



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Instituto
Geofísico del Perú - IGP

Investigación en
Vulcanología



Volcán Sabancaya

Lecciones de la reciente erupción
1990-98 y características del
estado de “intranquilidad volcánica”
observada desde febrero 2013

REPORTE TÉCNICO ESPECIAL N° 02-2014

Por:

Orlando Macedo
Nino Puma
José Luis Torres
José Alberto Del Carpio
Riky Centeno
Rolando Chijcheapaza

Arequipa-Perú
Setiembre, 2014

INDICE

INTRODUCCION.....	1
A) CONTEXTO EN QUE OCURRE EL FENOMENO: EL VULCANISMO EN EL PERU Y EL VOLCAN SABANCAYA.....	3
A1.- Contexto geodinámico del vulcanismo en el Perú.....	3
A2.- Volcanes activos y potencialmente activos del sur del Perú.....	4
A3.- El Volcán Sabancaya	5
B) CONOCIMIENTOS E INFORMACION GEOFISICA Y VULCANOLOGICA RECOPIADA EN BASE A LA ULTIMA ERUPCION.....	7
B1.- Indicios de reactivación del volcán en 1986.....	7
B2.- Inicio y evolución de la erupción del Sabancaya 1990-1998.....	8
B3.- Características y evolución de la sismicidad.....	8
B4.- Materiales expulsados durante la erupción.....	12
B5.- Dispersión de tefras (cenizas, lapilli y bloques).....	12
B6.- Flujos de lodo, avalanchas.....	14
B7.- Cursos de agua y manantiales.....	15
B8.- Observaciones y mediciones de deformación.....	17
B9.- Conclusiones sobre el desarrollo de la erupción 1990-98 y la información científica recolectada.....	18
C) LA REACTIVACION DEL VOLCAN SABANCAYA 2013-2014.....	20
C1.- La “intranquilidad volcánica” observada desde Febrero 2013.....	20
C2.- Instalación de Red Sísmica-Telemétrica y Monitoreo Sísmico y de Deformación del suelo.....	22
C3.- Vigilancia migración de la sismicidad en el tiempo y en el espacio.....	26
C4.- Modelo de la evolución del proceso que se observa actualmente en el volcán Sabancaya.....	29
C5.- Primera Explosión freática ocurrida en el volcán Sabancaya.....	33
C6.- Segunda explosión freática ocurrida en el volcán Sabancaya.....	37
Conclusiones acerca de la reactivación del volcán Sabancaya 2013-2014.....	37
D) EVALUACION DEL PELIGRO VOLCANICO EN EL AREA DEL VOLCAN SABANCAYA	39
Peligro Potencial del volcán Sabancaya.....	40

Conclusiones acerca del Peligro Volcánico asociado al volcán Sabancaya.. 44

E) INFORMACION PERMANENTE SOBRE EL ESTADO DEL VOLCAN Y

PRONOSTICO DE ACTIVIDAD 45

E1.- Pronósticos a “corto plazo” 45

E2.- Información periódica y Pronósticos a “mediano plazo” 46

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES 48

Bibliografía 51

ANEXO 1

ANEXO 2

ANEXO 3

INTRODUCCION

El presente reporte técnico especial ha sido preparado en atención al pedido hecho al Observatorio Vulcanológico de Arequipa (OVA-IGP) por el Consejo Regional de Arequipa y las autoridades de Defensa Civil ante la intranquilidad que actualmente se está observando en el volcán Sabancaya (Anexo 3). Este volcán causó importantes daños en una reciente erupción ocurrido entre 1990 y 1998 y, actualmente amenaza nuevamente a los asentamientos humanos, fauna y flora de los alrededores, así como a las obras de infraestructura cercanos.

Por lo general, se ha observado que las erupciones que ocurren en un volcán siguen un comportamiento similar al que tuvieron en sus anteriores recientes erupciones. El detalle de la última erupción del volcán Sabancaya es bien conocido pues se produjo hace solo 16 años, pero no así los pormenores respecto de las anteriores que según los registros históricos, habrían ocurrido durante la segunda mitad del siglo XVIII. Sin embargo, los estudios realizados llevan a la conclusión de que las erupciones de este volcán ocurridas en los últimos siglos pueden ser catalogadas como erupciones pequeñas a moderadas. La última erupción (1990-1998) solo ha alcanzado, por ejemplo, un Índice de Explosividad Volcánica o IEV igual a 2-3 (Gerbe & Thouret, 2004). La escala IEV va de 0 a 8 (ver Anexo 1)

Teniendo en cuenta lo mencionado en los párrafos anteriores, se comprende el por qué es necesario tener un adecuado conocimiento de lo que ocurrió en la anterior erupción. En efecto, tales conocimientos permitirían esbozar o considerar un escenario muy probable para una próxima erupción magmática del volcán Sabancaya. En este reporte, por tanto, se da cuenta de los trabajos que el Observatorio Vulcanológico de Arequipa (OVA-IGP) ha efectuado durante el anterior proceso eruptivo (intranquilidad desde 1986, y finalmente erupción entre 1990-98), así como también de los principales daños que se reportaron. Seguidamente se desarrolla los trabajos y estudios de monitoreo que hemos realizado desde 2013, con especial énfasis en **Sismología Volcánica** pues este **método geofísico** ha sido **priorizado por el IGP en razón de su alta eficacia** mundialmente reconocida **en lo que se refiere a vigilancia de volcanes** activos.

Cabe resaltar que en ocasión de dicho serio problema que se presentaba para Arequipa a fines de los años 80, el **Instituto Geofísico del Perú (IGP)** recibió la **colaboración** decidida de las autoridades regionales y a través de **AUTODEMA** se instaló en Arequipa el **Observatorio Vulcanológico de Arequipa (OVA)**, en un local cedido en uso donde hoy en día continúa funcionando, sito en Urb. La Marina B-19, Cayma (Figura N°1)

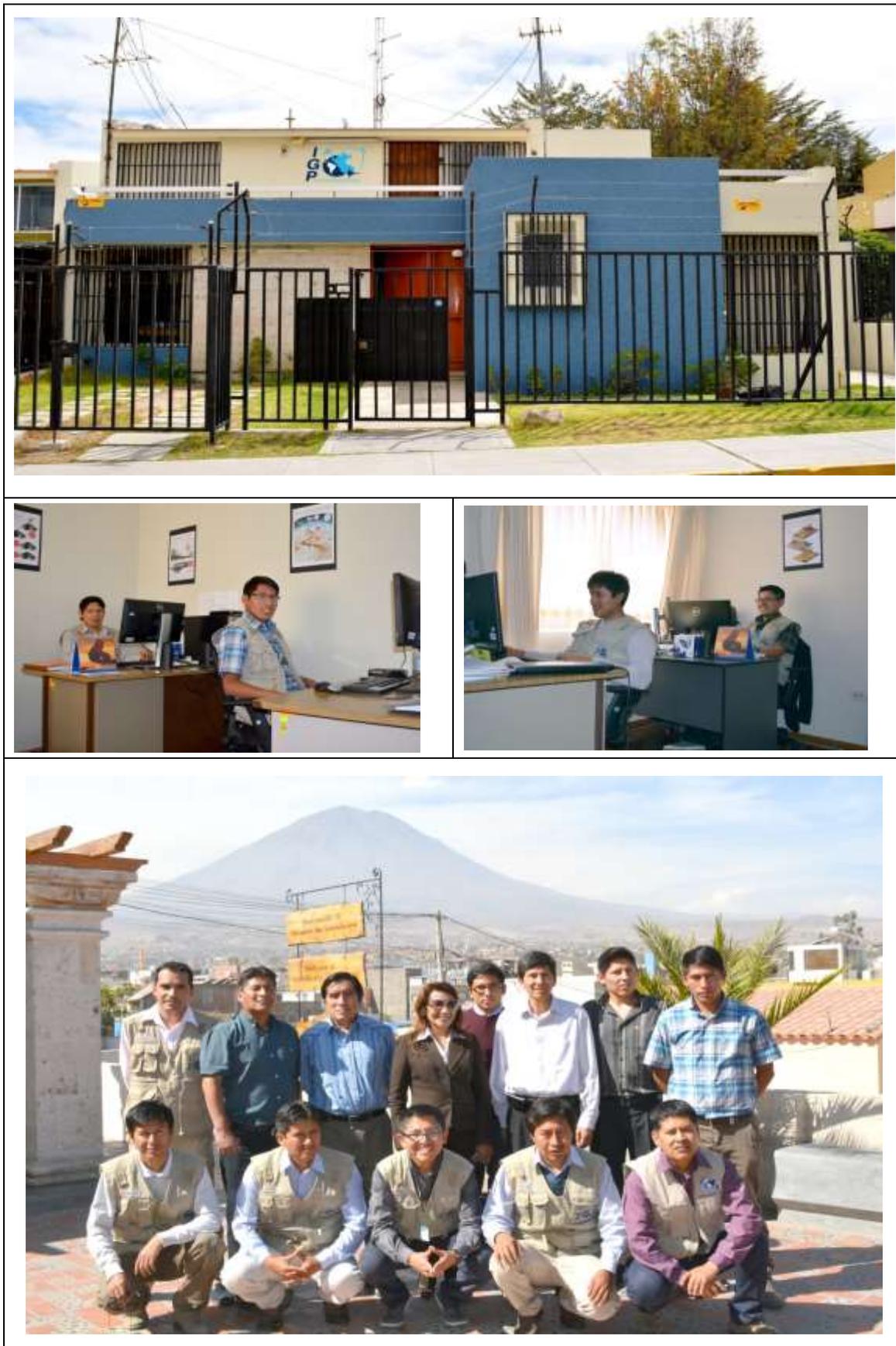


Figura 1.- Local del Observatorio Vulcanológico de Arequipa del Instituto Geofísico del Perú (OVA-IGP) y parte del personal profesional que allí trabaja. Este observatorio funciona gracias al Convenio IGP-AUTODEMA.

A) CONTEXTO EN QUE OCURRE EL FENOMENO: EL VULCANISMO EN EL PERU Y EL VOLCAN SABANCAYA

A1.- Contexto geodinámico del vulcanismo en el Perú

Los volcanes no se presentan al azar en el mundo. En América del Sur tenemos, por ejemplo, las Zonas Volcánicas del Norte, Central y del Sur (ZVN, ZVC y ZVS, respectivamente; ver Figura 2). Los volcanes activos del sur del Perú y norte de Chile están dentro de la ZVC, y el volcán Sabancaya se ubica en el sector septentrional de dicha zona (Figura 2).



Figura 2.- América del Sur y las cadenas de volcanes ZVN, ZVC y ZVS. El volcán Sabancaya se encuentra en el extremo septentrional de la ZVC.

El volcán Sabancaya, así como todos los volcanes activos del Perú, ha sido generado como consecuencia de la “subducción” de la placa de Nazca por debajo de la placa de Sudamérica (ver Figura 3). Subducción significa que una placa pasa por debajo de otra, lo cual perturba el entorno de la Astenosfera a 100 km de profundidad y hace que, finalmente, se forme magma fundido y de menor densidad. Este magma sube hasta la superficie, formando así los volcanes activos y potencialmente activos del Perú.

Una **característica** en los volcanes de subducción, como es el caso de los **volcanes peruanos**, es que su es **magma viscoso y altamente explosivo**, lo cual hace peligrosos a todos nuestros volcanes.



Figura 3.- Figura esquemática de la “subducción” de la Placa de Nazca que pasa por debajo de la Placa Sudamericana. El magma que empieza su ascenso hasta la superficie (volcanes) se genera por fusión parcial a unos 100-120 km de profundidad

A2.- Volcanes activos y potencialmente activos del sur del Perú

Según su nivel de actividad, los volcanes pueden ser catalogados como activos, potencialmente activos y extintos.

En el sur del Perú se puede observar más de 400 centros volcánicos, pero la gran mayoría de estos volcanes no presentan ningún signo de actividad en absoluto (volcanes extintos).

Existen **siete volcanes activos en el sur del Perú**, es decir volcanes que han tenido una erupción en los últimos 12,000 años y que actualmente presentan intensa actividad sísmica, geotermal y emisiones frecuentes de fumarolas. Estos son los volcanes Misti y **Sabancaya** en la región Arequipa; Ubinas, Huaynaputina y Ticsani en Moquegua; y Tutupaca y Yucamane en Tacna. Asimismo, en esta región se tienen por lo menos cuatro volcanes potencialmente activos (volcanes que tuvieron erupciones mucho más

antiguas, hasta en los últimos 5 millones de años) que son el Sara Sara, el Coropuna, Chachani y el Casiri. La Tabla 1 resume lo anterior.

Tabla 1.- Volcanes activos y potencialmente activos del sur del Perú

Región	Volcanes activos	Volcanes potencialmente activos	Altitud msnm	Localización	
				Latitud Sur	Longitud Oeste
Ayacucho		Sarasara	5,522	15° 18'	73° 27'
Arequipa	Misti		5.822	16°18'	71°24'
		Chachani	6070	16°11'	71°32'
		Coropuna	6.377	15° 31'	72° 39'
	Sabancaya		5.976	15°47'	71°32'
Moquegua	Ubinas		5.672	16°20'	70°54'
	Huaynaputina		4.500	16°36'	70°51'
	Ticsani		5.408	16° 45'	70° 37'
Tacna	Tutupaca		5.790	17° 01'	70° 12'
	Yucamane		5.550	17°11'	70° 12'
		Casiri	5.650	17°28'	69°49'

Además, en el valle de Huambo- Andahua existe también un campo volcánico con más de 40 conos monogénicos emplazados desde el Pleistoceno tardío (hace unos 50,000 años). Todos estos volcanes forman parte de la ZVC o Zona Volcánica Central.

A3.- El Volcán Sabancaya

El volcán Sabancaya (15°47'S; 71°51'W; con altitud de 5976 m.s.n.m.) se encuentra a 19 km del pueblo de Maca (valle del río Colca) y a 76 km al noroeste de la ciudad de Arequipa. Es un **estratovolcán activo que tiene una edad de menos de 12,000 años, y** pertenece al complejo volcánico Ampato – Sabancaya - Hualca Hualca. Está constituido por una sucesión de flujos y coladas de lavas en bloques de composición andesítica que cubren una superficie aproximada de 70 km² (Huamán et al., 1994, Instituto Geofísico del Perú). **En la cumbre del edificio**, con hielo y nieve la mayor parte del tiempo, se encuentra **un cráter activo de aproximadamente 350 m. de diámetro**. La historia eruptiva del Sabancaya muestra que este volcán tuvo periodos antiguos de erupciones violentas muy explosivas. Los estudios científicos han logrado fechar algunas erupciones antiguas, como por ejemplo las ocurridas hace 8520, 5440 y 1680 años (Juvigné et al, 1998; 2008). Más recientemente, las crónicas históricas mencionan que el volcán tuvo actividad explosiva en 1752 y 1784. Las crónicas de Travada y Córdova (1752) mencionan a un volcán en erupción observado por el cura

de la parroquia de Salamanca en viaje hacia Arequipa: “El volcán de Ambato, como han corrompidos los españoles, está en la provincia de Collaguas a veinte y tantas leguas al occidente de la ciudad de Arequipa. Su altura será de tres cuartos de legua, con falda muy dilatada que transitando yo por su faldas hice mansión muy cerca y sentí aquella noche ruido que sería de peñas que escaladas del fuego que arde incesantemente bajan despeñadas de la altura en busca de su centro, allí, el volcán está perennemente ardiendo de día y de noche y que no hay noticia de haber hecho estragos en tiempos inmemoriales”. Y las crónicas de Zamácola y Jáuregui (1804) describe también lo observado en julio de 1784 “Día, 11.- a las 9 y 56 minutos se sintió un temblor de tierra, con bastante remezón pero que 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”.

B) CONOCIMIENTOS E INFORMACION GEOFISICA Y VULCANOLOGICA RECOPIADA EN BASE A LA ULTIMA ERUPCION

En líneas anteriores del presente documento ya se ha resaltado en que es muy deseable que los científicos, autoridades, y público en general dispongan de una buena información acerca de lo ocurrido en la anterior erupción de un volcán. En efecto, dicha información es muy útil para enfrentar una crisis ulterior pues científicamente se sabe que, en líneas generales, **es muy probable que la erupción próxima sea de características similares a las erupciones más recientemente ocurridas en el volcán** que está siendo observado.

La más reciente **erupción (1990-98) del volcán Sabancaya fue monitoreada instrumentalmente por el Instituto Geofísico del Perú (IGP) y el Instituto Geofísico de la Universidad Nacional de San Agustín (IG-UNSA)**. Se dispone, entonces, de información sumamente valiosa, parte de la cual se expone más adelante.

Tales conocimientos permiten hoy en día esbozar o considerar un escenario probable para el caso de una eventual próxima erupción magmática del volcán Sabancaya.

B1.- Indicios de reactivación del volcán en 1986

La información sobre volcanes activos del Perú era parcial e completa a inicios de la década de los 80, de modo que las primeras observaciones que en 1981 daban cuenta de presencia de fumarolas y “ruidos” que venían del cráter del Sabancaya, no preocuparon mucho a las autoridades ni a los pobladores de Arequipa.

Rodríguez et al. (1994) refieren que desde Junio 1986 llegaron informes de estarse observando notables fumarolas que se emitían desde la zona de cumbre del volcán Sabancaya. Estos reportes de observaciones visuales se incrementaron en los meses siguientes, especialmente desde Noviembre 1986 en que el volcán empezó a emitir fumarolas en volúmenes que las hacían visibles desde grandes distancias.

En Junio 1988 un equipo de vulcanólogos peruanos (IGP, e IG-UNSA) y extranjeros (USA y Ecuador) efectuaron misiones de reconocimiento terrestre y aéreo al volcán Sabancaya (Huamán, 1988). Ellos concluyeron que había fuertes indicios de una reactivación del volcán, y describieron el área de cráter con emanación de gases, acumulación de óxidos y azufre nativo, y cenizas; se observó un domo central que aparecía recubierto por nieve y hielo, pero donde se apreciaba fracturas visibles. Las fumarolas alcanzaban 500 a 1000 m por encima del cráter. Estas emanaciones

formaban penachos de más de 10 km de distancia desviados por el viento en dirección Noreste.

Por comparación de fotografías aéreas antiguas 1955 y nuevas imágenes satelitales SPOT de 1986, 1989 y 1990, Huamán (1990a) deduce que la deformación se incrementa al nivel del cráter y que posiblemente la temperatura también lo hace. Por otro lado, las imágenes satelitales muestran una disminución del casquete glaciar.

B2.- Inicio y evolución de la erupción del Sabancaya 1990-1998

El 28 de Mayo de 1990 ocurre las primeras explosiones con emisión de cenizas en el volcán Sabancaya. Estas explosiones fueron de tipo freático. En las primeras semanas (Junio e inicios de Julio) las explosiones son muy numerosas, de más de una decena por día, y ocurren con intervalos regulares. La altura de la pluma alcanza los 5 km al inicio (1ra y 2da semana de Junio), y va disminuyendo posteriormente a 3 km; las cenizas se dispersan llegando a distancias de hasta 20 km alrededor. **En Agosto, la tasa de explosiones diarias se reduce drásticamente, pero son energéticas y se presentan con intervalos no regulares.**

Al nivel del cráter, entre 1990-92 se observó un paulatino ensanchamiento en un tercio de sus dimensiones iniciales, alcanzando los 500m x 300m, y 150m de profundidad a fines de 1992.

La actividad eruptiva permaneció variable en 1993-95, pero a partir de 1996 se observó una tendencia a la disminución, hasta que a mediados de 1998 las explosiones y emisiones de tefras se detuvieron.

B3.- Características y evolución de la sismicidad

En Julio 1990, el Instituto Geofísico del Perú instaló y operó una red de estaciones analógicas y digitales distribuidas entre 11 y 20 km alrededor del volcán (Rodríguez & Uribe, 1994), siendo este instrumental la herramienta más importante para el monitoreo del volcán. Los registros obtenidos mostraron la predominancia de sismicidad “por fractura” (modernamente conocidos como VT o volcano-tectónicos) en relación a la sismicidad “por paso de fluidos” (conocidos como LP o de periodo largo). Rodríguez & Uribe (1994) observaron que en **Julio-Agosto 1990, Mayo-Junio 1991, y Febrero 1992, la sismicidad VT se concentró preferentemente hacia el NE del cráter, en la zona situada** al sur de Maca y Achoma., a distancias entre 5 y 20 km del cráter (ver Mapas sísmicos, Figs 4 y 5).

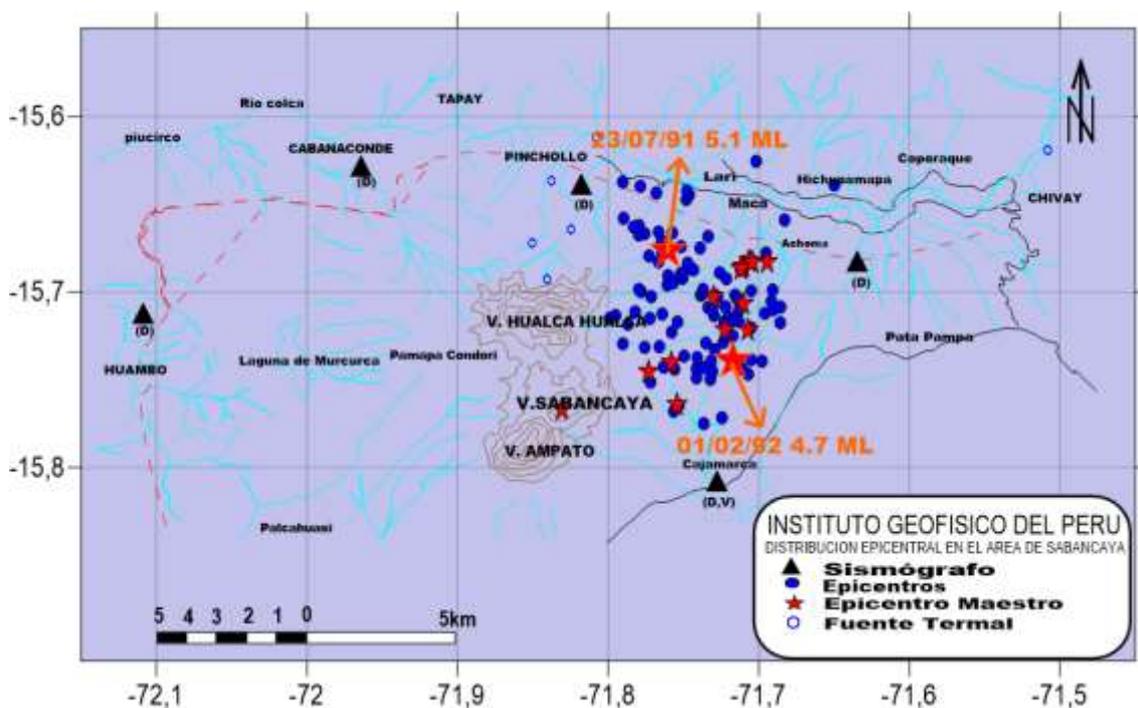


Figura 4. - Mapa de la actividad observada en la zona del volcán Sabancaya en 1991-1992 (Rodríguez & Uribe, 1994).

