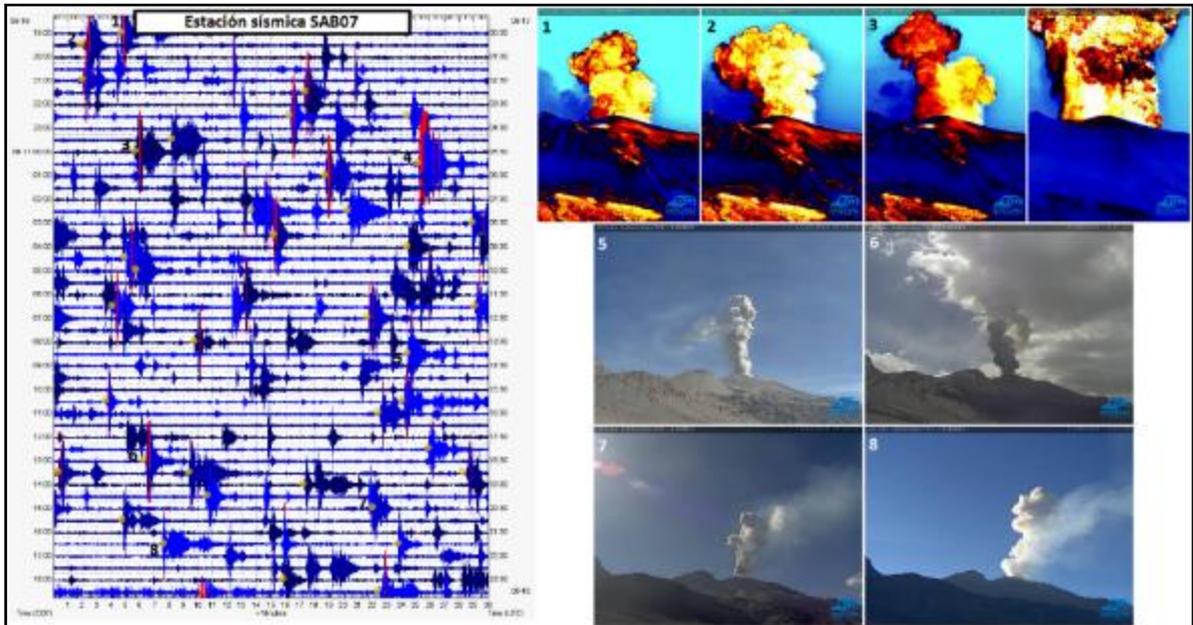


Figura 6.11. Señales sísmicas de explosiones ocurridas entre el 16 y 17 de agosto con energías sísmicas de hasta 1.0 MJ y desplazamientos reducidos de hasta 58 cm², dichas señales, generaron columnas eruptivas importantes de gases y cenizas.

6.5.3. Energía sísmica diaria y acumulada

El análisis de la energía sísmica liberada en el volcán Sabancaya durante el año 2018, se realizó principalmente mediante el registro de la estación SAB07, debido a su mayor continuidad de registro de la data sísmica y su cercanía al cráter del volcán. En la Fig. 6.12, se muestra la energía acumulada liberada por sismos propiamente del volcán (línea negra), teniéndose un valor final de 3821.1 MJ, a diferencia del año 2017, donde se registró un valor de 6676.2 MJ, claramente se aprecia un descenso sustancial en la energía sísmica liberada por el volcán, concluyendo así que a comparación del año 2017, la actividad sísmica del volcán Sabancaya a lo largo del año 2018, ha disminuido notoriamente, y esto claramente se ve reflejado en la ocurrencia de explosiones poco energéticas (< 3 MJ).

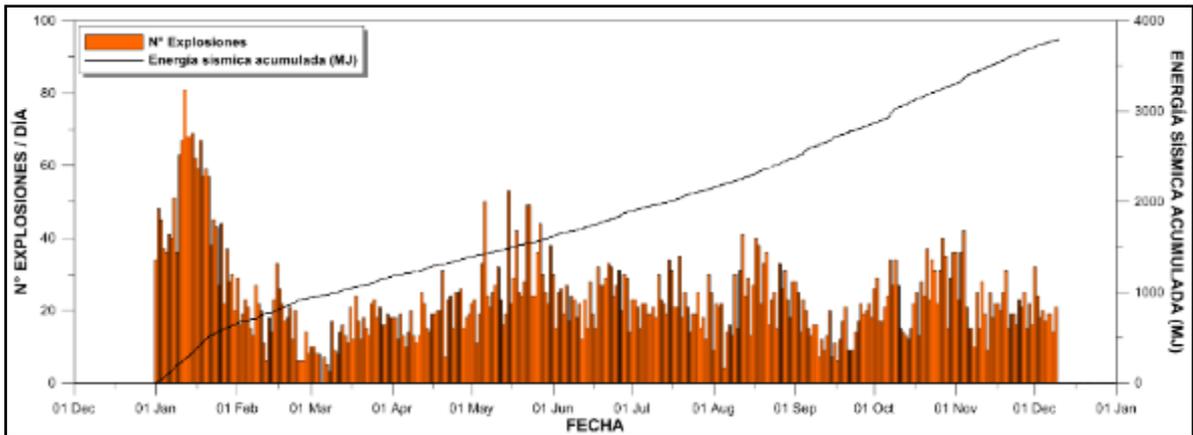


Figura 6.12. Comportamiento de la sismicidad del volcán Sabancaya, en base a la energía sísmica acumulada liberada (línea negra) y al número de explosiones por día (barras naranjas). Periodo: 2018.

6.5.4. Localización de las señales sísmicas volcano - tectónicas (VT)

Durante el año 2018 se registraron 9 690 señales sísmicas asociadas al fracturamiento de roca dentro de la estructura volcánica y a la actividad de fallas activas en la zona (sismos volcano – tectónicos proximales y distales); a diferencia del año 2017, donde se registraron 12 112 sismos volcano - tectónicos, en el año 2018, se aprecia un descenso significativo de este tipo de sismicidad.

Se localizaron 881 sismos volcano -tectónicos, las cuales, presentaron claras llegadas de las fases P y S, además que fueron registradas en 4 a más estaciones sísmicas. El modelo de velocidades empleado es el propuesto por Dorbath et al., 1991

En la Fig. 6.13, se muestra la distribución espacial y en profundidad de los 881 sismos que se localizaron entre enero y diciembre respectivamente. Los errores de localización son: < 2.5 Km en latitud, longitud y en profundidad. En general, estas señales se localizaron, predominantemente, hacia el Noroeste, Norte y Noreste del cráter del volcán Sabancaya a profundidades que llegaron hasta los 18.0 km y magnitudes entre 1.0 y 4.4 MI. Dichas señales se asociaron a fracturamiento de roca dentro del edificio volcánico o a causa de la actividad de fallas geológicas en la zona.

Al igual que años anteriores, la profundidad de los sismos es menor a los 14 km y al no localizarse sismos con mayor profundidad, posiblemente, estaría indicando que la cámara magmática del Sabancaya se estaría localizando a una profundidad por debajo de los 14 km y hacia el sector Norte del volcán, que es donde mayor actividad volcano – tectónica se registra.

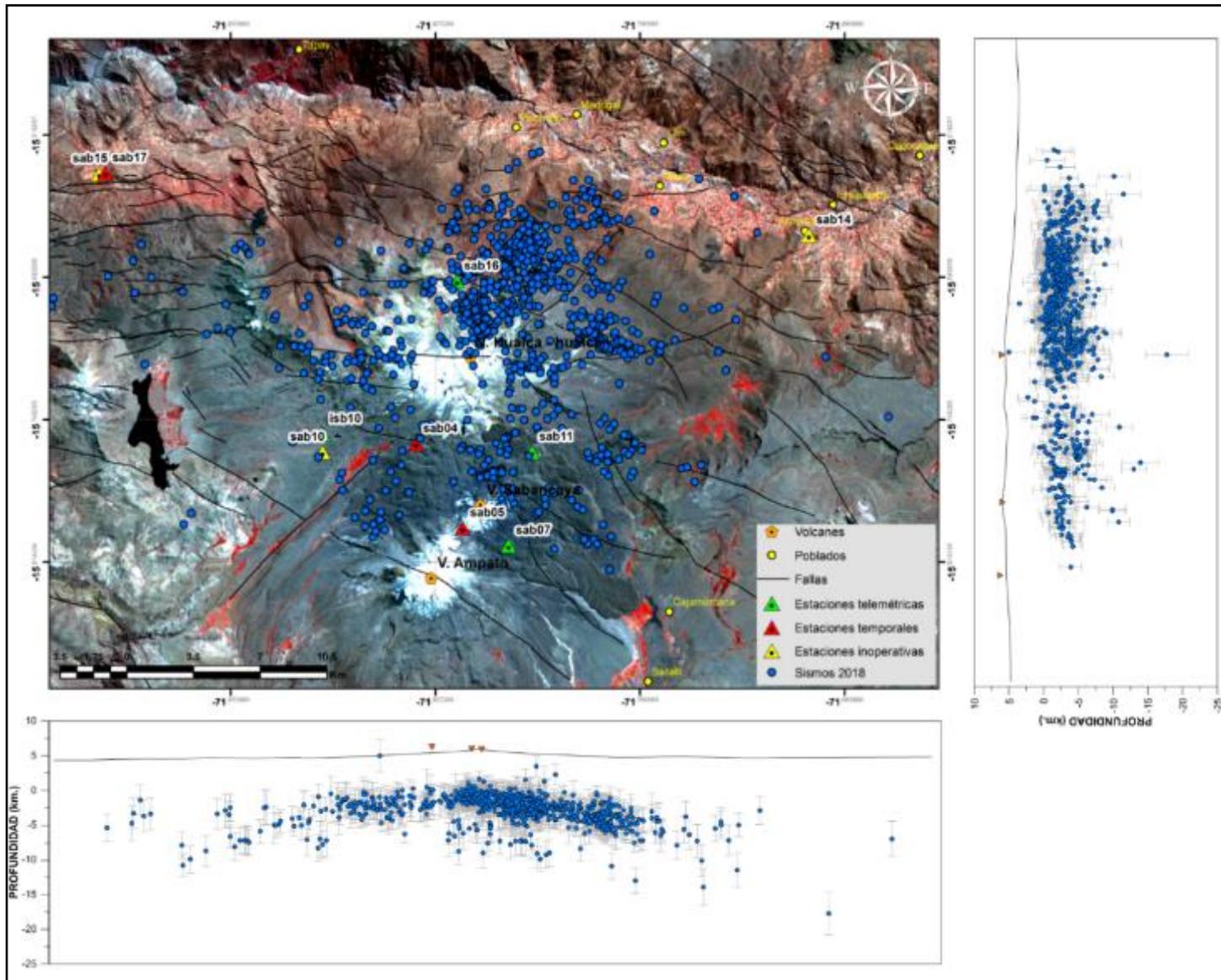


Figura 6.13. Distribución espacial de los 881 sismos volcánico – tectónicos localizados en los alrededores del volcán Sabancaya, (modelo de velocidades propuesto por Dorbath et al., 1991).
Parte inferior: Perfil sísmico con orientación W – E de sismos VT;
Margen derecha: Perfil sísmico con orientación S – N de sismos VT. Período 2018.

