

Informe Técnico N° A6734

EVALUACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE PELIGROS VOLCÁN SABANCAYA

Región Arequipa



POR:

JERSY MARIÑO
MARCO RIVERA
PABLO SAMANIEGO
LUISA MACEDO

NOVIEMBRE
2016

**INSTITUTO GEOLÓGICO MINERO Y METALÚRGICO
DIRECCIÓN DE GEOLOGÍA AMBIENTAL Y RIESGO GEOLÓGICO**

INFORME TÉCNICO

EVALUACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE PELIGROS VOLCÁN SABANCAYA (AREQUIPA)



Emisiones de gases y ceniza del volcán Sabancaya, día 11/11/2016

Elaborado por:

Jersy Mariño
Marco Rivera
Pablo Samaniego
Luisa Macedo

Noviembre 2016

ÍNDICE

CAPÍTULO	PÁGINA
I. INTRODUCCIÓN	3
II. GEOLOGÍA	5
III. ACTIVIDAD HISTÓRICA DEL VOLCÁN SABANCAYA	9
IV. PELIGROS VOLCÁNICOS Y ESCENARIOS ERUPTIVOS EN EL VOLCÁN SABANCAYA	15
V. ESCENARIOS ERUPTIVOS ANTE UNA POSIBLE REACTIVACIÓN DEL VOLCÁN SABANCAYA	18
VI. MAPA DE PELIGROS DEL COMPLEJO VOLCÁNICO AMPATO-SABANCAYA	22
VII. CONCLUSIONES	29
VIII. RECOMENDACIONES	31
REFERENCIAS	32

I. INTRODUCCIÓN

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). Luego de casi 15 años de calma, en febrero de 2013 el volcán Sabancaya empezó a registrar un incremento en las emisiones de gases. Paralelamente, la actividad sísmica también aumentó en áreas cercanas al volcán y en el valle del Colca. Los sismos más importantes ocurrieron en febrero de 2013 (Tavera *et al.*, 2013a), julio del 2013 (Tavera *et al.*, 2013b) y 14 de agosto 2016; este último tuvo magnitud 5.3 ML y fue seguido de muchas réplicas (Tavera *et al.*, 2016). Si bien, estos sismos debieron su origen a la actividad de fallas activas locales, pre-existentes, es probable que tengan un componente volcánico, pues estos sismos se vienen produciendo dentro de un ambiente volcánico.

En agosto del 2015 el Observatorio Vulcanológico del INGEMMET (OVI) reportó la presencia de emisiones fumarólicas en la parte superior del domo Suroeste del Sabancaya, que hasta en la actualidad vienen siendo emitidas. Estas emisiones contienen valores de 50 ppm.m del gas volcánico SO₂. Desde abril del 2016, se detectaron nuevas zonas con emisiones fumarólicas, localizadas al pie del flanco Norte, a una distancia promedio de 600 m del cráter. El día 25 de agosto, una brigada del OVI realizó una inspección de campo a dicha zona y pudo comprobar que se trata de siete nuevas zonas de emisiones fumarólicas. Posteriormente, el día 27 de agosto último a las 06:51 horas el Sabancaya registró una leve explosión con una energía sísmica liberada de aproximadamente 72 Megajoules (MJ) que fue seguida de emisiones densas de gases y algo de ceniza que alcanzaron alturas de hasta 1000 m sobre la cima. Finalmente, el día 03 de noviembre último, el sistema MIROVA, identificó por primera vez una anomalía térmica en el flanco Norte del volcán Sabancaya.

El día 06 de noviembre de 2016 a las 20:40 horas ocurrió una explosión en el volcán Sabancaya, la cual fue seguida de emisiones continuas de ceniza, con columnas eruptivas que tuvieron alturas entre 1000 y 3000 m sobre la cima del volcán. Este evento marca el comienzo de una nueva fase eruptiva del volcán Sabancaya.

El presente informe técnico contiene información sobre la geología del volcán Sabancaya, la evaluación de peligros, los escenarios eruptivos futuros en el Sabancaya, así como una explicación detallada del mapa de peligros volcánicos. El objetivo del informe es que sirva como un documento de base para la elaboración del Plan de Contingencia frente a la erupción del volcán Sabancaya, que viene siendo coordinado por las autoridades del Gobierno Regional de Arequipa.

UBICACIÓN Y ACCESO

El volcán Sabancaya está localizado aproximadamente a 76 km al Noroeste de la ciudad de Arequipa, en la provincia de Caylloma, y a 20 km al sur del valle del Colca (15° 46' - 15° 52' S; 71° 49' - 71° 54' O; Figura 1), en la Región Arequipa.

La principal vía de acceso al volcán Sabancaya es la que se dirige de la ciudad de Arequipa a la localidad de Chivay (provincia de Caylloma), la cual se encuentra completamente asfaltada. Siguiendo esta vía se arriba hasta el sector Patapampa (km 60 de la vía Arequipa-Chivay); de donde parte un desvío con dirección O y SO. Esta última vía corresponde a una trocha carrozable y angosta, la cual pasa al norte del nevado Ananta y continúa hacia la Hacienda Sallalli (30 km al oeste de Patapampa) y el caserío Cajamarcana, desde allí se observa el flanco Este del complejo Ampato-Sabancaya. Por esta vía de acceso es difícil transitar con vehículos

EVALUACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE PELIGROS VOLCÁN SABANCAYA

ligeros debido a la intensa acumulación de limo, arena y grava dispersos en toda la altiplanicie. Otra vía alterna, sale desde el pueblo de Achoma (valle del Colca), hacia el paraje Hornillos, ubicado al Norte del volcán.

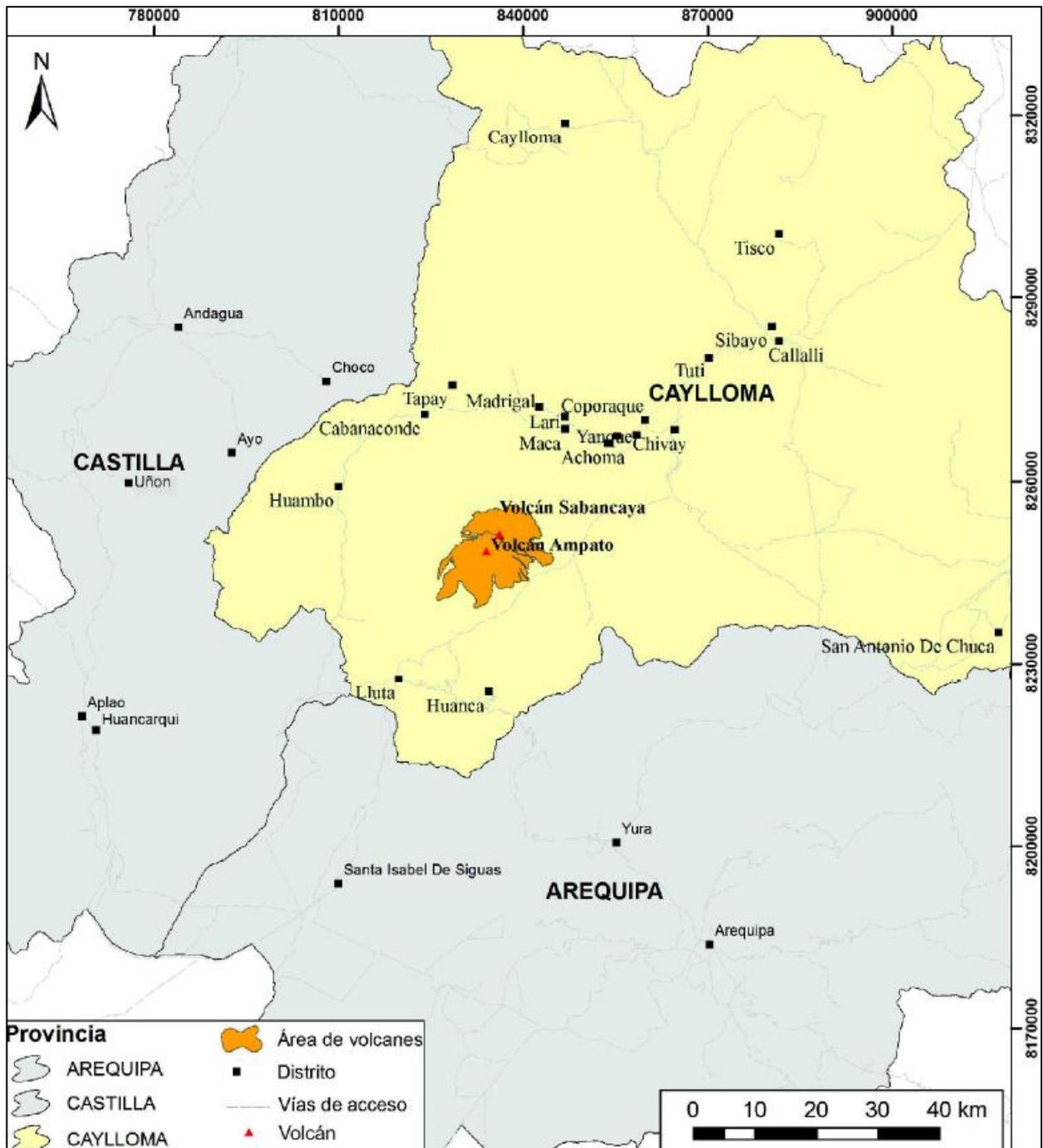


Figura 1. Ubicación del volcán Sabancaya, así como de las provincias y distritos localizados en sus alrededores (Tomado de Rivera et al., 2016).

II. GEOLOGÍA

Marco tectónico

En áreas aledañas al volcán Sabancaya existen numerosas fallas geológicas que aún registran actividad, entre ellas las fallas Huanca e Ichupampa, ubicadas al sur y norte de dicho volcán, respectivamente. Las fallas Trigal, Solarpampa y Solarpampa I, localizadas al Noroeste del volcán y que tienen una orientación Este-Oeste. La falla Sepina, de dirección NE-SO, la cual se ubica en el sector de la Pampa Sepina, al Este del volcán Sabancaya. Esta falla aparentemente se inicia en el volcán Sabancaya, cruza el cañón del Colca y atraviesa los pueblos de Achoma, Yanque, Ichupampa y Coporaque.

Características estructurales del volcán Sabancaya

La cumbre del volcán Sabancaya está localizada a 5980 metros sobre el nivel del mar y el edificio volcánico cubre un área de 65 a 70 km². El volcán está conformado por dos estratoconos, alineados en dirección SO-NE (figura 2). El más antiguo se halla en el extremo suroeste, en cuya cima se emplaza un domo de lava; mientras que el cono más reciente, localizado al extremo Noreste, contiene en su cima el cráter activo. Este cráter posee alrededor de 300 m de diámetro (figura 3). También, en el Sabancaya se han identificado dos centros de emisión o ventos adicionales; uno de ellos localizado a 3.5 km al SE del cráter, del cual se emitieron flujos de lava extensos; otro ubicado a 3.5 km al NO del cráter, por el cual se emplazó un pequeño domo-colada. Los dos centros de emisiones o ventos y el cráter se encuentran alineados en dirección SE-NO (figura 2).

