

DIRECCIÓN DE GEOLOGÍA AMBIENTAL Y RIESGO GEOLÓGICO

Informe Técnico N° A6954

MUESTREO DE CENIZAS EN LOS ALREDEDORES DEL VOLCÁN SABANCAYA

Región Arequipa
Provincia Caylloma
Distrito Lluta



OCTUBRE
2019

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

Informe Técnico 6954

**MUESTREO DE CENIZAS EN LOS ALREDEDORES DEL
VOLCÁN SABANCAYA**



**Por:
Ing. DAVID VALDIVIA**

RESUMEN

El volcán Sabancaya es el segundo volcán más activo del sur peruano, edificado durante los últimos 10 mil años. Este volcán es parte del complejo volcánico Ampato-Sabancaya. La última erupción del volcán Sabancaya ocurrió entre los años 1986 y 1998 (Gerbe y Thouret, 2004).

El día 6 de noviembre de 2016 a las 20:40 horas ocurrió una explosión la cual fue seguida de emisiones continuas de ceniza, con columnas eruptivas que tuvieron alturas entre 1000 y 3000 m sobre la cima del cráter. Este evento marco el comienzo de una nueva fase de actividad eruptiva en el volcán Sabancaya.

El Observatorio Vulcanológico de INGEMMET (OVI) tiene instalados 33 cenizómetros alrededor del volcán Sabancaya, en esta campaña se realizó la recolección de ceniza de los meses junio-agosto y la inspección del estado de operatividad de los cenizómetros ubicados en el flanco sureste, oeste y de los poblados de: Chivay, Yanque, Coporaque, Achoma, Maca, Lari, Madrigal e Ichupamapa.

Se ha podido estimar espesores de 2.2, 1, 0.4 y 0.2 mm en el sector sureste del volcán, en el sector noroeste del volcán se han podido obtener espesores de 1, 0.7 y <0.1 mm y se ha medido en Yanque un espesor <0.1 mm.

Se ha podido determinar el volumen de magma emitido por el volcán Sabancaya en un periodo de junio-agosto, por utilizando los métodos de Pyle (1989) y Bonadonna (2005).

INTRODUCCIÓN

En este informe se resumen las actividades realizadas por el suscrito en cumplimiento de la orden de servicios N° 01024, del Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET), por intermedio de la Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico (DGAR) y del Observatorio Vulcanológico del INGEMMET (OVI).

En este contexto, se explica el trabajo realizado del 20 al 22 de agosto en la comisión de servicios pre-campo N° 76, dirigida por el comisionado Ing. Rafael Miranda Cruz; con la finalidad de realizar el muestreo de cenizas e inspeccionar el estado actual de los cenizómetros instalados en los alrededores del volcán Sabancaya y calcular el volumen de magma emitido por este volcán.

CONTENIDO

RESUMEN	2
INTRODUCCIÓN	3
1. UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	6
2. ANTECEDENTES	6
3. OBJETIVOS DEL TRABAJO	9
4. CLIMA	9
5. VEGETACIÓN	9
6. MUESTREO DE CENIZA EN EL VOLCAN SABANCAYA	9
7.2 Medición de los espesores de la ceniza	9
7.3 Mediciones con los cenizómetros	10
7.5 Calculo de volumen de caídas de ceniza periodo enero-agosto 2019	15
CONCLUSIONES	18
RECOMENDACIONES	18
BIBLIOGRAFIA	19

Lista de Figuras

Figura 1: Mapa de ubicación del volcán Sabancaya	6
Figura 2: Ubicación de los cenizómetros alrededor del volcán Sabancaya.....	
Figura 3: Espesores medidos en agosto 2019	
Figura 4: Cenizómetros instalados alrededor del volcán Sabancaya; a) SC-26 poblado de Yanque, b) SC-21 Laguna Mucurca, c) SC-02 camino a la SAB11, d) SC-20 Lava oeste v. Sabancaya, e) SC-18 Lava noroeste v. Sabancaya, f) SC-01 SAB11, g) SC-28 sureste v. Sabancaya, h) SC-06 casa de pájaros, i) SC-27 -SAB07	12
Figura 5: Cenizómetros habilitados temporalmente e inhabilitados: a) SC-31 poblado de maca, b) SC-15 poblado de Lari, c) SC-16 poblado de Madrigal, d) SC-17 poblado de Madrigal, e) SC-25 poblado de Achoma (inhabilitado), f) SC-33 poblado de Chivay.	13
Figura 6: Mapa de isópacas para el periodo junio-agosto del 2019.	14
Figura 7: Gráfica del método exponencial Fierstein & Nathenson (1992) donde $T_0=0.004$ metros $K=0.243$	16
Figura 8: La gráfica de la curva de ley de poder extrapolada en una gráfica semi-logarítmica, se observa que el espesor disminuye en cuanto se reduce la raíz cuadrada de la isópaca.	16

Lista de Tablas

Tabla 1: Itinerario de trabajo.....	6
Tabla 3: Espesores medidos en los cenizómetros.....	10
Tabla 4: Resultados de los volúmenes obtenidos por cada método.....	17
Tabla 5: Datos usados para la obtención del volumen DRE del depósito de caída de cenizas.	17

1. UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

El volcán Sabancaya (Figura 1), ubicado a 75 km al NO de la ciudad de Arequipa, después del volcán Ubinas (Moquegua), es considerado el segundo volcán más activo del Perú. Desde el 06 de noviembre del 2016 hasta la actualidad viene presentando un nuevo proceso eruptivo caracterizado por recurrentes explosiones con presencia de gases y ceniza.