7.0. MONITOREO ACÚSTICO

El monitoreo acústico en volcanes, permite detectar las señales de infrasonido asociados a procesos volcánicos que ayuda a caracterizar y alertar sobre varios procesos volcánicos. El infrasonido es la componente de baja frecuencia del sonido, que normalmente varían de 0.001 a 20 Hz (imperceptibles al oído humano). Muchos de los fenómenos naturales como: terremotos, explosiones volcánicas, corrientes de densidad (como flujos piroclásticos, lahares, caída de rocas, flujos de derrubios y avalanchas), procesos atmosféricos, tsunamis, etc. son fuentes naturales de infrasonido. Entre ellos, los volcanes constituyen un emisor bastante común y variado de ondas infrasónicas, generadas principalmente por la interacción de procesos magmáticos con la atmósfera. Por lo tanto, la actividad infrasónica en los volcanes es la evidencia directa de que los conductos de alimentación estén abiertos y que el magma se desgasifica en condiciones de no-equilibrio.

En volcanes explosivos y activos como el Sabancaya, las fuentes volumétricas que se expanden rápidamente en la atmósfera (columnas eruptivas) producen señales de infrasonido que proporcionan información muy valiosa sobre la dinámica de la erupción y sobre todo el estado de la actividad volcánica.

7.1. Operatividad de las estaciones

Durante el año 2018, el INGEMMET implementó el monitoreo acústico del volcán Sabancaya. Para ello se realizaron dos campañas de campo en las inmediaciones del volcán, estos trabajos permitieron instalar 3 sensores de infrasonido permanentes que permiten monitorear en tiempo real la actividad del volcán. En la Fig. 7.1, se muestra la operatividad de las estaciones de infrasonido que operaron durante el presente año.

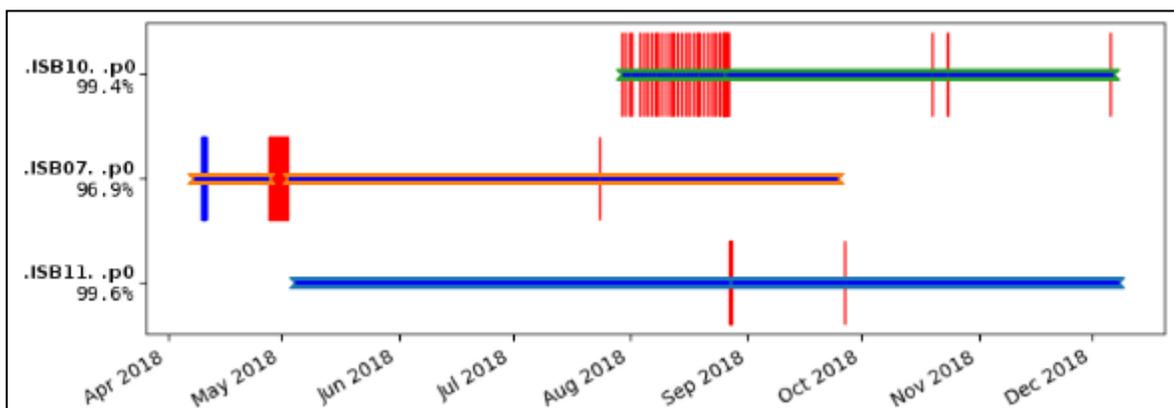


Figura 7.1. Operatividad de la Red de sensores de Infrasonido instalados en el volcán Sabancaya representada con barras horizontales, las líneas verticales en color rojo representan periodos sin datos, mientras que las líneas verticales de color azul periodos con redundancia de datos.

A continuación, se describe los trabajos efectuados en ambas campañas:

- Campaña marzo 2018

Durante el mes de marzo se llevó a cabo un experimento con sensores acústicos en el Sabancaya, este trabajo se realizó en colaboración con la Universidad de Liverpool, Reino Unido. Durante esta campaña se desplegaron 8 sensores entre 2 y 8 Km alrededor del cráter principal del volcán, y se adquirieron datos simultáneamente por alrededor de una semana. Las estaciones constaron de un sensor de infrasonido marca Chaparral UHP 60, un digitalizador Datacube y una fuente de poder, tal como se observa en la Fig. 7.2 y 7.3.



Figura 7.2. Trabajos de campo para la instalación de sensores de infrasonido en el volcán Sabancaya.

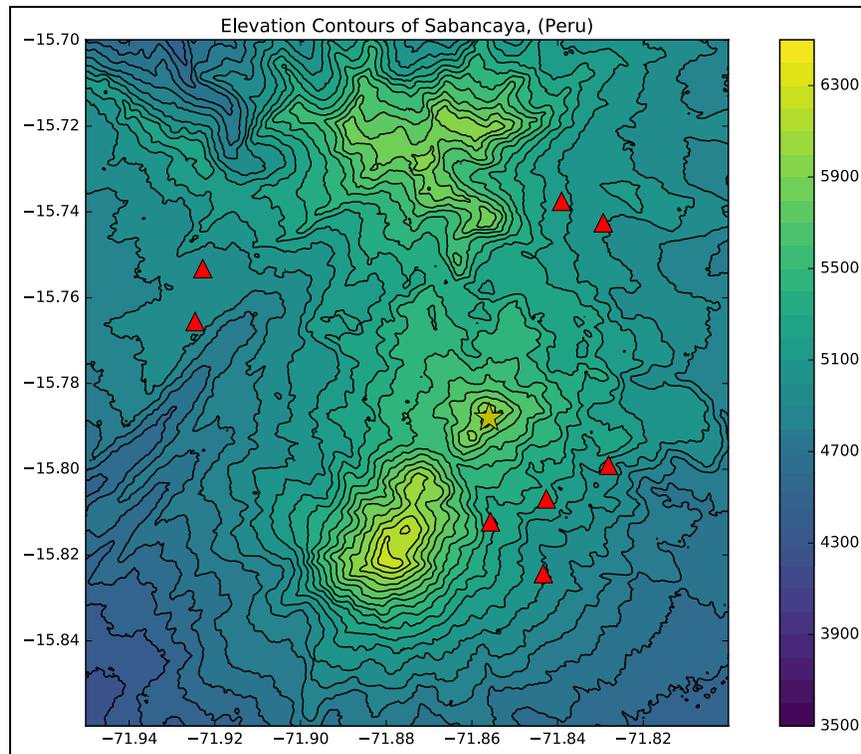


Figura 7.3. Mapa de ubicación de las ocho (08) estaciones de infrasonido desplegados en el volcán Sabancaya durante la campaña de marzo del 2018, sobrepuesta al mapa topográfico.

- Campaña julio del 2018

Se realizó una segunda campaña para instalar un arreglo de sensores de infrasonido en el Sabancaya, con la finalidad de detectar y alertar las explosiones más energéticas del volcán, dicho trabajo se realizó en colaboración con la Universidad de Firenze, Italia.

El principio de esta técnica se debe a que las señales de infrasonido están relacionadas con pequeñas perturbaciones de la presión atmosférica y dado la gran cantidad de fuentes naturales y/o artificiales, hacen que las mediciones del infrasonido con una única estación sean ambiguas (difíciles de interpretar). Por lo tanto, las estaciones de infrasonido más comunes se instalan en forma de red (con geometría específicamente diseñada para cada caso), en lo que se conoce como array o antena.

Estas técnicas de array permiten aumentar la relación señal/ruido y reducir la ambigüedad de la detección de la señal infrasonica, permitiendo medir a su vez el grado de correlación de las señales, el azimut hacía la fuente y la velocidad aparente de la señal infrasonica. Durante el mes de Julio de 2018, se instaló un arreglo de sensores de infrasonido en la estación SAB10 del volcán Sabancaya. Por cuestiones de nomenclatura se decidió nombrar a este arreglo de infrasonidos como ISB10, que consta de cuatro sensores de infrasonido y un digitalizador de 6 canales. Una estación de infrasonido es instalada en el centro de la red (ch1), junto a la estación sísmica, los otros tres sensores (ch2, ch3 y ch4) fueron instalados a una distancia aproximada de 100 m de la estación central y con una distribución azimutal para completar el array, tal como se puede observar en las Fig. 7.4 y 7.5.

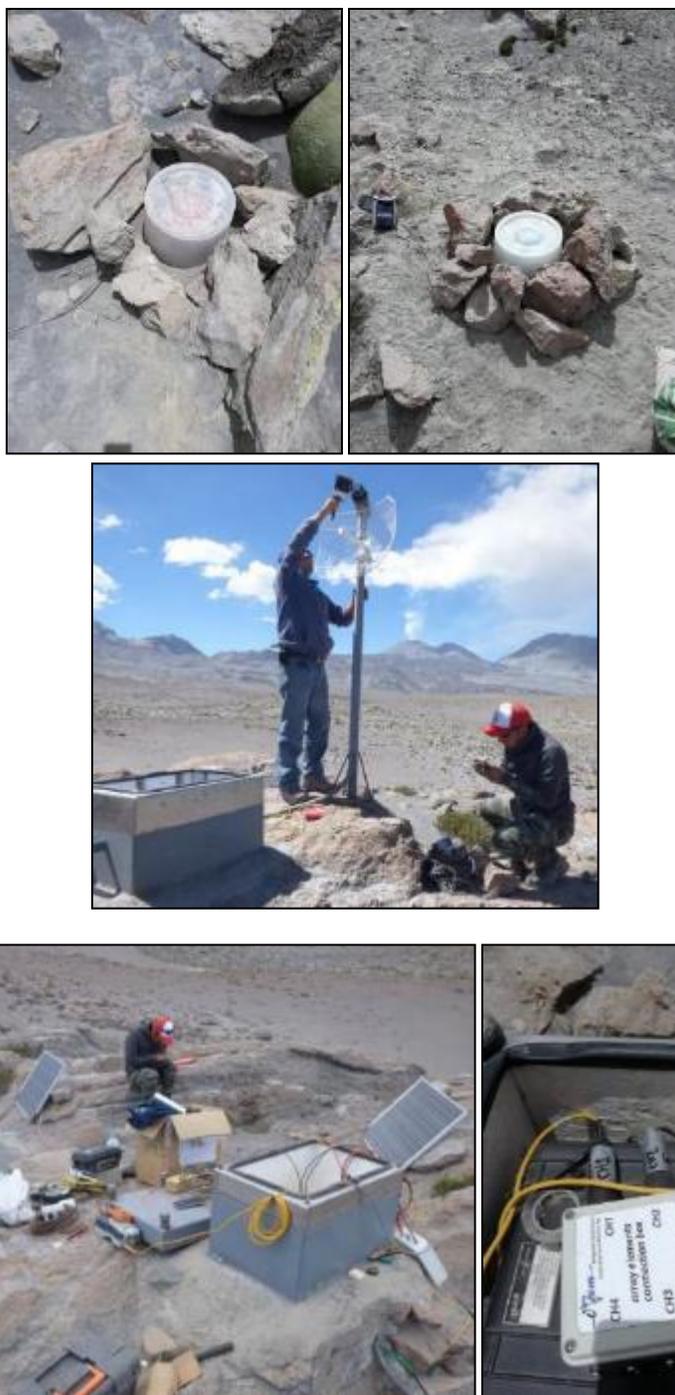


Figura 7.4. Trabajos de instalación del arreglo de sensores de infrasonido en la estación ISB10 del volcán Sabancaya.

