

## **MONITOREO Y ANALISIS PRELIMINAR DE LA ACTIVIDAD SÍSMICA DEL VOLCÁN SABANCAYA (AREQUIPA) DURANTE EL PERIODO COMPRENDIDO ENTRE EL 1 y 15 DE JULIO DEL 2002**

**SOPHIE CRAVOISIER y VINCENT MAURER**

*Escuela de Física del Globo*

*Universidad Louis Pasteur-Estrasburgo-Francia*

[phisocp@yahoo.com](mailto:phisocp@yahoo.com)

[peuf23@yahoo.com](mailto:peuf23@yahoo.com)

*Prácticas dirigidas por: Ing. Yanet Antayhua*

*Centro Nacional de Datos Geofísicos-Sismología*

### **RESUMEN**

En el presente estudio se realiza la clasificación y análisis preliminar de las señales sísmicas registradas por una Red Sísmica Temporal compuesta por 4 estaciones de banda ancha instaladas en las proximidades del volcán Sabancaya durante el periodo comprendido entre el 1 y 15 de Julio del 2002. La clasificación ha sido realizada utilizando el modelo propuesto por Minakami (1974). Durante el periodo de operatividad de la red sísmica se ha registrado señales de Tipo-A, Tipo-B, Periodo largo (LP), Tremores y Explosiones.

### **INTRODUCCION**

Los estudios sismológicos realizados sobre diferentes volcanes activos del mundo han permitido registrar y analizar una diversidad de señales sísmicas, los mismos que podrían estar relacionados con los procesos físicos, químicos y tectónicos que ocurren durante su evolución volcánica. En general, las causas para que se registren una gran variedad de señales volcánicas pueden ser atribuidos a dos procesos: el primero a procesos físicos de la fuente sísmica, el registro de las señales brindan información de la ruptura de la roca sólida que rodea al volcán, traslado o acumulación de magma, circulación de fluidos, gases y en superficie la emisión de fumarolas; el segundo proceso, esta relacionado con la trayectoria que sigue la onda sísmica a través de las diversas estructuras que constituyen el volcán las mismas que se reflejan después en la forma del registro de la señal, observándose frecuentemente una superposición de varias fases. Sin embargo, el análisis de las características del registro de cada una de las señales sísmicas dependerá básicamente de la evolución eruptiva de cada volcán en particular. Estas características han permitido que varios autores realicen

diversas clasificaciones para los diferentes tipos de registros (Minakami, 1974; Latter, 1979; Gil-Cruz y Chouet, 1999). Sin embargo, la clasificación más general obedece al esquema elaborado por Minakami (1974) basándose en su experiencia con muchas erupciones ocurridos en volcanes japoneses con características similares a los volcanes de la región Sur de Perú. Así, Minakami clasifica las señales sísmicas en 6 tipos: señales Tipo-A, Tipo-B, Tipo-C, Período Largo (LP), Explosión y Tremor. Sin embargo, algunos observatorios vulcanológicos han extendido esta clasificación de acuerdo a las características observadas en el proceso eruptivo de sus volcanes, ya sea de manera descriptiva o a partir del análisis del contenido de frecuencias típicas en cada señal sísmica.

El volcán Sabancaya, con una altura de 5978 m.s.n.m. forma parte del extremo Norte de la Zona Volcánica de los Andes Centrales (ZVAC) (Francis y Silva, 1990) y se encuentra ubicado en la parte central del gran Complejo Volcánico Ampato-Sabancaya-Hualca Hualca, el mismo que se ubica a 80 km de la ciudad de Arequipa. Este volcán inicia una importante actividad eruptiva en 1986 con abundante emisión de fumarolas y actividad sísmica,

motivo por el cual el Instituto Geofísico del Perú (IGP) en 1990, instaló una red sísmica temporal compuesta por 6 estaciones. En 1993 esta red es reemplazada por una Red Sísmica Telemétrica compuesta por 3 estaciones instaladas alrededor del volcán Sabancaya (RSTS), la misma que estuvo operando durante el periodo 1993-1995. En la actualidad, el Instituto Geofísico del Perú cuenta con información importante que corresponde al periodo 1990-1995 y cuyo análisis ha permitido identificar y postular algunas hipótesis sobre el origen de la gran diversidad de señales sísmicas del volcán Sabancaya (Tavera, et al., 2000, Antayhua, 2002).

En Julio de 2002, el Instituto Geofísico del Perú decide realizar la instalación de 4 estaciones sísmicas de banda ancha (SABA-1, SABA-2, SABA-3 y SABA-4), todas ellas ubicadas en las proximidades al cráter del volcán Sabancaya con la participación de los autores del presente estudio (Universidad Louis Pasteur de Estrasburgo-Francia) con la finalidad de monitorear e investigar el estado actual de la actividad sísmica de dicho volcán. En esta primera fase de estudio, la información sísmica obtenida de estas 4 estaciones es analizada y clasificada desde el punto de vista descriptivo utilizando como base la clasificación general propuesta por Minakami (1974).