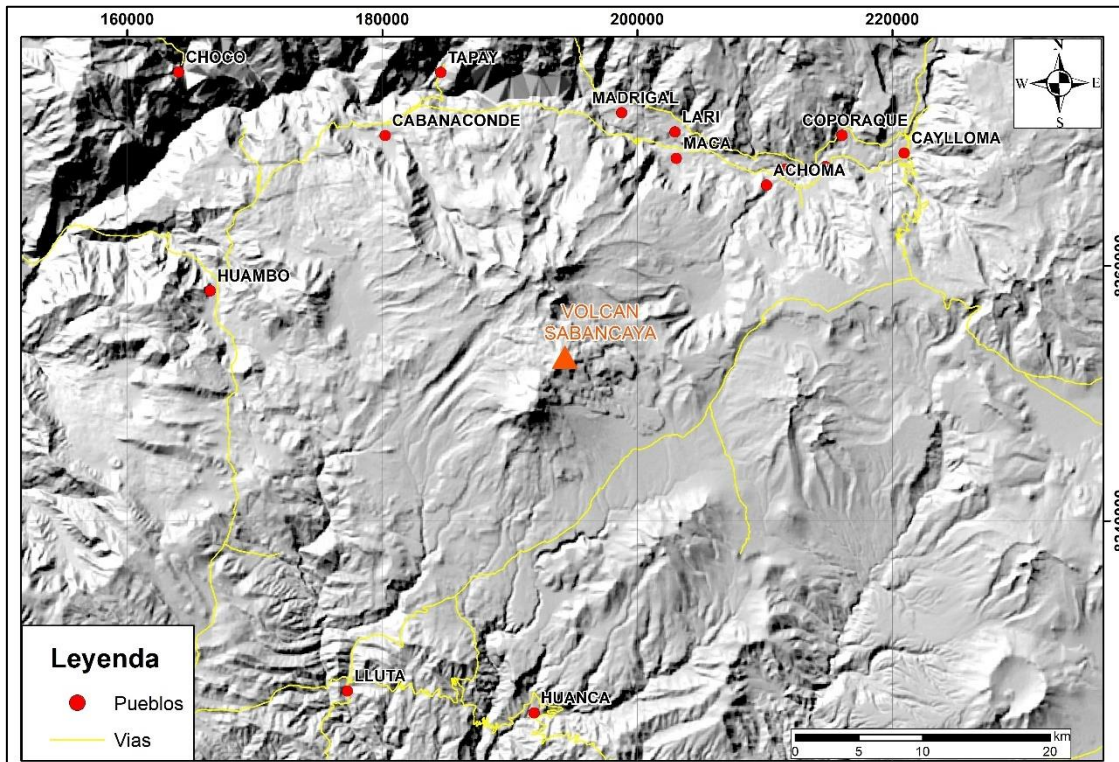


Figura 1: Mapa de ubicación del volcán Sabancaya

Tabla 1: Itinerario de trabajo

N° de días	Fecha	Ruta
1	19/08/2019	Arequipa – Chivay
2	20/08/2019	Chivay – Sallalli – volcán Sabancaya – Chivay
3	21/08/2019	Chivay – Sallalli – volcán Sabancaya – Chivay
4	22/08/2019	Chivay – Mucurca – Volcán Sabancaya – Chivay
5	23/08/2019	Chivay – Pinchollo – Volcán Sabancaya – Arequipa

2. ANTECEDENTES

Estudios geológicos efectuados por Gerbe y Thouret (2004); Mariño, (2012); Samaniego *et al.*, (2016); Rivera *et al.*, (2016), entre otros, describen el comportamiento eruptivo pasado del Sabancaya, desde los últimos 10000 años. De acuerdo a su actividad recurrente en el pasado histórico, este volcán ha

presentado erupciones efusivas lávicas y actividad explosiva moderada con considerables emisiones de ceniza. Así, la actividad eruptiva del Sabancaya ocurrida durante los últimos 400 años, consistió en erupciones explosivas de leves a moderadas (Índice de Explosividad Volcánica IEV 1-2). Durante este periodo presentó tres erupciones explosivas de leves a moderadas ocurridas en los años 1750, 1784 y entre 1990 - 1998, caracterizados por una intensa actividad fumarólica y emisiones de ceniza (Rodríguez y Uribe, 1994; Gerbe y Thouret, 2004). Durante la erupción 1990-1998, se midió ceniza volcánica, hasta 3 cm de espesor a 8 km al Este del volcán.

El OVI implementó una red de cenizómetros, dispositivos que se utilizan para medir espesores, densidad de área y densidad total de ceniza (>20 mm) utilizando la técnica descrita por Bernard (2013), hasta la fecha se ha instalado 33 cenizómetros (Informe N° A6783 y N° A6771), en los alrededores del volcán Sabancaya (Figura 2).