El sismo 5.1 ML del 23 de Julio 1991, denominado "terremoto de Maca" causo la muerte de 15 personas

El área de sismicidad VT corresponde a las zonas del valle Sepina y la zona al sur de Achoma-Maca-Pinchollo mencionado por Huamán et al (1991). Justamente, en esta zona ocurren dos fuertes sismos: el sismo de magnitud 5.1 ML ("Terremoto de Maca") del 23/07/91 a las 14:45 HL con epicentro aproximado a 6 km suroeste de Maca, y el sismo 4.7 ML ("terremoto de Sepina") del 01/02/92 a las 12:22 HL con epicentro a unos 12 km al suroeste de Achoma; ambos sismos fueron de foco superficial (<5.0 km) y ocurrieron alejados del Sabancaya, entre 11 y 13 km al NE del cráter (Rodríguez & Uribe, 1994; Antayhua, 2002).

El "terremoto de Maca" del 23 de Julio 1991 causo 15 víctimas mortales, la destrucción del poblado de Maca, deslizamientos en la zona y daño en muchos terrenos de cultivo y en canales de regadío. Posteriormente, este poblado fue reubicado en razón de las pésimas condiciones del suelo y los graves daños sufridos por el sismo.

Seis meses más tarde, el 01 de Febrero 1992, ocurre un segundo terremoto en la zona (Sismo de Sepina) localizado a solo 8 km al sureste del anterior. Huamán et al. (1992) han documentado los daños observados en el área de Sepina y determinado que la zona epicentral máxima (VI, en intensidad MM) corresponde a los parajes de Huituhuasi-Sahuana.

En 1993 el IGP instalo y opero una red de 3 estaciones sísmicas telemétricas, que enviaron la señal sísmica hasta el IGP-Arequipa. Al analizar los datos de **Agosto-Setiembre 1993**, se observó que la sismicidad VT se había trasladado ubicándose ahora cerca del cráter, hasta 7 km al Sureste, y con profundidades de 20 km.

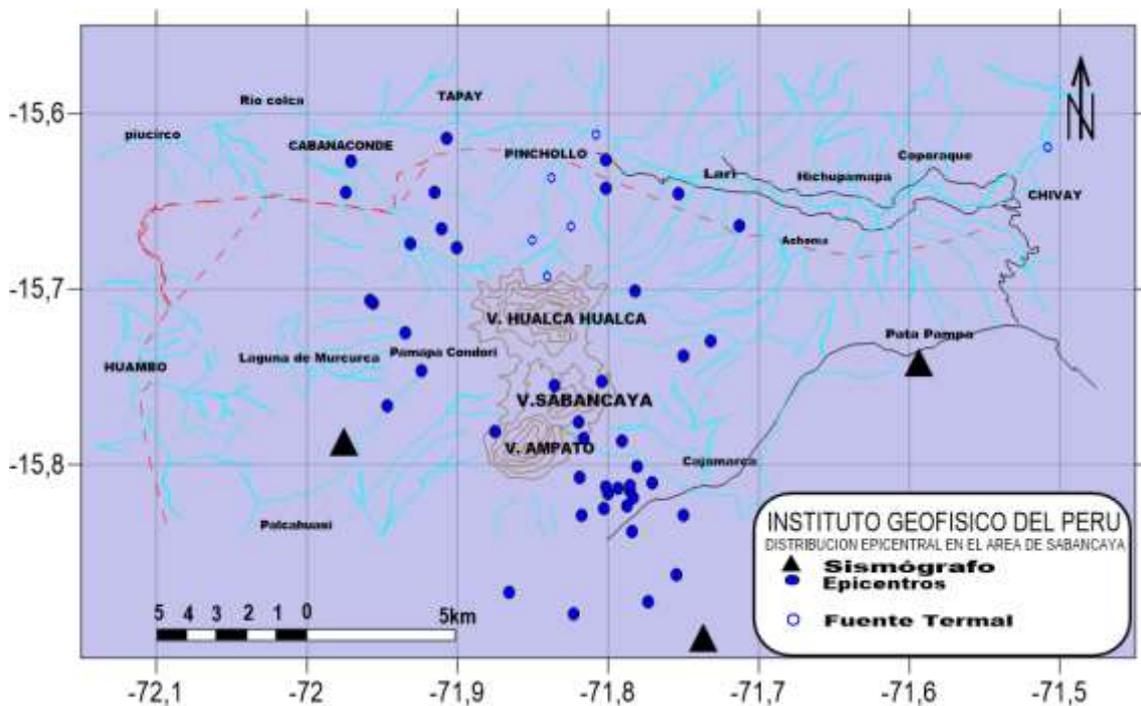


Figura 5. - Mapa de la actividad observada en la zona del volcán Sabancaya en Agosto-Setiembre 1993 (Rodríguez & Uribe, 1994)

En los meses que siguieron, es decir en Octubre, Noviembre y Diciembre 1993, la zona de epicentros se trasladó nuevamente en dirección nor-noreste situándose a estribaciones del Hualca-Hualca y los pueblos de Maca y Pinchollo, con profundidades cercanas a los 20 km.

En los últimos meses de 1993, se ha registrado sismos tipo híbrido, en donde el inicio de señal es de muy baja frecuencia y corta duración, seguido de altas frecuencias, con fases P y S. Durante todo el periodo observado, se ha registrado muy pocos temores de larga duración.

El monitoreo de la actividad sísmica en los años posteriores, ha continuado mediante la red sísmica telemétrica del IGP que funcionó hasta 1996, pero el área de mayor sismicidad no cambió fundamentalmente.

Los registros de sismos tales como LPs y “emisiones fumarólicas”, así como los de las explosiones fueron contabilizados a fin de establecer estadísticas de la actividad sísmica (Rodríguez & Uribe, 1994). La Figura 6 contiene un resumen del monitoreo sismográfico de la actividad asociada al volcán entre Agosto 1990- Julio 1993.

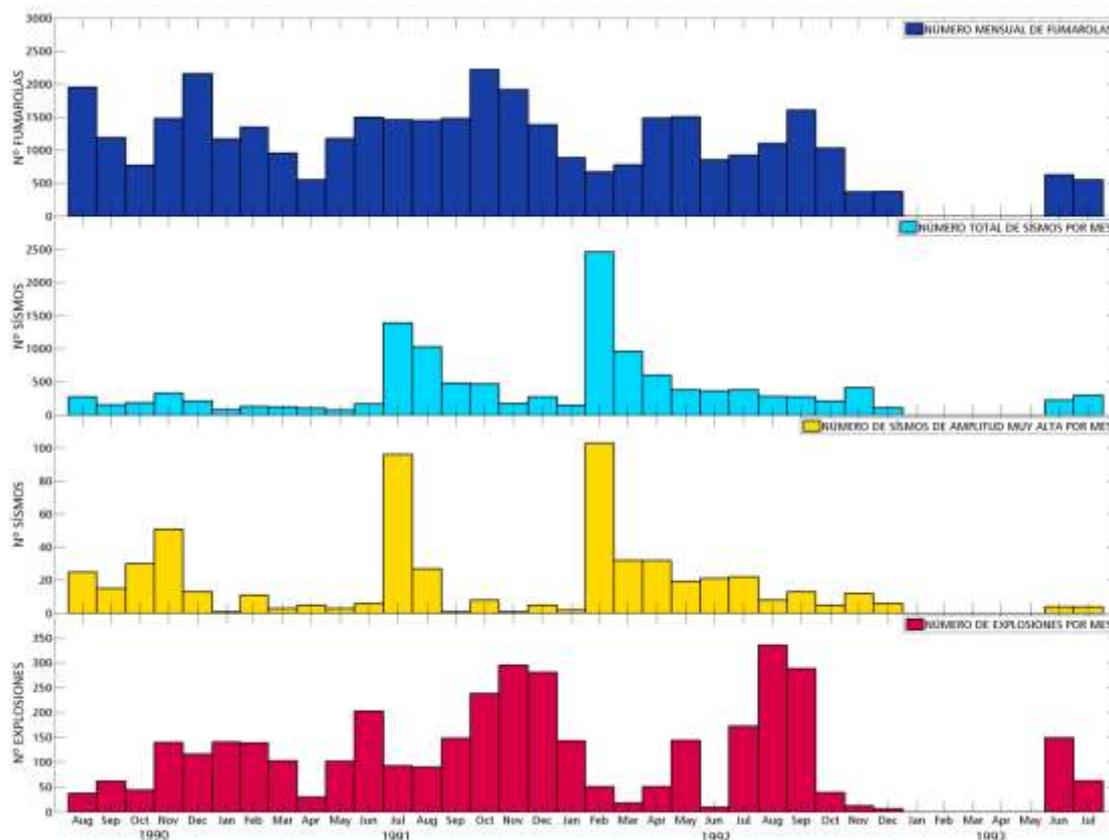


Figura 6.- Diagrama estadístico de la actividad sismovolcánica observada durante la erupción del volcán Sabancaya entre 1990-1993 (Rodríguez y Uribe, 1994)

Finalmente, cabe indicar que en base a los registros sísmicos así como observaciones visuales, Rodríguez & Uribe (1994) refieren que muy probablemente **el destaponamiento principal de los conductos del volcán Sabancaya se produjo principalmente en Octubre 1990**, es decir aproximadamente cuatro meses después de iniciada la erupción.

B4.- Materiales expulsados durante la erupción

Aunque hubieron algunos episodios de explosiones freatomagmáticas, se considera que el Sabancaya tuvo una actividad definida como vulcaniana, caracterizada por

explosiones fuertes pero breves, con intervalos más o menos regulares de 15 a 60 minutos, y que producen columnas eruptivas generalmente inferiores a 3 km, separadas por episodios de desgasaje más largos.

Durante la erupción del Sabancaya 1990-98, se expulsó material lítico (rocas antiguas, generalmente expelidas al limpiarse los conductos) y material juvenil es decir magma nuevo (Thouret et al., 1994). Los productos juveniles fueron poco a poco aumentando entre 1990 y 1992, en relación al material lítico. Se ha observado, a simple vista, que en general estos productos son densos, prácticamente sin vesiculaciones (Guillande et al., 1992).

Durante esta erupción, se han observado muy pocos productos típicamente freatomagmaticos, entre el 5-10% del material eyectado en Octubre de 1990, aunque aumentaron en Diciembre 1992, llegando al 20%. (Guillande et al., 1992)

B5.- Dispersión de tefras (cenizas, lapilli y bloques)

Las tefras han sido dispersadas desde el cráter central según su tamaño y según la dirección del viento reinante. Los bloques balísticos llegaron hasta los 500 m, el lapilli hasta los 3.5 km y las cenizas alcanzaron 15-20 km, e inclusive distancias mayores de los 25 km cuando se trataba de finas cenizas transportadas por el viento.

Un imagen satelital SPOT de fecha 14 Julio 1990 (Fig. 7) ha proporcionado información relativa al ámbito de dispersión de las tefras (Huamán, 1990b). Debido a la dirección de vientos de la época, las cenizas se depositaron hacia el Este y ENE, en un área de 35x60 km aproximadamente.

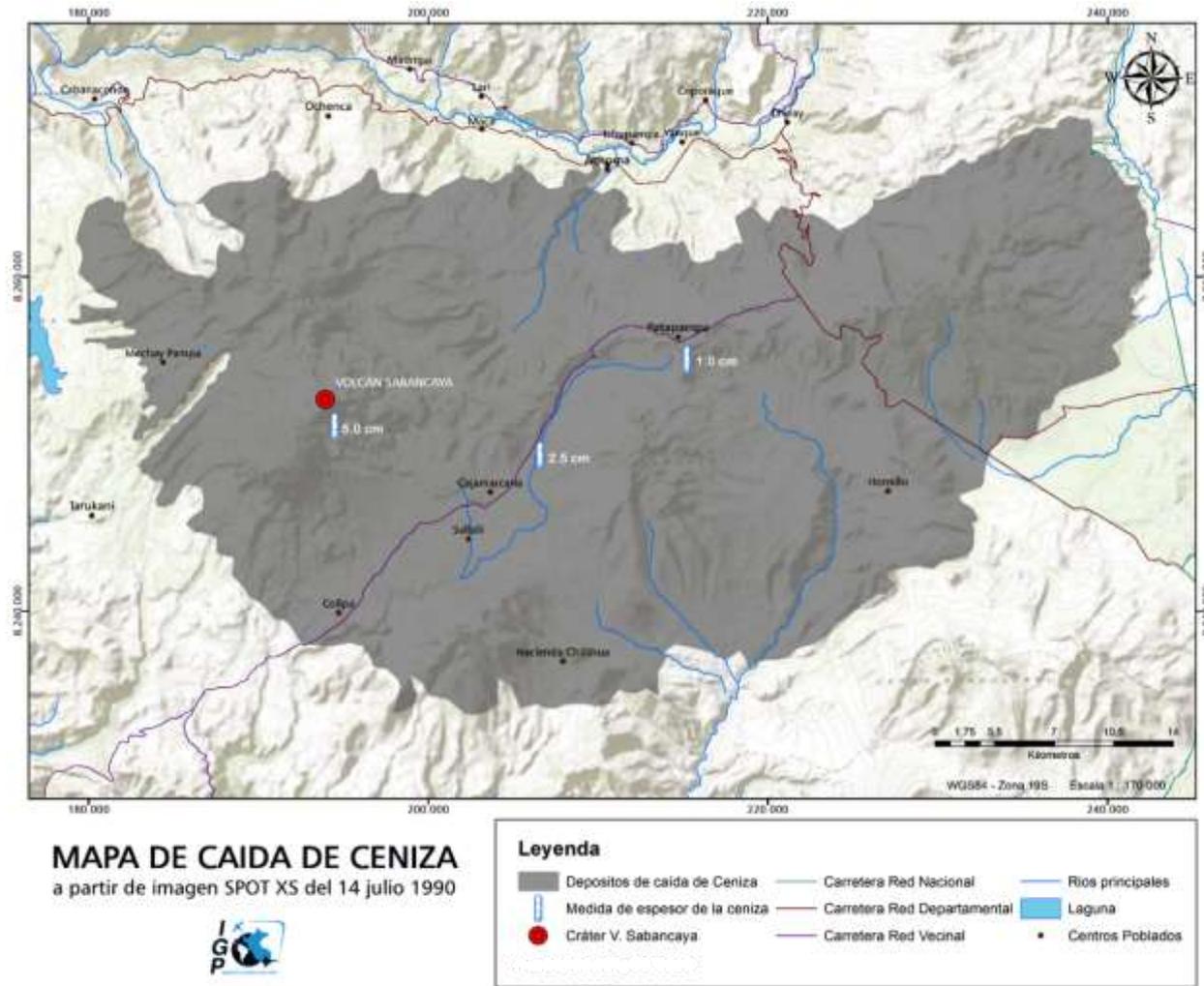


Figura 7.- Dispersión de ceniza en los primeros 45 días de iniciada la erupción, en base a una imagen SPOT tomada el 14/07/1990 (Huamán, 1990)

En los meses y años siguientes, las zonas de caída de la ceniza que aparece en el mapa de la figura 7 no ha variado sustantivamente, excepto que hacia el Oeste la distancia máxima se habría extendido hasta los 20 km (Rodríguez et al., 1991). Ocasionalmente hubieron también algunos días de dispersión al noreste, y en dirección sureste en que las cenizas alcanzaron grandes distancias. Por ejemplo, algunos días de Junio de 1990, así como en Junio 1991, **cenizas muy finas provenientes del volcán Sabancaya llegaron a observarse en inmediaciones de la ciudad de Arequipa**, sintiéndose además olor sulfuroso penetrante (Rodríguez et al., 1991).

Aun cuando los análisis químicos efectuados tanto en cenizas como en aguas, (resumideros y pequeñas lagunitas muy próximas al volcán) muestran importante acidez (Huamán, 1990b), hasta Diciembre 1990 no se habían reportado daños importantes ni en la fauna ni en la flora del área. Sin embargo hubo un caso, reportado en Mayo 1991 en Tarucani, en donde se habría constatado la **mortandad de camélidos sudamericanos**. En 1990-91 los caseríos situados a 10-20 km al sur y sureste del volcán, incluido la hacienda Sallalli, tuvieron que **desplazar a varios cientos de camélidos sudamericanos y ovinos** hacia lugares más lejanos, debido a la contaminación de los pastos. Asimismo, numerosos animales tuvieron que ser sacrificados en vista de la escasez de alimentos. La **hacienda Sallalli fue, finalmente, abandonada** permaneciendo así hasta la actualidad.

En Mayo-Junio 1991, en Chivay se reportó también un **aumento de casos de conjuntivitis** (hasta 60 personas afectadas, especialmente niños). Por otra parte, en algunas ocasiones los agricultores del valle del Colca han referido haber sufrido **disminución en sus cosechas** de papa, maíz y habas, posiblemente en relación a la caída de ceniza volcánica.

B6.- Flujos de lodo, avalanchas

En Agosto 1990, informaciones proporcionadas por los pobladores refieren de **aumento en caudal de fuentes de agua y de su temperatura**, principalmente en la Quebrada Hualca Hualca, Pinchollo, Madrigal y Yanque.

En octubre 1990 ocurrieron una serie de flujos de lodo y rocas (conocido localmente como “huayco”) que **descendieron del flanco norte del nevado Hualca Hualca** colindante con el volcán Sabancaya, por la Quebrada Huayuray (Huamán, 1991). Tres meses y medio después, a fines de Enero 1991, nuevamente se registraron fuertes “huaycos” por esta misma quebrada. Ambos eventos constituyeron una **seria**

amenaza a la seguridad del canal de Majes (“Canal 16”) que pasa transversalmente a esta quebrada (Cuenca et al., 1991; Rodríguez & Uribe., 1994) a la altura de la cota 3670 metros de altitud. Los estudios realizados por el IGP (Cuenca et al ,1991) concluyen entonces que la principal causa de las avalanchas o huaycos seria el proceso acelerado del deshielo a causa del incremento del flujo de calor relacionado a la erupción del Sabancaya.

Esta importante información ha sido también recogida en la elaboración de los nuevos mapas de peligros de la zona (ver figuras 26 y 27)

Por el lado sur y sureste del Sabancaya, se observó cursos de lahares hasta 11 km del cráter, aunque los materiales acarreados son de poco volumen.

B7.- Cursos de agua y manantiales

A medida que se acercaba la erupción y una vez ocurridas las primeras explosiones, nuevas fuentes de agua termal han aparecido, y la temperatura en las fuentes pre existentes se incrementaron.

Durante una misión realizada por el IGP en colaboración con vulcanólogos franceses, F. Le Guern y JC Thouret, los días 14-15 octubre 1990, se ha tomado muestras de aguas en diez sitios muy diferentes (y por tanto sus resultados no son comparables) a proximidad del volcán Sabancaya. Los resultados son reproducidos a continuación a modo de ejemplo.

Nº1= Rio Colca

Nº2= Fuente termal Colca (74°C).- Coporaque-Ichupampa

Nº3= Torrente (deshielo) del Hualca-Hualca, cerca de Pinchollo

Nº4= Agua de impregnación en las cenizas de la cumbre del Sabancaya (13/10/90)

Nº5= Agua superficial , del Ampato (13/10/90)

Nº6= Torrente (deshielo) de la nieve del Sabancaya (14/10/90).

Nº7= Caída de agua (molino), entre Pinchollo y Huayuray.

Nº8= Flujo de lodo (lahar) del 15/10/90 a las 15:00 hrs, del Hualca Hualca

Nº9= Lodo del Sabancaya

Nº10= Lodo del Ampato

	N°1	N°2	N°3	N°4	N°5	N°6	N°7	N°8	N°9	N°10
pH	6.9	7.1	6.66	2.7	3.69	5.77	6.16	5.64	3.2	4.2
C	1918	5497	269	12120	584	1657	99	323		
Min.	1455	4178	207	10308	418	1257	95	249		
Cl	390	1500	T<5	1950	17.5	55	T<5	T<5		
SO4	100	450	90	6600	400	500	20	170		
HCO3	261	610	T<0.6	0	0	195.8	21.35	T<0.6		
Mg	9.7	7.5	5.6	730	5.45	115	1.7	11		
Ca	31.8	45.4	26.6	303.4	51	28.4	5.2	37.6		
Na	325	1080	7.25	605	8.5	117.5	7.25	14.75		
K	24.25	90	3	200	5.5	21.25	3	7.5		

Tabla N° 2.- Resultados de análisis de aguas en zona del volcán Sabancaya

Unidades:

C: conductividad a 20°C en uS

Min.: mineralización en mg/l

Aniones: mg/l

Cationes: mg/l

Aguas cloruradas sódicas (1-2): Na-K>Ca>Mg Cl>HCO3>SO4>NO3

Aguas cloruradas cálcicas (3-8): Ca>Mg>Na-K SO4>NO3>Cl>HCO3

(5): Ca>Na-K>Mg SO4>Cl>NO3>HCO3

Aguas sulfatadas magnesianas (4): Mg>Na-K>Ca SO4>Cl>NO3>HCO3

(6): Mg>Na-K>Ca SO4>HCO3>Cl>NO3

Aguas sulfatadas sódicas (7): Na-K>Ca>>K SO4>HCO3>NO3>Cl

Observaciones realizadas por el IGP del 14 al 17 de Febrero 1991 (Cuenca et al, 1991) en la zona del flanco norte del Hualca Hualca, en la Quebrada Huayuray, paraje Hatun Ojo se constatado la presencia de una nueva fuente termal. Los pobladores lo conocen con el "geiser de Pinchollo". Se señala también que a inmediaciones del límite de los deshielos del Hualca Hualca, se ha observado el surgimiento de un gran volumen de agua, que a manera de formidable torrente desciende por la quebrada con gran acción erosiva.