#### **ACTIVIDAD ERUPTIVA DEL VOLCÁN SABANCAYA**

El volcán Sabancaya, se encuentra localizado en las coordenadas 15°47'S y 71°32'W y presenta una altura de 5970 m.s.n.m. Este volcán es un típico estratovolcán andesítico de edad Holocénica Reciente y forma parte del Complejo volcánico Ampato-Sabancaya-Hualca Hualca. Geográficamente, este volcán está ubicado a 30 km al S-W de la localidad de Chivay y a 80 km en dirección NNW de la ciudad de Arequipa y su accesibilidad, desde esta ciudad, se realiza a través de la carretera que conduce a la localidad de Chivay, Cajamarca y la Hacienda Sallalli.

La actividad eruptiva de este volcán se remonta a los años 1750 y 1784-1785, desde entonces no se ha tenido noticia alguna del volcán. Luego de un periodo de quietud de aproximadamente 200 años, el volcán pasa a otro periodo de reactivación en Noviembre de 1986, distinguiéndose una primera fase eruptiva de tipo Vulcaniana caracterizada por la frecuente emisión de fumarolas que alcanzaron alturas de 3 y 5 km aproximadamente (Rodríguez y Uribe, 1994). Este proceso eruptivo duró hasta 1990, para luego pasar a la fase explosiva caracterizada por la expulsión de cenizas, bloques pequeños de rocas y la constante emisión de fumarolas que llegaron a cubrir un área de 10 km<sup>2</sup> (Huamán, 1995). A partir de 1993, la erupción del volcán Sabancaya decrece paulatinamente, llegando a presentarse únicamente emisiones de fumarolas en forma esporádica acompañadas con sismos de magnitudes prácticamente imperceptibles. Las emisiones esporádicas de fumarolas, pueden ser observadas hasta la actualidad. Durante el proceso eruptivo del volcán, el Instituto Geofísico del Perú y la Universidad Nacional de San Agustín realizaron diversos estudios de vigilancia sísmica con periodos cortos de observación y cuyos resultados permitieron proponer diversas hipótesis para explicar el proceso evolutivo del volcán desde el punto sísmico (Rodríguez y Huamán, 1992; Kosaka, et al, 1996; González, 1996; Lazo, et al.1996, Tavera et al, 2000; Antayhua, 2002) y geológico-tectónico (Thouret, et al., 1995a y Thouret et al., 1995b). En general, el desarrollo de la actividad eruptiva del volcán Sabancaya estuvo caracterizado por el registro de una gran variedad de señales sísmicas de tipo volcánico que podrían estar relacionados al fracturamiento de rocas, circulación de fluidos, gases dentro del conducto volcánico y en superficie emisión de fumarolas, caída de cenizas y pequeños bloques de rocas (Tavera et al., 2000). Asimismo, los diferentes estudios sísmicos realizados en la región del volcán Sabancaya, muestran que la actividad sísmica registrada durante el proceso eruptivo del volcán Sabancaya se concentró mayormente al Este y NE del volcán Sabancaya; es decir, sobre los

lineamientos tectónicos presentes en la zona denominada como Pampa Sepina (Antayhua et al., 2001; Antayhua, 2002).

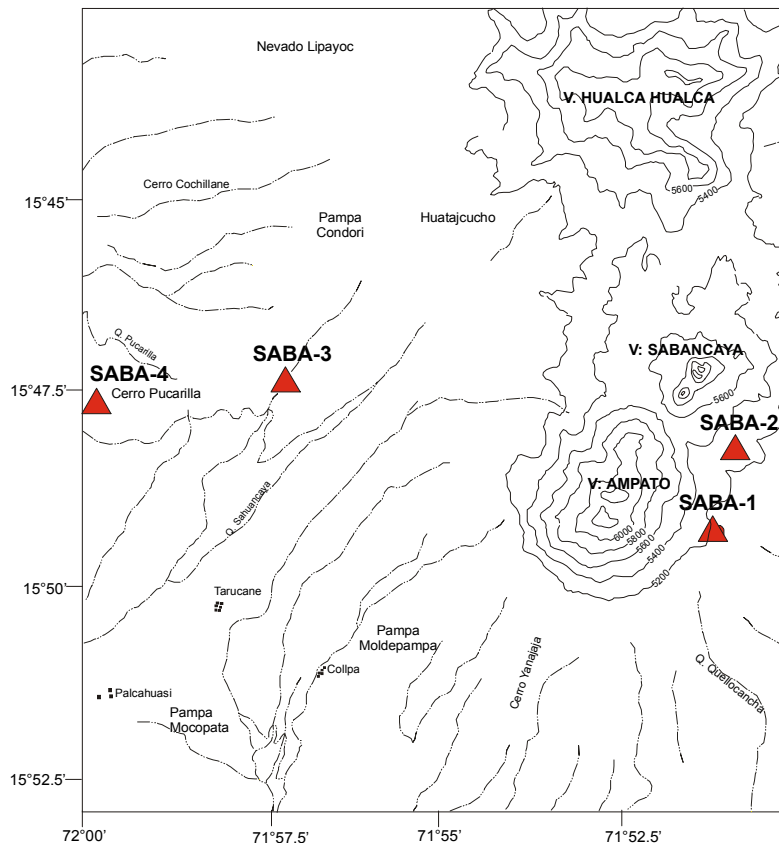
**RED SÍSMICA TEMPORAL DEL VOLCÁN SABANCAYA**