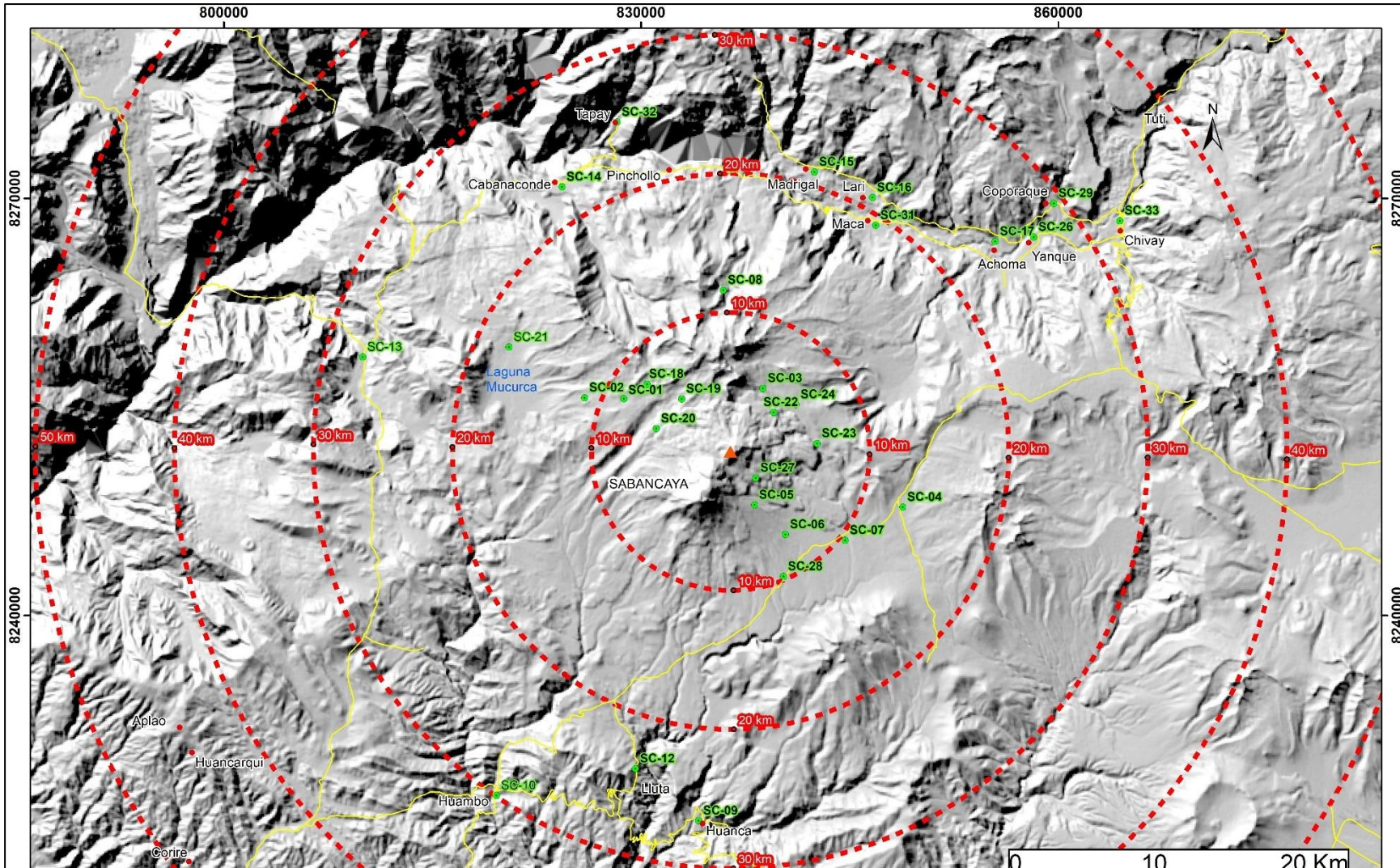


Figura 2: Ubicación de los cenizómetros alrededor del volcán Sabancaya

3. OBJETIVOS DEL TRABAJO

- Informar del muestreo de ceniza realizado en los alrededores del volcán Sabancaya.
- Calcular el volumen de ceniza emitida en el periodo junio-agosto de 2019.

4. CLIMA

En este sector de los Andes del sur peruano, la temporada seca corresponde a los meses de abril a noviembre, mientras que, el régimen de lluvias ocurre durante el verano (diciembre a marzo). Se presenta, por lo tanto, una sola estación húmeda, lo que repercute en el régimen de caudal de los ríos. Entre el 60 % y 75 % de la precipitación se concentra en los meses de enero a marzo. Los períodos críticos secos se sitúan entre junio y julio. En el sector noreste del volcán Sabancaya, sobre los 3900 msnm, la precipitación anual total varía entre 480 a 926 mm. Al norte del volcán Sabancaya, sobre los 3000 msnm (valle del río Colca), la precipitación anual es también variable, tal es así que en Madrigal la precipitación promedio anual total es 390.5 mm, en Cabanaconde 386.8 mm, en Chivay 391.7 mm, y en Sibayo 574.5 mm. Las precipitaciones estimadas en el complejo Ampato-Sabancaya en promedio es de 400 mm/año (Lamadon, 1999) y ocurren entre diciembre y marzo, registrándose precipitaciones de lluvia, nieve y granizo que se depositan en la cumbre y parte superior de los flancos del complejo volcánico.

5. VEGETACIÓN

La vegetación en la zona está conformada por tres estratos: arbóreo, arbustivo y herbáceo. En conjunto conforman varias comunidades mayores o formaciones vegetales y, a su vez, agrupan a varias comunidades menores que por la gradiente altitudinal, fisonómica y estructural son diferentes:

- Cactáceas columnares y escasos arbustos
- Matorral desértico de arbustos espinosos con cactáceas columnares.
- Ecotono de matorral desértico de arbustos espinosos con cactáceas columnares y pajonal
- Pajonal de ichu (*Stipa*) con arbustos bajos resinosos
- Pajonal de puna (*Festuca*)
- Pastizal de crespillo
- Tolar
- Yaretal
- Vegetación almohadillada cespitosa

6. MUESTREO DE CENIZA EN EL VOLCAN SABANCAYA

Para la recolección de información, en esta oportunidad, se ha participado en la comisión de servicios del 20 al 22 de agosto del presente.

