

SEÑALES SÍSMICAS DE VOLCANES ACTIVOS: EJEMPLOS DEL VOLCÁN SABANCAYA, AREQUIPA (PERÚ)

Hernando TAVERA & Yanet ANTAYHUA

*Centro Nacional de Datos Geofísicos-Sismología. Instituto Geofísico del Perú
Calle Calatrava 216 – Urb. Camino Real La Molina, Lima-Perú
E-mail: jtavera@geo.igp.gob.pe*

RESUMEN

Los registros de eventos sísmicos ocurridos durante el proceso eruptivo del volcán Sabancaya, que se inició en 1986 y llegó a su etapa final en 1995 aproximadamente, son analizados a partir de las características de sus formas de onda, duración y de sus posibles fuentes de origen. La clasificación propuesta por Minakami (1974) es considerada como referencia para la evaluación de las señales sísmicas. Todos los registros fueron obtenidos de dos estaciones sísmicas portátiles y de una red sísmica telemétrica compuesta por tres estaciones, todas de componente vertical y período natural de 1 segundo. Estas estaciones fueron instaladas alrededor del volcán y funcionaron entre los años 1990 y 1995. Los resultados muestran que a pesar de la diversidad de las señales sísmicas, muchas presentan características similares a los registrados durante los procesos eruptivos de otros volcanes en el mundo. En los registros obtenidos del volcán Sabancaya se ha identificado señales de Tipo-A, Tipo-B, Período Largo (LP), Explosiones y diversidad de Tremores.

ABSTRACT

Records of seismic events that occurred during the most recent eruption of the Sabancaya volcano, extending from 1986 to to its final stages in 1995, are analyzed based on the characteristics of their waveforms, duration, and of their possible sources. The classification proposed by Minakami (1974) is considered as reference for the assessment of these seismic data. All the records were obtained from two portable seismic stations and from a telemetric seismic network comprising three stations, all of vertical component and natural period of 1 second. These stations were installed around the volcano and operated between 1990 and 1995. The results show that in spite of the diversity of the seismic signals, many of them present similar characteristics to those registered during the eruptive processes of other volcanoes in the world. In the seismograms obtained from the Sabancaya volcano, we have identified seismic signals of Type-A, Type-B, Long Period (LP), Explosions and a diversity of Tremors.

INTRODUCCION

Los estudios sísmológicos realizados sobre diferentes volcanes, han permitido observar y registrar una gran variedad de señales sísmicas que pueden ser asociadas a los distintos procesos físico-tectónicos típicos de volcanes en actividad.

A diferencia de los registros de eventos sísmicos propios de zonas de contacto de placas o deformación cortical, los volcánicos presentan una mayor diversidad debido principalmente a la complejidad de los procesos eruptivos que tienen lugar en cada volcán, la misma que ha llevado a muchos autores a proponer diversas categorías o clasificaciones para estos registros (Minakami, 1974; Latter, 1979; Gil-Cruz y Chouet, 1997;

Tsuruga et al, 1997). Por otro lado, si se considera que los cambios que frecuentemente se observa en la forma de la señal de los registros sísmicos (amplitud y frecuencia) están relacionados con las variaciones espacio-tiempo de los diversos procesos físicos que se producen en los volcanes, las características de la señal podrían ser utilizadas para intentar predecir futuras erupciones de numerosos volcanes. Sin embargo, en la práctica esta información no resulta útil debido a que cada volcán requiere de estudios detallados antes de establecer patrones de recurrencia para los diferentes procesos físicos que en ellos se produce y que son registrados por los sismógrafos (estación sísmica).

En general, las causas para la existencia de una gran variedad de señales propias de sismos volcánicos

pueden ser atribuidas a dos procesos. El primero considera a las señales de sismos generados por diferentes fuentes tales como, ruptura de corteza volcánica, explosiones, circulación de fluidos, emisiones fumarólicas, etc.; por lo tanto, estas señales contendrían información sobre las características físicas de la fuente y pueden ser utilizadas para su estudio. El segundo proceso tiene que ver con el trayecto que sigue la onda antes de ser registrada; en este caso, las señales contendrían información de cómo la onda ha sido afectada durante su recorrido por las diversas estructuras generando, muchas veces, superposición de fases sísmicas debido a la alta heterogeneidad geológica y física del medio. Sin embargo, el estudio de las características de las señales sísmicas de una gran variedad de volcanes, sugiere que la forma de la señal dependerá únicamente de las características de la evolución de los diferentes procesos eruptivos del cualquier volcán.