Esta Red Sísmica Temporal del Volcán Sabancaya estuvo conformada por 4 estaciones sísmicas de banda ancha, las mismas que fueron instalados en los puntos denominados como SABA-1, SABA-2, SABA-3 y SABA-4, todas a

distancias desde el cráter de 4, 2.5, 14 y 20 km respectivamente (Figura 1). Estas estaciones están constituidas de registradores REFTEK, modelo 72A-07 y sensores marca GURALP modelo CMG-40T con un ancho de banda de 30 s a 50 Hz. El control de tiempo estuvo sincronizado por GPS. Las estaciones sísmicas estuvieron operativas durante el periodo comprendido entre 1 y 15 de Julio del 2002. En la Tabla 1, se presenta las coordenadas geográficas de dichas estaciones.

*Tabla 1.- Principales características de las estaciones que conforman la Red Sísmica Temporal del Volcán Sabancaya.*

ESTACION	CODIGO	LATITUD (grados)	LONGITUD (grados)	ALTITUD (m.s.n.m)
Sabancaya-1	SABA-1	-15.812°	-71.847°	5169
Sabancaya-2	SABA-2	-15.807°	-71.841°	5271
Sabancaya-3	SABA-3	-15.788°	-71.974°	4743
Sabancaya-4	SABA-4	-15.803°	-72.029°	4527



*Figura 1. Distribución de la Red Sísmica Temporal del Volcán Sabancaya (periodo 1 al 15 de Julio del 2002). Los triángulos indican la ubicación de cada una de las estaciones.*

## TIPOS DE SEÑALES SÍSMICAS

Para realizar la clasificación de las señales sísmicas registradas por la red Sísmica Temporal del Volcán Sabancaya, se ha utilizado como base la clasificación propuesta por Minakami (1974), el mismo que distingue hasta 6 tipos de señales sísmicas de origen volcánico: señales de Tipo-A, Tipo-B, Tipo-C, Periodo Largo (LP), Explosión y Tremor (Figura 2). A continuación se realiza una breve descripción de las características de cada una de ellas.

**Señales de Tipo-A.**- Estas señales ocurren a profundidades menores a 10 km. Se caracterizan por presentar altas frecuencias y amplitudes, sugiriendo que deben su origen a fracturamiento de rocas en respuesta a la intrusión o migración del magma dentro del cráter del volcán. Las fases sísmicas P y S son identificables y pueden ser fácilmente confundidas con sismos producidos por procesos netamente tectónicos.