7.2 Medición de los espesores de la ceniza

El trabajo ha consistido en medir con ayuda de los cenizómetros graduados con una escala milimétrica el espesor de ceniza que se ha recolectado desde los meses de

marzo hasta agosto, instalados en Chivay, Yanque, Coporaque, Achoma, Maca, Lari, Madrigal, laguna de Mucurca, sector SE y sector NO del volcán Sabancaya.

Tabla 2: Espesores medidos en los cenizómetros

Código	Espesores	Código	Espesores
SC-01	0.1	SC-19	0.5
SC-02	>0.1	SC-20	1
SC-03	_____	SC-21	>0.1
SC-04	0.2	SC-22	_____
SC-05	1	SC-23	_____
SC-06	0.4	SC-24	_____
SC-07	_____	SC-25	_____
SC-08	_____	SC-26	>0.1
SC-09	_____	SC-27	2.2
SC-10	_____	SC-28	0.2
SC-12	_____	SC-29	_____
SC-13	_____	SC-31	_____
SC-14	_____	SC-32	_____
SC-15	0.7	SC-33	_____
SC-16	_____		
SC-17	_____		
SC-18	0.7		

7.3 Mediciones con los cenizómetros

Los espesores de caída de ceniza se han determinado con las medidas obtenidas de los cenizómetros; el 20 de agosto del presente se ha realizado medidas de espesores de caída de cenizas en el sector sureste del volcán Sabancaya determinando que entre 2 a 10 km, hay espesores de 2.2 a 0.2 mm y a 13 km espesores de 0.2 mm (Tabla 1; Figura 2 y 3).

También se ha medido espesores de caída de cenizas en los cenizómetros, el 22 de agosto en el sector noroeste del volcán Sabancaya; donde se ha podido determinar entre 5 y 9 km espesores de 1 a 0.1 mm respectivamente, y entre 10 y 18 km espesores de caída de cenizas menores a 0.1 mm (Tabla 1; Figura 2 y 3).

Así mismo se ha realizado una medida de espesor de caída de ceniza en poblado de Yanque obteniendo una medida menor a 1 mm (Tabla 1; Figura 2 y 3). Es importante mencionar que, debido a la presencia de vientos fuertes en la zona, la ceniza es retrabajada y retransportada.

Adicionalmente se ha realizado una inspección el día 21 de agosto de los cenizómetros ubicados en Chivay, Achoma, Maca, Madrigal, Ichupampa y Coporaque (Tabla 1 y Figura 4) encontrándose inhabilitados para la recolección de ceniza; se les ha realizado un mantenimiento provisional quedando actualmente habilitados temporalmente.