Las técnicas de array están ampliamente extendidas en el monitoreo acústico de volcanes, el que ha permitido detectar explosiones, lahares, flujos piroclásticos entre otros. El arreglo instalado en el volcán Sabancaya está diseñado para detectar las explosiones y potenciales lahares que ocurran en el flanco oeste del volcán. El análisis continuo de las señales con el método “Beamforming”, permite estimar el azimut hacia la fuente y la velocidad aparente de las señales de infrasonido, lo

que además permite descartar señales de ruido como las generadas por los vientos. En la Fig. 7.5, se puede observar un caso exitoso de detección y alerta temprana de una explosión ocurrida el 22 de octubre de 2018 a 00:33:00 UTC (19:33:00 hora local), el cual, ocurrió fuera de horario de trabajo pero que pudo ser alertado mediante el sistema de mensajes de texto automático del observatorio.

A lo largo del año 2018, se han reportado decenas de explosiones energéticas del volcán Sabancaya gracias al arreglo de sensores de infrasonido, este método ha mostrado gran utilidad ya que permite registrar y alertar explosiones las 24 horas del día, siendo aún más relevante su importancia durante las noches en el que no existe observador de turno (fuera del horario de oficina). La información en tiempo real puede observar en la siguiente dirección de acceso interno: <http://10.102.131.52/infrasonido/index.html>.

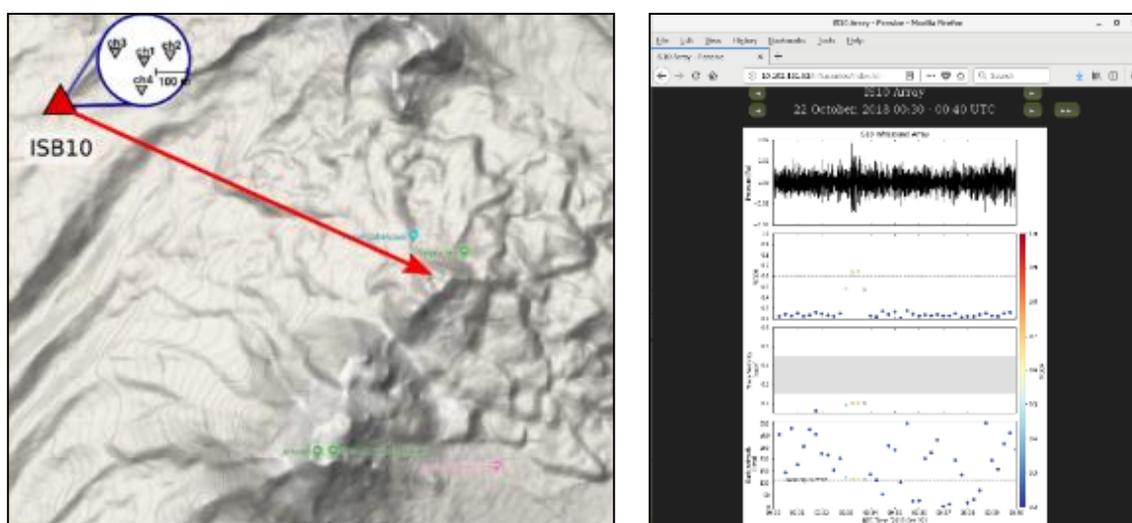


Figura 7.5. Monitoreo en tiempo real de explosiones con arreglos de sensores de infrasonidos en el volcán Sabancaya. A la izquierda se puede observar el azimuth hacia la fuente desde la estación ISB10 y a la derecha los resultados del beamforming.

7.2. Caracterización de las señales de infrasonido

Es preciso indicar que es la primera vez que se realizan registro de señales de infrasonido en volcanes peruanos, por ello una de los trabajos principales fue caracterizar las señales infrasónicas generadas por las constantes explosiones registradas en el volcán. Esta caracterización ha permitido identificar que el volcán Sabancaya genera continuas señales infrasónicas con una alta relación entre señal y ruido. La duración de estos eventos varía entre 2 y 4 min y la amplitud (presiones excedentes) va entre 1 - 4 Pa (a 2.5 km de la fuente). La frecuencia central de estas señales va de 0.6 a 0.8 Hz (Fig. 7.6). De igual manera, se ha estimado que la masa expulsada por las explosiones oscila entre 12 y 20 Toneladas durante el periodo de estudio.

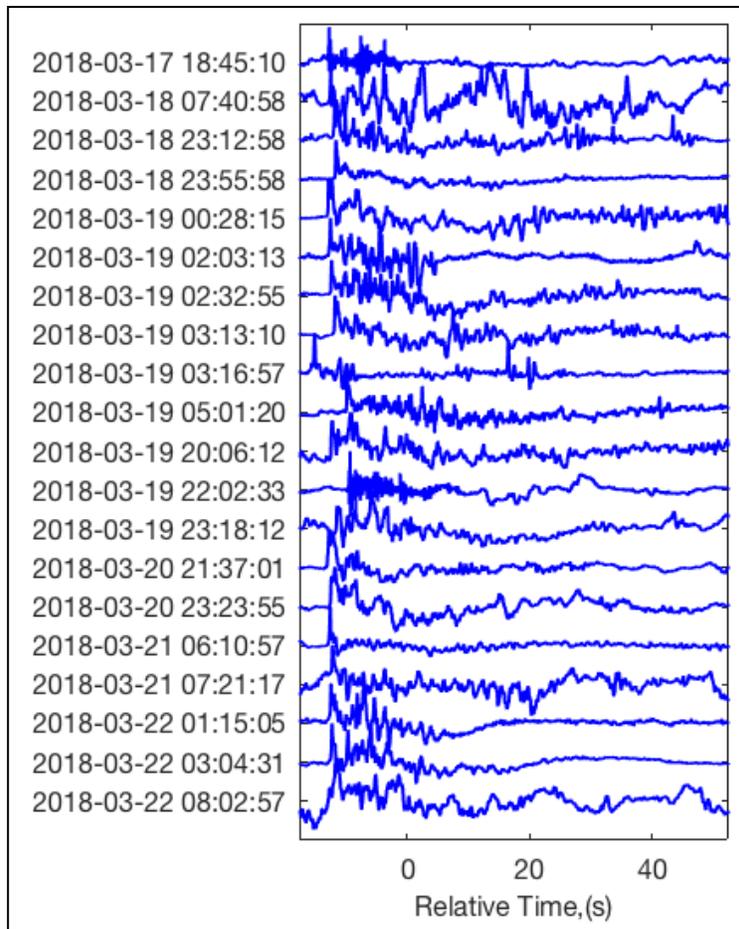


Figura 7.6. Forma de onda de las señales de infrasonido más representativas registradas durante la campaña de marzo del 2018, estación SB07.

El análisis de RSAM y RSEM, muestra que las señales de infrasonido son muy persistentes durante ciertos días, por ejemplo, en la Fig. 7.7, se muestra una constante generación de señales de infrasonido el día 19 de marzo, lo que indica que el volcán emite señales de infrasonido persistentes que están asociados a las emisiones de ceniza constante y actividad tremórica en el volcán.

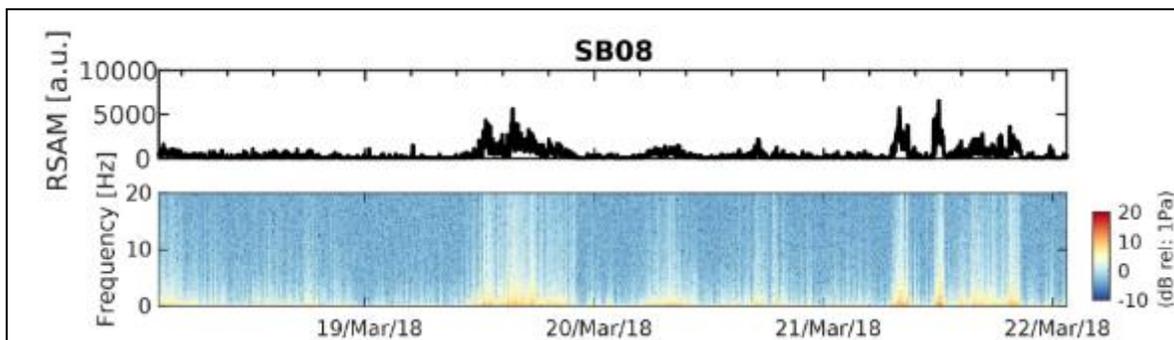


Figure 7.7. RSAM y RSEM de la estación SB08, registrados del 18 al 22 de marzo del 2018.

Para la localización de la fuente de estas señales de infrasonido, se ha utilizado la inversión de las formas de onda y las señales sintéticas de las funciones de Green. Los resultados obtenidos para un medio isotrópico y fuente acústica monopolo, muestran que las fuentes de estas señales se encuentran justo en el cráter activo del volcán (Fig. 7.8), lo cual, es concordante con las observaciones visibles. Estos resultados ayudan también a validar los procedimientos y parámetros de inversión empleados.