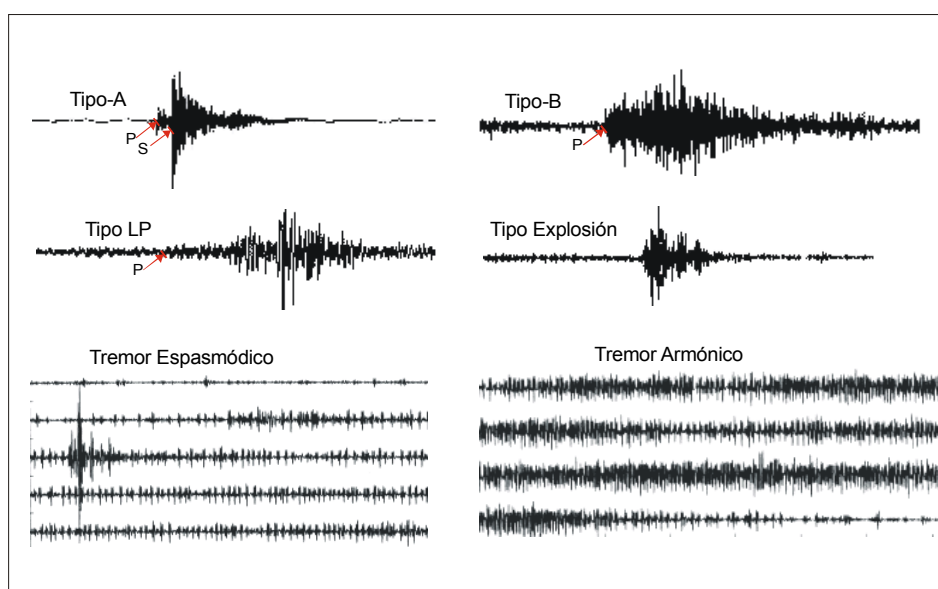


Figura 2. Clasificación general de los diversos tipos de señales sísmicas registradas en volcanes activos (Minakami, 1974). P y S son las fases sísmicas.

**Señales de Tipo-B.**- Este tipo de señal se caracteriza por presentar fases P y S muy emergentes y el contenido de frecuencia es menor al del Tipo-A. Estas señales pueden estar asociadas también a fracturamiento de rocas y ocurren a profundidades menores a 1 km. Algunas veces pueden presentarse como un enjambre de sismos y puede presentar el registro simultaneo de diversas fases reflejadas debido a la trayectoria que sigue la onda a través de capas heterogéneas.

**Señales de Tipo-C.**- Estas señales pueden ser muy similares a las de Tipo-B aunque con el registro de fases múltiples. Este tipo

de señal fue observado por primera vez, por Minakami durante el proceso eruptivo del volcán Showa y Usu (Japón), el mismo que podría estar relacionado al crecimiento del domo de lava.

**Señales de Periodo Largo (LP).**- En general, estas señales sísmicas se caracterizan por presentar frecuencias bajas debido a la resonancia causada por la presión esporádica de los fluidos y gases en las grietas del conducto volcánico y la posterior desgasificación en superficie.

**Señales de Explosión.**- Estas señales son generadas por explosiones volcánicas que

se producen durante el proceso eruptivo de un volcán. El registro de estas señales depende básicamente de la fuerza de la explosión, la misma que acondiciona su duración y frecuencia.

**Señales de Tremor.-** Las señales de tremores se caracterizan por presentar un tren continuo de vibraciones que pueden durar horas, días y semanas. A diferencia de las señales descritas anteriormente, los tremores proporcionan información de todo el proceso eruptivo de los volcanes, entre ellos los asociados a los procesos magmáticos en el interior del volcán ya sea por el movimiento del magma mismo, gases, ruidos, etc. y en superficie por la emisión de fumarolas, cenizas y caída de rocas. De acuerdo a la forma, amplitud y frecuencia de la señal de tremor puede ser clasificado en armónicos, periódicos, monocromáticos y espasmódicos.

#### **SEÑALES SÍSMICAS REGISTRADAS EN EL VOLCÁN SABANCAYA**

Durante el periodo de monitoreo del volcán Sabancaya, las estaciones SABA-1, SABA-2 y SABA-3, han registrado 5 tipos de señales: señales sísmicas de Tipo-A, Tipo-B, Periodo Largo (LP), Tremor y Explosiones. A fin de realizar un mejor análisis de los registros se ha visto por conveniente dividirlos en 3 grupos de acuerdo a su fineza y de su nivel de ruido. Así, el primer grupo considera a señales con registros claros y nítidos, el segundo esta conformado por señales cuyo registro presenta cierto nivel de ruido que dificulta su análisis siendo necesario utilizar un filtro y el tercer grupo, considera a las señales con mayor nivel de ruido; siendo estas demasiado elevados.

**Señales Tipo A.-** Durante el tiempo de operatividad de las estaciones, se ha registrado un gran número de señales Tipo-A en las estaciones SABA-1 y SABA-2 y menor en SABA-3. Estas señales hacen un total de 25 y 272 respectivamente. Asimismo, se ha observado que el incremento de actividad sísmica de Tipo-A corresponde principalmente a los dos últimos días de operatividad de las estaciones (días 14 y

15). En la Figura 3a, se muestra un ejemplo de señal Tipo-A registrada el 09/07/2002 a las 14:21 (GMT) en la estación SABA-1, el mismo que corresponde al segundo grupo de señales sísmicas. En el extremo izquierdo se presenta la señal sin filtro y en el extremo derecho la señal filtrada, siendo posible identificar a las fases P y S. En la Figura 3b, corresponde a la señal registrada el 03/07/2002 a las 01:31 (GMT) en la estación SABA-2. Debido a la buena calidad del registro, esta señal es considerada dentro del primer grupo. Otro ejemplo de señal de Tipo-A es mostrado en la Figura 3c y corresponde a la registrada el 05/07/2002 a las 03:03 (GMT) en la estación SABA-3. La buena calidad de su registro permite identificar fácilmente las fases P y S.