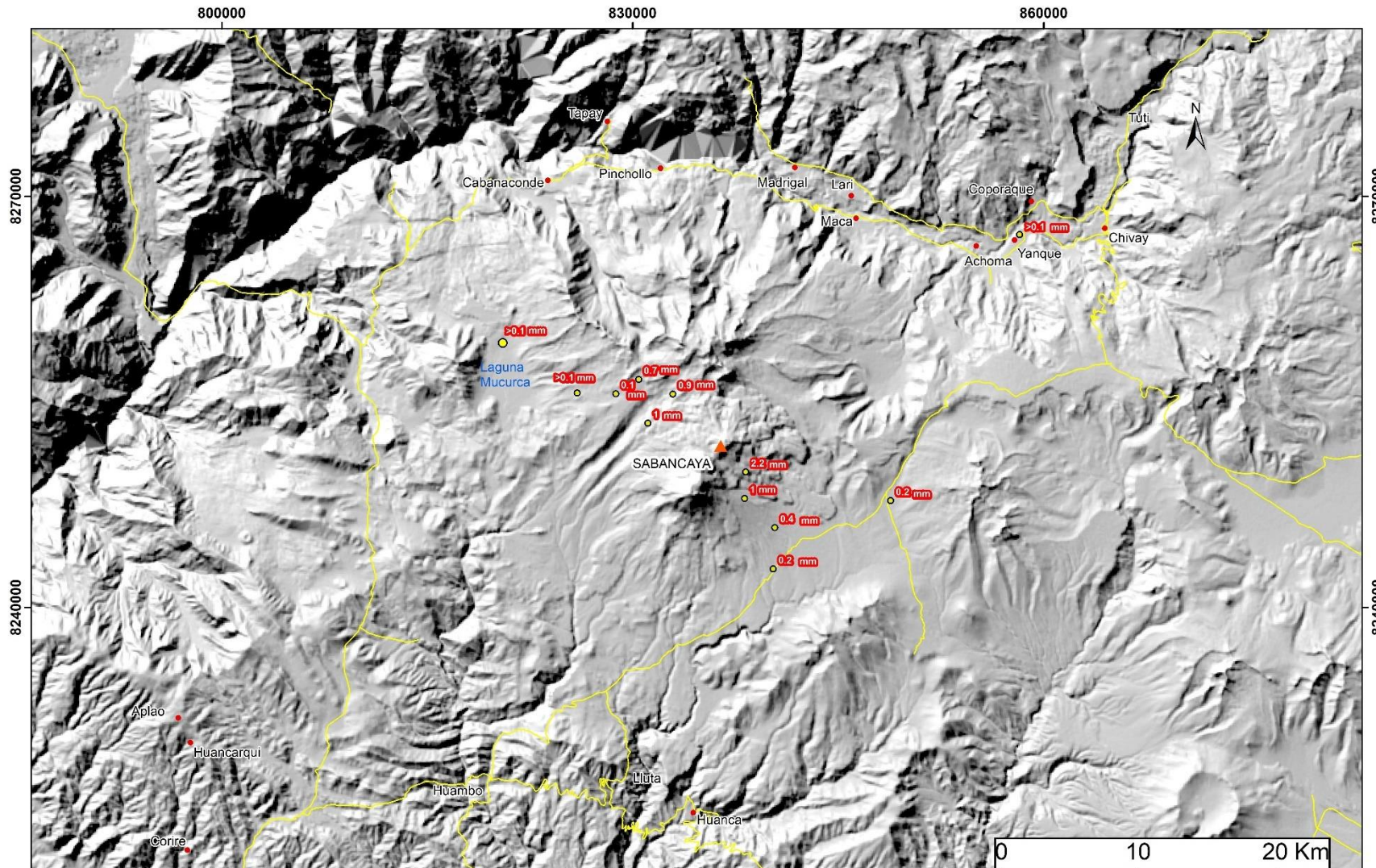


Figura 3: Espesores medidos en agosto 2019



Figura 4: Cenizómetros instalados alrededor del volcán Sabancaya; a) SC-26 poblado de Yanque, b) SC-21 Laguna Mucurca, c) SC-02 camino a la SAB11, d) SC-20 Lava oeste v. Sabancaya, e) SC-18 Lava noroeste v. Sabancaya, f) SC-01 SAB11, g) SC-28 sureste v. Sabancaya, h) SC-06 casa de pájaros, i) SC-27 -SAB07

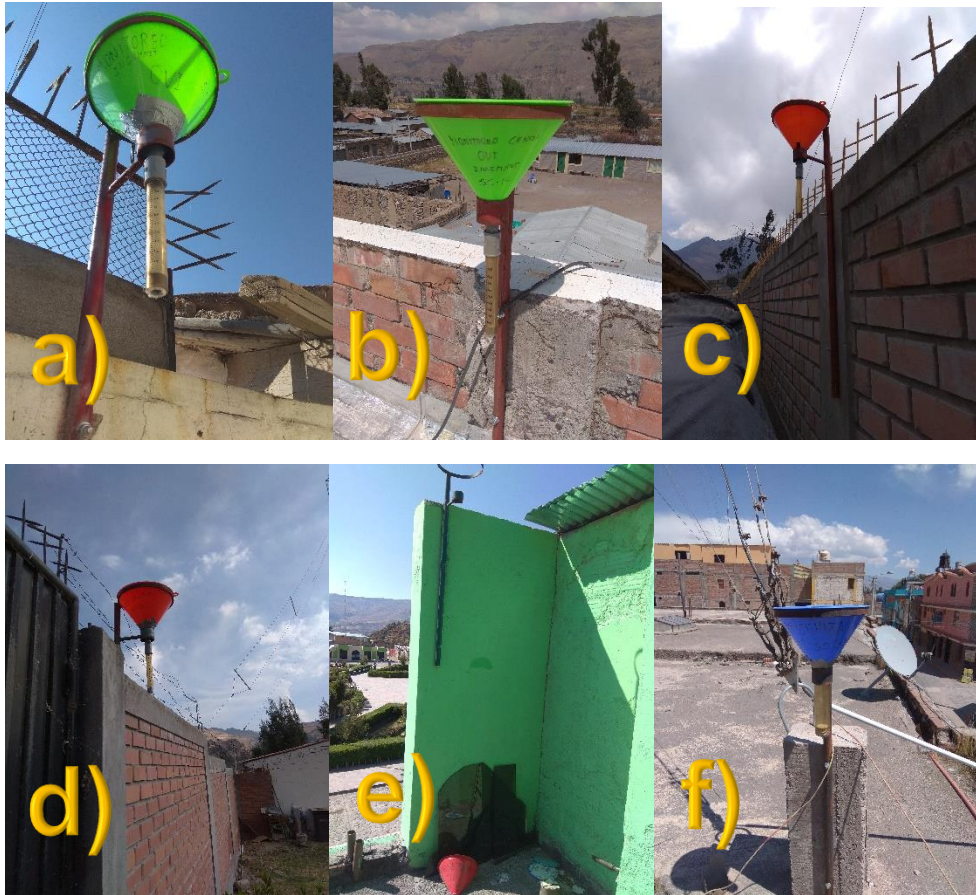


Figura 5: Cenizómetros habilitados temporalmente e inhabilitados: a) SC-31 poblado de maca, b) SC-15 poblado de Lari, c) SC-16 poblado de Madrigal, d) SC-17 poblado de Madrigal, e) SC-25 poblado de Achoma (inhabilitado), f) SC-33 poblado de Chivay.

7.4 Mapa de Isópacas

Desde junio hasta agosto del presente año se han realizado medidas de espesores de caída de cenizas en el sector sureste del volcán Sabancaya determinando que entre 2 a 10 km, hay espesores de 2.2 a 1.0 mm, y a 13 km espesores de 0.3 mm. Así mismo, en el sector noroeste del volcán, se determinó que entre 5 y 9 km los espesores son de 1.0 a 0.4 mm respectivamente, y entre 10 y 18 km los espesores de caída de cenizas son menores a 0.1 mm.