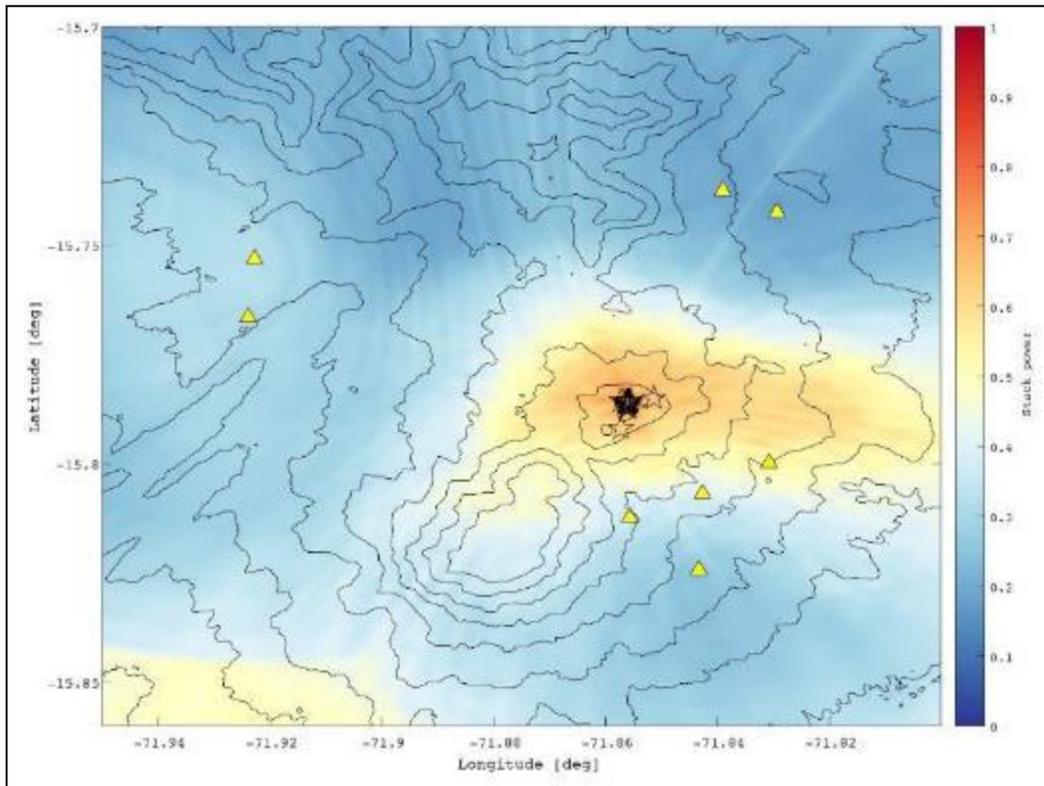


Figure 7.8. Localización de la fuente de las señales de infrasonido utilizando las señales registradas en las ocho estaciones desplegadas durante este experimento. La ubicación de las fuentes está representada en estrellas, y la posición de las estaciones en triángulos amarillos.

8.0. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Durante el año 2018, en el volcán Sabancaya se observaron etapas de aumento y descenso en la actividad volcánica y estas etapas básicamente se debieron a cambios en los métodos de monitoreo, reflejándose así en: emisiones de gases y ceniza, composición de las cenizas volcánicas, inflación/deflación, flujos de SO₂ y variación en la temperatura de las fuentes termales y en la actividad sísmica.

De la Fig. 8.1, se puede apreciar el comportamiento de cada parámetro en función del tiempo (**a.** Desplazamiento reducido de cada explosión y la energía sísmica acumulada; **b.** Altura de las emisiones; **c.** Deformación y **d.** Flujo de SO₂); a lo largo del 2018, la sismicidad estuvo principalmente predominada por sismos de baja frecuencias, los cuales, se asociaron al movimiento de fluidos (gases, líquidos, posiblemente magma), se registraron también explosiones leves y moderadas (entre 1 y 3 MJ de energía sísmica) que estuvieron seguidas de actividad tremórica, lo cual, concordó con la actividad superficial, que se caracterizó por la presencia de columnas eruptivas de gases y ceniza de hasta 2.5 km de altura (en promedio) y en periodos de mayor actividad las columnas alcanzaron alturas de hasta 5.0 km, la dirección predominante de estas emisiones fueron hacia Noreste y Suroeste - Sur -Sureste, afectando principalmente a los pueblos ubicados en el valle del Colca (Cabanaconde, Achoma, Huanca y Huambo), cabe destacar que, en algunas ocasiones fue posible observar la presencia de bloques en el flanco N que alcanzaron distancias de hasta 1.5 km de la cumbre. Por otra parte, los flujos de SO₂ presentaron importantes valores, destacando los registrados los días 02 de febrero, 13 y 18 de julio del 2018 con mediciones que alcanzaron los 9270, 14860 y 12068 Tn/día respectivamente, estos flujos, a pesar de ser GRANDES, se consideran que están dentro de un comportamiento normal del volcán, pues recordemos que el Sabancaya aún se encuentra dentro de un proceso eruptivo con un sistema abierto, en cuanto al monitoreo de la composición de aguas y temperatura de las fuentes termales, destacan la estaciones SA2 y SA3, donde se puede apreciar variaciones importantes e incremento en la temperatura y esto posiblemente esté asociado a cambios en el aporte magmático al sistema hidrotermal. Respecto al monitoreo geodésico, los resultados indican periodos de inflación relativamente importantes que estuvieron asociados a incrementos en la actividad del volcán y respecto a los mapas de vectores de desplazamiento, éstos indican claramente la presencia de un cuerpo localizado al N – NE del volcán Sabancaya a una profundidad por debajo de los 14 km, el cual, posiblemente se trate de un reservorio de magma que a través de un conducto secundario hace migrar el magma hacia el cráter del Sabancaya y finalmente termina en la ocurrencia de explosiones energéticas, esta hipótesis es apoyada también por la localización de sismos VT, que durante el año 2018 y años anteriores, demuestran que la sismicidad de este tipo siempre está localizado principalmente al N – NE el cráter del volcán.

Por lo tanto, del análisis y correlación de todos estos parámetros, se concluye que el volcán Sabancaya aún continua dentro de un proceso eruptivo, caracterizado por la ocurrencia de EXPLOSIONES VULCANIANAS relativamente energéticas (1 y 3 MJ), las cuales, fueron observadas en superficie en forma de columnas eruptivas de gases y cenizas que ascendieron aproximadamente a 2.5 km en promedio y que tuvieron direcciones predominantes hacia el Valle del Colca.

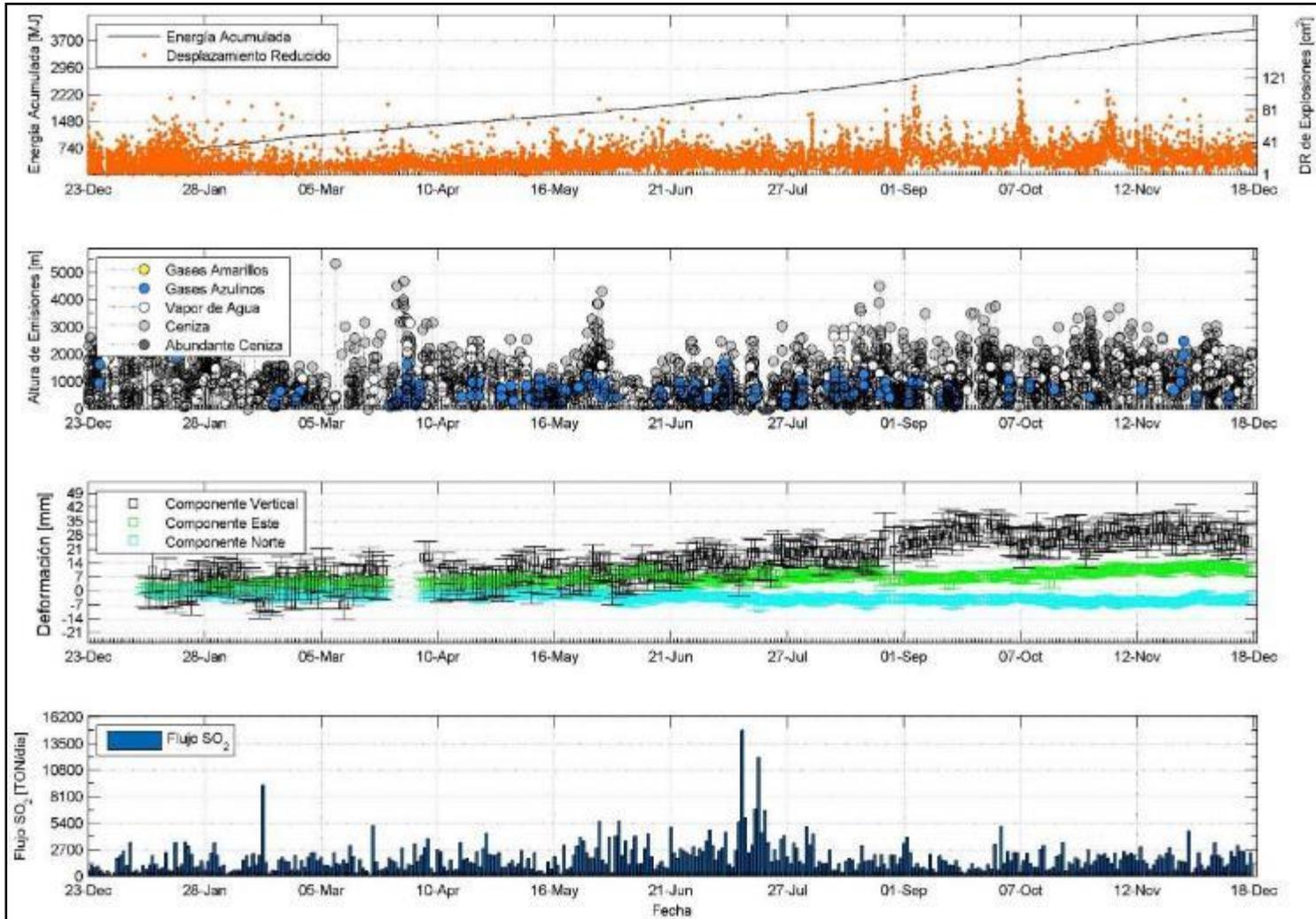


Figura 8.1. a. Evolución temporal de la actividad explosiva en base a su desplazamiento reducido – DR (puntos naranjas) y evolución de la energía sísmica acumulada de los eventos volcánicos (línea negra); **b.** Altura de las emisiones de gases, ceniza y vapor de agua; **c.** Serie temporal de las mediciones GPS en la estación SBSE y **d.** Mediciones del flujo de SO₂.