**Señales Tipo-B.-** Señales de este tipo fueron registradas durante los últimos días de operatividad de las estaciones sísmicas (días 13,14 y 15), principalmente en las estaciones SABA-1 y SABA-2 (60 y 224 señales). En la Figura 4a y 4b, se muestran las señales registradas los días 07 y 14 de Julio a las 01:12 y 12:49 (GMT) en las estaciones SABA-1 y SABA-2 respectivamente. Estas señales son mostradas en sus componentes vertical (Z), Norte-Sur (N-S) y Este-Oeste (E-W). Tal como se observa en las Figuras, estas señales se caracterizan por presentar al inicio de su registro una señal de baja frecuencia, siendo posible identificar únicamente la fase P. El tiempo de duración de ambos registros es de 15 y 14 segundos aproximadamente.

**Señales de Periodo Largo (LP).-** Estas señales fueron menos numerosas que las dos anteriores y han sido registrados en SABA-1 (7) y SABA-2 (13). En la Figura 5a, se presenta un ejemplo de señal LP registrado el 09/07/2002 a las 17:05 (GMT) en la estación SABA-1. Esta señal esta ha sido considerada en el segundo grupo. En esta figura, se observa una señal acompañada de ruido (extremo izquierdo) lo que no permite identificar su inicio; sin embargo, después de ser filtrada (extremo derecho) se observa la presencia de una fase P muy emergente. En la Figura 5b, se

presenta la señal registrada el 12/07/2002 a las 20:24 GMT en la estación SABA-2, que a diferencia de la Figura anterior, es considerada en el primer grupo. La particularidad que se observa en este registro es que se puede diferenciar

claramente una señal de alta frecuencia al inicio del registro y posteriormente el predominio de la señal de periodo largo. Las duraciones de dichos registros oscilan entre 30 y 60 segundos aproximadamente.

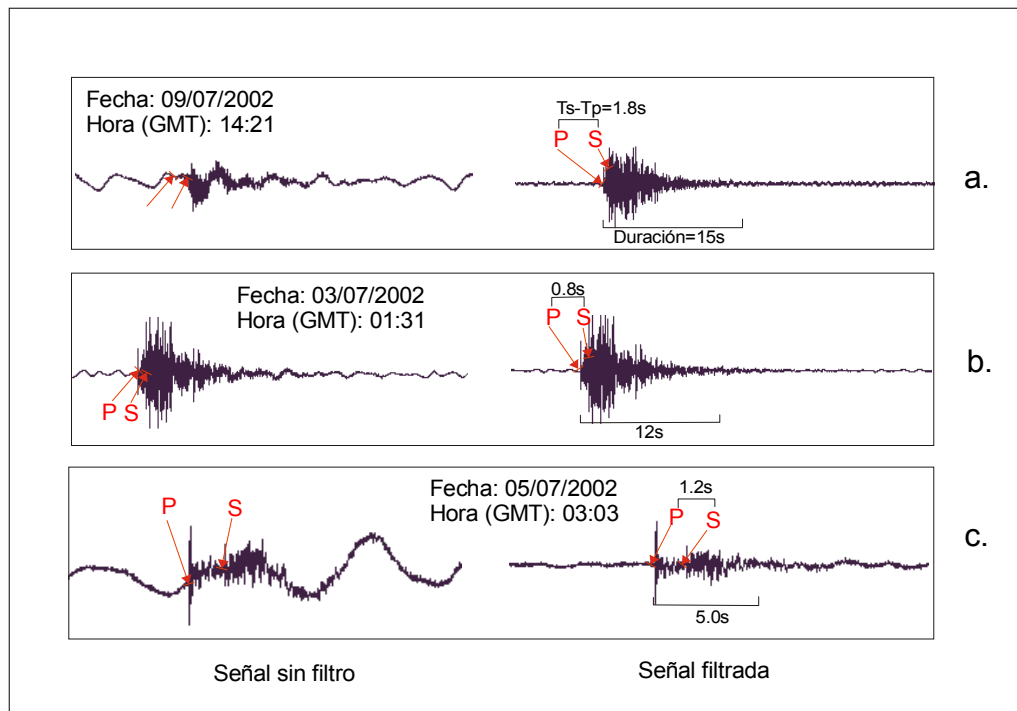


Figura 3. Ejemplos de señales sísmicas de Tipo-A registradas en las estaciones de la Red Sísmica Temporal del Volcan Sabancaya. a). Sabancaya-1 (SABA-1); b). Sabancaya-2 (SABA-2) y c). Sabancaya-3 (SABA-3).  $T_s-T_p$  es la diferencia en tiempos de llegada de las fases P y S en segundos (s).