Estos resultados han permitido elaborar un Mapa de Isópacas (un mapa de isópacas consiste en líneas que unen puntos de igual espesor de un depósito) de la ceniza acumulada desde enero hasta el mes de agosto, el cual, indica que la dirección predominante de la dispersión y caída de ceniza es hacia el sureste (Figura 6).

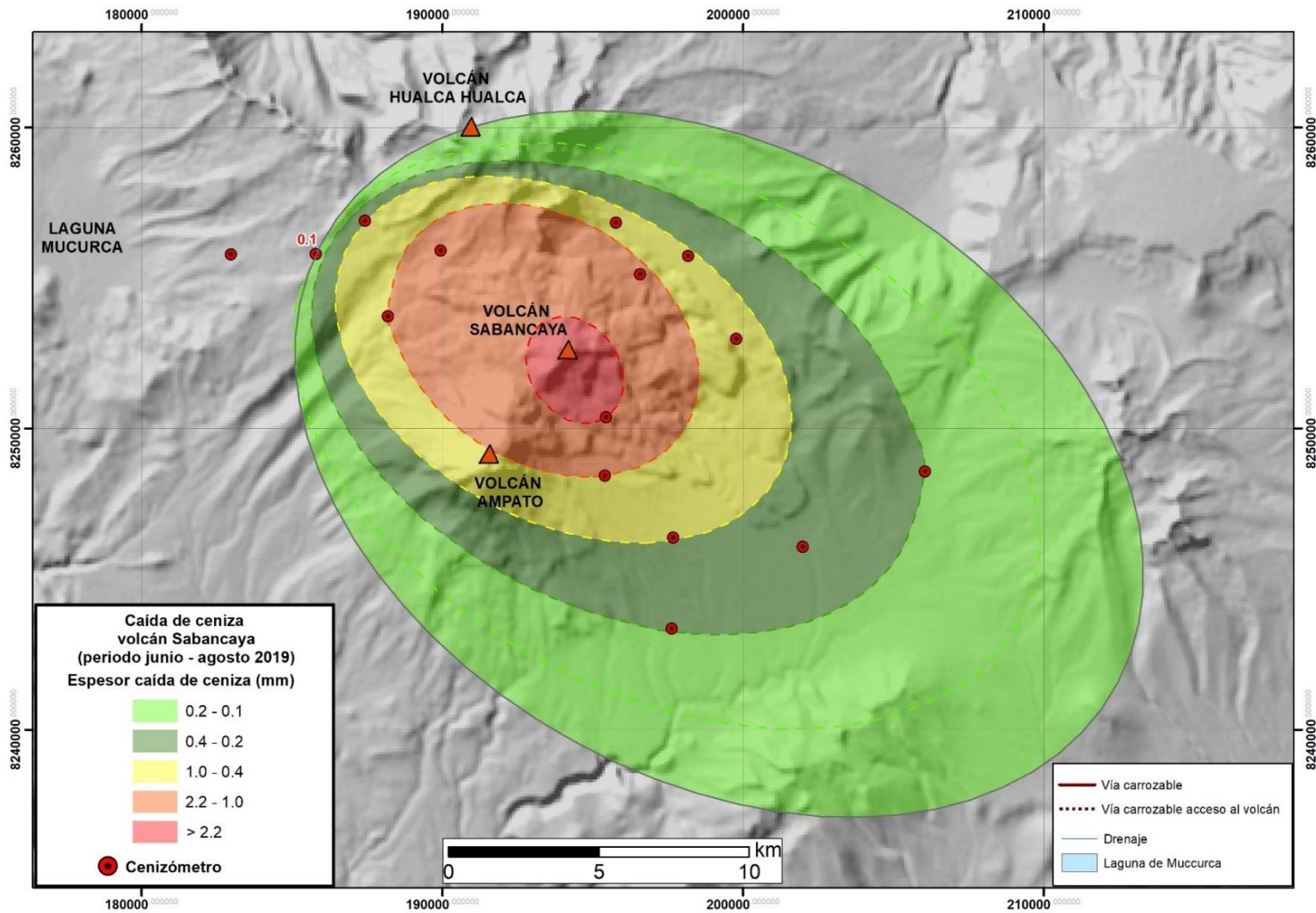


Figura 6: Mapa de isópacas para el periodo junio-agosto del 2019.

7.5 Cálculo de volumen de caídas de ceniza periodo enero-agosto 2019

Los depósitos de caídas de ceniza (tefra) preservan información valiosa relacionada a los parámetros dinámicos y físicos asociados a una erupción volcánica. Uno de los parámetros más importantes que pueden ser derivados del análisis de los depósitos de tefra es el volumen erupcionado (volumen bulk) el cual es esencial para la evaluación de peligros y riesgos volcánicos (Bonadonna & Costa, 2013).

Sin embargo, las mediciones realizadas con los cenizómetros nos proporcionan datos más confiables para realizar el cálculo del volumen de caída de ceniza para un determinado periodo.