B8.- Observaciones y mediciones de deformación

En Mayo 1991 vulcanólogos del IGP que realizan el monitoreo de la actividad eruptiva del Sabancaya, resaltan que los resultados de análisis de la actividad micro-sísmica entre Agosto y Noviembre 1990 muestran una **concentración de epicentros hacia el sector noreste del volcán** (Huamán et al., 1991; Rodríguez & Uribe., 1994). Asimismo, estos mismos autores determinan rasgos estructurales generales del área por medio de análisis de imágenes satelitales SPOT, e identifican numerosos “lineamientos” en la zona, siendo algunos de ellos interpretados como fallas. Estas fallas formarían tres familias, entre las que destaca la familia de fallas de dirección N50°-60° emplazada a lo largo del valle Sepina, la que al prolongarse atraviesa el valle del Colca llegando a inmediaciones de Ichupampa (Huamán et al., 1991).

En resumen, en los trabajos de Huamán et al. (1991) y de Rodríguez & Uribe. (1994) se describe brevemente la observación de fracturas evidenciadas por teleanálisis, la distribución de la sismicidad en la zona, así como también se resalta la existencia de deslizamientos; en base a estas observaciones ellos concluyen que el “sistema Sepina” se comporta como una estructura geodinámica bastante activa.

Si bien el trabajo anterior no puede llegar a conclusiones más concretas, **los datos y observaciones que contiene se revelarían**, con posterioridad, **concordantes con** la ocurrencia de **dos sismos de fuerte magnitud** en los meses siguientes, los que **afectaron al poblado de Maca** y el sector de Sepina.

Años después del fin del proceso eruptivo del volcán Sabancaya, Pritchard & Simons (2002) presentan un interferograma del área inmediata (Fig 8), que obtienen utilizando imágenes que datan de Junio 1992 y Abril 1996, es decir en un lapso de tiempo que recubre parcialmente el tiempo de la erupción del Sabancaya (1990-1998). El área deformada, que alcanza hasta casi 7.8 cm de inflación máxima, resulta corresponder bien a la distribución de la sismicidad en la zona.

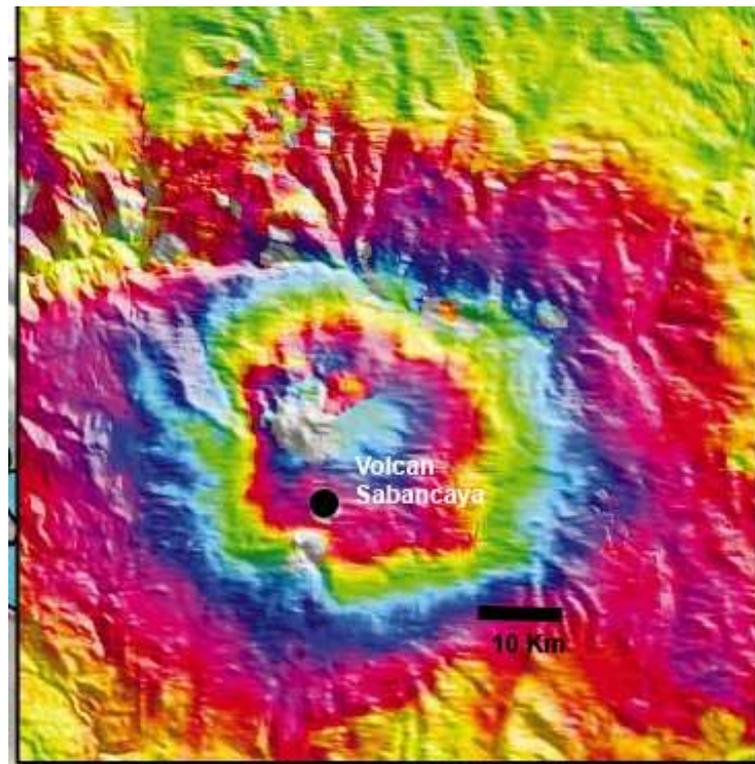


Figura 8.- Interferograma a partir de imágenes InSAR 4/96-6/92 de la zona Sabancaya-Hualca Hualca (Pritchard & Simons, 2002). Una inflación de casi 8 cm en su punto máximo ha sido registrada a inmediaciones del volcán Sabancaya, en el lapso de 4 años.

B9.- Conclusiones sobre el desarrollo de la erupción 1990-98 y la información científica recolectada.

1.- El proceso eruptivo estuvo antecedido por al menos **3 años y medio de “intranquilidad volcánica”** manifestada fundamentalmente por aumento notable de la sismicidad fuera del edificio volcánico y de emisiones fumarólicas al nivel del cráter.

2.- La **erupción 1990-98** del volcán Sabancaya fue **monitoreada por medio de instrumentos del Instituto Geofísico del Perú (IGP) y el Instituto Geofísico de la Universidad Nacional de San Agustín (IG-UNSA)**, con la colaboración de vulcanólogos franceses, ecuatorianos y de USA. Se emplearon esencialmente redes de sismógrafos, mediciones de temperatura de las aguas termales, análisis de imágenes satelitales para observar el entorno del cráter y también todo el área ocupada por los edificios volcánicos Sabancaya y Hualca Hualca.

3.- La erupción alcanzo **un nivel modesto, IEV 2 a 3**, pero causo daños en las cercanías al volcán, especialmente aquellos lugares situados a menos de los 20 km de distancia. **Los mayores daños fueron causados por los 2 terremotos que afectaron Maca** y otros pueblos del valle del Colca, así como otros asentamientos humanos cercanos. El terremoto 5.1 ML de Maca del 23/07/1991 provoco la muerte de 15 personas y la destrucción de todo el pueblo. El terremoto 4.7 ML de Sepina del 01/02/1992 provoco el colapso de modestas viviendas de algunos caseríos situados al NE del volcán.

4.-Las **cenizas** expelidas durante las numerosas explosiones y dispersadas por el viento reinante, **provocaron contaminación diversa y daños en la flora y fauna** próxima al volcán. Afectaron también a la **salud de los pobladores** que vivían a proximidad del volcán (estancias, caseríos situados a menos de 20 km).

5.- Las **aguas** de manantiales y de ríos que discurren por la zona, mostraron **niveles moderados de contaminación**. Se ha observado la aparición de numerosos manantiales con temperaturas elevadas en las inmediaciones de los volcanes Sabancaya y Hualca-Hualca. En el sector de la Quebrada Huayuray se ha observado la **aparición de una fuente de agua que sale a alta temperatura** (más de 79 °C) y a presión. Esta fuente es conocida como “**geiser de Pinchollo**”.

6.- Imágenes satelitales SAR tomados entre 1992 y 1996 han puesto en evidencia que durante el periodo de erupción del volcán Sabancaya, **ocurrió una deformación de hasta 8 cm a proximidades del edificio volcánico**.

7.- A nivel de infraestructura en peligro, una **situación alarmante** ocurrió cuando **lahares (huaycos importantes) bajaron por el lado norte del Hualca Hualca en Octubre 1990 y Enero 1991 y casi dañan el canal de Majes por el sector de Pinchollo**. Ambos eventos constituyeron una seria amenaza a la seguridad del canal de Majes (“Canal 16”) que pasa transversalmente a esta quebrada a la altura de la cota 3670 metros de altitud. Los estudios realizados por el IGP han concluido que la principal causa de las avalanchas o huaycos fue el proceso acelerado del deshielo a causa del incremento del flujo de calor relacionado a la erupción del Sabancaya.

C) LA REACTIVACION DEL VOLCAN SABANCAYA 2013-2014

El contexto tectónico en el que se sitúa el volcán Sabancaya es particular. En efecto, el Sabancaya forma parte de un complejo volcánico (complejo Ampato-Sabancaya-Hualca Hualca) de gran extensión, el mismo que está incluido dentro de un área mucho más extensa en donde la actividad tectónica (fallamiento) es muy alta. Esta actividad ocurre en el denominado sistema de fallas de Huambo-Cabanaconde, con direcciones NO-SE y EO, que ha generado numerosos terremotos a lo largo de la historia en esta zona de los Andes.

Lo anterior significa que el ascenso de magma inmediatamente antes y durante un proceso eruptivo, resulta ser un elemento adicional que influye en la dinámica de la corteza en esta zona caracterizada por su alta sismicidad.

Por tanto, el escenario general para el área del volcán Sabancaya puede ser resumido de la siguiente manera: el ascenso de material magmático va a inducir, inicialmente, una intensa actividad sísmica en las áreas próximas al edificio volcánico, sobre todo en el sector E, NE, N y NO hasta distancias de 20 km; si el ascenso de magma persiste y tiene amplitud importante, la erupción finalmente se produce.

C1.- La “intranquilidad volcánica” observada desde Febrero 2013

Luego de cerca de quince años de reposo, desde fines de 2012 se observó un incremento notable de las emisiones fumarólicas. Esta intranquilidad se agudizó el **22-23 de Febrero 2013** con la ocurrencia de **4 sismos de 4.6, 5.2, 5.0 y 4.5 ML** en las inmediaciones del volcán, provocando además el colapso de 12 viviendas en Maca, poblado situado a 19 km al NE del cráter. En los días siguientes se registraron un promedio de 500 sismos VT por día, siendo la gran mayoría localizados a 6-12 km al noreste del cráter, fuera del edificio volcánico. Desde entonces, se observa una intensa actividad sísmica siempre fuera del área que ocupa el edificio volcánico, especialmente la zona al noreste, norte y noroeste del cráter, a distancias de hasta 25 km y con profundidades generalmente menores a los 15 km. Asimismo, por métodos interferométricos InSAR se ha detectado deformaciones en el suelo, que acompañan a estas mismas zonas de intensa actividad sísmica volcano-tectónica. Se ha observado también, una notable **actividad fumarólica** en la zona de cráter con alturas de pluma próximas a los 600m, de coloración blanquecina (vapor de agua), pero que en marzo 2013 mostro también coloraciones azulinas (**gas magmático SO₂**). Una visita in-situ al cráter en mayo 2013 constato la inexistencia de lava en el cráter ni de productos

sólidos en sus inmediaciones, descartándose así eventuales explosiones que pudieran haber ocurrido.

Durante los meses que siguieron, la actividad sísmica principal ha sido de “tipo fractura” (sismos VT) la cual ha sido intensa y constante. Esta actividad ha ocurrido principalmente lejos del volcán aunque en algunas oportunidades se ha observado actividad al nivel del edificio volcánico. Otro tipo de actividad sísmica observada ha sido aquella relacionada al “paso de fluidos” (sismos LP), que ha estado presente siempre pero no llegando a ser la más importante. Por otro lado, los sismos de “tipo híbrido” también se hicieron presentes, pero con mucho menor número e intensidad; estos solo estuvieron muy marcados a inicios de setiembre y antecedieron a la primera explosión registrada.

A continuación se describe las redes sísmicas instaladas (Fig 9), así como los datos obtenidos, análisis y sobre todo resultados alcanzados.

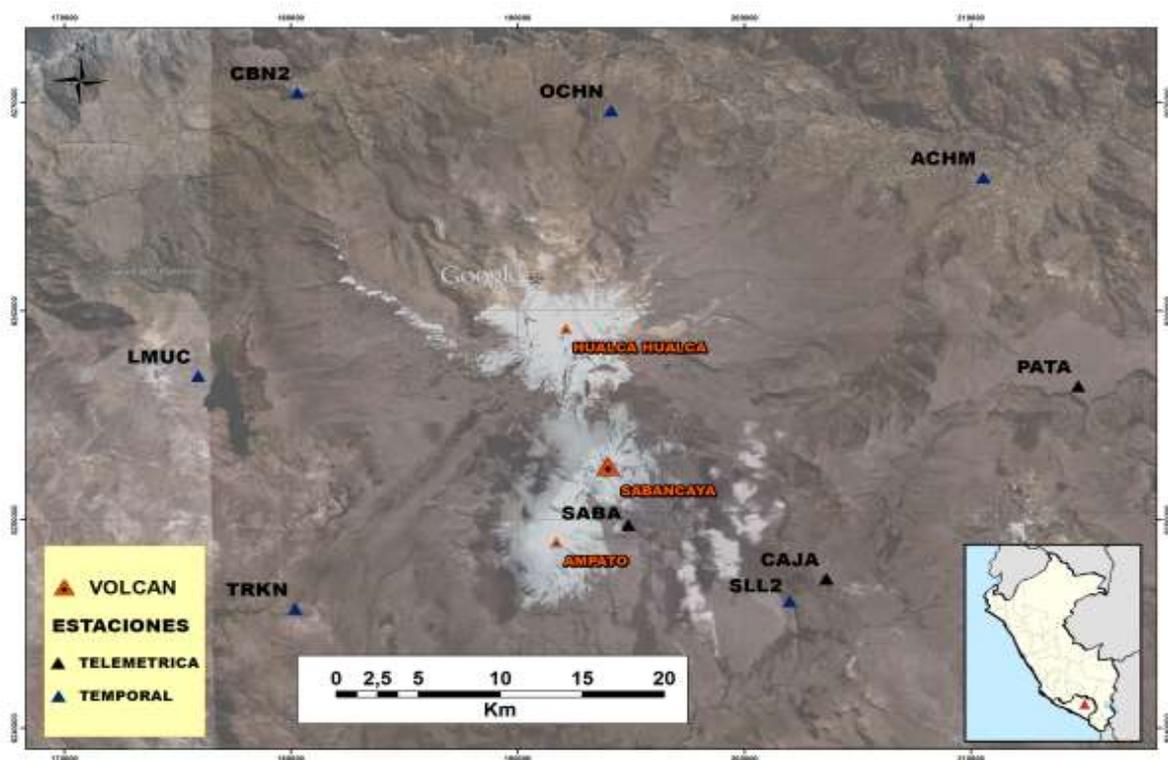


Figura 9. - Mapa de la región del volcán Sabancaya y las estaciones sísmicas del OVA-IGP



Figura 10.- Vista fotográfica aérea del volcán Sabancaya donde se observa el cráter activo actual, y dos notables domos en la zona de cumbre

C2.- Instalación de Red Sísmica-Telemétrica y Monitoreo Sísmico y de Deformación del suelo.

Atendiendo a la situación de intranquilidad que se presentó, el Observatorio Vulcanológico de Arequipa (OVA-IGP) **instaló a partir de Febrero una red de 6 modernas estaciones** sísmicas digitales portátiles, banda ancha. Adicionalmente, a partir del **24 de Marzo 2013** entró en operación la **Red Telemétrica Sabancaya (RESSAB)** que **consta de 3 estaciones: SABA, CAJA y PATA**, equipadas igualmente con **modernos instrumentos sísmicos y telemetría digital** (Figuras 11 y 12).



Figura 11.- Estación sísmica SAB (5200 msnm), de la red telemétrica del Sabancaya. Esta estación está muy cerca del cráter y está diseñada para el monitoreo en condiciones climáticas extremas. Los datos son enviados en tiempo real hasta el OVA-IGP



Figura 12.- Esquema de las redes de estaciones sísmicas-telemétricas que funcionan en tiempo real para la vigilancia de los volcanes activos del Sur del Perú. El Observatorio OVA-IGP centraliza la información.

Tan intensa ha sido la actividad sismovolcánica que entre Febrero a Julio 2013 se han registrado y clasificado un total de 15253 sismos. De ellos, 13485 (88.4%) fueron eventos volcano-tectónicos (VT) y 1328 (8.7%) son eventos de periodo largo (LP); se registraron también 440 eventos de tipo Híbrido (HIB), Tremores (TREM) y Tornillos (TOR) los que representan solo el 2.9% del total. De estos eventos, se ha logrado localizar 1655 eventos VT con magnitudes entre 1.0 a 5.7 ML. Estos sismos están preferencialmente distribuidos hacia los sectores NE y NO, a distancias entre 7 a 15km del cráter del volcán (Figs. 13 y 14).

Con el fin de tener un completo conocimiento de la dinámica actual en la corteza de la zona, se ha efectuado, también, estudios sobre la forma como se movieron las fallas en estos sismos. En la figura 13 se observa que los mecanismos de falla en los sismos mejor registrados.

Por otra parte, se ha usado datos de satélite para determinar cuáles son las zonas que presentan deformaciones del suelo. Esto se logra por medio del método InSAR, que ha sido aplicado gracias a colaboración del OVA-IGP con la Universidad de Cornell (USA).

Así, el mapa de la figura 13 incluye curvas concéntricas, de colores, que indican como y donde fueron las deformaciones del suelo en todo el área al noroeste y noreste del volcán (técnicamente, se trata de "interferogramas") entre Enero 2012 y Julio 2013. De esta manera, las características y efectos de los fuertes sismos que ocurrieron en la zona (sismos del 22 y 23 Febrero 2013, de magnitudes entre 4.5 y 5.2 ML, así como el sismo de 5.7 ML del 17 Julio 2013) no solo son estudiados por medio de la Sismología, sino también por medio de la Geodesia Espacial. Estos sismos, que tuvieron focos a menos de 6 km de profundidad, provocaron movimientos de fallas y deformaciones visibles en el terreno.

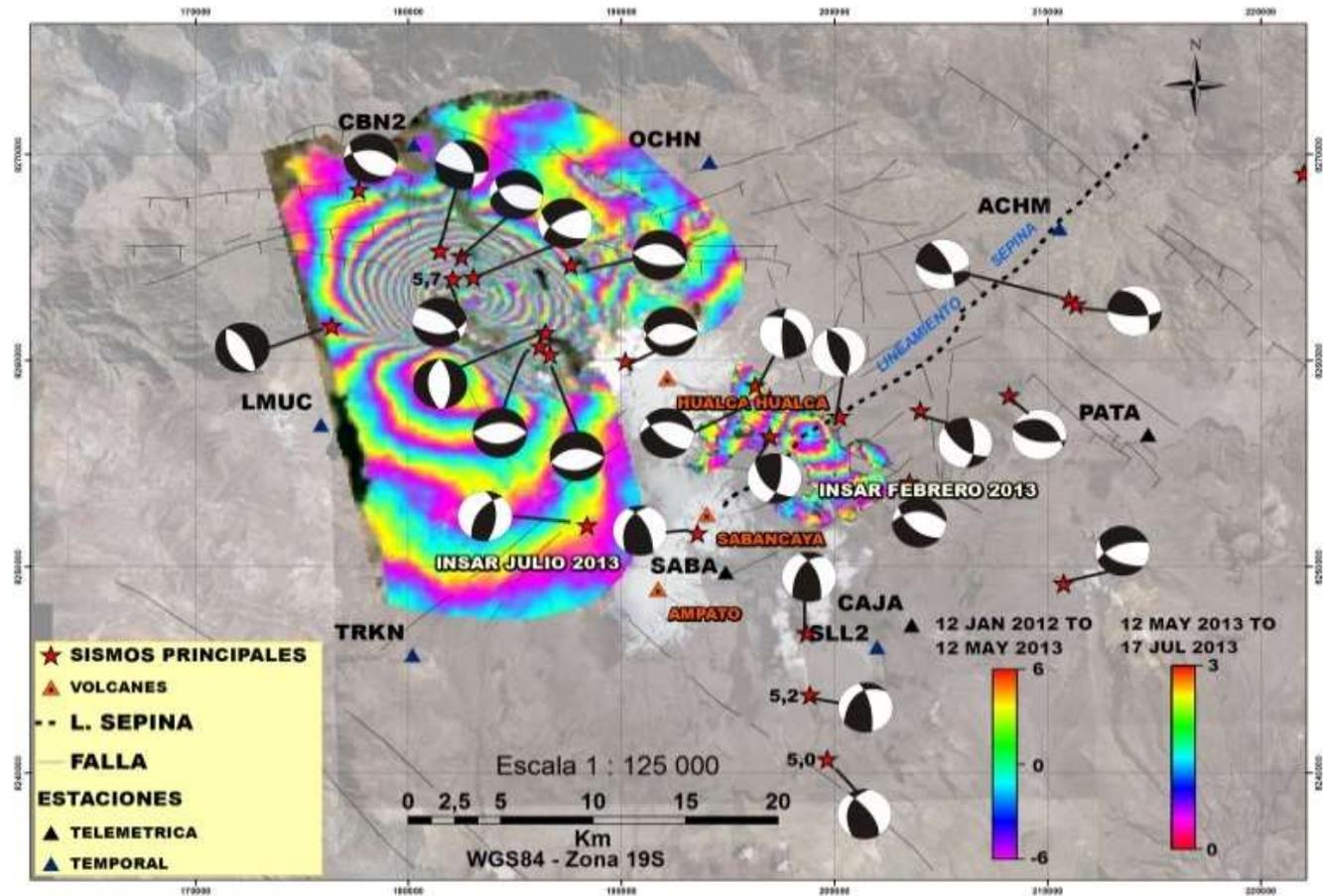


Figura 13.- Mapa tectónico y de mecanismos focales. La deformación del suelo, evidenciada por las imágenes satelitales InSAR coloreadas, corresponden a fallas normales. La imagen INSAR (12/01/2012-12/05/2013) corresponde a un fallamiento con buzamiento hacia el SO y una subsidencia de 6cm. La imagen INSAR (12/05/2013-17/07/2013) corresponde a un fallamiento con buzamiento hacia el NE y subsidencia de 17 cm.