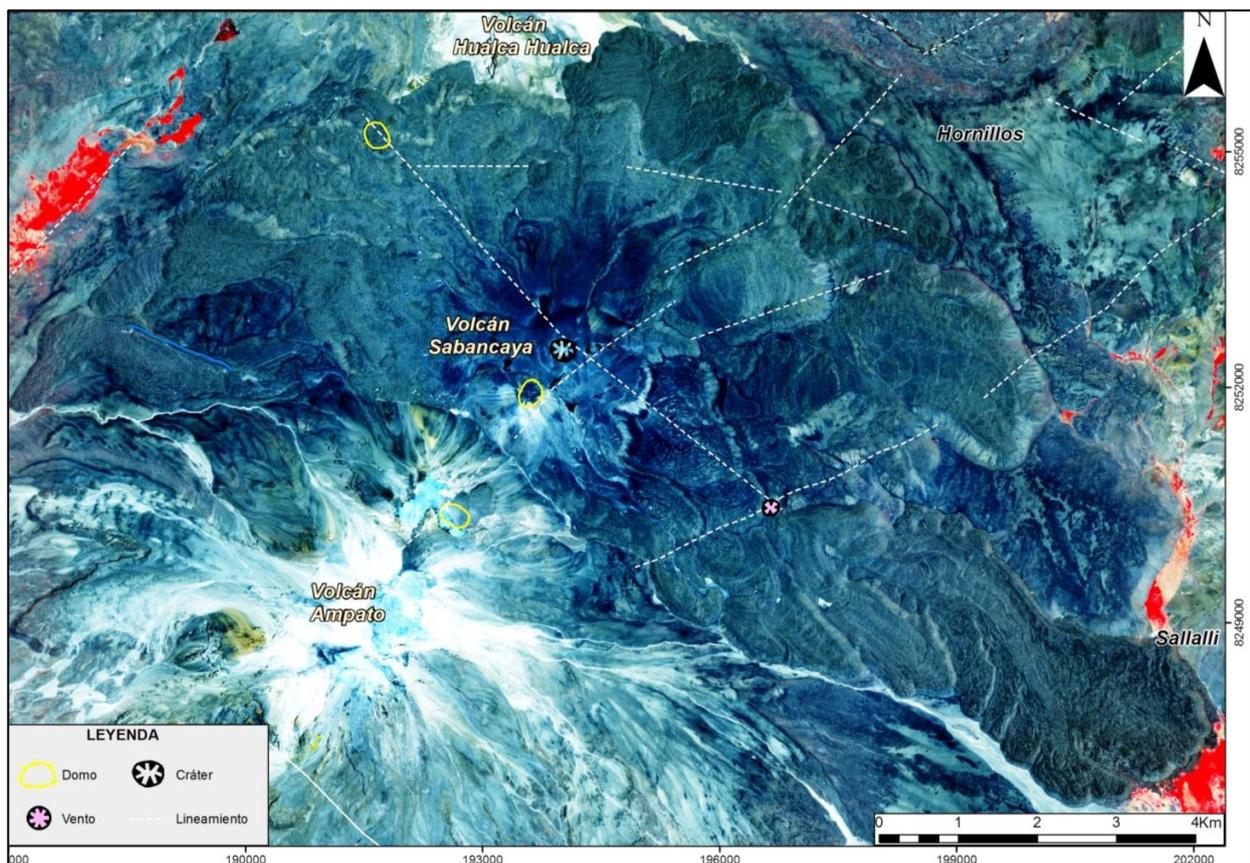


Figura 2. Imagen satelital Rapid eye donde se muestra el volcán Sabancaya y las principales estructuras volcánicas y tectónicas.



Figura 3. Vista del cráter del volcán Sabancaya, tomada en octubre del 2009. Se observan leves emisiones fumarólicas, principalmente emitidas de la pared occidental del cráter.

Geología del volcán Sabacaya

Los estudios geológicos efectuados por Mariño (2012) y Rivera *et al.* (2016) muestran que el volcán Sabancaya se ha edificado en tres etapas: «Sabancaya I», «Sabancaya II» y «Sabancaya III» (figuras 4, 5 y 6). Durante las etapas «Sabancaya I y II» se emplazaron principalmente flujos de lavas, y algunos depósitos de caída de ceniza. Durante la etapa «Sabancaya III» se emplazaron al menos dos flujos de lava andesíticos, extensos, emitidos a través de un centro de emisión o vento, localizado en el flanco sureste, a 3.5 km del cráter. En la fase intermedia y final de la etapa «Sabancaya III», ocurrieron erupciones explosivas de magnitud moderada (IEV 1-2), que emitieron delgados depósitos de cenizas grises a negras, y algunos bloques juveniles que yacen sobre los flujos de lavas. Dichas erupciones explosivas ocurrieron durante los últimos miles y cientos de años.

Los estudios tefro-estratigráficos del volcán Sabancaya realizado por medio de cuatro calicatas ubicadas al pie del flanco Este del volcán Sabancaya muestran varias erupciones explosivas de baja a moderada magnitud (IEV 1-2) ocurridas durante el Holoceno. En las calicatas se han identificado 13 capas con espesores centimétricos de caída de ceniza grises emitidas entre 4150 ± 40 años AP y 730 ± 35 años AP.

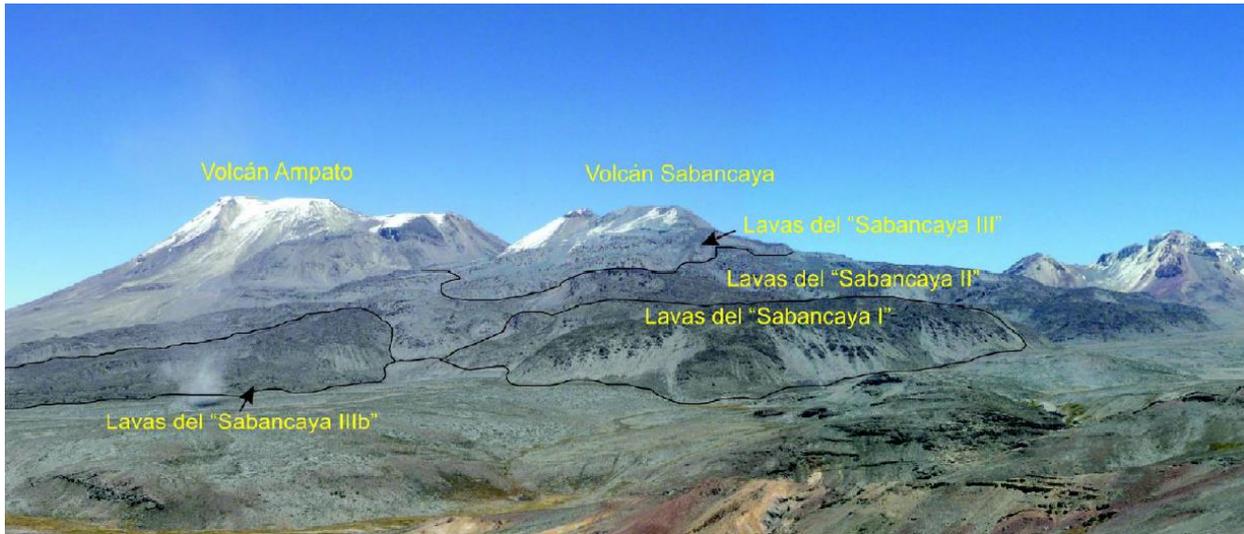


Figura 5. Vista del sector este del complejo volcánico Ampato-Sabancaya. Al pie del volcán Sabancaya se distinguen flujos de lava basales («Sabancaya I») y lavas emitidas por el cráter adventicio («Sabancaya IIIb»).

SERIE	ETAPA	FASES DE EVOLUCIÓN VOLCÁNICA	Espesor (m)	LITOLOGÍA	DESCRIPCIÓN
ÉPOCA HISTÓRICA Y PRE-HISTÓRICA	SABANCAYA III	Actividad explosiva leve a moderada	~30	[Lava flow patterns]	Lahares Nivel de ceniza de la actividad eruptiva 1988-1998 dC. Lahares
		Apertura del cráter actual Actividad explosiva moderada		Nivel de ceniza datada entre 1460 - 1670 dC (J) Nivel de ceniza datada en poco más de 730 ± 35 años A.P. Lahares	
		(Sa-3c)		Flujos de lava en bloques de composición andesítica con textura porfídica. Nivel de ceniza datada en poco más de 1790 ± 110 años A.P. (J) Nivel de ceniza datada en hace menos de 2955 ± 80 años A.P. (T)	
HOLOCENO	SABANCAYA II	Actividad efusiva: Lavas emitidas desde un centro parásito localizado al SE del volcán.	~150	[Lava flow patterns]	Flujos de lava en bloques de composición andesítica con textura porfídica.
		(Sa-3b)			
	Construcción del estratocono superior Actividad efusiva	~500	[Lava flow patterns]	Flujos de lava en bloques de composición andesítica y dacítica con textura porfídica. Nivel de ceniza datada en hace menos de 3015 ± 40 años A.P.	
	(Sa-3a)				
SABANCAYA I	Emplazamiento del domo sur: actividad extrusiva	~400	[Dome flow pattern]	Domo dacítico	
	(Sa-2D)				
SABANCAYA I	Construcción del cono medio Actividad efusiva alternada con algunas erupciones explosivas leves a moderadas	~400	[Lava flow patterns]	Flujos de lava en bloque de composición andesítica y dacítica. Nivel de ceniza datada en hace menos de 4150 ± 40 años A.P. Nivel de ceniza datada en hace menos de 4500 ± 125 años A.P. (T)	
	(Sa-2)				
SABANCAYA I	Construcción de la base del volcán Actividad efusiva alternada con erupciones explosivas moderadas	300	[Lava flow patterns]	Flujos de lava en bloque de composición andesítica y dacítica con textura porfídica, dispuestos de manera subhorizontal. Una lava fue datada en 5440 ± 40 ka. (T) Nivel de ceniza datada en hace menos de 8330 ± 120 años A.P. (J) Nivel de ceniza datada en hace menos de 9650 ± 170 años A.P. (J)	
	(Sa-1)				

Figura 6. Columna estratigráfica generalizada que resume la estratigrafía del volcán Sabancaya. (J) datación de Juvigné et al. (2008); (T) datación de Thouret et al. (2002b) (Tomado de Rivera et al., 2016).

III. ACTIVIDAD HISTÓRICA DEL VOLCÁN SABANCAYA

El volcán Sabancaya ha registrado erupciones en los años 1750, 1784 y 1988-1998 (Giesecke, 1989; Gerbe y Thouret, 2004; Huamán, 1995; Siebert *et al.*, 2011).

Actividad eruptiva de 1750

Corresponde a una leve actividad fumarólica mencionada por primera vez en 1750 por el cura Ventura Travada y Cordoba de la parroquia de las comarcas de Salamanca (valle del río Marán) y Pocsi en Arequipa. Quien relata en la obra «El suelo de Arequipa convertido en cielo»...» *allí el volcán esta perennemente ardiendo de día y de noche y que no hay noticia de haber hecho estrago alguno el tiempo de la cristiandad aunque tampoco le faltan señas de haber erupcionado sus crudezas en inmemorables tiempos*». Según el catálogo «Volcanoes of the world» (Siebert *et al.*, 2011) se habría tratado de una erupción explosiva leve.

Actividad eruptiva de 1784

Existe un relato histórico de Zamácola y Jáuregui (1804) sobre una erupción ocurrida el 11 de julio de 1784, posterior al gran terremoto registrado el 13 de mayo de ese mismo año, el cual destruyó la ciudad de Arequipa. En este relato, Zamácola y Jáuregui (1804), mencionan: «*Día 11 a las 9 y 56 minutos se sintió un temblor de tierra, con bastante remezón pero no causó ningún daño. Se tuvo noticia de que el pueblo de Lari, jurisdicción de Caylloma, hay un cerro o volcán llamado Ambato, el que a efectos de estos terremotos, el volcán humea y bosteza fuego*» (Barriga, 1951). Ninguna de estas descripciones permitió entonces discernir a cuál de los tres volcanes se referían, aunque en la actualidad se asume que se trataría del volcán Sabancaya (Rodríguez y Huamán, 1992). También, según el catálogo «Volcanoes of the world» (Siebert *et al.*, 2011), se habría tratado de una erupción explosiva leve, que generó daños o destrucción de los terrenos y propiedades.

Actividad eruptiva de 1988 - 1998

Durante el mes de noviembre de 1986 se reportó un importante incremento de la actividad fumarólica en el volcán Sabancaya, así como la apertura del cráter del volcán (Thouret *et al.*, 1994). Entre mayo de 1990 y diciembre de 1994, la actividad del Sabancaya fue de tipo vulcaniana, con un Índice de Explosividad Volcánica igual a 2, que consistió en explosiones separadas por periodos de 15 a 60 minutos, luego del cual se formaban columnas eruptivas de 0.5 a 3 km de altura en promedio (Thouret *et al.*, 1994). Durante las explosiones se expulsaron proyectiles balísticos y ceniza (Guillande *et al.*, 1992; Thouret *et al.*, 1994). El periodo de mayor actividad se registró entre el 28 de mayo y 5 de junio de 1990. En este periodo la columna eruptiva alcanzó entre 3 y 5 km de altura sobre el cráter, los proyectiles balísticos eyectados alcanzaron algunos cientos de metros a 1 km de altura sobre el cráter, se reportaron caídas de lapilli entre 3 y 5 km del cráter y las cenizas fueron dispersadas entre 20 y 30 km al Este del volcán, cubriendo alrededor de 250 km² (Thouret *et al.*, 1994, figura 7). El material juvenil eyectado tuvo composición andesítica a dacítica, y se estima que alcanzó un volumen de 25 millones de m³.