9.0. DIFUSIÓN DE REPORTES SEMANALES COLEGIADOS

Desde el 26 de diciembre del 2016, a raíz del inicio del proceso eruptivo del volcán Sabancaya; el Instituto Geofísico del Perú (IGP) y el Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET) como parte integrante del Comité Científico - técnico para la gestión de riesgos volcánicos de la región Arequipa (formado por ordenanza regional N° 252), acuerdan emitir reportes semanales colegiados acerca de la actividad volcánica del Sabancaya, con la finalidad de informar de manera oportuna y veraz sobre la evolución temporal del mismo, mediante el análisis, correlación e interpretación de cada disciplina (visual, geoquímica, geodesia y sísmica).

Toda la información sísmica y visual es consensuada entre ambas instituciones antes de la difusión de la misma. Básicamente, consiste en promediar el número total de eventos sísmicos (sismos de largo periodo – LP, sismos híbridos – HYB y explosiones EXP) y promediar las alturas máximas de las columnas eruptivas de gases, ceniza y vapor de agua. En cuanto a las demás disciplinas: Geoquímica y Geodesia, la información es proporcionada al 100% por INGEMMET.

A lo largo del 2018, se han emitido un total de 52 reportes semanales colegiados, los cuales, han sido difundidos hacia las autoridades y público en general.

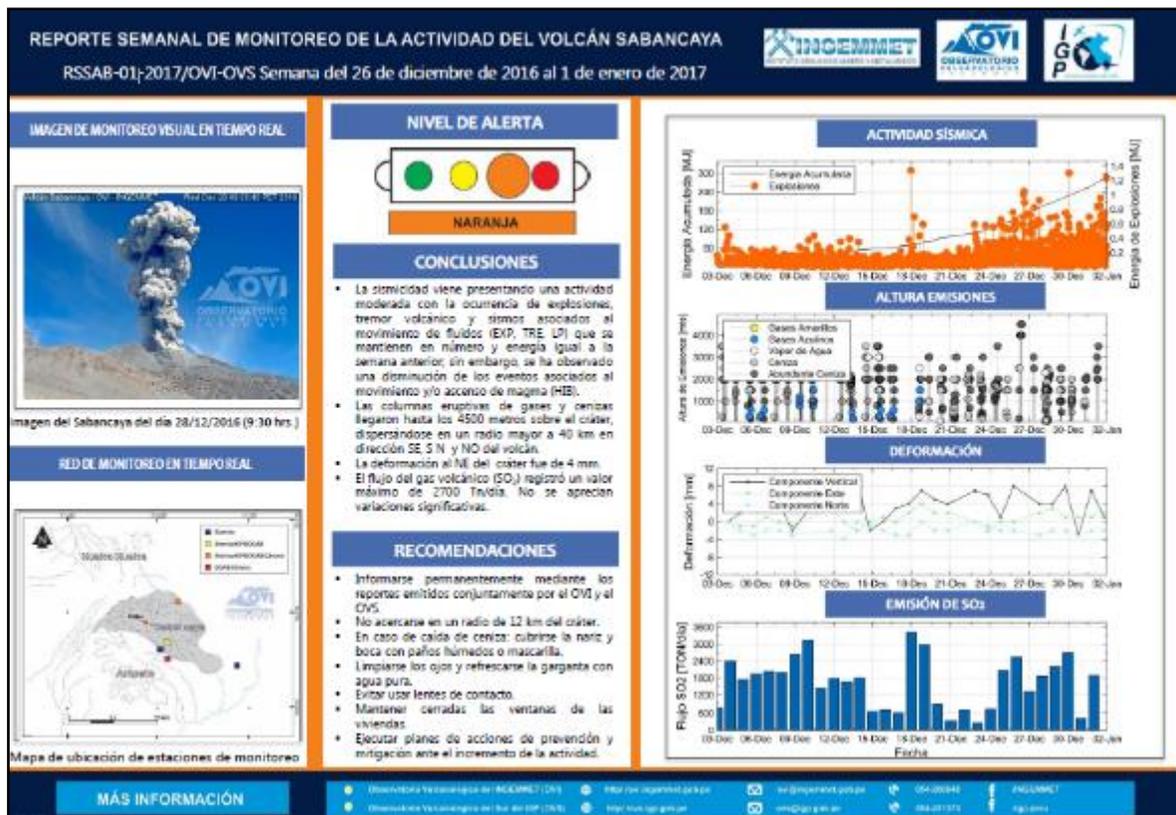


Figura 9.1. Ejemplo de reporte semanal colegiado IGP – INGEMMET, correspondiente a la semana del 26 de diciembre del 2016 al 01 de enero del 2017.

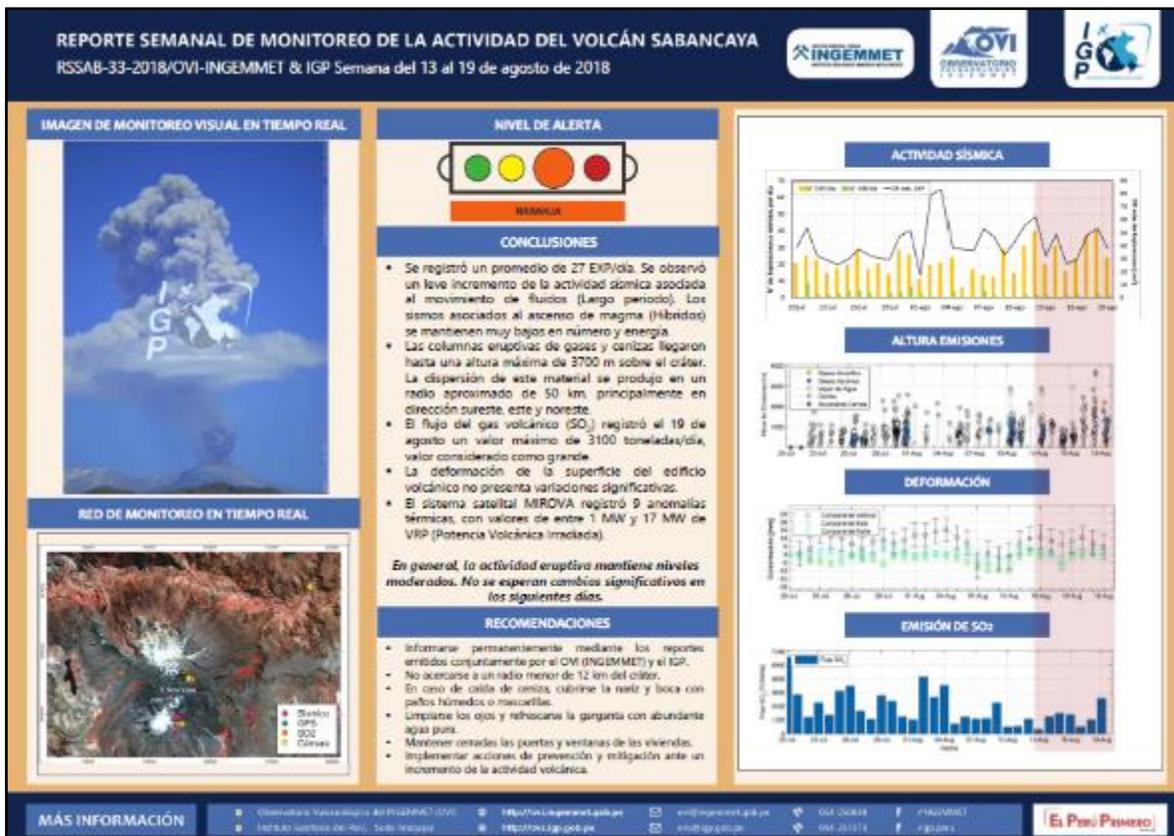


Figura 9.2. Ejemplo de reporte semanal colegiado IGP – INGEMMET, correspondiente a la semana del 13 al 19 de agosto del 2018.

10.0. CONCLUSIONES

El monitoreo continuo del volcán Sabancaya realizado durante el año 2018, ha permitido llegar a las siguientes conclusiones:

- El volcán Sabancaya se caracterizó por presentar **EXPLOSIONES VULCANIANAS** con emisiones de ceniza que ascendieron hasta aproximadamente 2500 m, en promedio, pero en periodos de mayor actividad estos alcanzaron alturas de hasta 5300 m, la dirección del desplazamiento de estas emisiones se dio principalmente en dirección Noreste y Suroeste-Sur -Sureste, afectando principalmente a los poblados del Valle del Colca.
- Se cuenta con 32 cenizómetros ubicados en los sectores proximales, mediales y distales del volcán Sabancaya, los cuales, nos permiten cuantificar la caída de ceniza en el lugar.
- Los cenizómetros que colectaron más ceniza acumulada corresponden a la estación Sab07 y Ampato, ubicadas en el sector Sureste del volcán Sabancaya. Las medidas en promedio de ceniza son de 1 mm por mes acumulado.
- En general, las concentraciones de cenizas no representan un peligro a la salud de la gente y los animales. Sin embargo, la concentración del fluoruro puede ser perjudicial en ciertas circunstancias, especialmente en lugares donde hay mucha ceniza acumulada, quizá puede ocasionar graves problemas.
- La composición de la ceniza muestreada durante el periodo 2015-2018, oscila entre andesita y dacita (59.8-62.8 wt. % SiO₂; 2.41-2.76 wt. % K₂O), mientras que los balísticos tienen una composición andesítica (60.7-62.1 wt. % SiO₂; 2.49-2.67 wt. % K₂O).
- El monitoreo geoquímico de fumarolas y fuentes termales muestra que, la desgasificación del volcán Sabancaya corresponde a un sistema abierto, con llegada continua de magma a la superficie, lo que mantiene el proceso eruptivo. Se mantiene la perturbación del sistema hidrotermal, aportando cada vez más gases y fluidos magmáticos, los que se ve reflejado en aumento de la temperatura en las fuentes termales.
- El monitoreo continuo y permanente de la deformación de la superficie del volcán Sabancaya, llevada a cabo por la red de equipos GNSS, ha permitido determinar y analizar los cambios del estado de actividad volcánica, por lo cual desde el mes de mayo a noviembre se ha observado un alzamiento hasta de 35 mm/yr observado en la estación SBSE. Así mismo, se han determinado periodos inflacionarios y deflacionarios entre junio y agosto de hasta 14 mm/yr, para las estaciones de monitoreo.
- Los resultados han permitido determinar los modelos de deformación las que mejor se han ajustado a los patrones de deformación registrados por las estaciones GNSS, con la finalidad de estimar la profundidad y la ubicación de la fuente generadora de deformaciones en el Sabancaya, las cuales se ubican entre Sabancaya y Hualca Hualca a una profundidad por debajo de los 14 km por debajo del volcán, así como del volumen involucrado en los procesos de deformación, dicha hipótesis es complementada con estudios de sismología volcánica.
- El INGEMMET continuamente trabajando en la ampliación y la diversificación de las redes de monitoreo geodésico, implementado nuevas estaciones y ampliando la red de monitoreo

temporal o campañas de adquisición de datos, con el objeto de mejorar el conocimiento de la fuente de deformación del volcán Sabancaya.