C3.- Vigilancia migración de la sismicidad en el tiempo y en el espacio

Durante el tiempo de estudio 2013-2014, se ha observado que la sismicidad ha migrado tanto en el tiempo como en el espacio.

La figura 14 muestra la ubicación de tres zonas principales de focos sísmicos. Las zonas A, B y C corresponden a sismicidad ocurrida en Febrero-Marzo, en Marzo-Julio, y en Julio, respectivamente.

La figura 15 muestra un histograma donde se observa cómo evoluciona la sismicidad en el tiempo. Se ha podido observar que lo esencial de la sismicidad en Febrero-Marzo 2013 ocurrió al ENE del cráter a distancias entre 6 y 12 km (ver figura 14, Zona A), lo cual coincide con las deformaciones evidenciadas por InSAR (Fig 13).

En cuanto a la sismicidad en la Zona B, que está también situada el NE pero alejada del cráter, ella ha ocurrido sobre todo durante el mes de Junio, y no tiene asociada deformación alguna.

Finalmente, en la Zona C situada a unos 15 km al NO del cráter la intensa sismicidad ha deformado ampliamente el área (Fig. 13). Una característica notable es que los eventos ocurridos al inicio de la intranquilidad (22-23 Febrero 2013) han sido del tipo “swarm” (enjambre) y no del tipo “mainshock- aftershock”. En efecto, el 22 y 23 Feb 2013 han ocurrido en enjambre (4 sismos de 4.6, 5.2, 5.0 y 4.5 ML en el lapso de 24 horas). Un comportamiento similar se observó también el 16-17 de Julio con la ocurrencia de 3 sismos de 4.9, 4.2 y 5.7 ML en el lapso de 17 horas).

Aquí cabe indicar un aspecto importante en la vigilancia de procesos eruptivos usando la Sismología Volcánica. Uno de los más connotados investigadores científicos en materia de pronóstico de erupciones, Randall White (2011), ha mostrado que la ocurrencia de **sismicidad en “swarm” en ambientes volcánicos** es un **importante signo** de la **inminencia de actividad eruptiva**. Asimismo, este mismo autor ha mostrado que frecuentemente al inicio de la intranquilidad volcánica ocurre sismicidad de fractura (sismos de tipo VT) que se sitúa lejos del cráter, a algunos kilómetros de distancia y que pueden llegar a 30 km, estando en la base de tal fenómeno la transmisión de presiones de fluidos bajo o cerca del edificio volcánico. Las observaciones de la sismicidad que está ocurriendo en el volcán desde Febrero 2013 hasta la fecha, así como las observaciones de actividad fumarólica incesante al nivel del cráter nos muestran que en el volcán Sabancaya está siguiendo el patrón indicado por White (2011) (Figuras 16 A y B). Se debe señalar, sin embargo, que los cambios (o pasos) de sismicidad que llevan hasta la erupción no se están produciendo a la

velocidad que ocurren en la mayor parte de volcanes, sino que es mucho más lenta. En general, se está repitiendo la “lentitud” que ya se observó en el volcán Sabancaya en los años 1986 a 1990, cuando la actividad mostraba un incremento pero siempre moderado y, finalmente, llegó la erupción con explosiones freatomagmáticas y magmáticas después de Mayo 1990.



Figura 14a. Fotografías que ilustran la incesante actividad fumarólica del volcán Sabancaya en 2013 y en 2014. La pluma de gases y vapor de agua se eleva entre 500 y 2000 m de altura por encima del cráter. En general se trata de gases blanquecinos (asociados a vapor de agua) pero esporádicamente se presentan algunos días donde los gases azulinos asociados al gas magmático SO_2 predominan (foto arriba derecha)

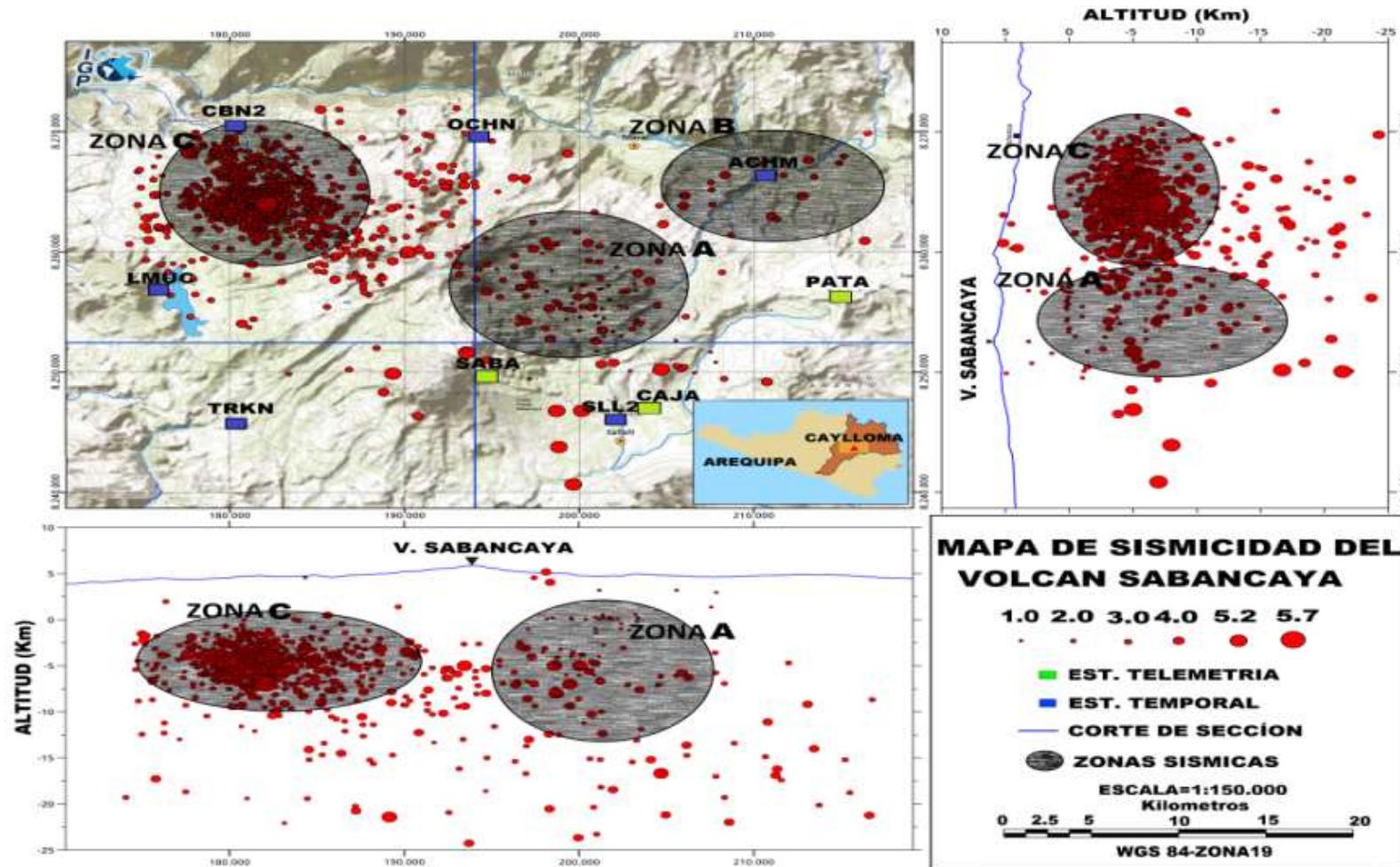


Figura 14b. -Distribución de la sismicidad en la zona del volcán Sabancaya desde 2013. Se observa claramente la distribución 3 zonas sísmicas.

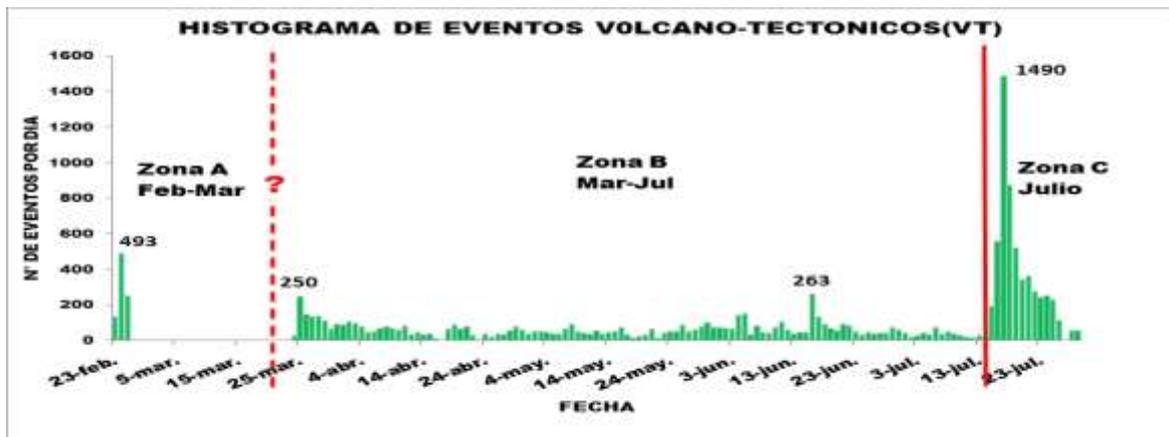


Figura 15.- Número de eventos VT y evolución en el tiempo (Puma et al, 2014).

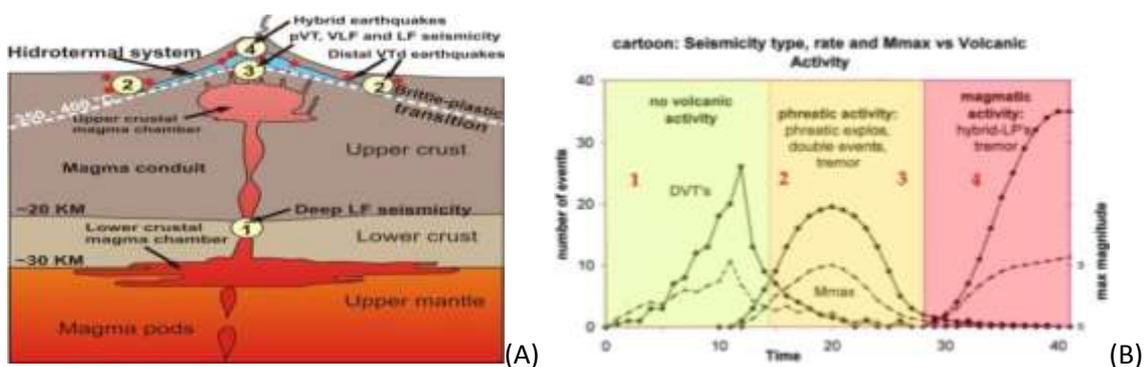


Figura 16. Modelo geológico basado en Fournier (1999) y White (2011) que ilustra la sismicidad asociada a erupciones.

El esquema (A) muestra la localización en etapas de la sismicidad dominante vs la actividad volcánica que se observa en (B). Los números 1, 2, 3 y 4 indican la ubicación y tipo de sismicidad durante la evolución hacia la erupción.

C4.- Modelo de la evolución del proceso que se observa actualmente en el volcán Sabancaya.

Se ha realizado un modelo esquemático (Fig. 19) para explicar la evolución de la sismicidad VT y deformaciones observadas en el tiempo y el espacio. Aun cuando en el esquema se ha considerado el modelo de Fournier (1999) y White (2011) (ver figura 16), pensamos que se debe tener en cuenta los importantes esfuerzos tectónicos que afectan permanentemente a esta parte de los Andes.

El modelo

Una intrusión magmática ha iniciado su manifestación en superficie y ha causado actividad en la Zona A (Febrero-Marzo 2013). Considerando los 4 sismos consecutivos de magnitudes 4.6, 5.2, 5.0 y 4,5 ML es posible que la intrusión haya sido rápida pero de poco volumen; ella habría inducido la transmisión de la presión de fluidos lateralmente ocasionando reactivación de fallas situadas hacia el NE durante Febrero-Marzo, y causado deformación en superficie.

De Marzo a la primera quincena de Julio 2013, la intrusión se mantiene muy moderada y solo genera sismicidad leve, sin generar deformación en superficie (Zona B, así como sismos dispersos).

En la segunda quincena de Julio 2013 ocurre un nuevo ascenso importante de magma que va ocasionar la amplia y enérgica sismicidad superficial con epicentros al NO del cráter, causando fuerte deformación en superficie (Zona C). En este sector se encuentran fallas tectónicas muy activas, las que muy posiblemente se reactivaron inmediatamente al recibir presiones provenientes de fluidos con origen magmático.

En los meses posteriores, y hasta la actualidad, la intensa sismicidad superficial ha continuado a lo largo de diversas fallas situadas principalmente en los sectores NO, N, NE y E del volcán, a distancias entre 5 y 20 km. (Figuras 17 y 18)

Como se puede resumir, hasta ahora los sismos de fractura (volcanotectónicos o VT) han sido superficiales y con epicentros fuera del volcán (preferentemente al NO, N, NE y E). Solo en contadas oportunidades los focos sísmicos se situaron bajo el mismo edificio volcánico. Esto significa que los conductos internos que llegan hasta la zona de cráter continúan presentando un alto grado de obstrucción.

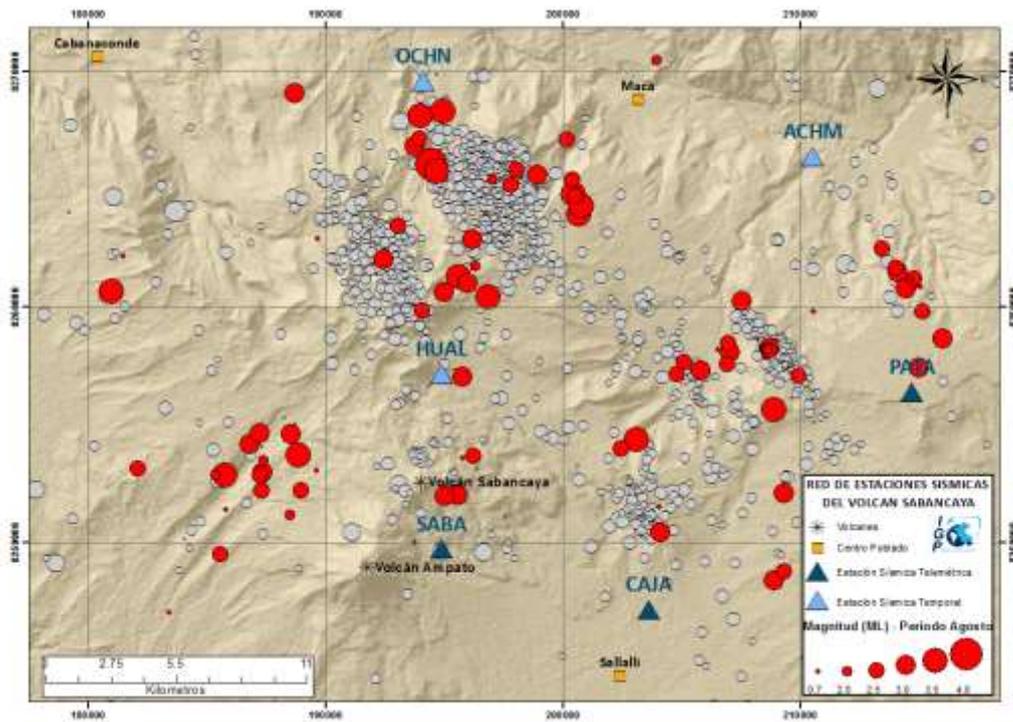


Figura 17.- Ejemplo de mapas de sismicidad que publica el OVA-IGP, donde se aprecia la intensa sismicidad que está ocurriendo entre Mayo-Setiembre 2014 en las inmediaciones del volcán Sabancaya.

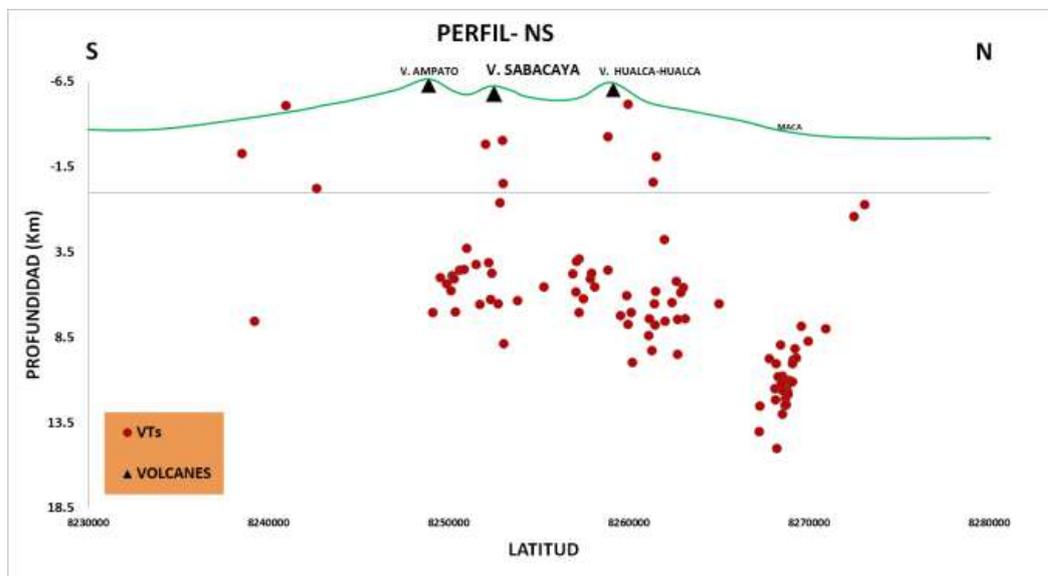


Figura 18.- Ejemplo de corte o perfil sísmico que muestra la ubicación de los sismos y su profundidad en la zona del volcán Sabancaya en las 2 primeras semanas de Setiembre 2014.

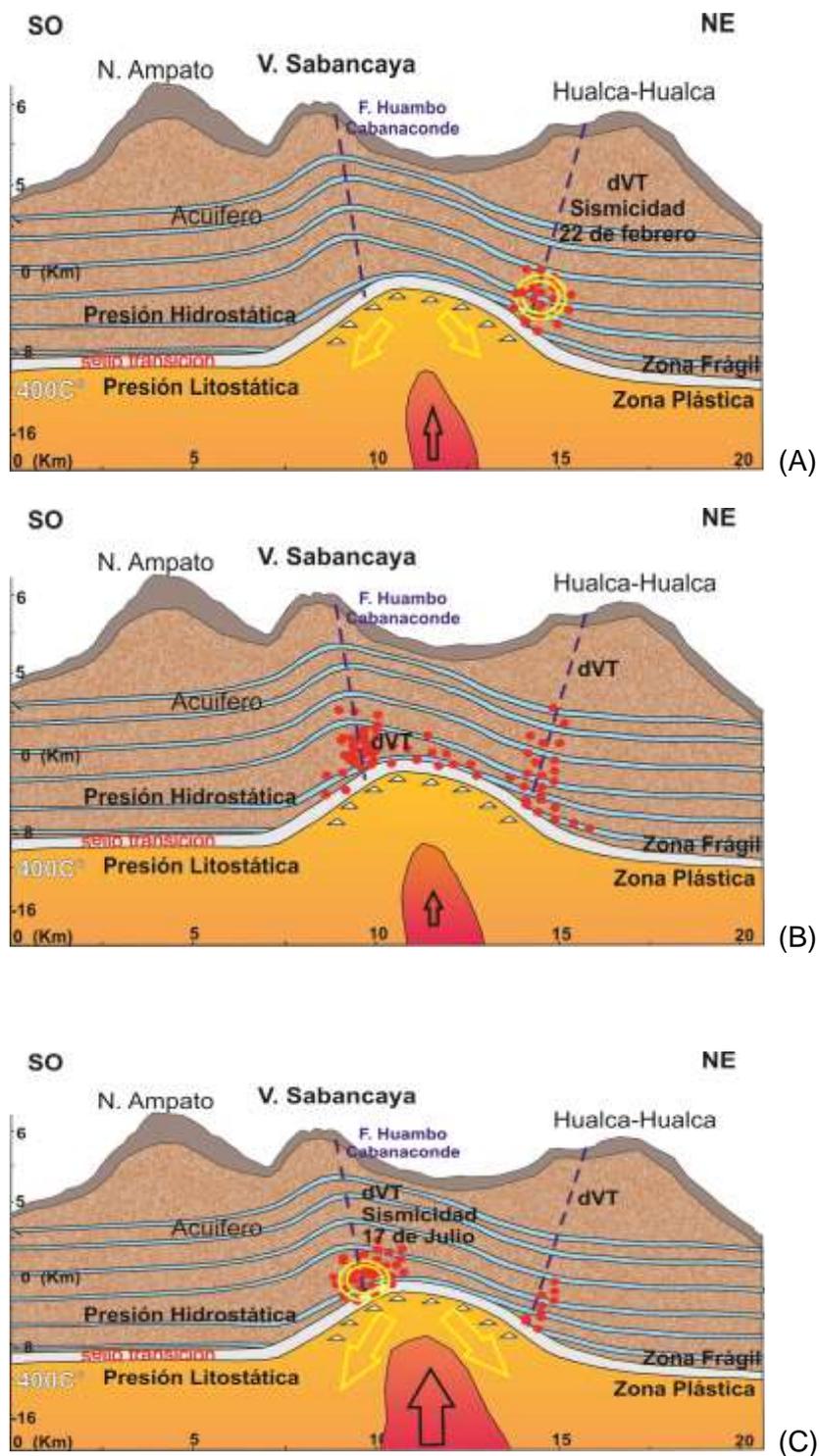


Figura 19.- Modelo esquemático (a partir de Fournier (1999) y White (2011)), que ilustra la evolución de la sismicidad VT en la zona del volcán Sabancaya entre Febrero y Julio 2013. A) Etapa de intrusión magmática relativamente rápida y sismicidad al NE. B) Intrusión y sismicidad limitadas. C) Etapa de intrusión magmática y actividad sísmica mayores. Epicentros a 15 km al NO del cráter. La sismicidad VT esta principalmente asociada a la transmisión de presiones de fluidos.