Por otro lado, los reportes del GVP (<http://www.volcano.si.edu/world/volcano.cfm?vnum=1504-006&volpage=var>), dan cuenta de columnas eruptivas mayores, de entre 6 y 7 km de altura sobre el cráter, los días 5 y 7 de junio de 1990. También el día 7 los medios de comunicación reportaron presencia de una pluma volcánica en Arequipa y Puno, así como caídas de ceniza a

EVALUACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE PELIGROS VOLCÁN SABANCAYA

más de 20 km de distancia, que provocó destrucción de pastos y contaminación de ríos, especialmente el río Sigwas, ubicado a más de 40 km al sur del volcán Sabancaya. En el mismo reporte, el GVP informa la acumulación de caída de ceniza de hasta 1 cm de espesor, en un radio de 20 km alrededor del volcán.

Después de 5 meses del periodo de mayor actividad eruptiva, registrada entre mayo y junio de 1990, se generaron lahares o flujos de lodo que discurrieron por varias quebradas aledañas al volcán Sabancaya. Según un reporte del GVP (<http://www.volcano.si.edu/world/volcano.cfm?vnum=1504-006&volpage=var>), durante un sobrevuelo realizado el 10 de noviembre de 1991, se observó ceniza depositada en el volcán Hualca Hualca, el cual provocó el derretimiento de la nieve y glaciares que se encontraban en su cima con la consiguiente generación de varios lahares. Este mismo reporte da cuenta de lahares en el flanco norte del volcán Hualca Hualca, que fueron a dar al río Colca, entre noviembre y diciembre de 1990. Actualmente, estos depósitos de lahares se logran visualizar en la quebrada Pinchollo, en el flanco norte del volcán Hualca Hualca, aproximadamente a 14 km al norte del cráter del Sabancaya (Figura 8). Este depósito posee cerca de 3 m de espesor, y está conformado por una matriz de ceniza (70%), que engloba bloques de diámetro centimétrico a decimétrico (30%, figura 8).

Posteriores reportes del GVP también daban cuenta del emplazamiento de lahares de poco volumen ocurridos durante los días 9 y 10 de mayo de 1995, en las quebradas ubicadas en los flancos del volcán Ampato. Los lahares se originaron debido a la fusión del hielo provocado por las caídas de ceniza. Durante esos días la pluma eruptiva fue dispersada en dirección suroeste, sur y este, cubriendo gran parte del volcán Ampato.

La actividad eruptiva fue decreciendo hasta 1996 donde las explosiones eran raras o poco frecuentes y de menor intensidad. Sin embargo hay consenso en diversas publicaciones que la actividad eruptiva continuó hasta aproximadamente 1998 (Gerbe y Thouret, 2004). Según el catálogo del GVP, durante este último periodo se produjeron explosiones freáticas.

La erupción generó efectos negativos en el medioambiente y los poblados ubicados cerca al volcán Sabancaya. Se reportaron muerte de ganado, destrucción de cultivos y desplazamiento de familias enteras hacia zonas más seguras. Todo ello generó problemas sociales y económicos que no fueron atendidos por el Estado.

EVALUACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE PELIGROS VOLCÁN SABANCAYA

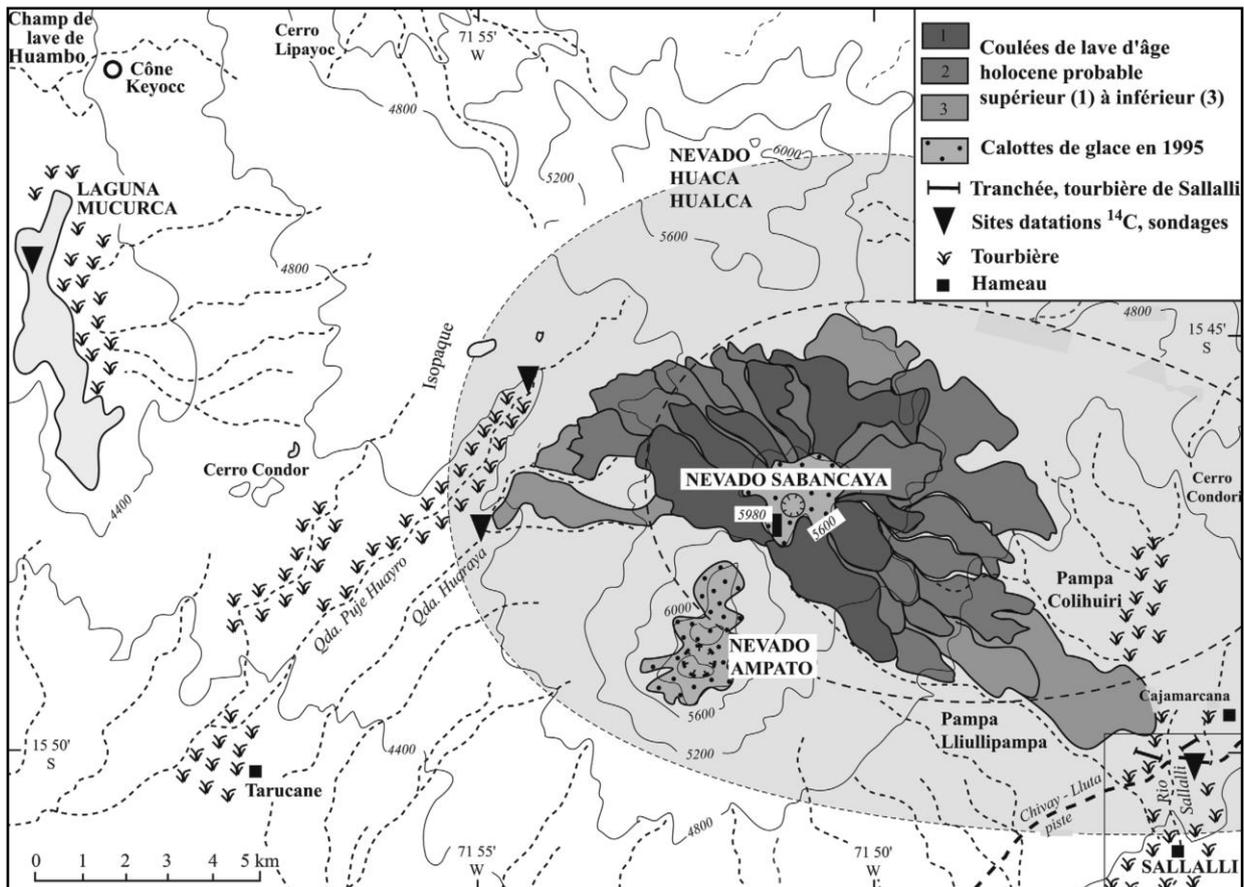


Figura 7. Dispersión de los productos en la erupción del volcán Sabancaya, 1990-1998. Tomado de Juvigné, et al., 2008.



Figura 8. Depósito de lahar de coloración blanquecina en la quebrada Pinchollo, a más de 14 km al norte del volcán Sabancaya. Estaría relacionado a lahars emplazados entre noviembre y diciembre de 1990 (Tomado de Mariño, 2012).

Erupción del año 2016

Luego de casi 15 años de calma, en febrero de 2013 el Sabancaya empezó a registrar un ligero incremento en las emisiones de gases. Paralelamente la actividad sísmica también aumentó en áreas cercanas al volcán y en el valle del Colca. Los sismos más importantes ocurrieron en febrero de 2013 (Tavera *et al.*, 2013a), julio del 2013 (Tavera *et al.*, 2013b) y 14 de agosto de 2016, este último tuvo magnitud 5.3 ML y fue seguido de muchas réplicas (Tavera *et al.*, 2016). Si bien, estos sismos deben su origen a la actividad de fallas activas locales, es probable que tengan un componente volcánico, pues estos sismos se vienen produciendo dentro de un ambiente volcánico.

Desde el año 2013 hasta mediados del 2016 el volcán Sabancaya viene emitiendo solo gases grises, y a veces gases blanquecinos, que en ciertas oportunidades se tornaron más densos y voluminosos, y alcanzaron alturas de hasta 1800 m sobre la cima del volcán.

Desde abril del 2016, se detectaron nuevas zonas con emisiones fumarólicas en los sectores Norte y Noroeste del Sabancaya, a solo 600 m de distancia del cráter. El día 25 de agosto último, una brigada del OVI realizó una inspección de campo y pudo comprobar la existencia de al menos siete nuevas zonas desde donde hasta la actualidad vienen siendo emitidos gases volcánicos.

El día 27 de agosto último a las 06:51 horas se registró una leve explosión en el volcán Sabancaya, que fue seguida de emisiones densas de gases y algo de cenizas que solo duraron algunos segundos. La pluma alcanzó hasta 1000 m de altura sobre el cráter del volcán. Luego, desde el 27 de agosto al 06 de noviembre, el Sabancaya vino emitiendo gases que ascendieron hasta los 1800 m de altura sobre la cima.

Posteriormente, el día 06 de noviembre a las 20:40 horas., ocurrió una explosión en el volcán Sabancaya y luego de la explosión se han registrado emisiones continuas de ceniza, con columnas eruptivas de entre 1000 y 3000 m sobre la cima del volcán. Este último evento marca el comienzo de una nueva fase eruptiva del volcán Sabancaya.

Las cenizas han viajado entre 20 y 50 km de distancia del volcán, siendo dispersadas preferentemente en dirección Noreste, Este y Sureste, y esporádicamente en dirección Norte, cubriendo el valle del río Colca, donde se localizan poblados como Maca, Chivay, Callalli, entre otros.



Figura 9. Columna de gases y ceniza de 2 km de altura, emitida por el volcán Sabancaya el día 09 de noviembre de 2016, a las 06:03 hrs.



Figura 10. Columna de gases y ceniza de cerca de 3 km de altura, emitida por el volcán Sabancaya el día 13 de noviembre de 2016, a las 09:09 hrs.



Figura 11. Depósito de caída de ceniza, de cerca de 1 mm de espesor que cubren equipos de monitoreo volcánico del OVI, localizado a menos de 4 km del cráter, el día 09 de noviembre de 2016.



Figura 12. Depósito de caída de ceniza sobre la camioneta del OVI, de menos de 1 mm de espesor, ubicado en el pueblo de Chivay, a poco más de 30 km del cráter del volcán Sabancaya, el día 10/11/2016.

IV. PELIGROS VOLCÁNICOS Y ESCENARIOS ERUPTIVOS EN EL VOLCÁN SABANCAYA

En el volcán Sabancaya se han identificado peligros generados por caídas de piroclastos, por flujos de lava, por flujos de lodo (lahares), flujos piroclásticos y avalanchas de escombros (figura 14). A continuación una descripción de dichos peligros:

Peligros por caídas de piroclastos

Las erupciones explosivas emiten fragmentos de roca o piroclastos que son expulsados de manera violenta hacia la atmósfera y forman una columna eruptiva densa de gases, ceniza y/o pómez que, a veces, puede alcanzar varias decenas de kilómetros de altura. Posteriormente, los fragmentos más grandes y densos caen cerca del volcán y se denominan bombas o bloques (>64 mm), mientras que, las partículas de menor tamaño, denominadas lapilli (2-64 mm) y ceniza (<2 mm) son llevadas por el viento a grandes distancias, para luego caer y formar una capa de varios milímetros o centímetros de espesor. La distancia alcanzada por los fragmentos de roca dependerá de la magnitud de la erupción, de la distancia al cráter y de la velocidad del viento al momento de la erupción.

Las partículas pueden cubrir y afectar extensas áreas, de algunas centenas de km² a varios cientos de km² (Cas y Wright, 1987). En el caso del Sabancaya, estas partículas emitidas pueden causar serios problemas en la salud en los habitantes del valle del Colca. Asimismo, pueden contaminar las fuentes de agua, contaminar los pastos que sirven de alimento para el ganado camélido, puede afectar cultivos, interrumpir el tráfico aéreo, entre otros. Si la actividad incrementa puede provocar el colapso de techos de las viviendas por el peso acumulado de la ceniza.

Peligros por flujos de lodo y escombros (lahares)

Los flujos de lodo y escombros (o lahares) son mezclas de fragmentos de rocas volcánicas de tamaños diversos movilizados por el agua y que fluyen rápidamente (20-60 km/h) por valles y quebradas originados en los volcanes. Se generan en periodos de erupción o de tranquilidad volcánica (Tilling, 1989). El agua puede provenir de fuertes lluvias, fusión de hielo o nieve, ríos, o lagunas cratéricas.

Los lahares viajan a lo largo de quebradas o ríos y, eventualmente, pueden salir de estos cauces en los abanicos de inundación, como ocurrió con los lahares que destruyeron la ciudad de Armero en Colombia, luego de la erupción del volcán nevado del Ruiz en 1985 (Thouret, 1990). El área afectada depende del volumen de agua y de materiales sueltos disponibles en el trayecto del lahar, así como, de la pendiente y topografía de los valles o quebradas. Normalmente, destruyen todo a su paso, pueden alcanzar grandes distancias (>200 km), e incluso generar inundaciones cerca al cauce de ríos (Tilling, 1989).