Para utilizar los datos de campo medidos en los cenizómetros (espesor de caída de ceniza) y el área del mapa de isópacas, para lo cual se ha empleado 2 métodos para el cálculo del volumen del depósito:

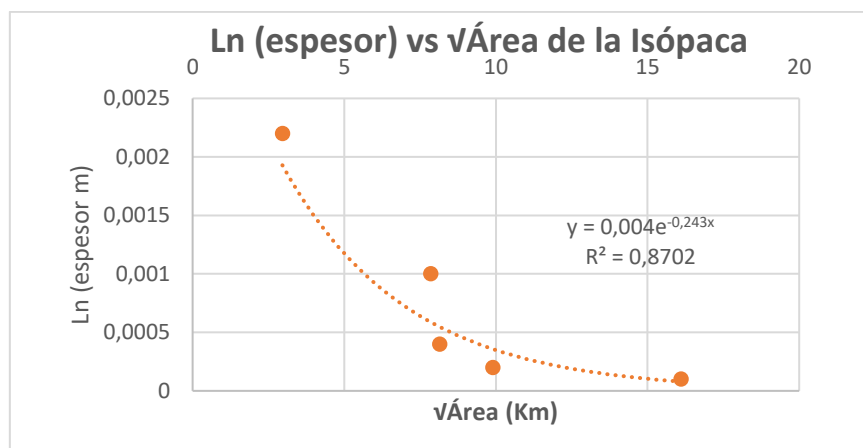
- a) Pyle (1989), propuso empíricamente que el espesor disminuye exponencialmente en función a la raíz cuadrada del área de \sqrt{A} , representado en la siguiente ecuación:

$$T(x) = T_o e^{-kA^{0.5}} \quad (1)$$

Además, Fierstein & Nathenson (1992), extendieron este enfoque integrando directamente la ecuación (1), sin asumir una forma específica para las isópacas, hallando así el volumen del depósito por la siguiente ecuación:

$$\text{Volumen} = 2 * (T_o / k^2) \quad (2)$$

- T_o : Máximo espesor extrapolado, $\ln T$ vs la raíz cuadrada del área del isópaca
- K : es la pendiente del segmento exponencial mejor trazado en la gráfica $\ln T$ vs la raíz cuadrada del área del isópaca (Fig.7).



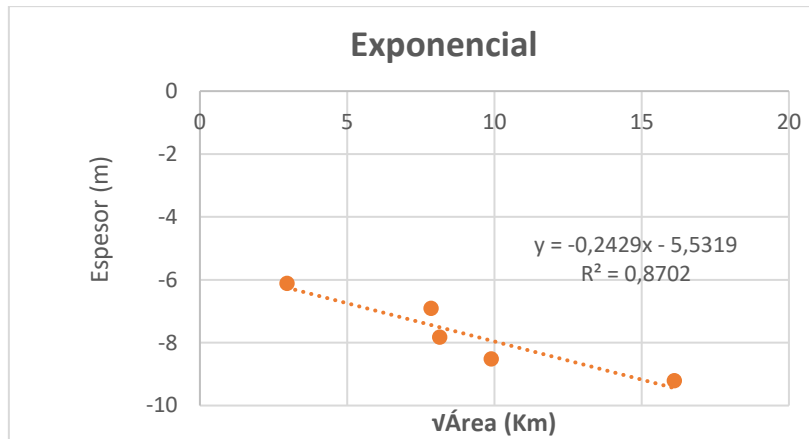


Figura 7: Gráfica del método exponencial Fierstein & Nathenson (1992) donde $T_0=0.004$ metros $K=0.243$

Con los datos obtenidos, reemplazamos en las ecuaciones se obtiene un **volumen de 0.000135593 km³ o 135000 m³ – volumen mínimo (Tabla 4).**

- b) Según Bonadonna & Houghton (2005), es posible describir una relación de “ley de Potencial de la forma”:

$$T(x) = Tpl \sqrt[A]{A^{-m}} \quad (3)$$

Para lo cual Tpl y m son el coeficiente y el coeficiente de la función potencia respectivamente, siendo **B** límite proximal y el limite distal (**C**) el volumen (Figura 8) queda como sigue:

$$\text{Volumen} = (2Tpl / 2 - m) [c^{(2-m)} - B^{(2-m)}] \quad (4)$$

Siendo la ecuación para B :(4)

$$B(\text{límite proximal}) = (T_0 / Tpl)^{(1/-m)} \quad (5)$$

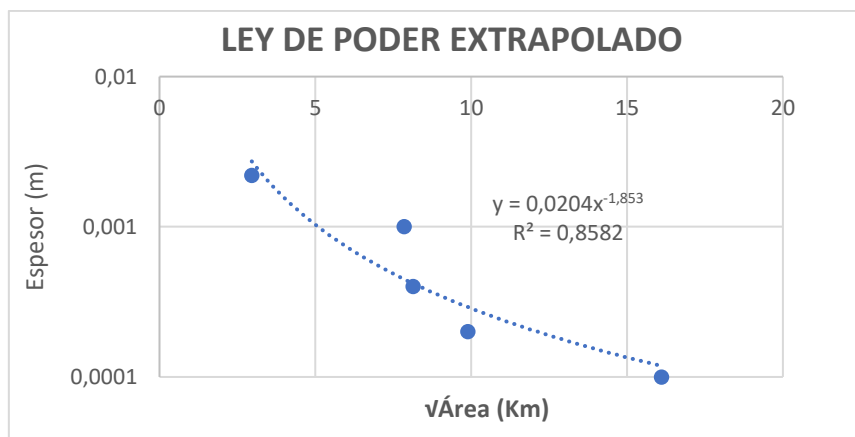


Figura 8: La gráfica de la curva de ley de poder extrapolada en una gráfica semi-logarítmica, se observa que el espesor disminuye en cuanto se reduce la raíz cuadrada de la isópaca.