No obstante, en algunas ocasiones (tiempos variables, que pueden durar horas o días) se ha observado incremento tanto en el número y energía de sismos asociados a subida de magma (sismos Híbridos) como también incremento de fumarolas y cambio de coloración en ellas. Lo anterior indica que pulsos de magma han estado presionando y limpiando limitadamente el camino (conductos) para que el magma alcance la superficie. Pero, hasta ahora, este avance no ha sido franco.

En este contexto es que ha ocurrido ya las dos primeras explosiones en el volcán. Estas explosiones han sido de tipo freático.

C5.- Primera Explosión freática ocurrida en el volcán Sabancaya

Hasta el momento, dos explosiones han sido registradas por la red sísmica del OVA-IGP. Estas explosiones ocurrieron a nivel del crater en el volcán Sabancaya, una el 09 y otra el 25 de Agosto.

El día **09 de Agosto 2014** a las 04 horas 29 minutos y 16 segundos, hora local, sobrevino la **primera explosión en el volcán Sabancaya** (Figs 20 y 21). La explosión tuvo una energía sísmica de 9083 MJ y una duración de 50 segundos. Esta explosión ha sido de tipo freático y ha debido eyectar una columna de cenizas. Al haber ocurrido en horas de la noche, la explosión no ha podido ser vista, además que la cobertura nubosa es muy densa actualmente en la zona y la visibilidad difícil incluso de día.

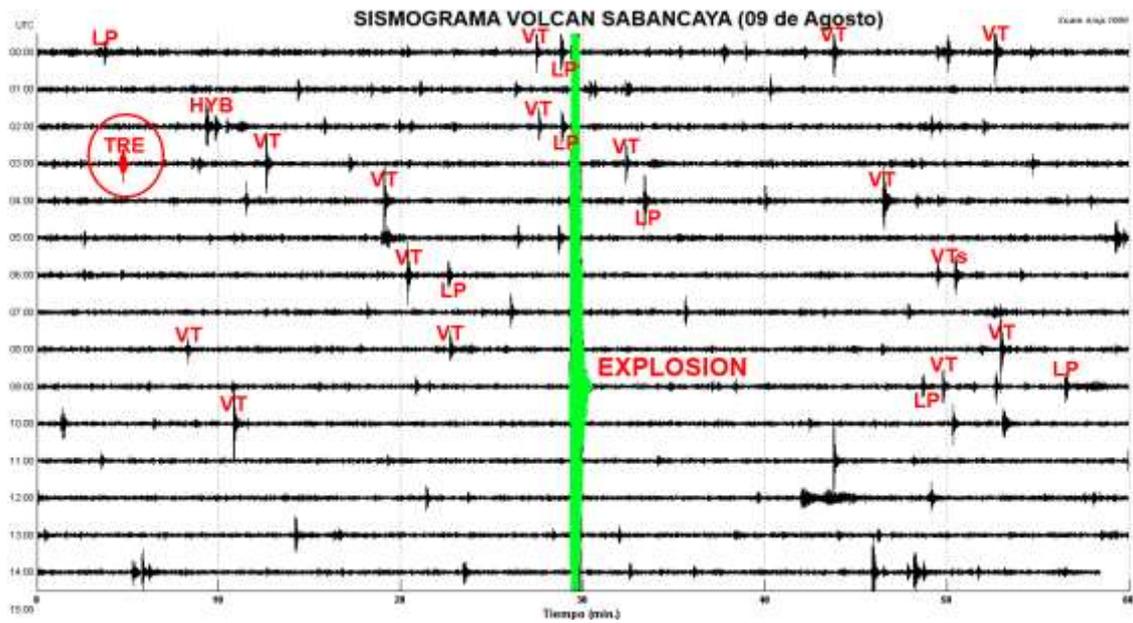


Figura 20. - Sismograma del 9 de agosto de la estación sísmica SAB situada a 3 Km. del cráter. Los sismos VT y el pequeño tremor precedieron a la primera explosión registrada en el Sabancaya.

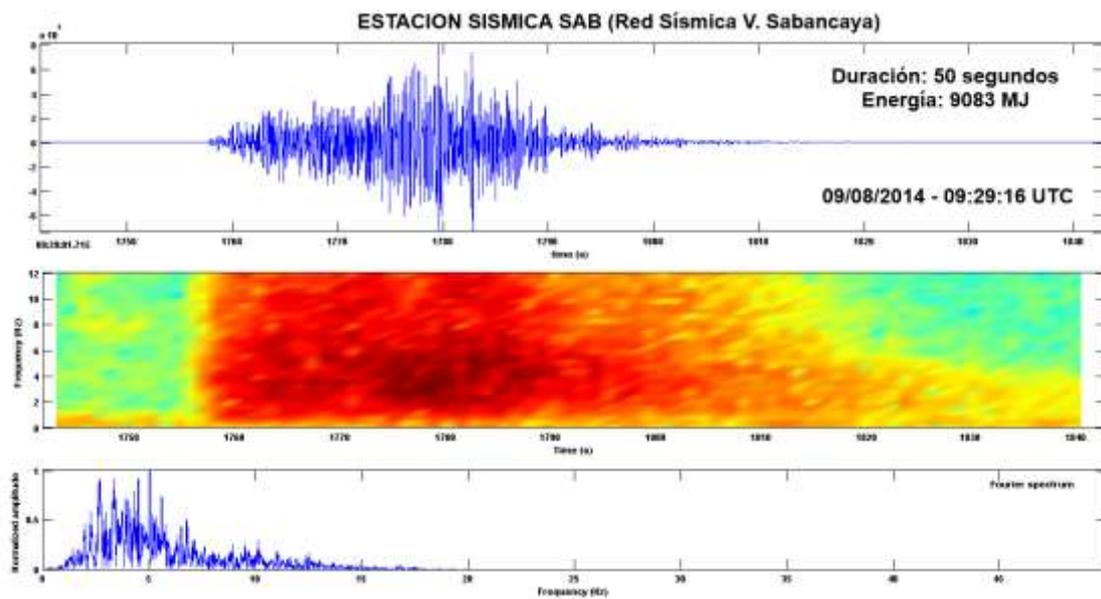


Figura 21. - Sismograma de la primera explosión ocurrida en el volcán Sabancaya.

Estas explosiones se han producido en medio de muchos meses de actividad incesante, tal como se observa en las figuras 22 y 23. En el desarrollo de numerosos procesos eruptivos, se ha observado que las explosiones son precedidas por señales sísmicas de tipo híbrido (White, 2011), y en el caso de la erupción del volcán peruano Ubinas, también se ha observado este patrón sísmico (Coppola et al, 2014). En el monitoreo que se está efectuando para el volcán Sabancaya, hasta ahora hemos observado que también puede identificarse sismos de tipo híbrido en concordancia con la actividad en ascenso. Es así que el día 02 de Agosto se registró la más altas energías y numero de híbridos y, 7 días después ocurrió la primera explosión en el volcán Sabancaya.

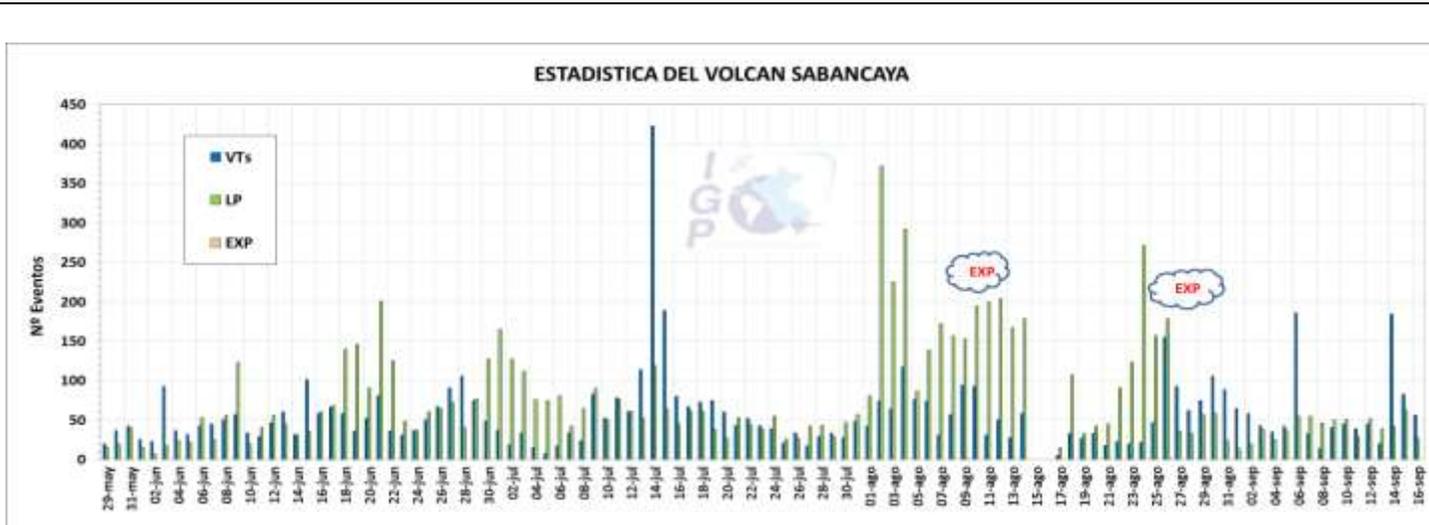


Figura 22.- Histograma de eventos sismo-volcánicos VT (volcano-tectonicos), LP (largo periodo) y Explosiones registrados desde el 29 de Mayo hasta el 16 de Setiembre del 2014. Se observa una actividad intensa e incesante en inmediaciones del volcán Sabancaya.

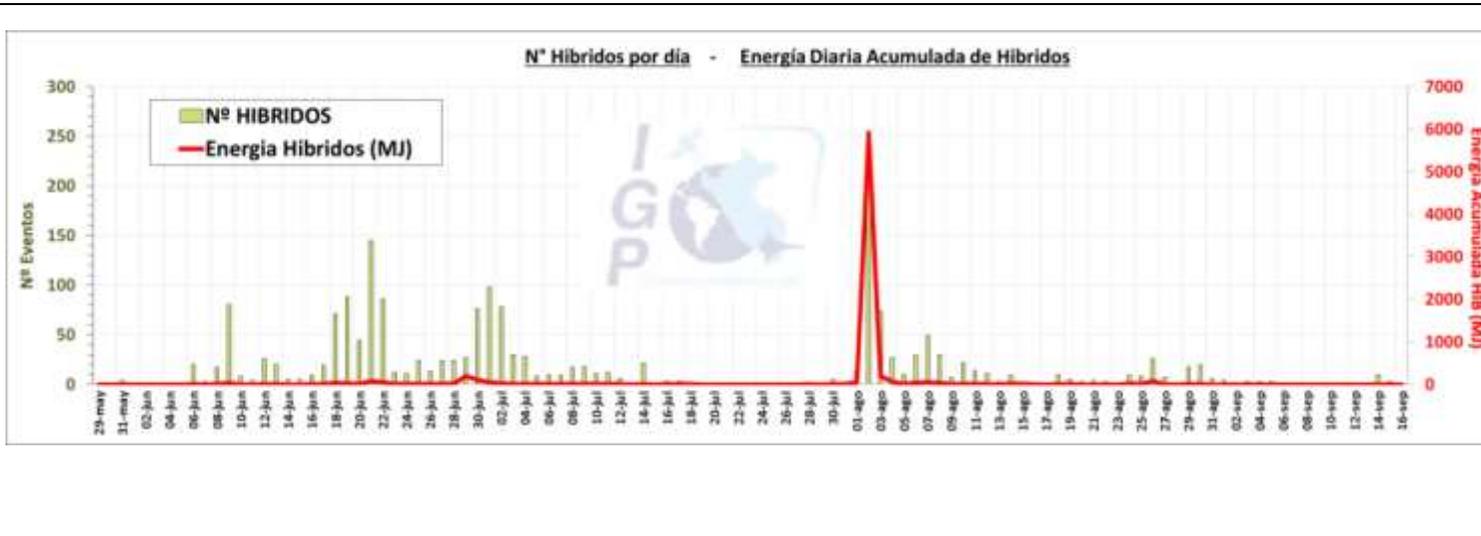


Figura 23.- Histograma de eventos sísmicos de tipo híbrido (asociados a ascenso de magma) registrado en el volcán Sabancaya. El día 02 de agosto se observó el máximo pico de sismos Híbridos, y siete días después ocurrió la primera explosión freática del volcán Sabancaya

C6.- Segunda explosión freática ocurrida en el volcán Sabancaya

Dos semanas después de la primera explosión, el **día 25 de Agosto a las 20:39** hora local ha ocurrido una **segunda explosión freática**, con una energía de 1151 Mega Joules, es decir de menor magnitud que la primera, pero de mayor duración (82 segundos). Este evento fue en realidad la forma de una cadena de eventos explosivos.

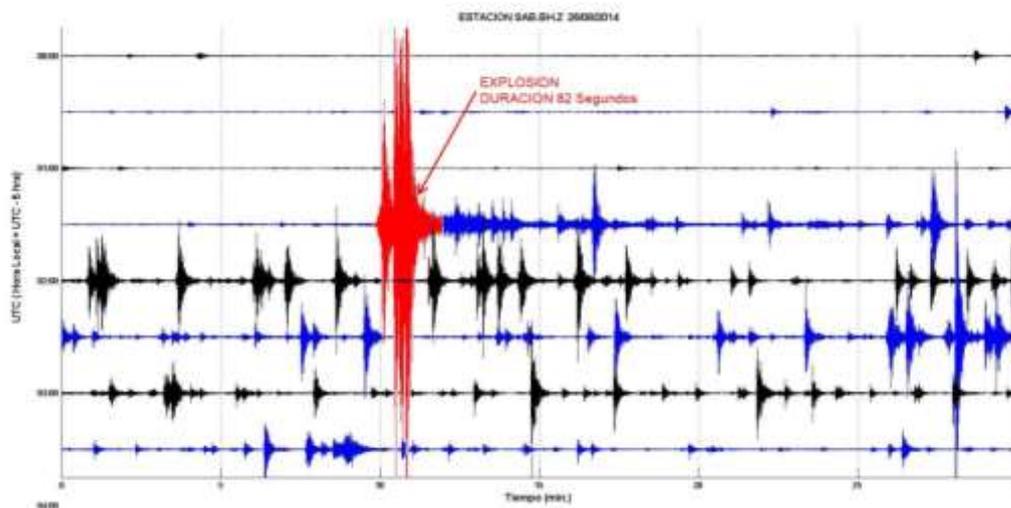


Figura 24.- Sismograma del 25 de agosto de la estación sísmica SAB situada a 3 Km. del cráter. Cuatro eventos explosivos en cadena, ocurrieron en el cráter, y fueron seguidos de numerosos sismos energéticos por varias horas. La energía calculada para esta cadena de eventos es de 1151 MJ, y tuvieron una duración total de 82 segundos.

Conclusiones acerca de la reactivación del volcán Sabancaya 2013-2014

- Miles de eventos sísmicos han sido registrados y clasificados gracias a la red de estaciones sísmicas que el OVA-IGP ha instalado y operado desde Febrero 2013 en inmediaciones del volcán Sabancaya y valle del Colca.
- Entre el inicio de la intranquilidad (Febrero 2013) y Julio 2013 se identificaron 3 zonas de sismicidad (Zona A, Zona B y Zona C) pero en tiempos y lugares diferentes, es decir es se trata de sismicidad migrante que se ubica entre 6 y 15 km del cráter. En esta sismicidad resaltan dos enjambres energéticos: (a) los 4 sismos del 22-23 de Febrero con magnitudes entre 4.5 y 5.2 ML, y (b) los 3 sismos del 16-17 de Julio con magnitudes entre 4.2 y 5.7 ML.

- La sismicidad posterior a Julio 2013 ha seguido siendo migrante, dispersa en todo el área. Solo en pocas oportunidades se ha acercado al mismo edificio volcánico Sabancaya.
- La sismología (mecanismos focales de los sismos) y la deformación del suelo (interferometría SAR, satelital) del área de estudio muestran que los sismos corresponden esencialmente a fallamiento acorde con la tectónica observada sobre los Andes.
- Todas estas características observadas en la ocurrencia y distribución de la sismicidad están acorde con el modelo propuesto por Randall White (2011) que describe los patrones de sismicidad en ambientes volcánicos con inminente erupción.
- En base a los datos sísmicos y de interferometría, así como de observaciones de las emisiones fumarólicas, se ha construido un modelo esquemático que explica la evolución de la sismicidad hasta ahora observada, y donde se ha considerado que el volcán Sabancaya presenta intranquilidad, con amplia sismicidad de fractura (VT) lejos del cráter, y que debería conducir a un proceso eruptivo en los meses siguientes. La siguiente etapa sería la aparición de sismicidad de baja frecuencia (LPs) e híbridos en tasas importantes.
- Para el volcán Sabancaya, la previsión (pronóstico) de la evolución de la actividad sismovolcánica, que el OVA-IGP ha hecho conocer desde Febrero 2013, se está cumpliendo hasta la fecha. Es decir:
 - Una sismicidad intensa inicial, que viene en forma de enjambre (“swarm”). Este tipo de sismicidad ha ocurrido, especialmente los días 22-23 de Febrero y el 16-17 de Julio 2013.
 - Una sismicidad de tipo “fractura” (denominada también tipo VT) en fallas cercanas y lejanas al edificio volcánico. Esta sismicidad está ocurriendo actualmente en forma diaria.
 - Una sismicidad de tipo “paso de fluidos” (denominada también tipo LP) en inmediaciones del cráter. Esta sismicidad está ocurriendo actualmente en forma diaria.
 - Una sismicidad de tipo “Híbridos” (asociada directamente a ascenso de magma) que ocurre únicamente a proximidades del cráter. Esta sismicidad ocurre actualmente pero en forma esporádica. La máxima actividad de este tipo ha ocurrido el día 02 de Agosto, y una semana después ocurrió la primera explosión del volcán Sabancaya.

D) EVALUACION DEL PELIGRO VOLCANICO EN EL AREA DEL VOLCAN SABANCAYA

Aproximadamente **30,000 habitantes viven en los valles** que drenan desde el volcán Sabancaya (en un radio de 30 km alrededor del volcán). Por el adyacente valle del Colca pasa el principal canal de irrigación del sur del Perú (canal Majes), y en las inmediaciones esta también una línea de transmisión eléctrica importante, la línea Socabaya-Mantaro del sistema eléctrico interconectado del sur del Perú. Las principales actividades económicas de la zona son la agricultura, la ganadería y el turismo; este último desarrollado en torno al cañón del Colca, viene experimentando un crecimiento acelerado. En caso de erupción, toda la zona podría verse comprometida, probablemente con similar intensidad a lo ocurrido en 1990-98, y podría ser alcanzada por caídas de tefras y por lahares, afectando a los terrenos de cultivo, viviendas y obras civiles importantes.

La **evaluación del peligro volcánico** en una zona de gran actividad volcánica, como es el caso del territorio sur peruano, se hace **principalmente en base a datos o registros de erupciones históricas, y** datos o registros geológicos de antiguas erupciones. Este ejercicio de evaluación del peligro volcánico asume en general que las zonas afectadas por la próxima erupción serán esencialmente las mismas que fueron afectadas en el pasado cercano. **Los resultados son plasmados en mapas de zonificación de peligros volcánicos**, los que proveen los elementos básicos para la planificación del desarrollo y el ordenamiento territorial.

Los estudios realizados por el IGP en colaboración con el IRD desde los años 90 dieron como resultado numerosas publicaciones científicas y de divulgación acerca de la historia eruptiva de estos volcanes, determinada tanto por la geología como por recopilaciones históricas. Asimismo, los estudios efectuados por el IGP permitieron la confección, por primera vez, de sendos Mapas de Peligro Volcánico. Estos mapas fueron publicados periódicamente por el Instituto de Defensa Civil (INDECI) dentro de los Atlas de Peligros Naturales. Posteriormente, este tipo de trabajo ha estado siendo actualizado por geólogos del Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, y por nuevos datos aportados en recientes publicaciones científicas.

Peligro Potencial del volcán Sabancaya

El volcán Sabancaya estuvo inactivo por más de 200 años antes de que, finalmente, hiciera erupción nuevamente en mayo de 1990. La erupción se prolongó hasta mediados de 1998. Los principales estudios acerca de esta erupción fueron realizados por el grupo científico del Instituto Geofísico del Perú, el Instituto Geofísico de la UNSA y el Instituto de Investigación para el Desarrollo (IRD) de Francia.

Siendo necesario contar con mapas de peligro a fin de manejar la crisis, los primeros mapas, tales como el mapa de peligros publicado por Rodríguez et al (1990b), se confeccionaron con información incompleta, pero que ayudaron de manera importante en la toma de decisiones de la época. Posteriormente un nuevo mapa ha sido publicado (Figura 25) por el IGP en el Atlas de Peligros de INDECI (2003). Se trata de un mapa preliminar preparado por Thouret et al (1995), en el marco de la cooperación IGP-IRD. Los datos recopilados durante el estudio de la erupción en curso en 1990, en especial la distribución espacial de los productos volcánicos, sirvieron para la confección de este mapa.