El Sabancaya presenta este tipo de peligro, ya que cerca a su cumbre presenta un casquete glaciario casi permanente. En consecuencia, los productos volcánicos calientes emitidos por este volcán durante una erupción efusiva y/o explosiva pueden interactuar con la nieve y el hielo y generar lahares que discurrirían hacia la zona de Sallalli. El volumen y distancia a recorrer por el lahar está en función del volumen del hielo, el volumen del material suelto, la temperatura del material emitido y la pendiente del volcán.

Peligros por flujos de lava

Los flujos de lava son corrientes de roca fundida, que son expulsadas por el cráter o fracturas en los flancos del volcán. Pueden desplazarse de manera lenta por las quebradas y valles y alcanzar varios kilómetros de distancia, alcanzando raramente más de 8 km del centro de emisión (Francis, 1993). En el Sabancaya las lavas son viscosas y normalmente recorren más de 6 km de distancia.

Flujos de lava generados por el volcán Sabancaya pueden cubrir todo a su paso, sin embargo no representan un peligro alto para las personas debido a su baja velocidad (Tilling, 1989).

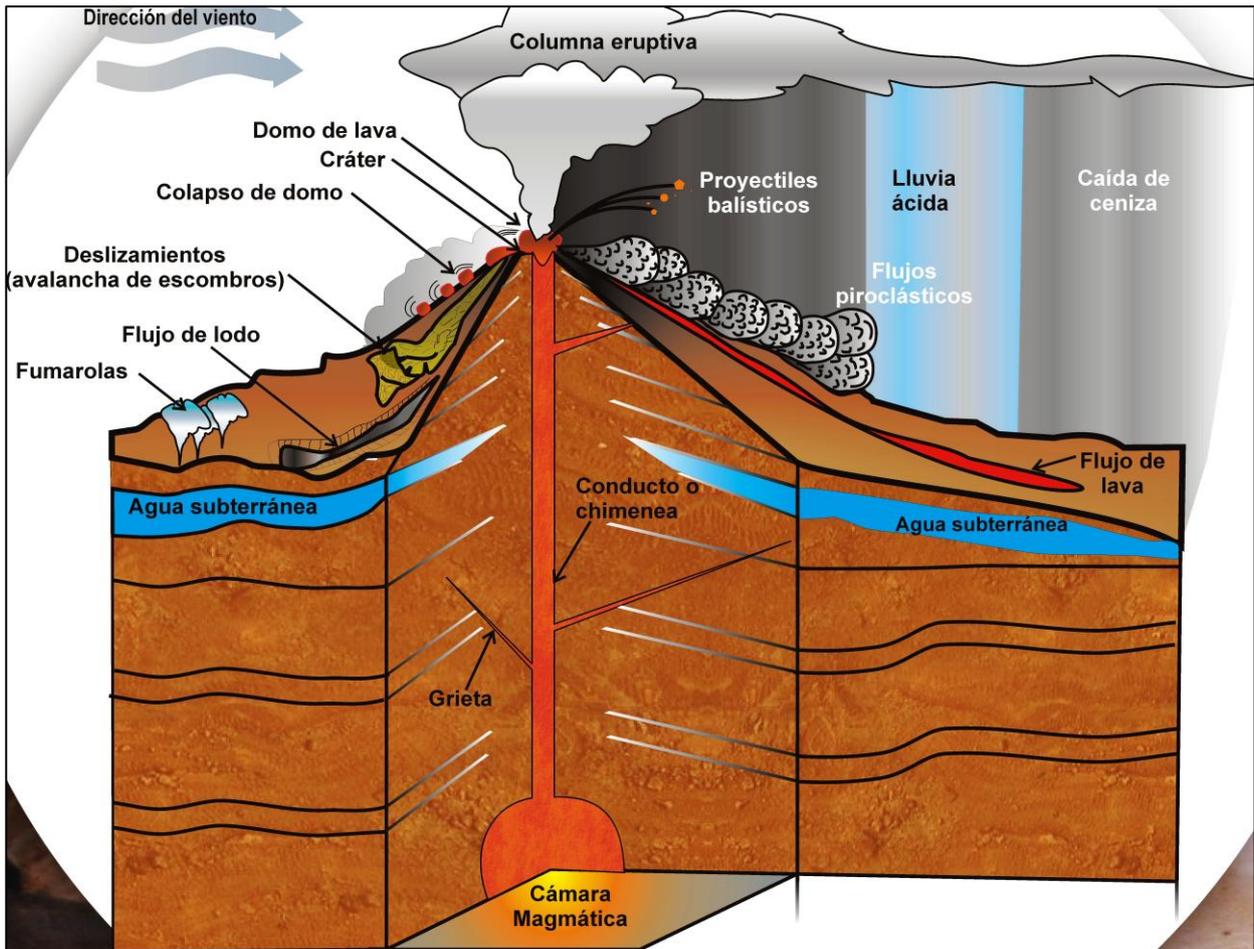


Figura 13. Tipos de peligros volcánicos reconocidos en el volcán Sabancaya.

Peligros por flujos y oleadas piroclásticas

Los flujos piroclásticos son mezclas calientes (300°C a 800°C) de ceniza, fragmentos de roca y gases (Nakada, 2000). Estos flujos descienden por los flancos del volcán al ras de la superficie y a grandes velocidades, comprendidas entre 100 y 300 m/s (Hoblitt et al., 1995). Poseen normalmente una parte inferior densa, que se encauza y desplaza por el fondo de las quebradas o valles y otra superior, menos densa, denominada oleada piroclástica, compuesta por una nube turbulenta de gases y ceniza que con facilidad sale del valle, sobrepasa relieves importantes y afecta un área considerable. Estos flujos y oleadas destruyen y calcinan todo lo que encuentran a su paso (Tilling, 1989).

Los estudios vulcanológicos realizados sobre el volcán Sabancaya muestran que este tipo de peligro no es muy común en dicho volcán. Sin embargo, si en el futuro el Sabancaya registrara un súbito incremento en su actividad eruptiva, se pueden generar flujos piroclásticos los cuales recorrerían hasta 6 u 8 km de distancia del volcán, esto basado en ejemplo de erupciones de otros volcanes similares al Sabancaya. Dado que dentro de un radio de 8 km del volcán no existen poblados u obras de infraestructura, el riesgo sería muy bajo.

Peligros por avalanchas de escombros

Las avalanchas de escombros son deslizamientos súbitos en los flancos de un volcán. Se originan debido a factores de inestabilidad, tales como la elevada pendiente del volcán, presencia de fallas, movimientos sísmicos fuertes, explosiones volcánicas violentas, etc. Las avalanchas de escombros ocurren con poca frecuencia y pueden alcanzar decenas de kilómetros de distancia, se desplazan a gran velocidad, así por ejemplo en el caso del monte St. Helens (EE.UU.), se estimaron velocidades del orden de 240 km/h (Glicken, 1996).

Las avalanchas de escombros ligados a colapso de flanco de volcán tienen mayor movilidad que sus similares no volcánicas, sobre todo si son voluminosas (a mayor volumen mayor velocidad y distancia recorrida). Las avalanchas de escombros entierran y destruyen todo lo que encuentran a su paso. Adicionalmente pueden generar lahares y crecientes, a partir del desagüe de agua represada por la avalancha (Tilling, 1989).

Existe poca posibilidad que el flanco occidental o norte del volcán Sabancaya colapse, ya que en esas zonas se han observado fracturas y fallas geológicas. Los productos resultantes pueden viajar hasta aproximadamente 8 kilómetros de distancia, cubriendo parte de los flancos del volcán y algunos bofedales aledaños a este. Dado que dentro de un radio de 8 km del volcán no existen poblados u obras de infraestructura, el riesgo sería muy bajo.

V. ESCENARIOS ERUPTIVOS ANTE UN POSIBLE INCREMENTO DE ACTIVIDAD DEL VOLCÁN SABANCAYA

El cartografiado geológico detallado (1:25,000) y el estudio cronoestratigráfico del volcán Sabancaya efectuados por Mariño (2012), Rivera *et al.* (2016), Samaniego *et al.* (2016) así como los trabajos previos de Thouret *et al.* (1994); Juvigné *et al.* (1998, 2008) y Gerbe y Thouret (2004), han puesto en evidencia la ocurrencia de erupciones explosivas y efusivas del volcán Sabancaya durante el Holoceno, en 1988-1998 y recientemente en noviembre de 2016.

Para la elaboración de los escenarios eruptivos se han considerado la presencia de los depósitos antes descritos, así como, los siguientes aspectos:

- Probables dinamismos eruptivos futuros, es decir, los tipos de erupciones que podrían darse en el volcán Sabancaya.
- La magnitud de las erupciones pasadas, establecida en función del trabajo de campo y de la distribución de los productos volcánicos.
- El comportamiento de otros volcanes peruanos, considerados como «análogos» al Sabancaya, tales como el Ubinas.

Adicionalmente, se consideró la presencia del casquete glacial en las partes altas de los volcanes Ampato y Sabancaya, a partir del cual se podrían generar lahares durante una erupción volcánica.

Primer escenario: Erupción vulcaniana (IEV 1-2)

Las erupciones vulcanianas son erupciones explosivas moderadas a violentas que emiten cenizas, bloques, bombas, escorias y eventualmente pómez. Las explosiones se dan en intervalos de minutos a horas e incluso días, como resultado de estas explosiones se generan columnas eruptivas de gases y cenizas de menos de 10 km de altura (Sigurdsson, 2000).

En el sur del Perú, los volcanes Misti, Ubinas, Yucamane y Sabancaya han presentado erupciones vulcanianas (Thouret *et al.*, 2001; Gerbe y Thouret, 2004; Rivera *et al.*, 2014). La última actividad del volcán Sabancaya, ocurrida entre los años 1988 y 1998, presentó dinamismos de tipo vulcaniano, la ceniza fue dispersada entre 20 y 30 km al este del volcán y luego de las explosiones se expulsaron proyectiles balísticos en un radio de 2 km alrededor del cráter (Guillande *et al.*, 1992; Thouret *et al.*, 1994).

El cartografiado geológico detallado (1:25000) y el estudio cronoestratigráfico de Sabancaya, así como los trabajos previos de Thouret *et al.* (1994), Juvigné *et al.* (1998, 2008) y Gerbe y Thouret (2004), han puesto en evidencia la ocurrencia de erupciones explosivas leves a moderadas (principalmente vulcanianas) del volcán Sabancaya ocurridas durante el Holoceno, la época histórica y recientemente entre 1988-1998. Estudios de tefrocronología realizados por Juvigné *et al.* (2008) y Juvigné *et al.* (1998), permitieron identificar por lo menos tres depósitos de ceniza que guardan similitud con la ceniza de la erupción del volcán Sabancaya de 1988-1998. Estas cenizas han sido emplazadas hace aproximadamente 4500 ± 125 , 2050 ± 70 y 1790 ± 110 años AP.

Por otro lado, los depósitos de caída de ceniza identificados en las calicatas Sallalli I, II y III, y Colihuiri (al SE y este del volcán Sabancaya, respectivamente), poseen similitudes de espesor, granulometría y mineralogía, con respecto a la ceniza emitida durante la actividad eruptiva 1988-1998. Por tanto pensamos que se trataron de erupciones de tipo vulcaniano con IEV 1-2. En la calicata Sallalli II se identificaron seis depósitos de ceniza, emplazados en los últimos

4000 años y en la calicata Colihuiri se tienen quince depósitos de caída de ceniza, depositados en los últimos 3000 años, aproximadamente.

Por lo antes citado, se concluye que la posibilidad de ocurrencia de erupciones vulcanianas en el Sabancaya es alta. Estas erupciones ocurren cada 100 a 200 años aproximadamente. En caso de ocurrir una erupción vulcaniana, entre noviembre a marzo, las cenizas emitidas viajarán preferencialmente al Oeste y SO, afectando pastizales del ganado camélido, contaminando suelos, canales de agua, en particular el canal Majes-Siguas, afectando poblados como Huambo, Cabanaconde, LLuta y otros (Fig. 1). Sin embargo, si la erupción vulcaniana ocurriera entre los meses de abril a octubre, las cenizas viajarán preferentemente al NE, E, SE y S del Sabancaya. En este caso, cenizas caerían sobre los poblados de Maca, Achoma, Yanque, Chivay, Tuti, Sibayo, Callalli y otros, localizados dentro del valle del río Colca, hasta una distancia mayor de 40 km del volcán Sabancaya. En este último escenario, la situación es más compleja pues hay una variación diaria de las direcciones de viento, por ejemplo, en abril la pluma se dirigiría en la mañana al S-SO, mientras que, en la tarde se dirigiría al E-NE.