- La actividad del volcán estuvo dominada por la ocurrencia de sismos de largo periodo – LP (38 874), seguida de actividad tremórica – TRE (18 970 episodios, haciendo un total de 1 192 hrs.) seguidos de explosiones – EXP (8 472), sismos volcano – tectónicos proximales VT (8 639), sismos volcano – tectónicos distales VTD (1 051), sismos híbridos – HIB (542) y por último sismos de muy bajo periodo – VLP (25). Principalmente, los sismos que predominaron fueron los de bajas frecuencias y esto nos indicó el tránsito de fluidos dentro del edificio volcánico (gases, líquidos y hasta el mismo magma), lo cual, se vio reflejado en la ocurrencia de explosiones que en superficie se observó a manera de columnas eruptivas de gases, cenizas y vapor de agua.
- A diferencia del año 2017, durante el año 2018, la energía sísmica liberada por el volcán Sabancaya disminuyó sustancialmente en un 50% (de 6 345.6 MJ a 3 821.1 MJ), sin embargo, se observan periodo en donde el incremento de la energía sísmica acumulada se debió principalmente a la ocurrencia de explosiones energéticas y a la ocurrencia de sismos volcano – tectónicos distales.
- Los sismos asociados a fracturamiento (sismos volcano – tectónicos VT), durante este año se localizaron principalmente al sector NO, N y NE del cráter del volcán Sabancaya, con profundidades superficiales de hasta 18 km y magnitudes entre 1.0 y 4.4 MI; dichos sismos se ubicaron a distancias de hasta 25 km del cráter del volcán. Al igual que años anteriores, la profundidad de los sismos es menor a los 14 km y al no localizarse sismos con mayor profundidad, posiblemente nos estaría indicando que la cámara magmática del Sabancaya se estaría localizando por debajo de esta profundidad y hacia el sector Norte del volcán, que es donde mayor actividad volcano – tectónica se registra.
- El monitoreo acústico del volcán Sabancaya ha permitido alertar sobre la ocurrencia de explosiones energéticas y a su vez, se ha localizado la fuente de estas señales de infrasonido, obteniendo así, ubicaciones justo por debajo del cráter activo del volcán, y dichos resultados se pueden corroborar con las observaciones en superficie.
- Se han emitido un total de 52 reportes semanales colegiados (INGEMMET - IGP), los cuales, han sido difundidos hacia las autoridades y público en general, para un mejor conocimiento del comportamiento que viene presentando actualmente el proceso eruptivo del volcán.

11.0. 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) para establecer una línea base y a su vez, para fines de investigación, es decir, conocer a mayor detalle la estructura interna del volcán.

12.0. BIBLIOGRAFÍA

1. Battaglia, M., Cervelli, P.F., Murray, J.R., 2013a. Modeling crustal deformation near active faults and volcanic centers-A catalog of deformation models. US Geol. Surv. Tech. Methods 13–B1.
2. Battaglia, M., Cervelli, P.F., Murray, J.R., 2013b. dMODELS: A MATLAB software package for modeling crustal deformation near active faults and volcanic centers. J. Volcanol. Geotherm. Res. 254,
3. Dorbath, L., Dorbath, C., Jimenez, E., & Rivera, L. (1991). Seismicity and tectonics deformation in the eastern cordillera and the sub-andean zone of central Peru. Jour. Of South American Earth Sciences., 4, 13-24.
4. Lesage, P. (2009) – Interactive Matlab software for the analysis of seismic volcanic signals. Computers & Geosciences, 35 (10): 2137-2144.
5. Lesage P., Mora M., Alvarado G., Pacheco J. & Métaixian J-P (2006). Complex behavior and source model of the tremor at Arenal volcano, Costa Rica. Journal of Volcanology and Geothermal Research 157, 49–59.
6. Masías, P., Taípe, E., Antayhua, J. & Ramos, D. (2013) – Monitoreo de los volcanes Misti y Ubinas, período 2006 – 2012, INGEMMET. Boletín, Serie C: Geología Ambiental y Riesgo geológico, 54, 104p.
7. Macedo, O., Taípe, E., Del Carpio, J., Ticona, J., Ramos, D., Puma, N., & Cruz, J. (2016). Evaluación del riesgo volcánico en el Sur del Perú, situación de la vigilancia actual y requerimientos de monitoreo en el futuro.
8. McTigue, D.F., 1987. Elastic stress and deformation near a finite spherical magma body: resolution of the point source paradox. Journal of Geophysical Research 92, 12931–12940.
9. Ottemoller, L.; Voss, P. & Havskov, J. (2016) – Seisan earthquake analysis software for windows, solaris, linux y macosx, 2014.
10. Okada, Y., 1985. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space. Bulletin of the Seismological Society of America 75, 1135–1154.
11. Pecerrillo & Taylor, 1976
12. Stewart, C., Horwell, C., Plumlee, G., Cronin, S., Delmelle, P., Baxter, P., Calkins, J., Damby, D., Morman., Oppenheimer, S. (2013) Protocol for analysis of volcanic ash samples for assessment of hazards from leachable elements. workshop held at the Institute of Hazard, Risk and Resilience, Durham University, UK, on June 14-15, 2011, attended by the authors.
13. 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.

ANEXO I

TRABAJOS DE CAMPO EN EL VOLCÁN (Instalación y mantenimiento de equipos que conforman la red de monitoreo).



Mantenimiento de la estación de monitoreo Ampato, donde está instalado el equipo escáner DOAS "SAD1" y la cámara de monitoreo.



Instalación de la estación Multigas en el volcán Sabancaya.



Imagen al finalizar trabajos de mantenimiento en la estación Sabancaya.



Recuperación de la muestra de ceniza del cenizómetro SC – 08, ubicado en el flanco norte – Pinchollo.



Recuperación de la muestra de ceniza del cenizómetro SC - 23, ubicado en el flanco noreste - Hornillos.



Instalación de GPS para registro temporal en el punto SBAH (Abra Hornillos), en el flanco Noreste.

**Muestra de la fuente termal SA2 –
Volcán Sabancaya.**



Instalación del punto SBQC para registro temporal de data GPS (Qello-cocha loma), en el flanco Oeste.



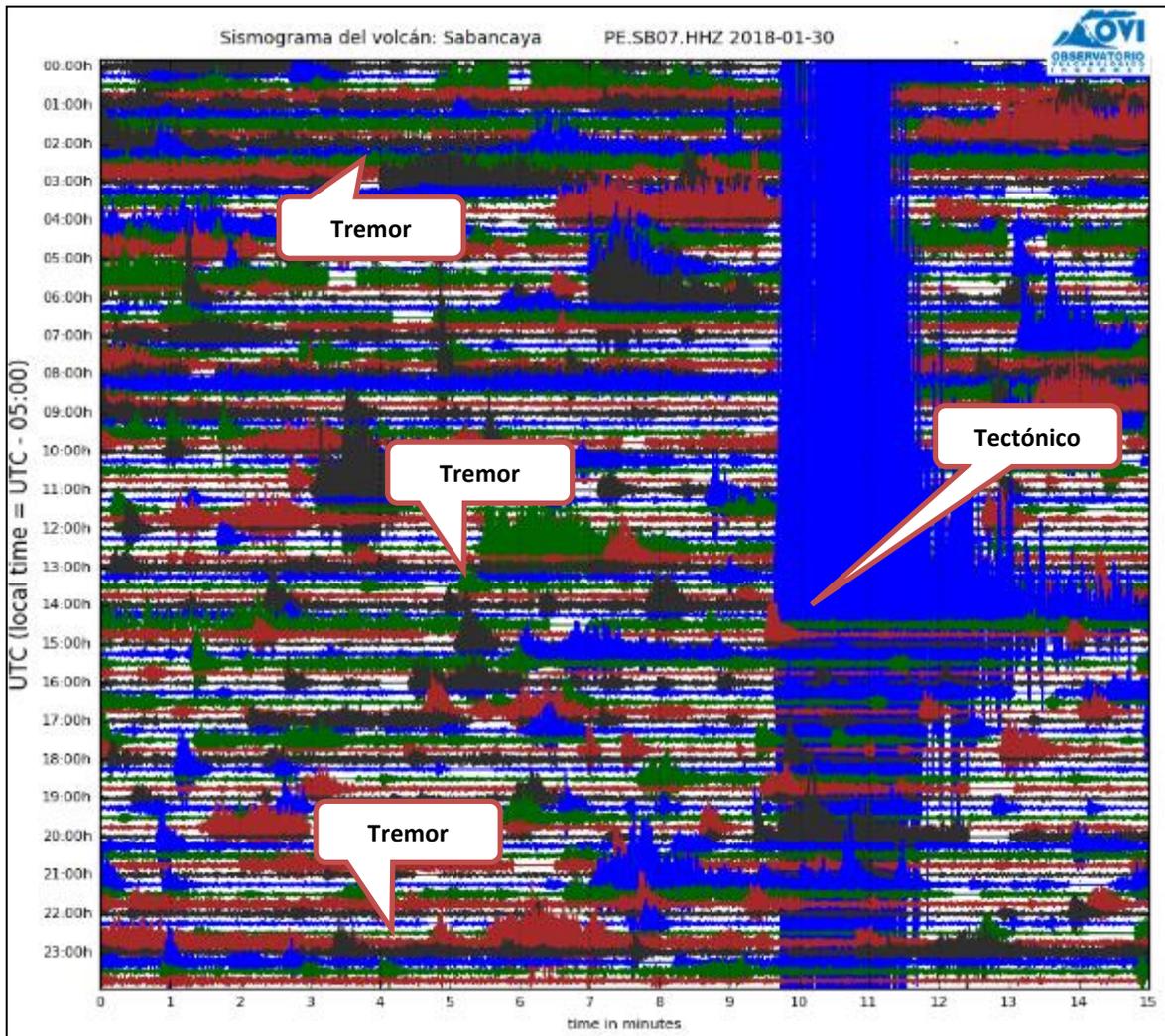
Recuperación de data del monitoreo acústico y de la data GPS de la estación telemétrica sab10, ubicada en el flanco Noroeste del volcán Sabancaya – Mucurca.