Para un escenario de riesgo o daño potencial de una erupción muy importante, de tipo paroxismal (IEV de 5-6), Thouret et al (1995) han estimado que la tefra afectaría un área de más de 2,000 km², volúmenes grandes de flujos piroclásticos se extenderían por amplias áreas alrededor del cráter hasta distancias de 9-11 km valle abajo, pudiendo ocasionar lahares que afectarían varias decenas de kilómetros. Este tipo de erupción es, afortunadamente, poco probable en el caso del Sabancaya.

Una erupción de esta explosividad podría ocasionar fenómenos extremos como derrumbes y/o avalanchas de material suelto y escombros, incluso explosiones laterales, etc. En el mapa esquemático del peligro potencial para una erupción con este IEV, que se presenta en el mapa publicado en el **Atlas de INDECI (2003)**, se puede observar que muchos centros poblados a lo largo del valle del Colca serían afectados de manera importante. La ciudad de Arequipa no estaría al abrigo de los productos emitidos por el volcán Sabancaya, pues sería afectada con depósitos de al menos 1 cm de ceniza volcánica. Los lahares o flujos de lodo afectarían los valles del Colca, Majes, Sihuas y las quebradas aledañas.

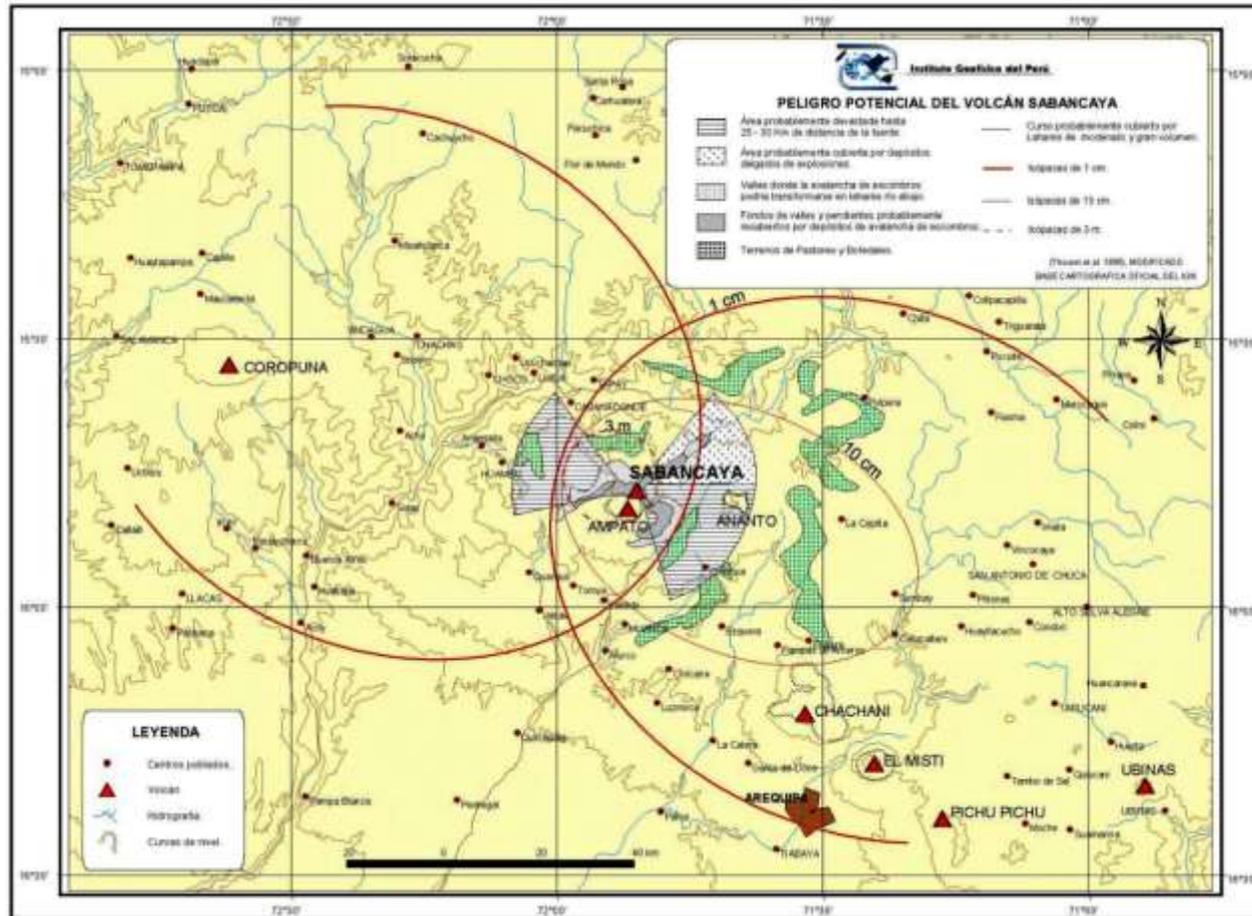


Figura 25.- Mapa del Peligro Potencial del volcán Sabancaya para un escenario de IEV igual a 5-6 (Thouret et al., 1995), publicado por el IGP en el Atlas de Peligros de INDECI (2003).

Recientemente el INGEMMET ha retomado los estudios efectuados por el IGP-IRD, y se ha obtenido mapas de peligro que integran escenarios con mayor probabilidad de ocurrencia, como son erupciones vulcanianas con VEI 1-2 y erupciones efusivas, erupciones vulcanianas y sub-plinianas con VEI 3, y erupciones plinianas con VEI 4-5. Mariño (2012) considera un mapa de peligros para la zona proximal del volcán Sabancaya (Figura 26) donde la zona de alto peligro, en color rojo, se encuentra entre 1.5 y 3.5 km de distancia del cráter; la zona de moderado peligro, de color naranja, se encuentra entre 3 y 6 km del volcán; y la zona de bajo peligro, en amarillo, esta entre 9 y 12 km del volcán. En este mapa se ha integrado la información sobre peligro por lahares, realizado por Bellot (2011) para el volcán Sabancaya .

En estos mapas no está considerado el peligro por sismos importantes asociados a la actividad volcánica. Actualmente ya sabemos que, de acuerdo a los registros sísmicos obtenidos en los años 1990-98 y 2013-2014, la zona de mayor actividad sísmica influenciada por la actividad volcánica es la zona al NO, N, NE y E del volcán, hasta distancias de 20 km, es decir el área entre el volcán y el valle del Colca.

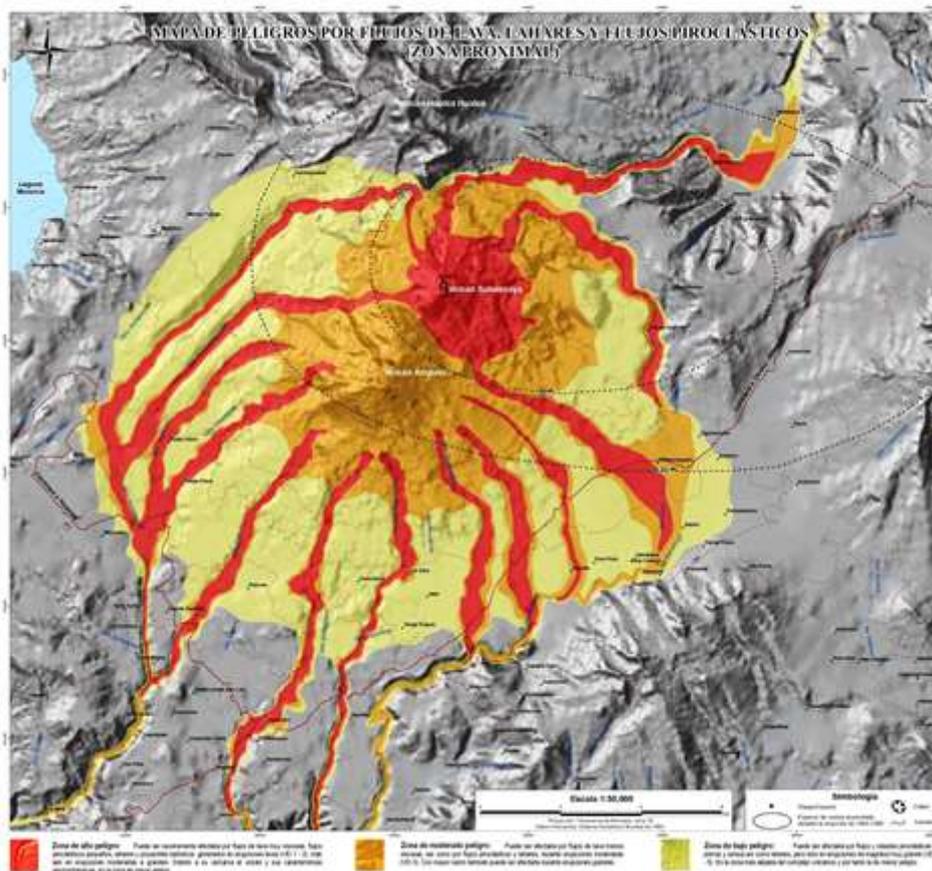
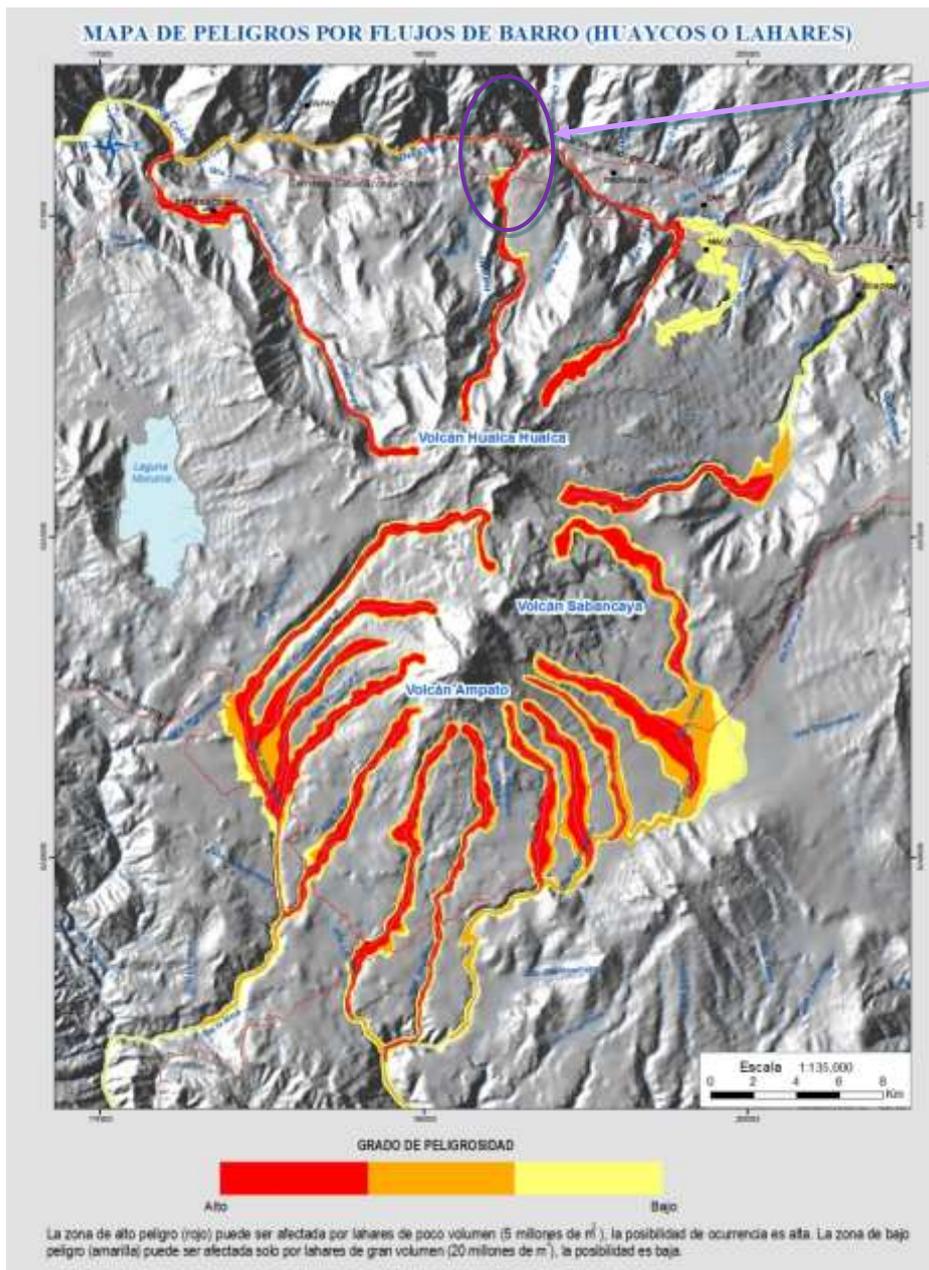


Figura 26.- Mapa de peligros de la zona proximal en el volcán Sabancaya (Mariño et al, 2012), considerando flujos de lava, lahares y flujos piroclásticos.



Lahares por el sector de Pinchollo, que en 1990-91 amenazaron seriamente al canal de Majes

Figura 27.- Mapa de peligros por lahares y huaycos, asociados al volcán Sabancaya (Mariño et al, 2012). Se ha señalado (circulo en lila) el lugar donde, en 1990-98, se observaron huaycos importantes que bajaron por la quebrada Huayuray que desemboca a la altura de Pinchollo.

Conclusiones acerca del Peligro Volcánico asociado al volcán Sabancaya

Desde los años 80-90 el IGP ha trabajado en los estudios científicos de base que han permitido levantar mapas de peligro para el volcán Sabancaya. Un primer mapa, publicado por Rodríguez (1990) con ocasión de la casi inesperada erupción del volcán, fue de gran utilidad para la gestión de la crisis de ese tiempo.

Posteriormente, el IGP en colaboración con el IRD levantaron otros mapas basados en mayores datos científicos. Finalmente, en años recientes el INGEMMET ha retomado el trabajo realizado y ha publicado mapas de peligro que resumen lo anteriormente observado. Los peligros más importantes asociados a la actividad eruptiva del volcán Sabancaya pueden resumirse a lo siguiente:

- La caída de tefras (principalmente cenizas), puede afectar áreas importantes llegando a distancias de 20 o 30 km del cráter. La dirección predominante de dispersión es hacia el Este y el Oeste, así como también hacia el ONO y ESE.
- Los flujos de lodo o lahares pueden afectar zonas alrededor del volcán Sabancaya. Sin embargo, las zonas que han presentado mayor peligro por lahares durante la erupción de 1990-98 han sido los sectores próximos a los flancos septentrionales del nevado Hualca Hualca. La quebrada Huayuray que desemboca hacia Pichollo es la zona de mayor cuidado.
- Los demás peligros, tales como coladas de lava, gases volcánicos, etc afectarían sobre todo a las zonas muy próximas al volcán, las que no son habitadas.
- Un peligro que existe pero que está considerado en estos mapas es el peligro por sismos importantes asociados a la actividad volcánica. De acuerdo a la información registrada durante los años 1990-98 y 2013-2014, la zona de mayor actividad sísmica influenciada por la actividad volcánica es la zona al NO, N, NE y E del volcán, hasta distancias de 20 km.

E) INFORMACION PERMANENTE SOBRE EL ESTADO DEL VOLCAN Y PRONOSTICO DE ACTIVIDAD

E1.- Pronósticos a “corto plazo”

El OVA-IGP ha desarrollado desde 2006, con ocasión de la vigilancia de la erupción del volcán Ubinas, métodos geofísicos que permiten dar pronósticos del comportamiento eruptivo de un volcán, así como pronósticos de eventos importantes tales como explosiones inminentes.

Durante la erupción del volcán Ubinas 2006-2009, se observaron señales sísmicas curiosas e interesantes: se trataba de “sismos precursores” de explosiones inminentes. Son sismos conocidos como de tipo “Largo Periodo” o LP. Estos sismos se presentaban en forma de enjambres pocas horas antes de la ocurrencia de explosiones del volcán. Al estudiar dichas señales pudimos determinar sus características precisas, de manera que se logró establecer un procedimiento de identificación de la inminencia de explosión, lo cual fue utilizado para eventualmente emitir la “alerta de explosión inminente” dirigido a las autoridades encargadas de la gestión de la crisis. Esta alerta fue dada al COER-Moquegua en diversas oportunidades.

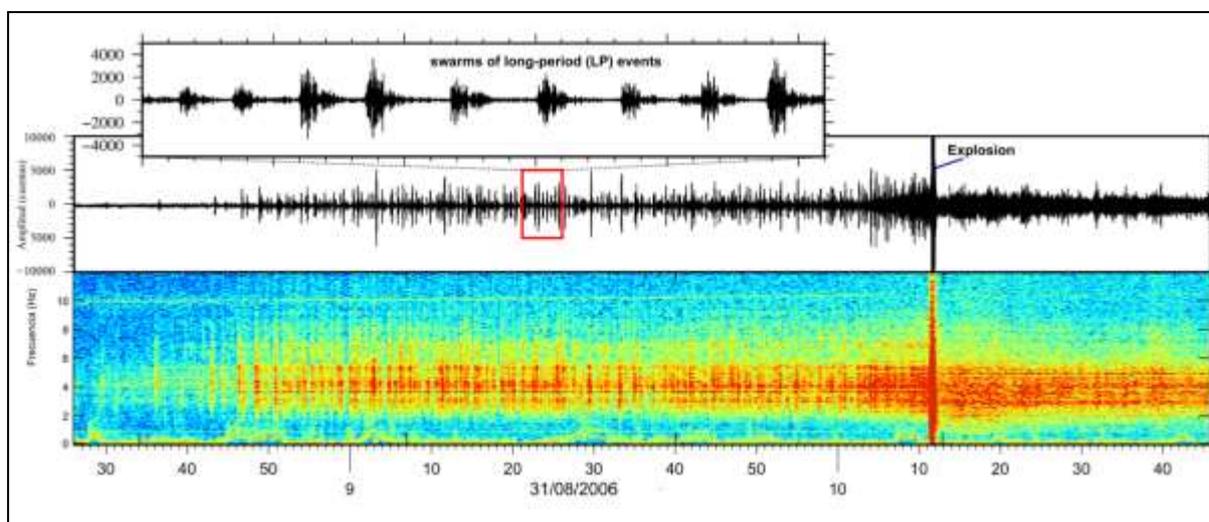


Figura 28. - Pronóstico de explosiones: Los sismos de tipo LP detectados, “avisan” la pronta llegada de la explosión en el volcán Ubinas.

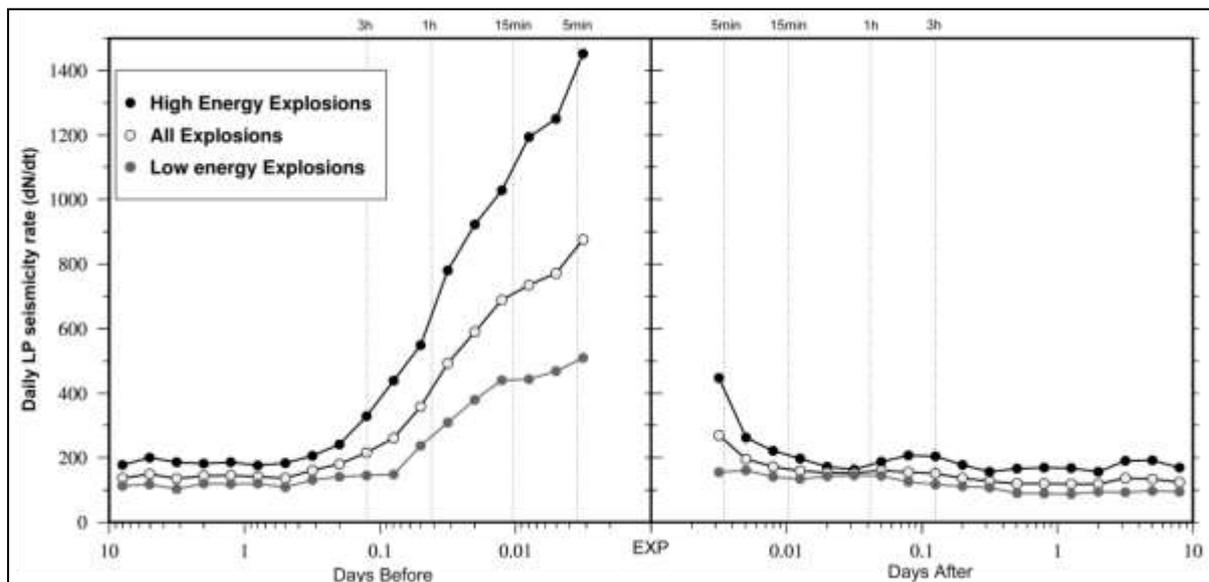


Figura 29.- Pronóstico de explosiones: La estadística realizada sobre las explosiones y sismos LPs durante la erupción 2006-2009, mostraron que era posible pronosticar la inminente llegada de una explosión hasta 3 horas antes, pues tal como se ve en este gráfico, antes de la explosión (EXP) la tasa de LP se incrementa fuertemente.

E2.- Información periódica y Pronósticos a “mediano plazo”

En caso de una probable erupción inminente, es indispensable disponer de un sistema de monitoreo instrumental de las diversas manifestaciones físicas y químicas del fenómeno (vigilancia geofísica, geoquímica y observacional) a fin de estimar el tiempo, prever la magnitud de la erupción así como la amplitud del área por ser afectada. La mayoría de señales de intranquilidad volcánica pueden ser detectados por medio del monitoreo instrumental principalmente en las etapas iniciales es decir, semanas, o meses antes de que dichos cambios fueran percibidos por los sentidos humanos.