También, es frecuente la formación de lahares durante la ocurrencia de este tipo de erupciones, sobre todo si consideramos que el Sabancaya posee un casquete glacial. Esto sucedió en la última erupción de los años 1988-1998, donde se generaron lahares en quebradas aledañas al volcán Sabancaya, Ampato y Hualca Hualca, específicamente en noviembre de 1990 y mayo de 1995 (GVN, 1995). Durante el cual, algunos lahares alcanzaron el río Colca, situado a más de 15 km al norte del cráter del Sabancaya (fig. 8). Se trató de lahares de pequeño volumen, posiblemente de 0.5 a 1 millón de m³.

En caso de un incremento de actividad del volcán Sabancaya, productos calientes emitidos por dicho volcán pueden fundir parte del casquete glacial y generar lahares de moderado volumen. Estos descenderían por las quebradas que drenan del volcán Sabancaya, e incluso por quebradas que drenan por los volcanes Ampato y Hualca Hualca. Los lahares causarían graves daños en terrenos de cultivo, carreteras como la vía Chivay - Huambo, puentes, sobre todo, si descienden del volcán Hualca Hualca. Los lahares pueden descender por la quebrada Mollebaya-Río Sepina (Achoma), el río de Hualca Hualca y la quebrada Huayuray (Pinchollo).

Durante erupciones vulcanianas moderadas (IEV 2), también pueden generarse flujos piroclásticos de poco volumen y limitado alcance. En efecto, los flujos piroclásticos pueden alcanzar al menos 6 km de distancia del cráter, sin afectar la vida de los pobladores de la zona.

Segundo escenario: Erupción efusiva

El volcán Sabancaya durante los últimos 10 000 años presentó en variadas oportunidades erupciones efusivas, que emitieron principalmente flujos de lava. Estos flujos han alcanzado distancias máximas de 6 y 7 km de la fuente. Sin embargo, no existen evidencias geológicas ni históricas, que sugieran la ocurrencia de una erupción efusiva en los últimos siglos. Por esta razón, la posibilidad de ocurrencia de una erupción de este tipo es baja a moderada. Sin embargo, si ocurriese una erupción efusiva, la lava puede fundir la capa de hielo y nieve que existe en la cumbre del volcán Sabancaya y producir lahares que descenderían por las quebradas que surcan el cono volcánico. Los lahares causarían graves daños en terrenos de cultivo, carreteras, puentes, sobre todo, si descienden por la quebrada Mollebaya-Río Sepina (Achoma), río de Hualca Hualca, quebrada Huayuray y otros.

Tercer escenario: Erupción vulcaniana o subpliniana (IEV 3)

Durante las erupciones de tipo vulcaniano o sub-pliniano, con IEV 3, las columnas de ceniza, escorias y/o pómez alcanzan entre 3 y 15 km de altura sobre el cráter, y generan depósitos de caída y flujos piroclásticos (Sigurdsson, 2000). La ceniza que viaja a mayor distancia, puede ser dispersada a algunas decenas de kilómetros del volcán, e incluso sobrepasar fácilmente los 50 km. En este tipo de erupciones pueden generar flujos piroclásticos de pómez y ceniza que serían canalizados por quebradas y valles aledaños al volcán.

La mayoría de volcanes del sur del Perú han presentado este tipo de actividad. En el volcán Sabancaya no se han encontrado depósitos asociados a erupciones subplinianas o vulcanianas con IEV 3. En tal sentido, la posibilidad de ocurrencia de erupciones vulcanianas y subplinianas con IEV de 3, es de moderada a baja en el volcán Sabancaya.

Uno de los eventos muy característicos asociados a la erupciones vulcanianas a subplinianas fuertes son las emisiones de ceniza, escorias o pómez, estas, según la estación del año viajarán preferencialmente al Oeste y SO, esto es entre noviembre a marzo, afectando terrenos de cultivo, terrenos de pastizales, ganado, canales de agua, canal Majes-Siguas, los poblados de Huambo, Maca, Lari, Madrigal, Cabanaconde, Ayo y otros. Mientras que entre los meses de abril a octubre, lo harán preferencialmente al NE, Este y SE. En este caso las cenizas pueden afectar a los habitantes de Sallalli, Parco, Humacala, o los poblados de Maca, Achoma, Ichupampa, Yanque, Coporaque, Chivay y otros localizados entre 8 y 50 km del cráter del Sabancaya, donde caería ceniza, acumulándose con algunos centímetros de espesor. En este tipo de actividad, cenizas pueden también alcanzar las represas de Agua Aguada Blanca y El Frayle, las cuales abastecen de agua a la ciudad de Arequipa.

Los flujos piroclásticos también pueden ser producidos por este tipo de actividad. Varios casos sustentan esta afirmación, por ejemplo, en la erupción del año 1667 d.C. del volcán Ubinas que tuvo un IEV 3 (Thouret *et al.*, 2005) se generaron flujos piroclásticos cuyos depósitos se encuentran a 3 km al oeste del cráter. Sin embargo, dependiendo del volumen de magma y la pendiente del terreno, estos flujos pueden alcanzar mayores distancias. Por ejemplo, los flujos piroclásticos de la erupción del volcán Tungurahua de agosto 2006, alcanzaron entre 7 y 8 km de distancia (Kelfoun *et al.*, 2009). Flujos piroclásticos generados durante este tipo de actividad puede ser letal para los pocos habitantes que viven dentro de un radio de 10 km alrededor del volcán, a quienes sería recomendable evacuar.

Las erupciones vulcanianas y subplinianas (IEV 3), también pueden generar lahares, especialmente si los flujos y oleadas piroclásticas se emplazan el casquete glacial y originan su fusión (Major y Newhall, 1989), como ocurrió durante la erupción del volcán nevado del Ruiz en 1985, que tuvo un IEV 3 (Pierson *et al.*, 1990). Se estimó que el casquete glacial del nevado del Ruiz, sufrió una disminución de 8 y 10 %, produciendo una serie de flujos de escombros, cuyo volumen total se estimó en 60 millones de m³ (Naranjo *et al.*, 1986; Thouret *et al.*, 2007). Un fenómeno similar puede ocurrir debido al emplazamiento de depósitos piroclásticos sobre el casquete glacial del volcán Sabancaya, durante una erupción con IEV 3.

En caso de una erupción del Sabancaya pueden descender lahares de gran volumen por las quebradas que drenan del volcán Sabancaya, e incluso por quebradas que drenan por los volcanes Ampato y Hualca Hualca. Lahares causarían graves daños en terrenos de cultivo, carreteras, puentes, sobre todo si descienden por las quebradas que drenan del volcán Hualca Hualca, entre ellas: quebrada Mollebaya-Río Sepina (Achoma), río de Hualca Hualca, quebrada Japo, quebrada Huayuray y otros.

Cuarto escenario: Erupción pliniana (IEV 4-5)

Las erupciones plinianas son las erupciones explosivas más violentas, debido a que el magma, en la mayoría de los casos es silíceo, viscoso y posee alto contenido de gases. En dichas erupciones, las columnas eruptivas pueden alcanzar alturas mayores a los 20 km y los materiales emitidos pueden afectar más de 800 km² (Cas y Wright, 1995). Durante estas erupciones se generan depósitos voluminosos de caída de lapilli de pómez y ceniza, asimismo se pueden generar flujos piroclásticos de pómez y ceniza, y oleadas piroclásticas. También es frecuente encontrar lahares asociados a este tipo de erupciones, los mismos que alcanzan decenas a cientos de kilómetros.

En el sur de Perú, los volcanes Misti, Ubinas, Ticsani, Huaynaputina y Ampato han presentado este tipo de erupciones (Rivera *et al.*, 1998; Thouret *et al.*, 1999; Thouret *et al.*, 2001; Mariño y Thouret, 2003).

No se han encontrado depósitos asociados a erupciones plinianas en inmediaciones del volcán Sabancaya, pero si existen varios depósitos asociados al volcán Ampato. La posibilidad de ocurrencia de erupciones plinianas en el Sabancaya es muy baja. Aunque por analogía con otros volcanes similares, la posibilidad de ocurrencia no puede ser excluida completamente.

Las erupciones plinianas también pueden generar lahares, especialmente si los flujos y oleadas piroclásticas se emplazan sobre el casquete glacial del Sabancaya originando la fusión de hielo y nieve (Major y Newhall, 1989). Durante una erupción pliniana del volcán Sabancaya, los flujos piroclásticos pueden alcanzar los flancos de los volcanes Ampato y Sabancaya. Según Alcalá (2007), el volumen medio del casquete glacial en los tres volcanes antes mencionados (Sabancaya, Ampato, Hualca Hualca), fue de 1.7 km³ durante el 2000. Este volumen del glacial es importante y fácilmente se pueden generar lahares durante una erupción pliniana. También se pueden originar lahares posterior al emplazamiento de los depósitos piroclásticos, durante las temporadas de fuertes precipitaciones, que se dan entre los meses de diciembre y marzo en la región sur del Perú. Durante una erupción pliniana, el alcance de los lahares sería regional, como ocurrió durante la erupción pliniana del volcán Huaynaputina del año 1600 d.C., donde los lahares llegaron hasta el océano Pacífico, luego de recorrer más de 120 km de distancia (Thouret *et al.*, 1999).

VI. MAPA DE PELIGROS DEL COMPLEJO VOLCÁNICO AMPATO-SABANCAYA

Se han elaborado tres mapas de peligros que consideran una erupción del volcán Sabancaya. Estos mapas son: 1) mapa proximal para peligros múltiples; 2) mapa de peligros por lahares distales y avalanchas de escombros y 3) mapa por caídas de piroclastos.

Mapa proximal de peligros volcánicos múltiples

La zonificación de peligros del mapa proximal se realizó para peligros volcánicos múltiples, es decir para el emplazamiento de flujos piroclásticos, flujos de lava y eyección de proyectiles balísticos. El mapa está a una escala 1/50 000 (Figura 14).

Zona de alto peligro (rojo)

Para delimitar la zona de alto peligro, se consideró el valor 0.35 para la relación H/L y 250 m para el valor de H_0 . Estos valores fueron estimados en base al estudio de campo y corroborado con los datos de la bibliografía. Dichos valores son frecuentes para flujos piroclásticos de escoria de volumen pequeño, generados durante erupciones débiles con IEV 1 - 2 (Escenario 1: erupción vulcaniana). Se consideró como centro de emisión el cráter del volcán Sabancaya, ya que la probabilidad de ocurrencia de erupciones vulcanianas es bastante alta en este volcán, debido a que ocurrió de manera recurrente durante el Holoceno y época histórica. Incluso la última erupción (1988-1998) fue de tipo vulcaniano (Thouret *et al.*, 1994).

Los límites de la zona de alto peligro coinciden con el alcance de un gran número de flujos de lavas del Sabancaya, posiblemente las más viscosas, que se encuentran entre los 3 y 4 km de distancia desde su punto de emisión (figura 14). Por otro lado, los proyectiles balísticos generados durante erupciones vulcanianas (IEV 1-2), han alcanzado distancias limitadas a las zonas muy proximales al cráter, típicamente menores a 3 km, en varios volcanes del sur del Perú. Por ejemplo durante la erupción del volcán Ubinas 2006-2009, el alcance máximo de proyectiles balísticos fue poco más de 2 km (Rivera *et al.*, 2010), y durante la última erupción del volcán Sabancaya 1988-1998, alcanzó menos de 1.5 km (Thouret *et al.*, 1994).

La zona de peligro rojo corresponde a un área semi-circular, con un radio aproximado de 4 km alrededor del cráter, el cual se prolonga a más de 10 km de distancia del cráter, en zonas de quebradas y valles que drenan del volcán, como la quebrada Sahuancaya o Sallalli. Es necesario mencionar que también se considera como zona de alto peligro quebradas principales que drenan del volcán Ampato, el cual posee un casquete glaciar que puede ser cubierto por cenizas del Sabancaya y esto puede ocasionar su fusión y a la vez lahares que descenderían en dirección sur.

En resumen la zona de alto peligro (rojo), puede ser afectada por flujos piroclásticos generados durante erupciones pequeñas a moderadas con IEV 1-2; así como por flujos de lava y por proyectiles balísticos.

Zona de moderado peligro (naranja)

Para delimitar la zona de moderado peligro, se consideró el valor 0.30 para la relación H/L y 500 m como valor de H_0 , según datos de campo y bibliográficos. Estos valores son frecuentes para flujos piroclásticos de escoria de tamaño mediano, generados durante erupciones explosivas violentas con IEV 3 (Escenario 2). En este escenario también se consideró como centro de emisión el cráter del volcán Sabancaya.