Con los datos obtenidos y reemplazados en las ecuaciones se obtiene un **volumen de 0.00019083 km³ o 190830 m³ volumen máximo (Tabla 4).**

A continuación, se representa los volúmenes obtenidos:

Tabla 3: Resultados de los volúmenes obtenidos por cada método

Método	Volumen
Decaimiento exponencial; (Pyle 1989, Fierstein 1992)	0.0001355 km³
Ley de Poder; Bonnadona; 2005	0.0001908km³

7.6 Volumen equivalente de roca densa (DRE)

El DRE (equivalente de roca densa) es básicamente el volumen calculado del material emitido por una erupción, corregido a una densidad asumida, equivalente a la densidad del magma sin burbujas (Sidgursion et al. 2015).

Los análisis geoquímicos de la muestra de ceniza corresponden a un magma de composición andesítica, por lo cual la densidad de Roca Equivalente (Densidad del magma sin considerar los gases es de 2.7 kg/m³ (R. Aguilar, 2019), para la densidad del depósito se ha tomado considerando que varía de 690 – 1200 kg/m³ (R. Aguilar, 2019), que depende de la distancia al cráter del volcán, por lo cual se utilizó un valor de promedio 1000 kg/m³ (Tabla 5).

Tabla 4: Datos usados para la obtención del volumen DRE del depósito de caída de cenizas.

Ley de Poder	0.0001908 km ³ equivale a 190830 m ³
Densidad del depósito	1000 kg/m ³
Masa Densa Equivalente (DME)juvenil	1.9083 x 10 ⁸
Densidad de roca equivalente del magma	2700 kg/m ³
Volumen DRE total	0.0000717 km ³ o 71700 m ³

Volumen DRE Total: 0.0000717 km³

CONCLUSIONES

- Con las medidas recolectadas en los cenizómetros se ha logrado tomar los espesores de la caída de ceniza en el sector sureste del volcán Sabancaya, donde se midió espesores de: 2.2, 1, 0.4 y 0.2 mm.
- Se ha elaborado el mapa de Isopacas para el volcán Sabancaya en base a espesores medidos de los cenizómetros en el periodo junio-agosto 2019.
- Se ha calculado el volumen máximo de ceniza emitida en el periodo junio-agosto 2019, obteniendo un volumen de 0.0000717 km³.

RECOMENDACIONES

- Realizar un mantenimiento y habilitación de los cenizómetros instalados en los alrededores del volcán Sabancaya a fin de que estos se mantengan operativos.
- Realizar modelamientos o simulaciones en programas específicos (ASH3D) para este tipo de eventos a fin de realizar pronósticos de caídas de cenizas en los poblados asentados en los alrededores del volcán Sabancaya.
- Dar charlas al personal de las municipalidades, centros de salud y pobladores sobre los peligros volcánicos y el uso del cenizómetro.
- Para efectuar el monitoreo en tiempo real se sugiere instalar un cenizómetro con cámara y un espectrómetro XRF portátil.

BIBLIOGRAFIA

- Aguilar R. (2019). "Exposure-based risk assessment of tephrafall associated with long-lasting Vulcanian eruptions at Sabancaya volcano, Peru", Specialisation certificate in the assessment and management of geological and climate related risk CERG-C 2018, 33p.
- BENJAMIN B. (2013). Homemade ashmeter: a low-cost, high-efficiency solution to improve tephra field-data collection for contemporary explosive eruptions. *Journal of Applied Volcanology* 2:1
- Bonadonna, C., and Costa, A., 2013. Plume height, volume, and classification of explosive volcanic eruptions based on the Weibull function. *Bulletin of Volcanology*, 75, 742.
- Bonadonna, C., and Houghton, B., 2005. Total, grain-size distribution and volume of tephra-fall deposits. *Bulletin of Volcanology*, 67, 441–456.
- Fierstein, J., Nathenson, M., 1992. Another look at the calculation of fallout tephra volumes: *Bulletin of volcanology*, 54, 156–167.
- GERBE M.-C., THOURET J.-C. (2004). Role of magma mixing in the petrogenesis of lavas erupted through the 1990-98 explosive activity of Nevado Sabancaya in south Peru. *Bulletin of Volcanology*, 66, 541-561.
- INGEMMET (2017). Evaluación del proceso eruptivo del volcán Sabancaya – Region Arequipa, Informe Técnico N°A6771.
- INGEMMET (2017). Evaluación por caída de ceniza en el distrito Achoma, provincia Caylloma, Arequipa, Informe Técnico N°A6771.
- MARIÑO, J. (2012). Escenarios eruptivos y mapa de peligros del complejo volcánico Ampato-Sabancaya. Tesis Maestría, Universidad de Nice, Francia, 87 p.
- Pyle, D., 1989. The thickness, volume and grainsize of tephra fall deposits. *Bulletin of Volcanology*, 51, 1-15.
- RIVERA, M.; MARIÑO, J.; SAMANIEGO, P.; DELGADO, R. & MANRIQUE, N. (2016). Geología y evaluación de peligros del complejo volcánico Ampato - Sabancaya (Arequipa), INGEMMET. Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica, 61, 122 p., 2 mapas.
- SAMANIEGO, P., RIVERA, M., MARIÑO, J., GUILLOU, H., LIORZOU, C., ZERATHE, S., DELGADO, R., VALDERRAMA, P. (2016). The eruptive chronology of the Ampato-Sabancaya volcanic complex (Southern Peru). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. Vol. 323, p. 110-128.