El OVA-IGP dispone actualmente de información fundamental:

- De tipo geofísico: sísmico, gracias a redes sísmicas en tiempo real, y estaciones sísmicas temporales.
- De tipo geofísico: geodésico, gracias puntos de control monumentados.
- De tipo geoquímico satelital: densidad de gas SO₂ (GSDM-NASA).
- De temperatura de puntos importantes: gracias a imágenes satelitales.
- De anomalías térmicas importantes en el cráter: gracias a imágenes térmicas del sistema MIROVA (Universidad de Torino, Italia)
- De tipo visual, mediante observadores in-situ y observación a distancia.

Toda la información recolectada es analizada e interpretada por el equipo de profesionales geofísicos e ingenieros del Observatorio. Los resultados son publicados regularmente mediante reportes diarios, semanales y extraordinarios. Un ejemplo de reporte se da en los Anexos 2 y 3.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES

1.- El volcán Sabancaya ($15^{\circ}47'S$; $71^{\circ}51'W$; con altitud de 5976 m.s.n.m.) se encuentra a 19 km del pueblo de Maca (valle del río Colca) y a 76 km al noroeste de la ciudad de Arequipa. Este volcán pertenece a la cadena de volcanes activos ZVC (Zona Volcánica Central) de América del Sur.

2.- Para comprender el proceso de erupción de un volcán, es necesario revisar sus erupciones recientes, lo cual permite tener una buena idea de la peligrosidad del volcán. En base a los registros obtenidos y estudiados se puede, en líneas generales, estimar un probable escenario para la próxima erupción. Para el caso del volcán Sabancaya se puede inferir que una próxima erupción tendría similares características a las anteriores recientes erupciones, las cuales fueron de un IEV o Índice de Explosividad Volcánica próximas a 3

Características del proceso eruptivo ocurrido entre 1990-1998

3.- En el caso del Sabancaya, el proceso eruptivo más reciente (1990-98) estuvo antecedido por al menos 3 años y medio de “intranquilidad volcánica” manifestada fundamentalmente por aumento notable de la sismicidad fuera del edificio volcánico y de emisiones fumarólicas al nivel del cráter.

4.- La erupción 1990-98 del volcán Sabancaya fue monitoreada por medio de instrumentos del Instituto Geofísico del Perú (IGP) y el Instituto Geofísico UNSA, con la colaboración de vulcanólogos franceses, ecuatorianos y de USA. Se emplearon sismógrafos, medidores de temperatura de aguas termales, y se hicieron análisis de imágenes satelitales.

5.- La erupción 1990-98 alcanzó un nivel modesto, IEV 2 a 3, pero causó daños en lugares situados a menos de los 20 km de distancia. Los mayores daños fueron causados por los 2 terremotos que afectaron Maca y otros asentamientos humanos cercanos. El terremoto 5.1 ML de Maca del 23/07/1991 provocó la muerte de 15 personas y la destrucción de todo el pueblo. El terremoto 4.7 ML de Sepina del 01/02/1992 provocó el colapso de modestas viviendas de algunos caseríos situados al NE del volcán.

6.- Las cenizas expelidas durante las numerosas explosiones y dispersadas por el viento reinante, provocaron contaminación diversa y daños en la flora y fauna próxima al volcán. Afectaron también a la salud de los pobladores que vivían a proximidad del volcán (estancias, caseríos situados a menos de 20 km).

7.- Las aguas de manantiales y de ríos que discurren por la zona, mostraron niveles moderados de contaminación. En el sector de la Quebrada Huayuray se ha observado la aparición de una fuente con más de 79 °C. Esta fuente es conocida como “geiser de Pinchollo”.

8.- Durante el periodo de erupción del volcán Sabancaya 1990-98, ocurrió una inflación de hasta ocho centímetros en un amplio área a proximidades del edificio volcánico.

9.- En esta erupción 1990-98, lahares (huaycos importantes) bajaron por el lado norte del Hualca Hualca en Octubre 1990 y Enero 1991 y casi dañan el canal de Majes por el sector de Pinchollo. Ambos eventos constituyeron una seria amenaza a la seguridad del canal de Majes (“Canal 16”) que pasa transversalmente a esta quebrada a la altura de la cota 3670 metros de altitud. Los estudios realizados por el IGP han concluido que la principal causa de las avalanchas o huaycos fue el proceso acelerado del deshielo a causa del incremento del flujo de calor relacionado a la erupción del Sabancaya.

Características del nuevo proceso 2013-2014

10.- Desde Febrero 2013, el volcán Sabancaya ha entrado en una nueva “**intranquilidad volcánica**”. Miles de eventos sísmicos han sido registrados y clasificados gracias a la red de estaciones sísmicas que el OVA-IGP ha instalado y operado desde Febrero 2013 en inmediaciones del volcán Sabancaya y valle del Colca.

11.- **La principal sismicidad ocurre** actualmente **al NO, N, NE y E del volcán**, en un amplio área que se extiende hasta el valle del Colca. Los estudios científicos que realiza el OVA-IGP en el área de estudio muestran que los sismos corresponden esencialmente a fallamiento acorde con la tectónica observada sobre los Andes.

12.- Todas estas características observadas en la ocurrencia y distribución de la sismicidad están acorde con el modelo propuesto por Randall White (2011) del USGS que describe los patrones de sismicidad en ambientes volcánicos con inminente erupción. **Lo observado** hasta la fecha en este volcán **muestra que la evolución conduce hacia una erupción moderada** en los meses siguientes. De hecho, ya se produjeron hasta 02 explosiones freáticas. La siguiente etapa sería la aparición de sismicidad de baja frecuencia (LPs) e híbridos en tasas importantes.

13.- Las observaciones visuales, tanto al nivel del cráter como al nivel de **la evolución de fumarolas, indican que la actividad volcánica está en incremento**, pero moderado. La composición de las fumarolas es, hasta ahora, esencialmente dominado por vapor de agua (coloraciones blanquecinas), aunque **esporádicamente se presentan fumarolas correspondientes a gases magmáticos, SO₂** (coloración azulina).

14.- Para el volcán Sabancaya, la previsión (pronóstico) de la evolución de la actividad sismovolcánica, que el OVA-IGP ha hecho conocer desde Febrero 2013, se está cumpliendo hasta la fecha. Es decir:

- Una sismicidad intensa inicial, que viene en forma de enjambre (“swarm”). Este tipo de sismicidad ha ocurrido, especialmente los días 22-23 de Febrero y el 16-17 de Julio 2013.
- Una sismicidad de tipo “fractura” (denominada también tipo VT) en fallas cercanas y lejanas al edificio volcánico. Esta sismicidad está ocurriendo actualmente en forma diaria.
- Una sismicidad de tipo “paso de fluidos” (denominada también tipo LP) en inmediaciones del cráter. Esta sismicidad está ocurriendo actualmente en forma diaria.
- Una sismicidad de tipo “Híbridos” (asociada directamente a ascenso de magma) que ocurre únicamente a proximidades del cráter. Esta sismicidad ocurre actualmente pero en forma esporádica. La máxima actividad de este tipo ha ocurrido el día 02 de Agosto, y una semana después ocurrió la primera explosión del volcán Sabancaya.

Peligros más importantes que se deben tener en cuenta

15.- De acuerdo a la información registrada tanto durante los años 1990-98 como entre 2013-2014, **las zonas de mayor actividad sísmica influenciada por la actividad volcánica son las zonas al NO, N, NE y E del volcán**, hasta distancias de 20 km. Es en esa zona, por ejemplo, que durante la pasada erupción 1990-98 han ocurrido terremotos que causaron hasta 15 personas fallecidas (terremoto 5.1 ML, de Maca ocurrido el 23/07/91).

16.- Un segundo peligro **importante en el caso del volcán Sabancaya es la caída de cenizas**, que **puede afectar áreas importantes llegando a distancias de 20 o 30 km del**

cráter. La dirección predominante de dispersión es hacia el Este y el Oeste, así como también hacia el ONO y ESE.

17.- Finalmente, un tercer **peligro importante** se refiere a los **flujos de lodo o lahares** pueden afectar zonas alrededor situadas en los flancos septentrionales del Hualca Hualca, **especialmente el sector de la quebrada Huayuray que desemboca hacia Pichollo.** Esta es la zona de mayor cuidado, que causó seria preocupación durante la anterior erupción 1990-98, y que en la actualidad debiera ser considerado con la mayor atención.

Bibliografía

Antayhua, Y. (2002). Análisis de la Actividad Sísmica en la Región del Volcán Sabancaya y los sismos de Maca (1991), Sepina (1992) y Cabanaconde (1998). Tesis de Ingeniero, Univ. Nac. de San Agustín (Arequipa), 146 págs..

Bellot, N. (2011) - Modelamiento de lahares en los volcanes Sabancaya y Ubinas (Sur Peru), Reporte Interno Ingemmet, 28 p.

Cuenca J., Rivera M., Aguilar A., Antallaca A. and Fernandez J. (1991).- Avalanchas en el área de Pinchollo (Valle del Colca). Informe Interno OVA-IGP, Febrero 1991, 4 págs.

De Silva S.L. & Francis-P.W (1991).- Volcanoes of the Central Andes. New York: Springer-Verlag, 1991, 216 p

Fournier, R., (1999).- Hydrothermal processes related to movement of fluid from plastic into Brittle rock in the Magmatic-Epithermal environment. Bulletin of the Society of Economic Geologists, p. 1205-1208.

Gerbe M-C. & Thouret J-C. (2004).- Role of magma mixing in the petrogenesis of tephra erupted during the 1990–98 explosive activity of Nevado Sabancaya, southern Peru, Bull Volcanol (2004) 66:541–561

Guillande R., Thouret JC., Huaman D., and Le Guern F. (1992).- L'activite eruptive actuelle du volcan Nevado Sabancaya (Sud du Perou) et l'evaluation des menaces et des rsiques: Geologie, cartographie et imagerie satellitaire. Etude pour la Delegation aux Risques Majeurs (Ministere de l'Environnement) et du CNES, 133 p.

Huamán D. (1988).- El volcán Sabancaya, Informe interno OVA-IGP, Informe de misión, Junio 1988, 12 p.

Huamán D. (1990a).- Vigilancia del volcán Sabancaya: observaciones realizadas a la fecha 03-08-90 por el grupo IGP . Informe Interno OVA-IGP, Agosto 1990, 3 págs.

Huamán D. (1990b).- Efectos de la actividad volcánica sobre el medio ambiente. Informe Técnico Interno OVA-IGP, Diciembre 1990, 4 págs.

Huamán D., Guillande R., Rodriguea A., Caceres R., Antallaca A., Ancajima O., and Uribe M. (1991).- Toleanálisis geológico y sismicidad del sector comprendido entre el volcán Sabancaya y el poblado de Ichupampa: El sistema de fallas de Sepina. Informe Técnico interno OVA-IGP, Mayo 1991, 8 págs.

Huamán D. (1991).- Toleanálisis y determinación del riesgo geológico entre Cabanaconde y Maca. Informe Interno OVA-IGP, Marzo 1991, 3 págs.

Huamán D., Antallaca A. and Aguilar A. (1992).- Comisión de viaje al volcán Sabancaya: efectos del sismo del 01 de Febrero de 1992, en el área de Sepina. Informe Técnico interno OVA-IGP, Mayo 1992, 14 págs.

Juvigne E., Thouret J-C., Gilot E., Leclercq I., Gourgaud A. (1998) - L'activite du volcan Nevado Sabancaya (Perou) au cours de l'Holocene, Quaternaire, 9 (1), 45–51.

Juvigne E., Thouret J-C., Loutsch I., Lamadon S., Frechen M., Fontugne M., Rivera M., Davila J., Marino J. (2008).- Retombees volcaniques dans des tourbieres et lacs autour du massif des Nevados Ampato et Sabancaya (Perou Meridional, Andes Centrales). Quaternaire, 19 (2): 157 – 173.

Mariño J., Samaniego P., Rivera M., Bellot N., Manrique N., Macedo L., Valderrama P. and Delgado R. (2013).- Mapa de peligros del complejo volcánico Ampato-Sabancaya. Resúmenes del Foro de Peligros Geológicos, 14-16 Octubre 2013, pp 65-69.

Puma N., Torres JL., Jay J., Delgado F., Pritchard M. and Macedo O.(2014).- Actividad sismovolcánica asociada a la intranquilidad del volcán Sabancaya observada entre Febrero-Julio 2013. Resúmenes XVII Congreso Peruano de Geología, 4 págs.

Rodríguez A., Rivera M., Aguilar A. and Uribe M. (1991).- Carácter y distribución de los materiales eruptivos Volcán Sabancaya, Informe Interno OVA-IGP, Octubre 1991, 16 págs.

Rodríguez A & Uribe M. (1994).- Participación del Instituto Geofísico del Perú en relación con la reactivación del volcán Sabancaya, Provincia de Caylloma, Región Arequipa.- Informe IGP, 18 p.

Thouret JC, Guillaude R, Huaman D., Gourgaud A., Salas G, Chorowics J. (1994).- L'activite actuelle du Nevado Sabancaya (Sud Perou): reconnaissance géologique et satellitaire, évaluation et cartographie des menaces volcaniques.- Bull Soc géol France, t. 165, pp. 49-63

Thouret JC., Gourgaud A., Uribe M., Rodriguez A., Guillaude R. and Salas G. (1995).- Geomorphological and geological survey, and SPOT remote sensing of the current activity of Nevado Sabancaya stratovolcano (south Peru): assessment for hazard-zone mapping. Z. Geomorph. N.E., 39 (4), Gebruder Borntraeger, D-14129 Berlin. D-70176 Stuttgart, Germany. pp 515-535.

White R. (2011).-“Monitoring volcanoes and forecasting eruptions”. Volcano Observatory Best Practices Workshop: Eruption Forecasting, 11-15 September 2011, Erice, Italy.

Zamácola y Jáuregui (1804).- Diario del viaje que el obispo Dr. Pedro Chávez de la Rosa, verifico a las provincias de Moquegua y Tacna en 1789, publicado en "El Deber", Arequipa 1937.

ANEXO 1

Tabla del Índice de Explosividad Volcánica (IEV)

IEV	Altura de pluma o columna eruptiva	Volumen	Clasificación	Frecuencia	Descripción del evento	Ejemplo de erupción
0	<100 m	>1000 m ³	Hawaiano	Diario	No explosivo	Kilauea (USA)
1	100–1000 m	>10,000 m ³	Haw/Stromboliano	Diario	Reducido	Stromboli (ITALIA)
2	1–5 km	>1,000,000 m ³	Stromboliano/Vulcaniano	Semanalmente	Moderado	Misti (PERU), 1440-70 Ubinas (PERU), del 2006 al 2009
3	3–15 km	>10,000,000 m ³	Vulcaniano	Anualmente	Moderado a fuerte	Ruiz (COLOMBIA), 1985 Sabancaya (PERU), de 1990 a 1998
4	10–25 km	>0.1 km ³	Vulcaniano/Pliniano	>10 años	Fuerte	Misti (PERU), hace 2000 años Galunggung (Java INDONESIA), 1982
5	>25 km	>1 km ³	Pliniano	>100 años	Muy fuerte	St. Helens (USA), 1981
6	>25 km	>10 km ³	Pliniano/Ultra-Pliniano	>100 años	Muy fuerte	Huaynaputina (PERU), 1600
7	>25 km	>100 km ³	Ultra-Pliniano	>1000 años	Muy fuerte	Tambora (INDONESIA), 1815
8	>25 km	>1000 km ³	Ultra-Pliniano	>10,000 años	Muy fuerte	Toba (Sumatra INDONESIA), hace 71000 años

ANEXO 2

a) Ejemplo de Reporte Sismovolcánico Diario:

Reporte del 17 de Setiembre 2014

b) Ejemplo de Reporte de Actividad del volcán Sabancaya:

Reporte N° 10-2014

REPORTE SISMOVOLCÁNICO DIARIO

VOLCÁN SABANCAYA

25 DE AGOSTO DEL 2014

DATOS RELEVANTES

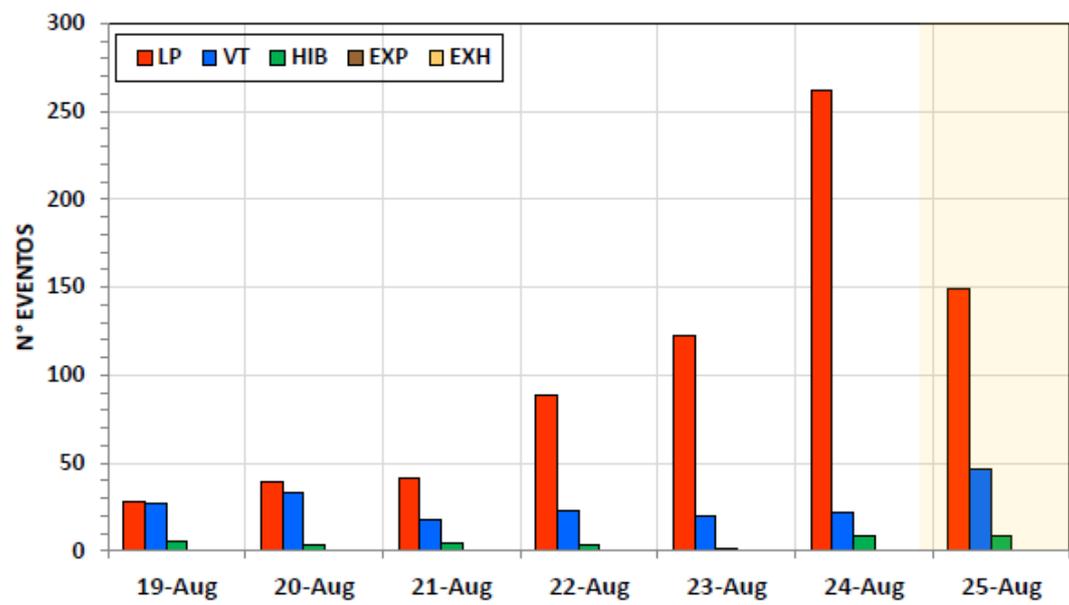
Estado actual:	Volcán con notoria intranquilidad, habiendo presentado 02 recientes explosiones freáticas. Actividad en lento ascenso Nivel de Alerta Volcánica: AMARILLO
Mayores eventos ocurridos a la fecha:	Enjambre de 04 Sismos VolcanoTectonicos distales: ocurridos el 22 y 23 de Febrero 2013, con magnitudes entre 4.5 y 5.2 ML. Doce viviendas colapsan en poblado Maca. Primera explosión freática: 09 Agosto 2014, a las 04:29 HL. Energía: 9083 Mega Joules Segunda explosión freática: 25 Agosto 2014, a las 20:39 HL. Energía: 1151 Mega Joules
Peligro mayor probable:	Caída de cenizas: en los alrededores, principalmente hasta 15-20 km de distancia. Lahares importantes: en dirección del valle del Colca, especialmente por los flancos septentrionales del Hualca Hualca. En anterior erupción (1990-98) un lahar por el sector de Pinchollo hizo peligrar el canal de Majes.

El **Observatorio Vulcanológico de Arequipa (OVA)** del **Instituto Geofísico del Perú (IGP)**, vigila al volcán Sabancaya mediante una red de 21 estaciones sísmicas, de las cuales **3 estaciones** (SAB, CAJ y PAT) están muy cerca al cráter y **transmiten en tiempo real**. El presente sucinto reporte se basa principalmente en el análisis de señales en tiempo real.

CUADRO 1: RESUMEN DE LA OCURRENCIA DE EVENTOS REGISTRADOS EL 25 de agosto de 2014 hasta las 16:00 Hora Local

TIPO DE EVENTO	NÚMERO	OBSERVACIONES
PERIODO LARGO o LP (asociado a movimiento de fluidos)	149	
VOLCANO-TECTONICO o VT (asociado a fractura en medio rocoso)	47	
HÍBRIDOS (asociado a ascenso de magma)	8	
EXHALACIONES	0	
EXPLOSIONES	0	

VOLCAN SABANCAYA: HISTOGRAMA DE EVENTOS DE LOS ULTIMOS 7 DIAS



CUADRO 2: CARACTERISTICAS DE LOS EVENTOS RESALTANTES REGISTRADOS EL 25 de agosto de 2014 hasta las 16:00 Hora Local

N°	EVENTO	FECHA Y HORA LOCAL	DURACIÓN (seg)	MAGNITUD (ML)	OBSERVACIONES
1	EXP	25/08/2014 20:39:53	82		Energía liberada fue 1087 MJ
2	VT	25/08/2014 05:04:21	51	3.1	Epicentro a 16 Km al Noreste del cráter.

VOLCAN SABANCAYA

REGISTRO COMPLETO DE

EVENTOS REGISTRADOS EL 24 DE AGOSTO DE 2014

CUADRO 3: RESUMEN DE LA OCURRENCIA DE EVENTOS REGISTRADOS EL 24 de agosto de 2014 (Datos completos)

TIPO DE EVENTO	NÚMERO	OBSERVACIONES
PERIODO LARGO o LP (asociado a movimiento de fluidos)	262	
VOLCANO-TECTONICO o VT (asociado a fractura en medio rocoso)	22	
HÍBRIDOS (asociado a ascenso de magma)	9	
EXHALACIONES	0	
EXPLOSIONES	0	

CUADRO 4: CARACTERISTICAS DE LOS EVENTOS RESALTANTES REGISTRADOS EL 24 de agosto de 2014 (Datos completos)

N°	EVENTO	FECHA Y HORA LOCAL	DURACIÓN (seg)	MAGNITUD (ML)	OBSERVACIONES
1	VT	24/08/2014 09:15:02	44	2.9	Epicentro a 7 Km al Norte del cráter.
2	VT	24/08/2014 07:19:56	32	2.6	Epicentro a 10 Km al Este del cráter.