Los límites de los flujos piroclásticos se encuentran entre 5 y 6 km en los flancos Sureste, Este y Noreste del Sabancaya (figura 14); entre 3 y 5 km en los flancos Noreste y Norte; y menos de 2 km en el flanco Sur y Sureste (ver mapa de peligros). En este último caso, la distancia alcanzada es menor ya que es limitada por el flanco noreste del volcán Ampato, que actúa como una «barrera» topográfica.

Los límites de la zona de moderado peligro también coinciden con los máximos alcances de algunos flujos de lava emitidos por el volcán Sabancaya, que se encuentran alrededor de 6 km de distancia desde su punto de emisión. Por lo tanto, esta zona de moderado peligro también sirve como zona de peligro para el escenario efusivo (área hasta donde cubrirían los flujos de lava).

Por otro lado, el alcance máximo de proyectiles balísticos se encuentra dentro de un radio menor a 4 km, según datos tomados de Blong (1984). Esta distancia se encuentra dentro de los límites de la zona de moderado peligro.

En resumen, la zona de moderado peligro (naranja) puede ser afectada por flujos piroclásticos generados durante erupciones con IEV 3, así como, por flujos de lavas y también por proyectiles balísticos.

Zona de bajo peligro (amarillo)

Para delimitar la zona de bajo peligro, se consideró el valor 0.20 para la relación H/L y 500 m el valor de H_0 . Valores cercanos a 0.2 del coeficiente H/L, son frecuentes para flujos piroclásticos de pómez y ceniza (Hayashi y Self, 1992) originados durante erupciones plinianas (IEV 4-5), (Escenario 3). Se escogió el valor de 0.2 para el coeficiente H/L debido a que este tipo de flujos piroclásticos poseen alta movilidad. En este escenario se ubicó el centro de emisión en la cumbre del volcán Ampato, debido a que se han encontrado depósitos de caída de pómez (unidad «Corinta») y depósitos de flujos piroclásticos de pómez y ceniza (unidad «ladrillo»), que habrían sido emplazados por erupciones plinianas.

Los alcances antes descritos coinciden con el alcance del flujo piroclástico de pómez y ceniza «ladrillo», que llegó alrededor de 10 km de distancia hacia el SE (figura 15). También, varias erupciones plinianas con IEV 4-5, de volcanes del sur de Perú han recorrido distancias casi similares. Por ejemplo, los flujos piroclásticos de pómez y ceniza de la erupción del volcán Misti de hace 2050 años AP, alcanzaron alrededor de 12 km de distancia (Thouret *et al.*, 2001).

En resumen, la zona de bajo peligro (amarillo), puede ser afectada por flujos piroclásticos de pómez y ceniza generados durante erupciones plinianas (IEV 4-5). La probabilidad de ocurrencia de este tipo de erupciones es muy baja (ocurren en un rango de varios miles de años).

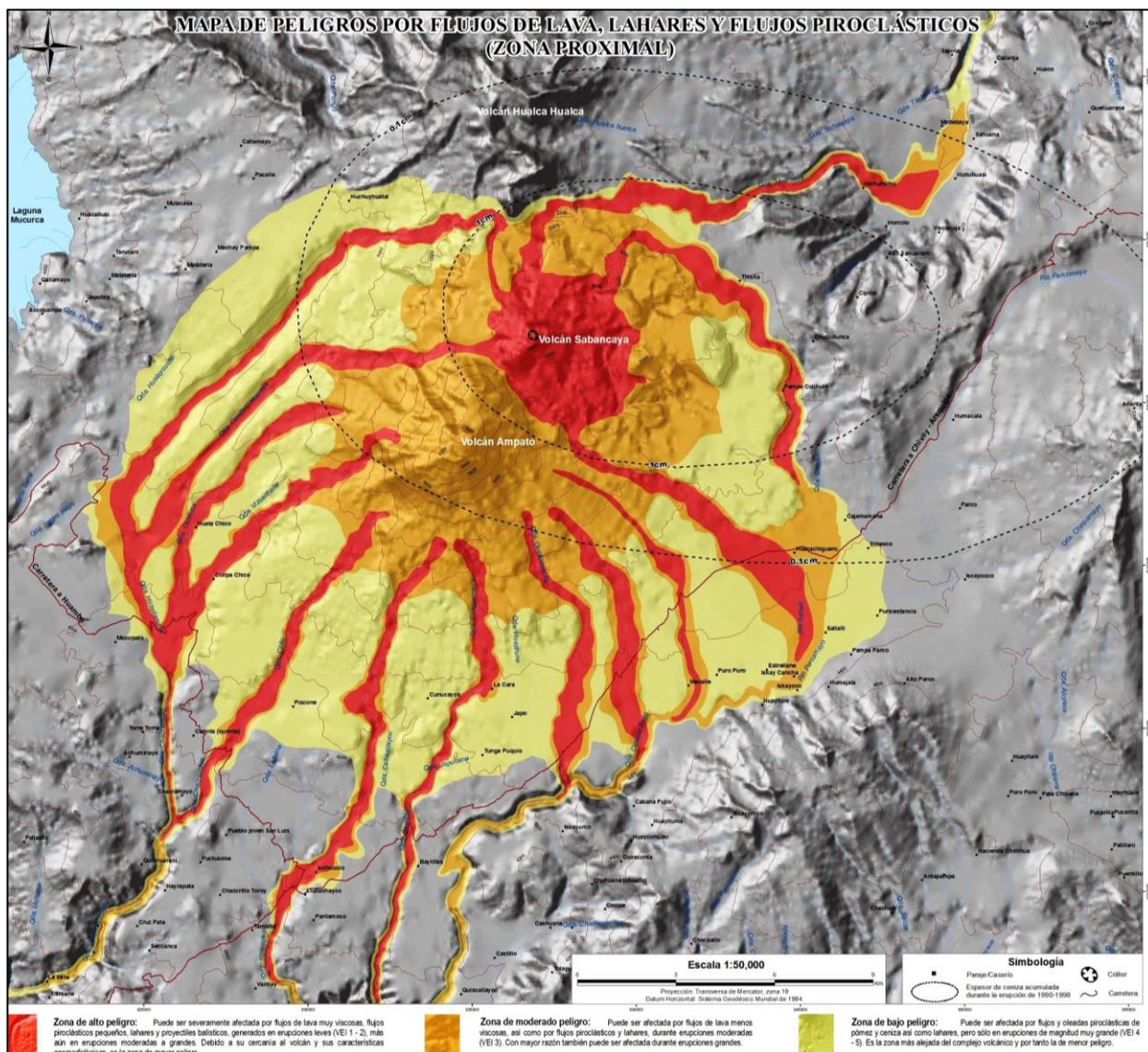


Figura 14. Mapa de peligros volcánicos múltiples en la zona proximal del Complejo Volcánico Ampato-Sabancaya (Tomado de Mariño, 2012).

Mapa de peligros por lahares

Las zonificación de las áreas de inundación por flujos de lodo (lahares) para el complejo Ampato-Sabancaya, fue realizado por Bellot (2011), utilizando el programa LAHARZ (Iverson et al., 1998; Schilling, 1998). Los volúmenes de los eventos laháricos escogidos por Bellot (2011) fueron de 1, 5, 10 y 20 millones de m³. Debido a que las erupciones explosivas del complejo volcánico han emplazado depósitos piroclásticos en zonas proximales y distales, el modelamiento se realizó sobre las principales quebradas ubicadas en los flancos de los volcanes Sabancaya, Ampato y Hualca Hualca. Se escogió la cabecera de cada quebrada, es decir la zona proximal roja, pero el objetivo de esta etapa es la delimitación de las zonas de inundación por lahares en las zonas distales.

En el volcán Sabancaya se escogieron cuatro principales quebradas: Mollebaya, Colihuiri, Sallalli y Sahuancaya-Pujro Huayjo. En el volcán Ampato, se escogieron cinco quebradas: Jaruma-Cabana-Pujio, Colquemarca-Tungapujio-Baylillas, Collo-Chacramayo, Vizcachane y Cabadillayoc. En el volcán Hualca Hualca, se escogieron cuatro quebradas: Pungo-Hualca Hualca, Huayuray, Japo y Huancané. También, se realizó el modelamiento en tres ríos ubicados

Mapa de peligros por caídas piroclásticas

El mapa de peligros por caídas piroclásticas para el complejo volcánico Ampato-Sabancaya, se ha dividido en tres zonas: zona de alto peligro en rojo, zona de moderado peligro en naranja y zona de bajo peligro en amarillo, cuyo foco de emisión sería el cráter del volcán Sabancaya (figura 16).

Para la zonificación de peligros se consideraron los tres escenarios explosivos previamente definidos: erupciones vulcanianas con IEV 1-2, vulcanianas y subplinianas con IEV 3, y erupciones plinianas con IEV 4-5. En el volcán Sabancaya, no se han encontrado depósitos piroclásticos asociados a erupciones sub-plinianas y plinianas con IEV 4-5, pero sí en el volcán Ampato.

También, se tuvieron en cuenta las direcciones predominantes de vientos, ya que estas controlan la dirección preferente de dispersión de las cenizas. Las direcciones de vientos fueron determinadas mediante el análisis de datos NCEP/NCAR, para el periodo 1979-1998 (ver mapa de peligro), por especialistas del Instituto Geofísico del Perú (Yamina Silva, comunicación escrita, 2007). Para el escenario vulcaniano con IEV 1-2, se utilizaron direcciones de vientos a 5865, 9690 y 10960 msnm, y para escenarios vulcaniano y subpliniano (IEV 3), así como pliniano (IEV 4-5), se utilizaron direcciones de vientos a 12445, 16645, 20662 y 26415 msnm. Durante el año se tienen dos direcciones preferentes, entre Abril y Octubre se dirigen hacia el Este, Sureste y Noreste, y entre noviembre y marzo se dirigen principalmente en dirección Suroeste y Oeste.

Zona de alto peligro (rojo)

La zona de alto peligro, es el área proximal y se halla aproximadamente dentro de un radio de 8 km de distancia del complejo volcánico (figura 16). Durante erupciones vulcanianas con IEV 2, esta área puede ser afectada por caídas de ceniza de algunos centímetros de espesor. Está basado en la dispersión de cenizas de erupciones vulcanianas de los volcanes Sabancaya, Ubinas y Misti.

Durante erupciones vulcanianas o sub-plinianas con IEV 3, esta área puede ser afectada por caídas de ceniza y lapilli de pómez de varios centímetros de espesor (Figura 16). Está basado en el mapa de isópacas de la erupción del volcán nevado del Ruiz de 1985 (IEV 3, Naranjo *et al.*, 1986). También durante la erupción del volcán Tungurahua (Ecuador) de agosto 2006, de IEV 3, se reportaron espesores de caídas de ceniza de entre 4 y 5 cm a 10 km de distancia del cráter y en el eje de dispersión de la pluma (Eychenne *et al.*, 2012).

Durante erupciones plinianas con IEV 4-5, esta área puede ser afectada por caídas de lapilli y bloques de pómez de varios decímetros a algunos metros de espesor (figura 16). Está basado en la dispersión de caídas piroclásticas de erupciones plinianas (IEV 4) de los volcanes Misti y Ticsani. La erupción del volcán Misti de 2050 años AP (IEV 4), a 10 km de distancia emplazó caídas de lapilli de pómez de entre 30 y 40 cm de espesor (Suní, 1999; Thouret *et al.*, 2001; Harpel *et al.*, 2011). La erupción del volcán Ticsani de 11000 años AP. (IEV 4), emplazó caídas de ceniza de alrededor de 3 m de espesor a 10 km del cráter (Mariño y Thouret, 2003).

En resumen, la zona de alto peligro puede ser afectada por caídas de ceniza de algunos centímetros de espesor durante erupciones pequeñas a moderadas (IEV 1-2), por caídas de ceniza de varios centímetros de espesor en erupciones medias (IEV 3), y por caídas de lapilli y bloques de pómez de varios decímetros a algunos metros de espesor en erupciones grandes (IEV 4-5).

Zona de moderado peligro (naranja)

La zona de moderado peligro se halla aproximadamente entre los 10 y 30 km de distancia del complejo volcánico (Figura 16).

Durante erupciones vulcanianas con IEV 1-2, esta área puede ser afectada por caídas de ceniza de pocos milímetros de espesor (figura 16). Esto está basado en la dispersión de cenizas de la erupción vulcaniana del volcán Sabancaya de 1988-1998 (IEV 2), durante la cual caídas de ceniza de 1 mm de espesor alcanzaron cerca de 30 km de distancia del cráter en dirección este, es decir en el eje de dispersión de la “pluma” (Thouret *et al.*, 1994).