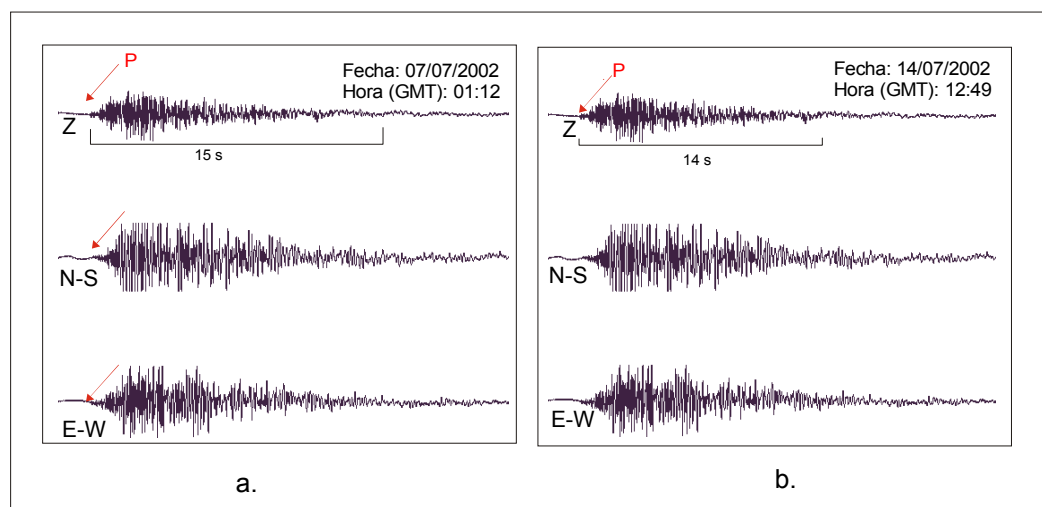


Figura 4. Ejemplos de señales sísmicas de Tipo-B registradas en las estaciones: a). SABA-1 y b). SABA-2 Z: componente vertical, N-S y E-W: componentes Norte-Sur y Este-Oeste respectivamente. Otros, ver Figura 3.

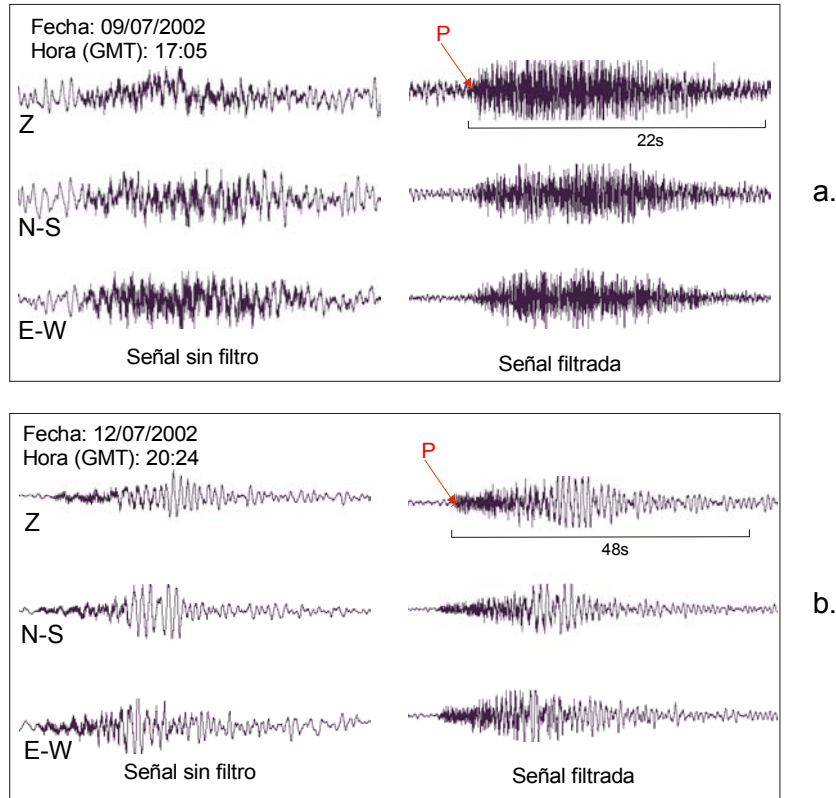


Figura 5. Ejemplos de señales sísmicas de Periodo Largo (LP) registradas en las estaciones: a). SABA-1 y b). SABA-2, Z: componente vertical, N-S y E-W: componentes Norte-Sur y Este-Oeste respectivamente. Otros, ver Figura 3.