OBSERVATORIO VULCANOLOGICO DE AREQUIPA (OVA)

INSTITUTO GEOFISICO DEL PERU (IGP)

Reporte N°10-2014

REPORTE EXTRAORDINARIO

Actividad del volcán Sabancaya

Fecha: 25 Agosto 2014

Segunda explosión freática y muy fuerte actividad sísmica en Volcan Sabancaya hoy 25/08/2014

Desde el 22-02-2013, El Observatorio Vulcanológico de Arequipa (OVA) del IGP ha reportado y puesto en conocimiento de las autoridades y comunidad en general, de la “intranquilidad volcánica” a partir del 22/02/2013, detectada por los métodos geofísicos, especialmente mediante las observaciones sísmicas.

En días pasados (Reporte N°07-2014 de fecha 6 de agosto 2014) hemos reportado el aumento notable de la actividad sísmica de este volcán, resaltando la ocurrencia de un enjambre de sismos híbridos asociado a ascenso de magma.

El OVA-IGP emite este nuevo reporte extraordinario en vista que hoy día, la Red de Estaciones Sísmicas-Telemétricas del volcán Sabancaya (ver mapa de la Figura 1) ha registrado señales sísmicas de GRAN ENERGIA a las 20:39 hora local (ver los sismogramas en las Figuras 2, 3 y 4), que al ser analizadas, corresponden a una EXPLOSION en el cráter. Esta es la SEGUNDA EXPLOSION registrada en el volcán Sabancaya en lo que va del año, y todo indica que se trataría también de un evento de tipo freático así como lo fue la explosión del 09/08/2014.

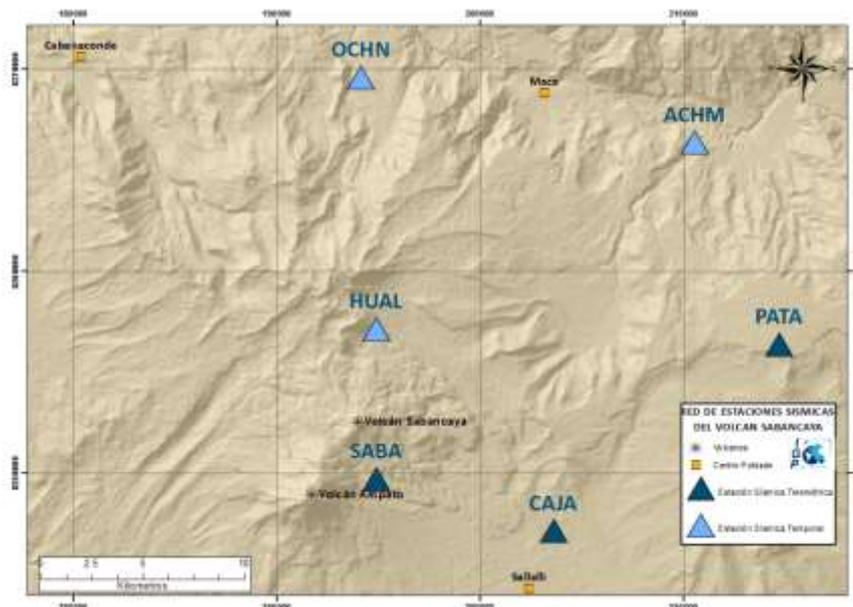


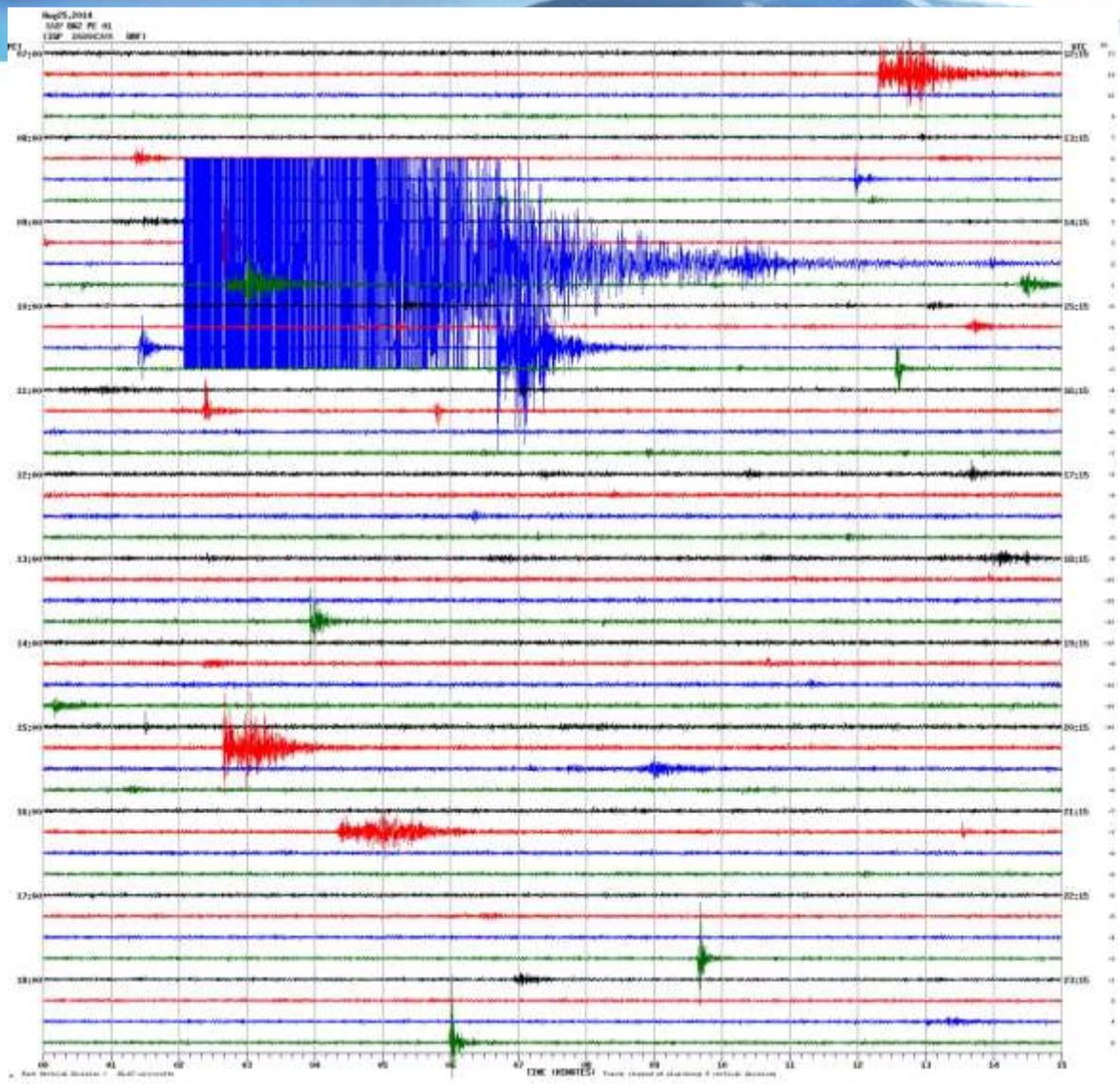
Figura 1. Red de estaciones sísmicas-telemétricas del volcán Sabancaya (triángulos azules). Adicionalmente, se han instalado 3 estaciones temporales (triángulos celestes) en la zona muy próxima. Además de estas estaciones, el IGP dispone de 12 estaciones sísmicas en tiempo real en la región.

Detalle de la actividad sísmica.-

Importante: El Observatorio Vulcanológico de Arequipa (OVA-IGP) basa sus interpretaciones en 2 tipos de Redes de Estaciones Sísmicas: Una red “macro” y una red “micro”. La primera red RSN (Red Sísmica Nacional) vigila la actividad sismovolcánica en conjunto en todo el Sur, y cuenta con 04 estaciones satelitales y 08 estaciones fijas, siendo un total de 12 estaciones permanentes y tiempo real. El segundo tipo de redes –las redes “micro” – son las establecidas para cada volcán. En el caso del Sabancaya funciona una red de 3 estaciones en tiempo real, a corta distancia del cráter (la más cercana está a 3 km del cráter). El OVA dispone así de un total de 15 estaciones sísmicas en tiempo real (entre satelitales, permanentes regionales y permanentes locales), que garantizan una buena cobertura e información geofísica del volcán Sabancaya.

*Aparte de estas 15 estaciones en tiempo real, recientemente se han instalado 03 estaciones sísmicas temporales. Por tanto, **el IGP dispone de 18 estaciones sísmicas para el monitoreo y vigilancia del volcán Sabancaya.** La figura 1 muestra la localización de las estaciones situadas a inmediaciones del volcán.*

- En el curso de ayer 24 y hoy día 25 de agosto, se han detectado principalmente un incremento de eventos sísmicos de tipo LP (asociados a paso de fluidos bajo el volcán). Los eventos VT (asociado a ruptura de rocas), por su parte, se han mantenido moderados.



- Figura 2 – Sismograma del 25 agosto de la estación sísmica SAB situada a 3 Km. del cráter. Luego de producirse un fuerte sismo regional de 5.7 ML que remeció gran parte de la región Arequipa, la sismicidad se incrementó ligeramente en la zona del volcán.
- Luego del sismo regional a las 09:31 Hora Local, de magnitud 5.7 ML con epicentro a 31 km al SE de Atico y que fue sentido en la región del Sabancaya con intensidad III, la sismicidad en el volcán se incrementó ligeramente.
- Finalmente, a las 20 horas, 39 minutos y 58 segundos, Hora Local, sobrevino una “cadena” de eventos sísmicos de tipo explosivo en el cráter del Sabancaya, liberando una energía de 1151 Mega Joules. Esta cadena de eventos tuvo una duración total de 82 segundos. Estos registros sísmicos tan energéticos corresponden muy probablemente a explosiones volcánicas de tipo freático, y muy probablemente ha debido eyectar una columna de cenizas y lapilli. Por segunda vez la explosión ha ocurrido en horas de la noche, por lo cual no ha podido ser vista, al menos desde la distancia. En las próximas horas, una brigada del personal del OVA-IGP se constituirá por la zona a fin de realizar inspecciones in-situ.

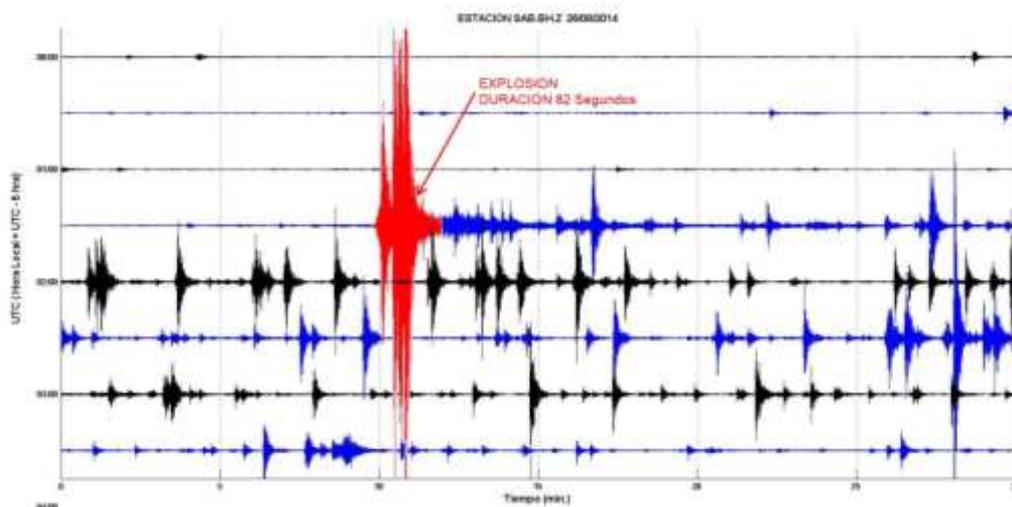


Figura 3 – Sismograma de hoy 25 de agosto de la estación sísmica SAB situada a 3 Km. del cráter. Cuatro eventos explosivos en cadena, ocurrieron en el cráter, y fueron seguidos de numerosos sismos energéticos por varias horas. La energía calculada para esta cadena de eventos es de 1151 MJ, y tuvieron una duración total de 82 segundos.

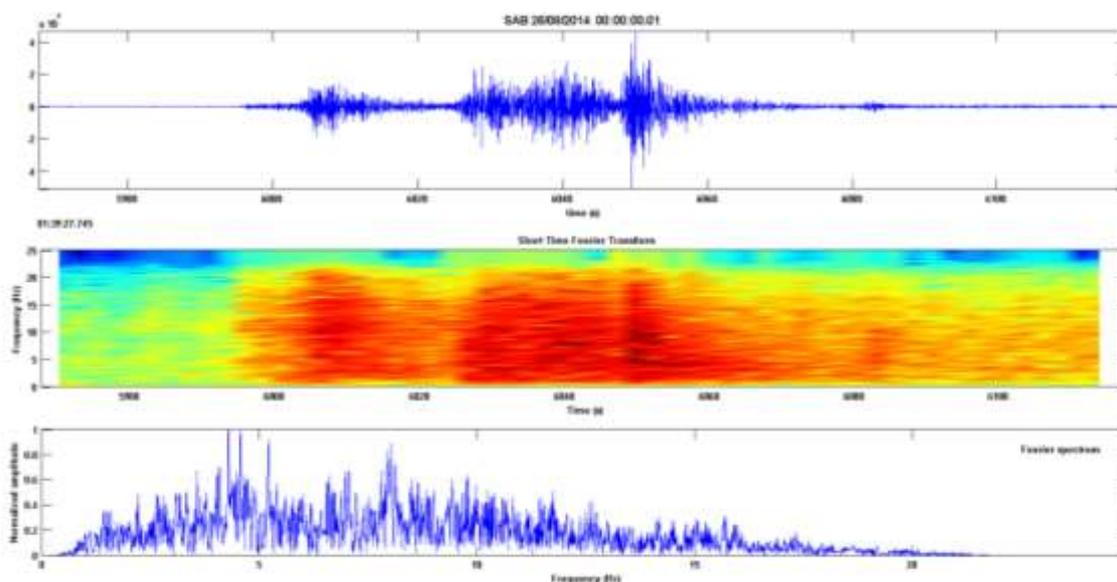


Figura 4 – Sismograma y espectrograma de las explosiones en cadena, ocurridos hoy 25 de Agosto a las 20:39 HL en el volcán Sabancaya. Este registro corresponde a la estación SAB situada a 3 km del cráter. Las otras dos estaciones telemétricas CAJ y PAT también registraron el evento.

Actividad fumarólica.-

Las emisiones fumarólicas de los últimos días han tenido las siguientes características generales:

- **Frecuencia:** Las emisiones fumarólicas del volcán Sabancaya de los últimos tres días (23-24-25 agosto) han sido intermitentes; sin embargo, en el transcurso de hoy día 25 se ha observado una relativa mayor emisión de gases.

- **Coloración:** Blanco en general (vapor de agua), pero hoy día 25 se ha observado intermitentes emisiones de gases de coloración azulina (gases magmáticos SO₂).
- **Altura:** entre 500 y 1500 m aproximadamente.



Figura 5 – Emisiones fumarólicas persistentes en el volcán Sabancaya, que en los tres últimos días se han visto con intermitencia.

Monitoreo Satelital.-

Detección de densidad de gas magmático SO₂ por satélite.-

No se dispone, todavía, de datos actualizados de emisiones de SO₂ detectados por satélite (GSDM-NASA)

Detección de Anomalías térmicas por satélite.-

El monitoreo de anomalías térmicas del volcán Sabancaya es realizado por el sistema MIROVA (www.mirova.unito.it) desarrollado por el Dr. Diego Coppola del Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Torino (Italia). El sistema MIROVA no ha detectado ninguna anomalía térmica al nivel del cráter.

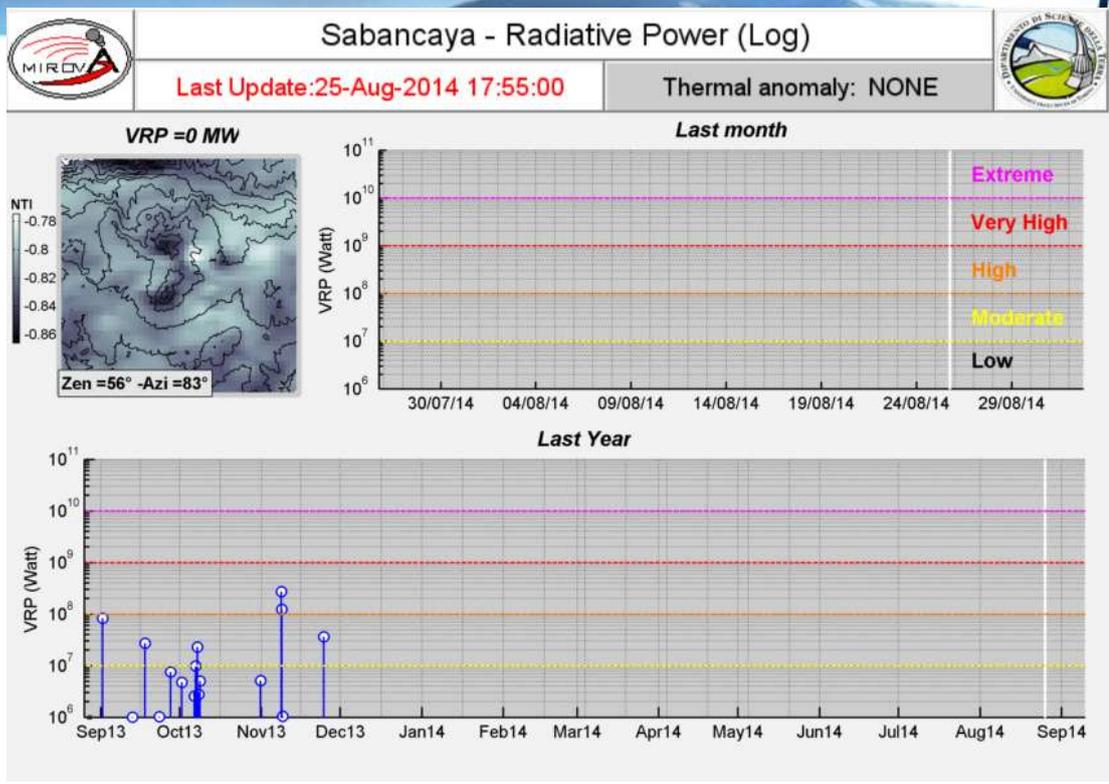


Figura 6.- Monitoreo térmico MIROVA no ha detectado ninguna anomalía en la zona del Volcán Sabancaya.

Conclusiones

- La actividad sismo-volcánica del volcán Sabancaya está siendo monitoreada por el OVA-IGP en tiempo real, por medio de 18 estaciones sísmicas (15 en tiempo real + 03 estaciones temporales). Tres de ellas son estaciones telemétricas (tiempo real) que están situadas muy cerca al cráter.
- Después de ocurrido un sismo regional a las 9:31 HL de magnitud 5.7 ML en la región de Arequipa, el volcán Sabancaya ha presentado incremento en su actividad sísmica durante once horas, al cabo de las cuales se ha producido una explosión.
- **La explosión** ha sido registrada por las 03 estaciones sísmicas-telemétricas del OVA-IGP **a las 20:39 hrs Hora Local**. Esta **explosión ha sido registrada como 4 eventos que ocurrieron uno tras otro, en cadena**, liberando una **energía total de 1151 Mega Joules (MJ)** y tuvieron una **duración de 82 segundos**.
- Durante las tres horas siguientes a la explosión, se siguen registrando frecuentes sismos energéticos que corresponden a salida de gases y posiblemente cenizas, así como a fractura de rocas en el interior del cráter.
- Habiendo ocurrido la explosión en horas de la noche, no son visibles las emisiones de fumarolas (gases y/o cenizas) que, muy probablemente, estén ocurriendo.

- El sistema de monitoreo satelital de SO₂ de GSDM-NASA no ha publicado los valores de los últimos días. Sin embargo, las observaciones visuales nos indican de un posible incremento del gas magmático SO₂ al nivel del cráter. El sistema de monitoreo térmico satelital MIROVA no detecta anomalías.
- Finalmente, tal como el OVA-IGP ha estado considerando e informando desde Febrero 2013 en que se inició la intranquilidad de este volcán, se reitera que la evolución del proceso eruptivo continúa en ascenso.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.-

- White R. (2011).-“Monitoring volcanoes and forecasting eruptions”. Volcano Observatory Best Practices Workshop: Eruption Forecasting, 11-15 September 2011, Erice, Italy.
- Rodríguez A. & Uribe M. (1994). Participación del Instituto Geofísico del Perú en relación con la reactivación del Volcán Sabancaya, provincia de Caylloma, región de Arequipa. Informe interno OVA-IGP Oficina de Arequipa, p. 28.

ANEXO 3

- a) Solicitud de elaboración de informe respecto a la actividad sismovolcánica del volcán Sabancaya.**



República del Perú



Gobierno Regional Arequipa
Consejo Regional Arequipa

OFICIO N° 1287 -2014-GRA/CR

Señor Doctor
Orlando Efrain Macedo Sanchez
Director del Observatorio Vulcanológico de Arequipa
Instituto Geofísico del Perú - IGP
Urb. La Marina B-19 Cayma
Ciudad.-

Ref.: Sesión Ordinaria de 18.08.14

De mi consideración

Me dirijo a usted para saludarlo atentamente y en atención a lo solicitado por el señor Consejero por Caylloma, en la sesión de la referencia, traslado su pedido consistente en que la institución a su cargo se sirva emitir un informe al Consejo Regional, sobre la posible erupción del Volcán Sabancaya y sus consecuencias para la vida humana, animal en los alrededores, distritos y en la infraestructura de riego mayor.

Sin otro particular quedo de usted,

Atentamente

GOBIERNO REGIONAL DE AREQUIPA
CONSEJO REGIONAL

.....
Abog. Yanina Osorio Belgado
PRESIDENTA DEL CONSEJO REGIONAL
DE AREQUIPA

YOD/
c.c. Cons. Caylloma
Archivos
Sia 44704