Durante erupciones vulcanianas o sub-plinianas con IEV 3, esta zona de moderado peligro puede ser afectada por caídas de ceniza de algunos centímetros de espesor (figura 16). Esto basado en algunos ejemplos, como en el caso de la erupción de noviembre de 1985 del volcán nevado del Ruiz, durante el cual la ceniza alcanzó cerca de 2 cm de espesor a 30 km de distancia del volcán. Mientras que en el caso de la erupción del volcán Tungurahua de agosto 2006 (IEV 3, Eychenne *et al.*, 2012) se reportaron espesores de 0.7 a 0.8 cm a la misma distancia.

Durante erupciones plinianas con IEV 4-5, esta área puede ser afectada por caídas de ceniza, lapilli y bloques de pómez, de varios decímetros de espesor (Figura 16). Está basado en la dispersión de caídas piroclásticas de erupciones plinianas (IEV 4) de los volcanes Misti y Ticsani. La erupción del volcán Misti de 2050 años AP (IEV 4), a 30 km de distancia emplazó caídas de lapilli de pómez que tienen entre 4 y 5 cm de espesor (Suni, 1999; Thouret *et al.*, 2001). La erupción del volcán Ticsani de 11 000 años AP (IEV 4), emplazó caídas de ceniza de alrededor de 50 cm de espesor a 30 km del cráter (Mariño y Thouret, 2003).

En resumen, la zona de moderado peligro, puede ser afectada por caídas de ceniza de algunos milímetros de espesor durante erupciones pequeñas a moderadas (IEV 1-2), por caídas de ceniza de algunos centímetros de espesor en erupciones medias (IEV 3), y por caídas de ceniza, lapilli y bloques de pómez de varios centímetros a decímetros de espesor en erupciones grandes (IEV 4-5).

Zona de bajo peligro (amarillo)

La zona de bajo peligro se halla aproximadamente entre los 30 y 60 km de distancia del complejo volcánico (Figura 16).

Durante erupciones vulcanianas con IEV 1-2, esta área difícilmente sería afectada por caídas de ceniza. Durante erupciones vulcanianas o sub-plinianas con IEV 3, esta área puede ser afectada por caídas de ceniza de varios milímetros de espesor. Está basado en las erupciones de los volcanes Nevado del Ruiz de noviembre de 1985, que a 50 km de distancia emplazó caídas de ceniza de entre 2 y 3 mm de espesor. Por su parte, luego de la erupción del volcán Tungurahua de agosto 2006 (IEV 3, Eychenne *et al.*, 2012) se reportaron espesores de ceniza de 6 mm a la misma distancia. Durante erupciones plinianas con IEV 4-5, esta área puede ser afectada por caídas de ceniza de varios centímetros de espesor. Está basado en el mapa de isópacas de la erupción del volcán Ticsani de hace 11 000 años AP. (IEV 4), que emplazó caídas de ceniza de alrededor de 1 cm de espesor, a 50 km del cráter (Mariño y Thouret, 2003).

En esta zona de bajo peligro se encuentran Yura, Arequipa, Tuti, Sibayo, Callalli, Chachas, Andagua, Viraco, Machaguay, Tipán, Uñón, Aplao, Huancarqui, Pedregal, entre otros (ver mapa).

EVALUACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE PELIGROS VOLCÁN SABANCAAYA

En resumen, la zona de bajo peligro sería poco afectada por caídas de ceniza durante erupciones pequeñas a moderadas (IEV 1-2), pero sí por caídas de ceniza de algunos milímetros de espesor en erupciones medias (IEV 3), y por caídas de ceniza de varios centímetros de espesor en erupciones grandes (IEV 4-5).

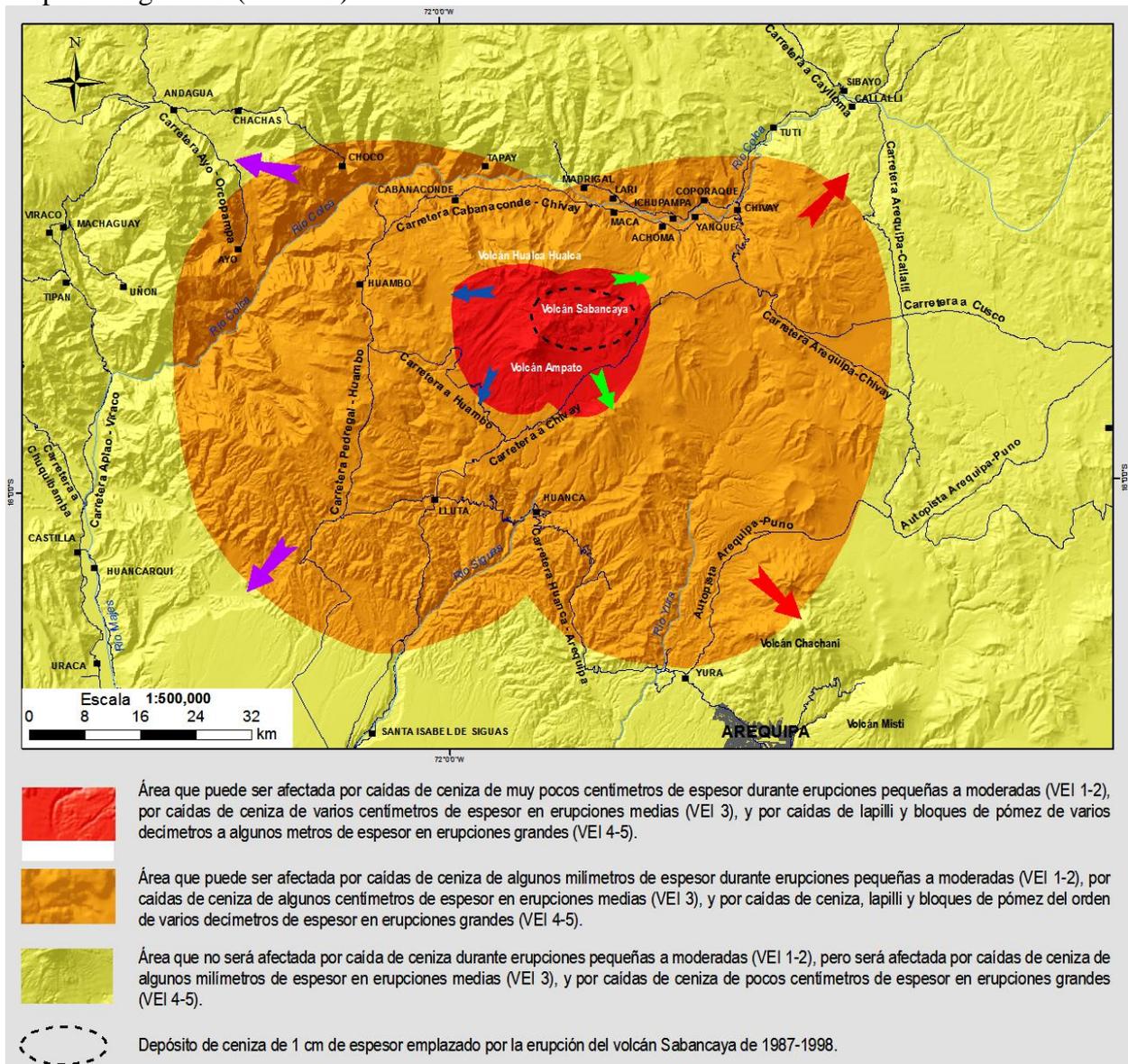


Figura 16. Mapa de peligros para caídas piroclásticas del Complejo Volcánico Ampato-Sabancaya (Tomado de Mariño, 2012).

VII. CONCLUSIONES

1. El volcán Sabancaya es el edificio activo del complejo volcánico Ampato-Sabancaya. Se ha construido en tres etapas sucesivas: «Sabancaya I», «Sabancaya II» y «Sabancaya III» que se desarrollaron durante el Holoceno, es decir los últimos 11 mil años aproximadamente. Dado su actividad recurrente en el pasado histórico es considerado el segundo volcán más activo del sur del Perú. Presentó erupciones efusivas lávicas y actividad explosiva moderada.
2. La actividad eruptiva del Sabancaya durante los últimos 4000 años, muestra la ocurrencia de erupciones explosivas leves a moderadas (IEV 1-2). Los datos históricos muestran que el volcán Sabancaya tuvo tres erupciones explosivas leves a moderadas ocurridas en los años 1750, 1784 y durante la década 1988-1998, caracterizados por alta actividad fumarólica y emisiones de ceniza. Durante la erupción ocurrida entre 1988-1998, el volcán emplazó ceniza de hasta 4 cm de espesor a 8 km al Este del volcán.
3. Recientemente, el día 06 de noviembre de 2016 el volcán Sabancaya entró en proceso eruptivo. Por ahora se trata de una erupción leve a moderada, con columnas de gases y cenizas que alcanzan hasta los 3 km de altura sobre la cima. La ceniza viene siendo dispersada en dirección Este, Noreste y Sureste del volcán. Se han reportado caídas de ceniza fina hasta 40 km de distancia del cráter.
4. En el volcán Sabancaya se han identificado cuatro escenarios eruptivos en caso de un incremento de actividad. Los escenarios que tienen mayor probabilidad de ocurrir, corresponden a erupciones vulcanianas (IEV 1-2) y erupciones efusivas. Los escenarios menos probables corresponden a erupciones subplinianas con (IEV 3) y erupciones plinianas con IEV 4-5.
5. El mapa proximal de peligros volcánicos múltiples (por flujos de lava, flujos piroclásticos, flujos de barro o lahares), muestra una **zona de alto peligro (rojo)** que se encuentra entre 2 y 4 km de distancia del cráter del volcán Sabancaya; la **zona de moderado peligro (naranja)**, se encuentra entre 4 y 6 km del volcán; y la **zona de bajo peligro (amarillo)**, están entre 9 y 14 km del complejo volcánico. En estas tres zonas de peligro, no se encuentran pueblos importantes, solo estancias con muy pocas viviendas, las que están muy dispersas. Sin embargo, se hallan cientos de camélidos, así como ganado ovino y vacuno.
6. En el **mapa de peligros por flujos de lodo (lahares) distales**, la zona roja, considerada de alto peligro, puede ser afectada por lahares de hasta 5 millones de m³; la zona naranja, de moderado peligro, puede ser afectada por lahares de 10 millones de m³; mientras que, la zona amarilla, de bajo peligro, puede ser afectada por lahares de 20 millones de m³. Estos lahares pueden descender principalmente por las quebradas que drenan en dirección Este, y por los flancos del Hualca Hualca y afectar las vías de acceso al valle y cañón del Colca, destruyendo los puentes y carreteras de la margen izquierda. También pueden afectar los accesos en la zona sur, los accesos a los poblados de Taya, Lluta y Huanca.

7. En el mapa de peligros por caídas piroclásticas:

La zona de alto peligro (rojo) puede ser afectada por caídas de ceniza de algunos centímetros de espesor durante erupciones pequeñas a moderadas (IEV 1-2), por caídas de ceniza de varios centímetros de espesor en erupciones medias (IEV 3), y por caídas, pómez y bloques de pómez de varios decímetros a algunos metros de espesor en erupciones grandes (IEV 4-5). En esta zona de peligro, no se encuentran pueblos importantes, solo estancias con muy pocas casas, las que están muy dispersas. Sin embargo, se hallan cientos de camélidos, así como ganado ovino y vacuno.

La zona de moderado peligro (naranja), puede ser afectada por caídas de ceniza de algunos milímetros de espesor durante erupciones pequeñas a moderadas (IEV 1-2), por caídas de ceniza de algunos centímetros de espesor en erupciones medias (IEV 3), y por caídas de ceniza, lapilli y bloques de pómez del orden de varios centímetros a decímetros de espesor en erupciones explosivas grandes (IEV 4-5). En esta zona se encuentran casi todos los pueblos del valle del Colca, tales como Chivay, Lari, Yanque, Coporaque, Ichupampa, Achoma, Maca, Madrigal, Pinchollo, Tapay, Cabanaconde, Choco, Huambo y Ayo. También están pueblos en la zona sur, tales como Huanca, Lluta y Taya.

La zona de bajo peligro (amarillo) no sería afectada por caídas de ceniza durante erupciones pequeñas a moderadas (IEV 1-2), pero sí por caídas de ceniza de algunos milímetros de espesor en erupciones medias (IEV 3), y por caídas de ceniza de varios centímetros de espesor en erupciones grandes (IEV 4-5). En esta zona se encuentran Yura, Arequipa, Tuti, Sibayo, Callalli, Chachas, Andagua, Viraco, Machaguay, Tipán, Uñón, Aplao, Huancarqui, Pedregal, entre otros (ver mapa).