### Señales de Tipo Tremor y Explosión.-

Durante el periodo de monitoreo, el registro de señales de tipo Tremor y Explosión en las estaciones SABA-1 y SABA-2 fueron mínimos (4 y 3 señales respectivamente). En SABA-2 por ejemplo, el 12/07/2002 a las 23:03 (GMT) se registró una explosión antecedida por un pequeño tremor (Figura 6a). La duración del tremor y explosión es de 18 y 22 segundos. Debido a la buena calidad de su registro esta señal ha sido considerada en el primer grupo. En la Figura 6b, se presenta otro ejemplo de explosión antecedida por tremor registrado el 13/07/2002 a las 04:16 (GMT). Estas señales corresponden al segundo grupo debido a que presentan un cierto nivel de ruido que se confunde con la señal de tremor (extremo izquierdo). En el extremo derecho se presenta las señales filtradas y donde es posible identificar el inicio del tremor y la explosión. La duración es de 20 y 23 segundos aproximadamente. Tal

como podemos observar en las Figuras, las características de las formas de onda de las señales son muy similares.

## DISCUSION Y RESULTADOS PRELIMINARES

El monitoreo sísmico del volcán Sabancaya fue realizado por el instituto Geofísico del Perú con la participación de los autores (Universidad Louis Pasteur de Estrasburgo-Francia).

El análisis preliminar de la información sísmica registrada por las estaciones de la Red Sísmica Temporal del Volcán Sabancaya, ha permitido identificar y clasificar las señales en 5 tipos: señales de Tipo-A, Tipo-B, Periodo Largo (LP) y Tremores antecedidas por Explosiones.

En general, durante el monitoreo sísmico del volcán Sabancaya se han registrado un gran número de señales de Tipo-A. Siendo

la estación SABA-2, la que presenta el mayor número de registros (272), especialmente durante los dos últimos días de operatividad (14 y 15 de Julio). Mientras que, la estación SABA-1 ha registrado 25 señales y SABA-3 20 señales. Esta diferencia en el número de señales registradas podría deberse a que las dos primeras estaciones estuvieron

instaladas en las proximidades del cráter del volcán Sabancaya. Asimismo, el tiempo de operatividad de las mismas fue mayor (15 y 10 días respectivamente) con respecto a SABA-3 (7 días). El origen de estas señales podrían estar relacionados a fracturamiento de rocas dentro del cono del volcán Sabancaya.

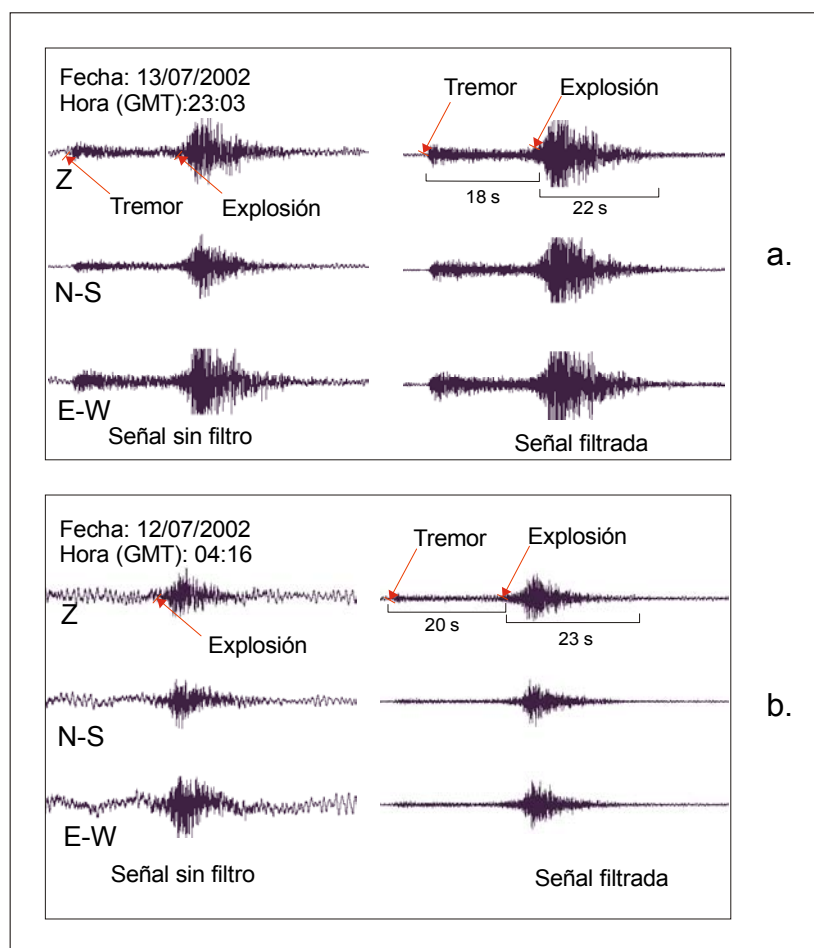


Figura 6. Ejemplos de señales sísmicas de Explosión antecedida por un pequeño Tremor, registradas en la estación SABA-1. a). Señal considerada en el primer grupo de señales y b). Segundo grupo de señales. Otros, ver Figura 3.