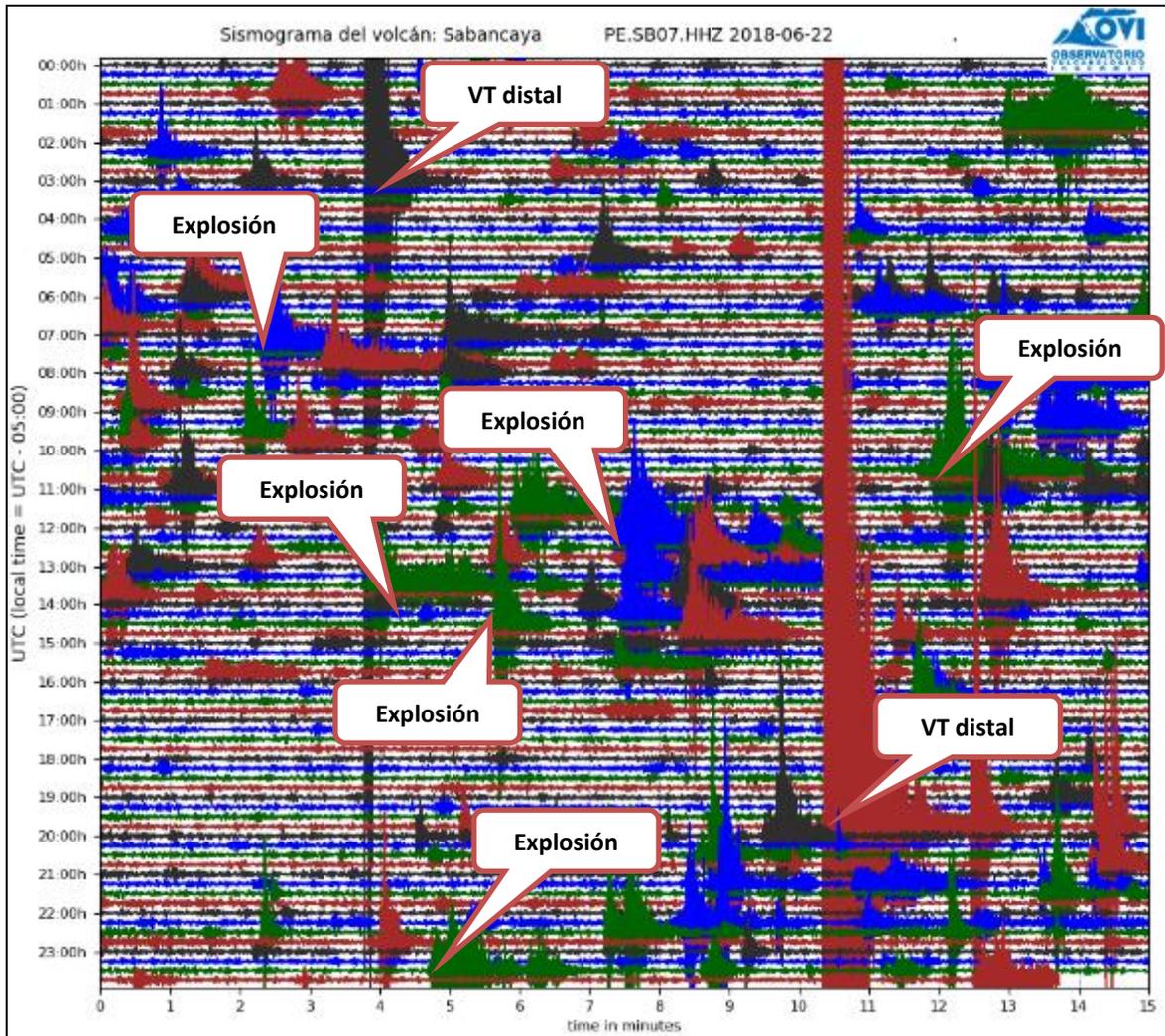
Obtención de imágenes térmicas, utilizando una cámara FLIR en el volcán Sabancaya.

ANEXO II

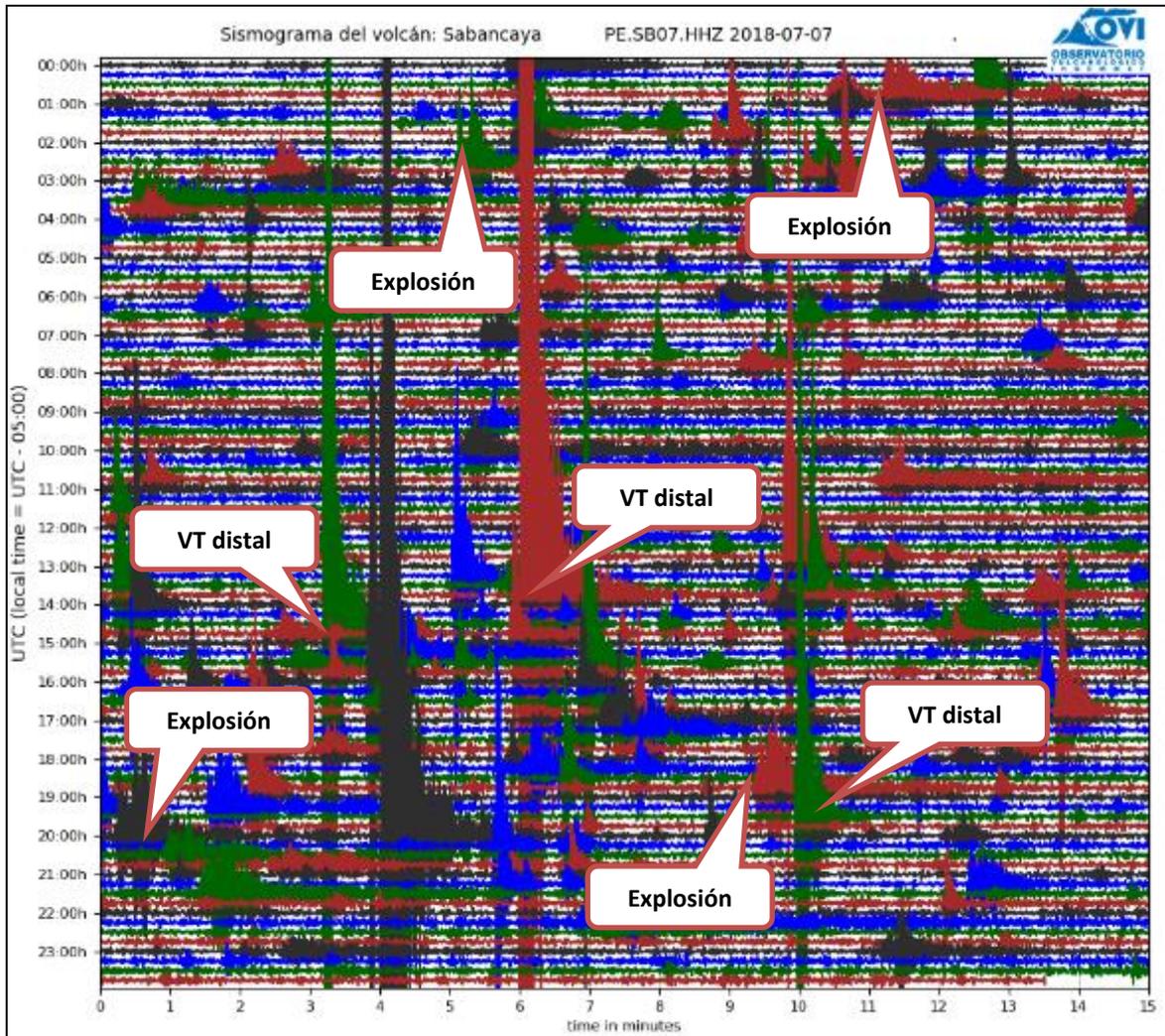
HELLICORDERS REPRESENTATIVOS DE LA ACTIVIDAD DEL VOLCÁN SABANCAYA REGISTRADOS POR LAS ESTACIONES SÍSMICAS EN TIEMPO REAL: SAB07 y SAB16.



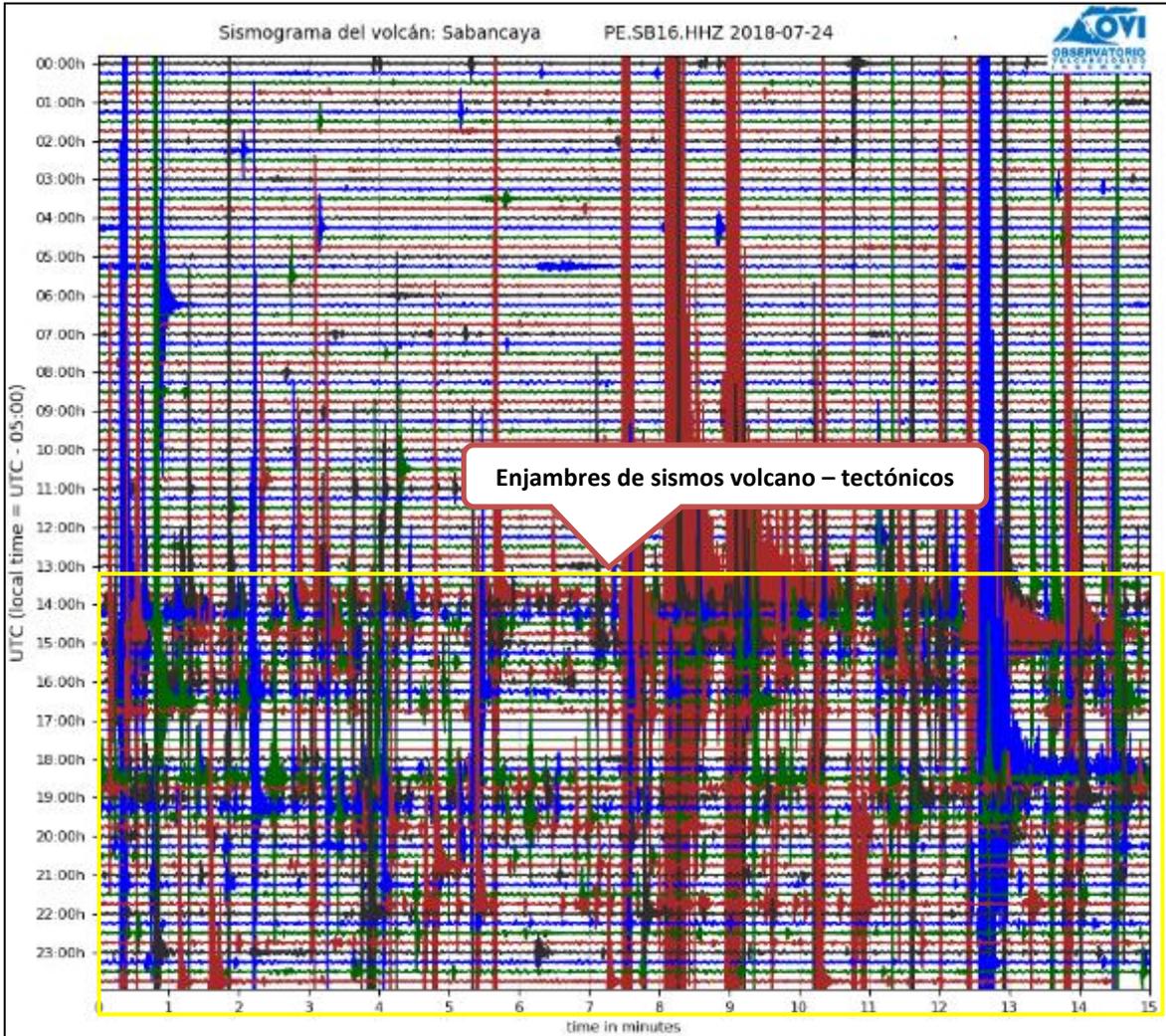
Actividad sísmica del volcán Sabancaya correspondiente al 30 de enero del 2018, en el hellicorder de las 24 hrs. se puede apreciar una intensa actividad tremórica, la cual, se asoció a la salida continua de emisiones de gases y cenizas.