VIII. RECOMENDACIONES

Las siguientes recomendaciones están dirigidas principalmente a las autoridades y la población que vive en áreas aledañas al volcán Sabancaya. Estas están basadas en la historia eruptiva del volcán Sabancaya, los escenarios eruptivos construidos, así como en el mapa de peligros y la actividad actual.

1. Utilizar el mapa de peligros del Complejo Volcánico Ampato-Sabancaya, en la elaboración del Plan de Contingencia, así como en la implementación de las medidas de mitigación frente al actual proceso eruptivo del volcán.
2. La ceniza que está emitiendo el volcán Sabancaya, puede provocar enfermedades respiratorias, especialmente en personas que sufren de asma y de afecciones de las vías respiratorias; afectar los ojos y generar conjuntivitis y laceraciones de la córnea, generar efectos en la piel, así como problemas gástricos o gastrointestinales, por ingesta de alimentos contaminados (agua, frutas, entre otros). Por ello recomendamos:
 - a) Distribuir la población afectada lentes (gafas) con protección lateral, así como mascarillas para evitar la inhalación de partículas de ceniza;
 - b) Que las instituciones competentes realicen una evaluación permanente del impacto de la ceniza en la salud de los pobladores afectados;
 - c) Que los centros de salud ubicados en los pueblos en riesgo, sean abastecidos de mayor cantidad de medicamentos y profesionales de la salud especializados en el tema.
3. La ceniza que está emitiendo el volcán Sabancaya, también puede generar problemas ambientales, tales como la contaminación de fuentes de agua (manantiales, pozos, acequias, ríos y quebradas); contaminación de pastizales (forrajes), especialmente del ichu y la alfalfa; incremento de accidentes de tránsito por baja visibilidad; muerte de animales por contaminación de pastos y fuentes de agua; destrucción de áreas de cultivo; colapso de techos en las viviendas, especialmente si estas son de teja, calamina, eternit o ichu; generar lluvias ácidas, entre otros. Frente a esto formulamos las siguientes recomendaciones:
 - a) Que las instituciones competentes realicen una evaluación permanente del impacto de las cenizas en el agua, suelo, áreas de cultivo, pastos naturales y animales, especialmente en zonas donde se viene registrando importante caída de ceniza;
 - b) La limpieza exterior de ceniza acumulada en techos, patios y calles;
 - c) Absténgase de conducir si la visibilidad está comprometida por la lluvia de ceniza;
 - d) Cubrir las fuentes de agua a fin de evitar consumo de agua contaminada por parte de las personas y animales.

Más recomendaciones puede leerse en la cartilla “Mapa de peligros e impacto de las emisiones de ceniza”, distribuido por el Observatorio Vulcanológico del INGEMMET (OVI).

Recomendamos también mantenerse informado sobre la evolución de la erupción a través de los reportes que viene emitiendo el Observatorio Vulcanológico del INGEMMET: www.ovi.ingemmet.gob.pe

REFERENCIAS

- ALCALÁ, J. (2007). La evolución de los glaciales en el complejo volcánico Ampato (Perú). Tesis Master, Universidad Complutense de Madrid, Madrid, 86 p.
- BARRIGA, V. (1951). Los terremotos en Arequipa, 1582-1868. Arequipa: La Colmena, 426 p.
- CAS, R.A.F. & WRIGHT, J.V. (1995). Volcanic successions: modern and ancient. London: Chapman & Hall, 528 p.
- EYCHENNE, J.; LE PENNEC, J.-L.; TRONCOSO, L.; GOUHIER, M. & NEDELEC, J.-M. (2012). Causes and consequences of bimodal grain-size distribution of tephra fall deposited during the August 2006 Tungurahua eruption (Ecuador). *Bulletin of Volcanology* 74(1): 187-205.
- FRANCIS, P.W. (1993). Volcanoes: a planetary perspective. New York: Oxford University Press, 443 p.
- 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.
- GIESECKE, A. (1989). Riesgo volcánico: evaluación y mitigación en América Latina, aspectos sociales, institucionales y científicos. Lima: Centro Regional de Sismología para América del Sur, 298 p.
- GLICKEN, H. (1996). Rockslide-debris avalanche of May 18, 1980, Mount St. Helens volcano, Washington. U.S. Geological Survey, Open-File Report 96-677, 90 p.
- GUILLANDE, R.; THOURET, J.-C.; HUAMAN, D. & LE GUERN, F. (1992). L'activité éruptive actuelle du volcan Nevado Sabancaya (Sud du Pérou) et l'évaluation des menaces et des risques: géologie, cartographie et imagerie satellitaire, informe inédito. Paris: Ministère de L'Environnement et Centre National d'Etudes Spatiales, 120 p.
- HOBLITT, R.P.; WALDER, J.S.; DRIEDGER, C.L.; SCOTT, K.M.; PRINGLE, P.T. & VALLANCE, J.W. (1995). Volcano Hazards from Mount Rainier, Washington. U.S. Geological Survey, Open-File Report 95-273, 10 p.
- HUAMÁN, D.; CHOROWICZ, J.; DEFFONTAINES, B.; GUILLANDE, R. & RUDANT, J.P. (1993). Cadre structural et risques géologiques étudiés à l'aide de l'imagerie spatiale: la région du Colca (Andes du Sud Pérou). *Bulletin Société Géologique de France*, 164(6): 807-818.
- HUAMÁN, D. (1995). Métodos y aplicaciones de las imágenes de satélite en la cartografía geológica: el caso del seguimiento y evolución de la amenaza volcánica del Sabancaya (región del Colca, Arequipa, Perú). Tesis Ingeniero Geólogo, Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa, 138 p.
- JUVIGNÉ, E.; THOURET, J.-C.; GILOT, E.; LECLERCQ, L. & GOURGAUD, A. (1998). L'activité du volcan Nevado Sabancaya (Pérou) au cours de l'Holocène. *Quaternaire*, 9(1): 45-51. Juvigné, E.; Thouret,
- JUVIGNE, E.; THOURET, J.-C.; LOUTSCH, I.; LAMADON, S.; FRECHEN, M. (2008). Retombées volcaniques dans des tourbières et lacs autour du massif des Nevados Ampato et Sabancaya (Pérou Méridional, Andes Centrales). *Quaternaire*, 19 (2): 157-173.
- J.-C.; LOUTSCH, I.; LAMADON, S.; FRECHEN, M., ET AL. (2008). Retombées volcaniques dans des tourbières et lacs autour du massif des Nevados Ampato et Sabancaya (Pérou Méridional, Andes Centrales). *Quaternaire*, 19 (2): 157-173.
- KELFOUN, K.; SAMANIEGO, P.; PALACIOS, P. & BARBA, D. (2009). Testing the suitability of frictional behaviour for pyroclastic flow simulation by comparison with a well-constrained eruption at Tungurahua volcano (Ecuador). *Bulletin of Volcanology* 71(9): 1057-1075.
- MARIÑO, J. & THOURET, J.C. (2003) - Geología, historia eruptiva y evaluación de peligros del volcán Ticsani (sur del Perú). *Boletín Sociedad Geológica del Perú*, (95): 7-31.
- MARIÑO, J. (2012). Escenarios eruptivos y mapa de peligros del complejo volcánico Amapato-Sabancaya. Tesis Maestría, Universidad de Nice, Francia, 87 p.

EVALUACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE PELIGROS VOLCÁN SABANCAYA

- MERING, C.; HUAMÁN, D.; CHOROWICZ, J.; DEFFONTAINES, B. & GUILLANDE, R. (1996) - New data on the geodynamics of southern Perú from computerized analysis of SPOT and SAR ERS-1 images. *Tectonophysics*, 259(1-3): 153-169.
- NAKADA, S. (2000) - Hazards from pyroclastic flows and surges. En: Sigurdsson, H.; Houghton, B.F.; McNutt, S.R.; Rymer, H. & Stix, J., eds. *Encyclopedia of volcanoes*. San Diego, CA: Academic Press, p. 945-955.
- RIVERA, M.; THOURET, J.-C.; SAMANIEGO, P. & LE PENNEC, J.-L. (2014) - The 2006-2009 activity of the Ubinas volcano (Peru): Petrology of the 2006 eruptive products and insights into genesis of andesite magmas, magma recharge and plumbing system. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 270: 122-141.
- 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.
- RODRÍGUEZ, A. & HUAMÁN, D. (1992). Actividad de los volcanes Ubinas y Sabancaya, informe inédito. Lima: Instituto Geofísico del Perú, 12 p.
- 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.
- SÉBRIER, M.; MERCIER, J.; MÉGARD, F.; LAUBACHER, G.; CAREY-GAILHARDIS, E. (1985). Quaternary normal and reverse faulting and the state of stress in the central Andes of Peru. *Tectonics*, 7, 895-928.
- SIEBERT, L.; SIMKIM, T. & KIMBERLEY, P. (2011). *Volcanoes of the world*. 3. ed. Washington, D.C.: Smithsonian Institution, Berkeley, CA: University of California Press, 551 p.
- SIGURDSSON, H.; HOUGHTON, B.F.; MCNUTT, S.R.; RYMER H. & STIX, J. EDS (2000). *Encyclopedia of volcanoes*. San Diego, CA: Academic Press, 1442 p.
- SUNI, J. (1999). Estudio geológico y vulcanológico del volcán Misti y sus alrededores. Tesis Ing. Geólogo, Universidad Nacional San Agustín, Arequipa, 179 p.
- TAVERA, H.; GUARDIA, P.; CONDORI, C.; FERNÁNDEZ, E. & ARREDONDO, L. (2013a). Sismos de la región del volcán Sabancaya del 22 y 23 de febrero del 2013, informe inédito. Lima: Instituto Geofísico del Perú, Informe Técnico N° 01-2013.
- TAVERA, H.; MARTÍNEZ, J.; FERNÁNDEZ, E.; ARREDONDO, L.; FLORES, C. & MILLONES, J. (2013b). Sismo de Huambo-Cabanaconde (Arequipa) del 17 de julio, 2013 (5,7ML), informe inédito. Lima: Instituto Geofísico del Perú, Informe Técnico N° 02-2013.
- TAVERA, H.; GUZMAN, J., VELARDE, L., CUYA, A. (2016). Sismo de Ichupampa del 14 de agosto del 2016 (5.3 ML), informe inédito. Lima: Instituto Geofísico del Perú, 18 p.
- THOURET, J.-C. (1990). Effects of the November 13, 1985 eruption on the snow pack and ice cap of Nevado del Ruiz volcano, Colombia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 41(1-4): 177-201.
- THOURET, J.-C.; GUILLANDE, R.; HUAMÁN, D.; GOURGAUD, A.; SALAS, G. & CHOROWICZ, J. (1994). L'activité actuelle du Nevado Sabancaya (Sud Pérou): reconnaissance géologique et satellitaire, évaluation et cartographie des menaces volcaniques. *Bulletin Société Géologique de France*, 165(1): 49-63.
- THOURET, J.C.; DAVILA, J. & EISSEN, J.P. (1999). Largest explosive eruption in historical times in the Andes at Huaynaputina volcano, A.D. 1600, southern Peru. *Geology*, 27(5): 435-438.
- THOURET, J.C.; FINIZOLA, A.; FORNARI, M.; LEGELEY-PADOVANI, A.; SUNI, J. & FRECHEN, M. (2001). Geology of El Misti volcano near the city of Arequipa, Peru. *Geological Society of America Bulletin*, 113(12): 1593-1610.
- THOURET, J.C.; RIVERA, M.; WÖRNER, G.; GERBE, M.C.; FINIZOLA, A., ET AL. (2005). Ubinas: the evolution of the historically most active volcano in southern Peru. *Bulletin of Volcanology*, 67(6): 557-589.

EVALUACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE PELIGROS VOLCÁN SABANCAYA

TILLING, R.I., ED. (1993). Apuntes para un curso breve sobre los peligros volcánicos, Santa Fé, Nuevo México, 2-3 julio 1989. [s.l.]: Organización Mundial de Observatorios Vulcanológicos, 125 p.

UI, T.; TAKARADA, S. & YOSHIMOTO, M. (2000). Debris avalanches. En: Sigurdsson, H.; Houghton, B.F.; McNutt, S.R., Rymer, H. & Stix, J., eds. Encyclopedia of volcanoes. San Diego, CA: Academic Press, p. 617-626.

ZAMÁCOLA, J. (1888). Apuntes para la historia de Arequipa. Año de 1804. Arequipa: Imp. de La Bolsa, 98 p.