Las señales Tipo-B, Periodo Largo (LP), Tremores y Explosiones han sido registradas únicamente en las estaciones SABA-1 y SABA-2. Sin embargo, el mayor número corresponde a la estación SABA-2, la misma que ha registrado 224 señales de Tipo-B, 13 de Periodo Largo y 3 señales de explosiones antecedidas por tremores. Mientras que, en la estación SABA-1, se han registrado 60 señales de Tipo-A, 7 y 4 señales de LP y tremores

respectivamente. La presencia de estas señales sugieren que el volcán Sabancaya permanece activo y es recomendable continuar con su monitoreo sísmico.

#### AGRADECIMIENTOS

Nuestro agradecimiento a la Ing. Yanet Antayhua por haber dirigido nuestras prácticas Pre-Profesionales. Al Dr. Hernando Tavera, Director del CNDG-



IGP por haber permitido y orientado el desarrollo del presente estudio, así como haber aceptado nuestra solicitud de estancia como practicantes. Finalmente, A los Srs. Edmundo Vila y David Portugal por su apoyo en el trabajo de campo y a todo el personal del CNDG por su amistad y colaboración durante nuestra estadía en el IGP.

## **BIBLIOGRAFIA**

Antayhua, Y., Tavera, H., Bernal, I. (2001). Análisis de la Actividad Sísmica en la Región del Volcán Sabancaya (Arequipa). Bol. Soc. Geol. v 91 p. 55-68.

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). P. 146.

Francis, P y Silva, S. (1990). Application of the Landsat Thematic Mapper to the identification of potentially active volcanoes: a new satellite technique, Nature, 338: 144-146.

Gil-Cruz y Chouet (1999). Observations of two spacial kinds of tremor at Galeras volcano Colombia (1989-1991). Annali di Geofisica, 43,3,437-449.

González, E., Kosaka, M y Minaya, A. (1996). Sismicidad del volcán Sabancaya y el Hualca-Hualca. Segundo Seminario Latinoamericano: Volcanes, Sismos y Prevención.

Huamán, D. (1995). Métodos y aplicaciones de las imágenes de satélite en la cartografía geológica: El caso del seguimiento y evolución de la amenaza volcánica del Sabancaya (región del Colca, Arequipa). Tesis de Ingeniero, Univ. Nac. San Agustín, Arequipa. 138 p.

Kosaka, M., Gonzales, E., Minaya, A. (1996). Sismicidad del volcán Sabancaya y el Hualca-Hualca. Segundo Seminario Latinoamericano: Volcanes, Sismos y Prevención. Arequipa-Perú.

Latter, I. (1979). Types and classification of volcanic earthquakes, 1976-1978. Geophysical Division Volcanological Observations at Tongariro National Park, Department of Scientific and Industrial Research Report N°150, 60pp.

Lazo, M. (1996). Características de la actividad sísmica intraplaca continental en el sur de Perú: II Seminario Latinoamericano Volcanes Sismos y Prevención. pp. 82-84.

Minakami, T. (1974). Seismology of Volcanoes in Japan: Physical Volcanology. Elsevier, Amsterdam, 1-27p.

Rodríguez, A., Huamán, D. (1992). Teleanálisis geológico y sismicidad del sector comprendido entre el volcán Sabancaya y el poblado de Ichupampa: El Sistema de fallas Sepina. Inf. Int. IGP., 8p.

Tavera, H., y Antayhua, Y., (2000). Señales Sísmicas en Volcanes Activos: Ejemplos del Volcán Sabancaya, Arequipa (Perú). Bol. Soc. Geol. del Perú.v. 90. P. 107-119.

Thouret, J-C., Gourgaud, A., Guillande, R., Y Salas, G. (1995a). La actividad eruptiva del volcán nevado Sabancaya (Sur de Perú): geología, sensores remotos, evaluación y mapeo de zonas de riesgo. Resúmenes Extendidos. Seminario Taller: Evaluación de la Litósfera en los Andes Peruanos y sus márgenes. Programa PICG, 188. Lima Perú.

Thouret, J-C., Gourgaud, A., Uribe, M., Rodriguez, A., Guillande, R. y Salas, G. (1995b). Geomorphological and geological survey and remote sensing of the current activity of Nevado Sabancaya strato volcano (South Peru): assesment for hazard-zone mapping. Z. Geomorph. N-E., 39, 4, 515-535.