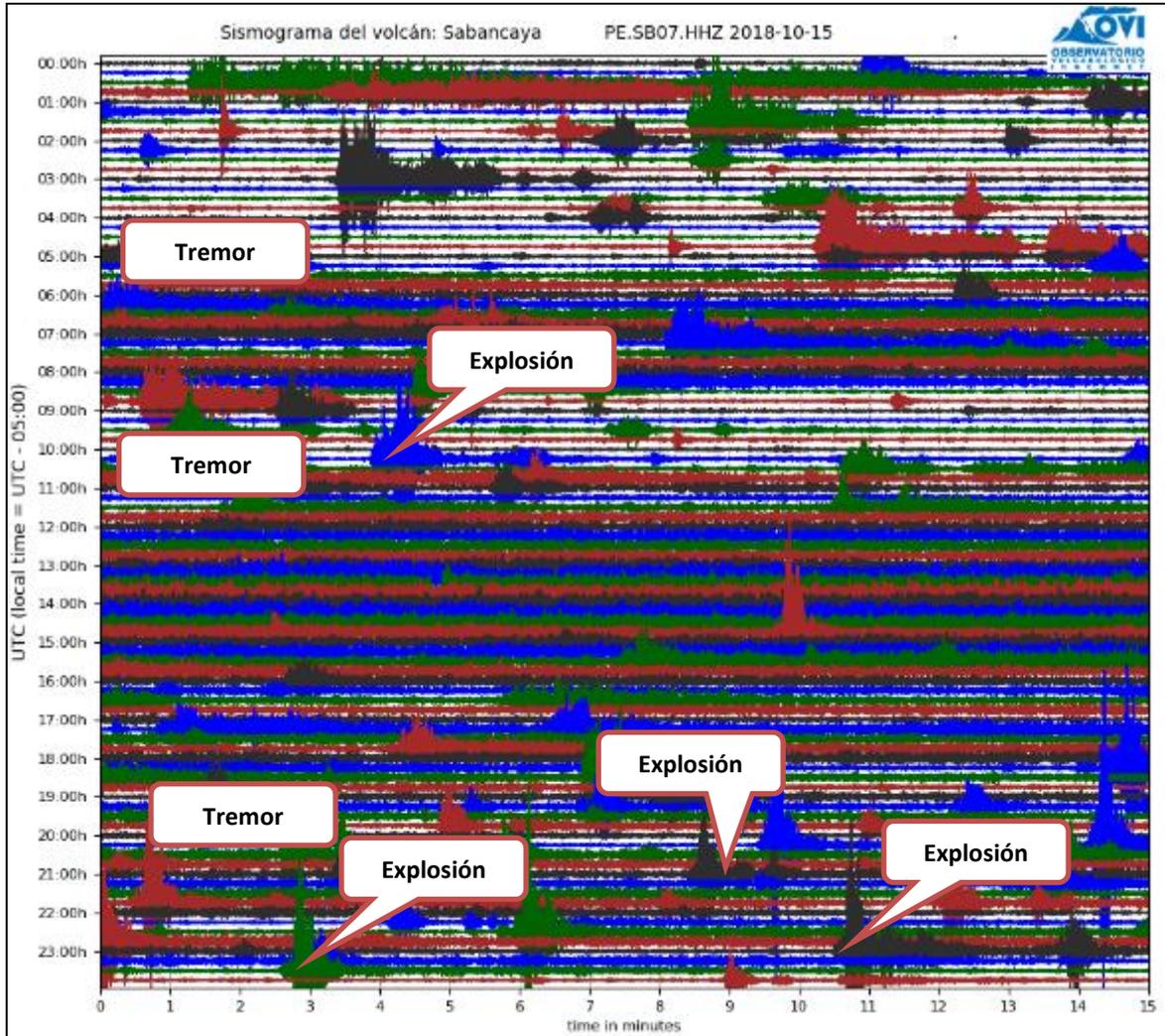
Actividad sísmica del volcán Sabancaya correspondiente al 22 de junio del 2018, en el hellicorder de las 24 hrs. se puede apreciar la ocurrencia de un sismo volcano – tectónico distal a las 19:55 UTC localizado al Noroeste del cráter del volcán Sabancaya con una magnitud de 3.6 MI, también se observa la ocurrencia de explosiones las cuales fueron seguidas de emisiones de gases y ceniza.



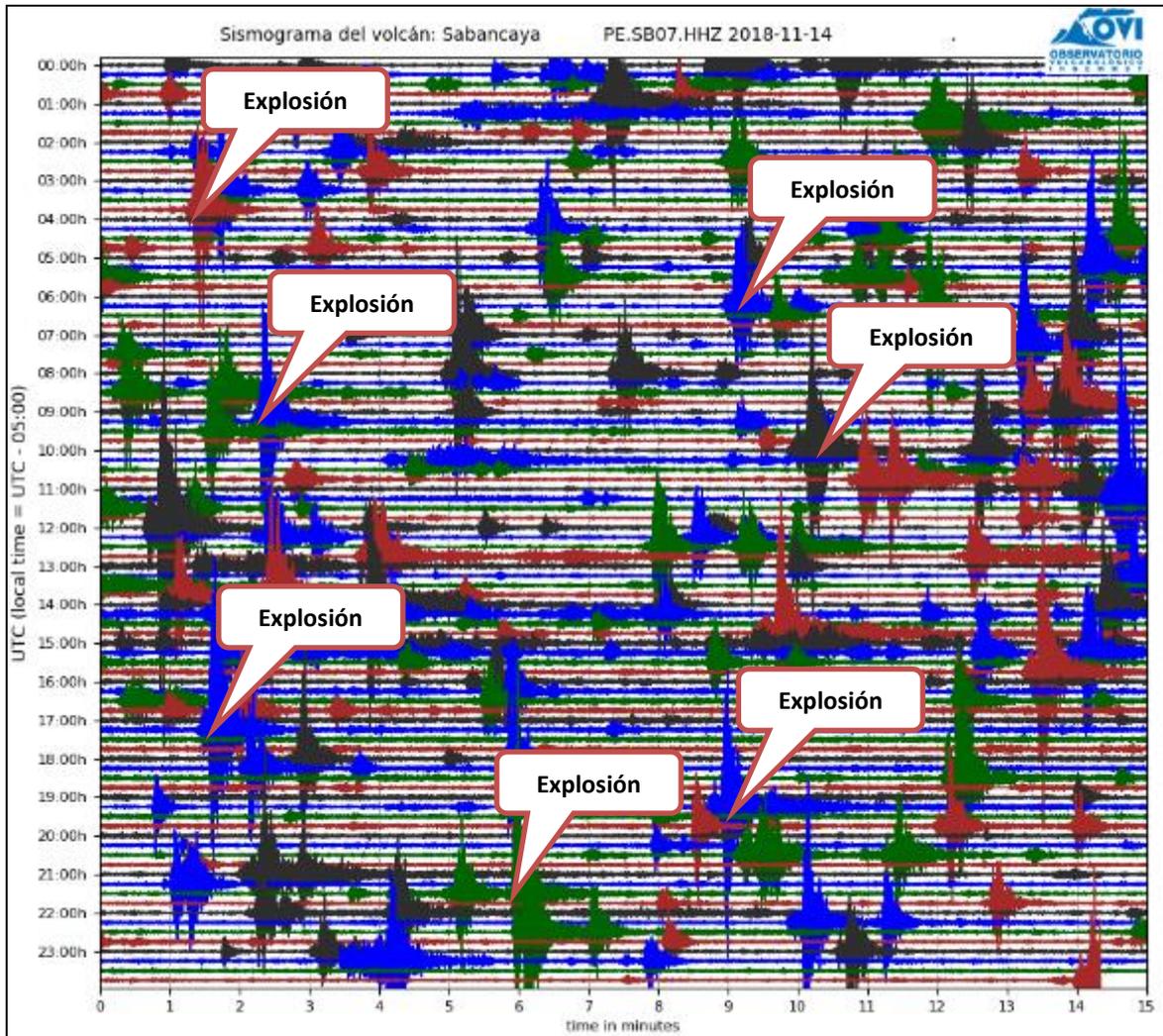
Actividad sísmica del volcán Sabancaya correspondiente al 07 de julio del 2018, en el hellicorder de las 24 hrs. se puede apreciar la ocurrencia de sismos volcano – tectónicos distales a las 12:54, 13:50 y 14:33 UTC localizado al Noroeste del cráter del volcán Sabancaya con magnitudes de 3.5, 3.5 y 3.4 MI, a su vez, se puede apreciar una baja actividad asociada propiamente al volcán (explosiones muy leves).



Actividad sísmica del volcán Sabancaya correspondiente al 24 de julio del 2018, en el hellicorder de las 24 hrs. se puede apreciar una intensa actividad de sismos volcano – tectónicos en forma de enjambres, los cuales, se asocian a fracturamiento de rocas en la zona.



Actividad sísmica del volcán Sabancaya correspondiente al 10 de octubre del 2018, en el helicorder de las 24 hrs. se puede apreciar una intensa actividad tremórica, acompañada al inicio de explosiones, dicha actividad se asoció a la salida continua de emisiones de gases y cenizas.



Actividad sísmica del volcán Sabancaya correspondiente al 14 de noviembre del 2018, en el hellicorder de las 24 hrs. se puede apreciar una intensa actividad explosiva seguida de tremor volcánico de baja energía, observándose en superficie columnas eruptivas de gases y cenizas.