El volcán Sabancaya, con una altura de 5,970 metros sobre el nivel del mar, es un típico estrato-volcan monogenético que se encuentra ubicado en la parte central del macizo volcánico Ampato-Sabancaya-Hualca Hualca y esta constituido por los domos Sabancaya-1 Sur y Sabancaya-2 Norte en cuyo medio se abre el cráter activo. Este volcán se encuentra ubicado a una distancia de 30 km al SW de la localidad de Chivay y a 80 km al NNW de la ciudad de Arequipa. El volcán Sabancaya es el último, que después de un período de quietud de 200 años aproximadamente, pasó a un período de reactivación que se inició en 1986 con una primera fase *eruptiva* caracterizada por una frecuente emisión fumarólica que alcanzaba alturas de 3 a 5 km y volúmenes con diámetros de hasta 300 metros (Rodríguez y Uribe, 1994). Este proceso duró hasta 1990 para luego iniciarse una segunda fase *explosiva* caracterizada por la presencia continua de emisiones fumarólicas y explosiones acompañadas de emisión de cenizas y bloques pequeños de rocas que llegaron a cubrir una área circular de radio igual a 10 km aproximadamente (Rodríguez y Uribe, 1994).

A partir del año 1993, el proceso eruptivo decreció presentándose emisiones fumarólicas y explosiones esporádicas que al final de 1995 disminuyeron considerablemente. Una revisión del proceso eruptivo del volcán Sabancaya puede ser encontrada en Huaman (1989, 1991, 1992 y 1995), Guillande y Thouret (1992), Thouret et al (1994), Thouret et al (1995a), Thouret et al (1995b), Bulmer et al (1997), Juvigné et al (1998) y Gerbe y Thouret (1999). En este estudio se analiza y evalúa los diferentes tipos de señales sísmicas asociados a sismos ocurridos en el volcán Sabancaya, las mismas que fueron obtenidas de dos estaciones portátiles instaladas durante el período más crítico del proceso eruptivo de dicho volcán (1986-1993) y de una Red Sísmica Telemétrica compuesta por tres estaciones sísmicas instaladas en 1993 por el Instituto Geofísico del Perú. Las características de la sismicidad asociada al volcán Sabancaya han sido discutidas por Lazo et al (1991), Huaman et al (1992), Uribe (1995), Kosaka y Lazo (1990), Rodríguez y Uribe (1994), Antayhua (2001).

De manera general, la clasificación de las señales en los registros de sismos volcánicos puede ser realizada a partir del análisis del contenido de frecuencias o de manera descriptiva dependiendo de las características de cada registro, procedimientos que han permitido establecer diferentes clasificaciones de los mismos (Minakami, 1974; Latter, 1979; Gil-Cruz y Chouet, 1997; Tsuruga et al, 1997; Gil-Cruz, 1999).

Los registros de las diferentes señales sísmicas del volcán Sabancaya serán analizados desde el punto de vista descriptivo considerando la forma de la señal, duración y su posible origen. La información a presentarse en el presente estudio, permitirá asentar las bases para evaluar los diferentes tipos de señales sísmicas que puedan observarse durante los procesos eruptivos de otros volcanes peruanos.

CLASIFICACION DE REGISTROS SISMICOS VOLCANICOS

El proceso eruptivo de cualquier volcán produce diferentes tipos de señales sísmicas. En general, las características de estas señales pueden ser clasificadas en función de su origen o fuente, siendo la clasificación realizada por Minakami (1963, 1974) sobre la base de muchas erupciones volcánicas y cambios observados en el registro de diferentes señales sísmicas asociados a estas erupciones, la más aceptada. Sin embargo, muchos observatorios volcanológicos han modificado o expandido esta clasificación de acuerdo a las características especiales de la evolución eruptiva de cada volcán (Latter, 1979; Fehler, 1983; Chouet, 1992; Tsuruga et al, 1997). La clasificación que mejor describe los diferentes tipos de señales sísmicas asociados a los procesos eruptivos de los volcanes se presenta en la Figura 1 y sus principales características se describen a continuación.

Señales Sísmicas de Tipo A. Los sismos que producen este tipo de señal ocurren entre 1 a 10 km de profundidad por debajo del volcán y se caracterizan por presentar altas frecuencias y fases P y S bien definidas. Estas señales pueden ser generadas por el fracturamiento de la roca volcánica en respuesta a la intrusión y migración del magma o por la expansión de los fluidos debido a la presencia de altas presiones geotermales. Asimismo, los sismos que producen este tipo de señal pueden ocurrir a distancias de 1 km desde el cráter o arbitrarias dependiendo del tamaño y de la estructura del cráter (Figura 1a). Frecuentemente, este tipo de señal es difícil de distinguir de los producidos por procesos netamente tectónicos.

Señales Sísmicas de Tipo B. Este tipo de señal son producidas por sismos que ocurren a profundidades menores a 1 km, siendo su contenido de frecuencias menores a los del Tipo-A. Las señales de Tipo-B presentan ondas P y S muy emergentes y por lo general, son difíciles de identificar (Figura 1b). Estas señales al igual que los de Tipo-A, pueden ser producidas por el continuo

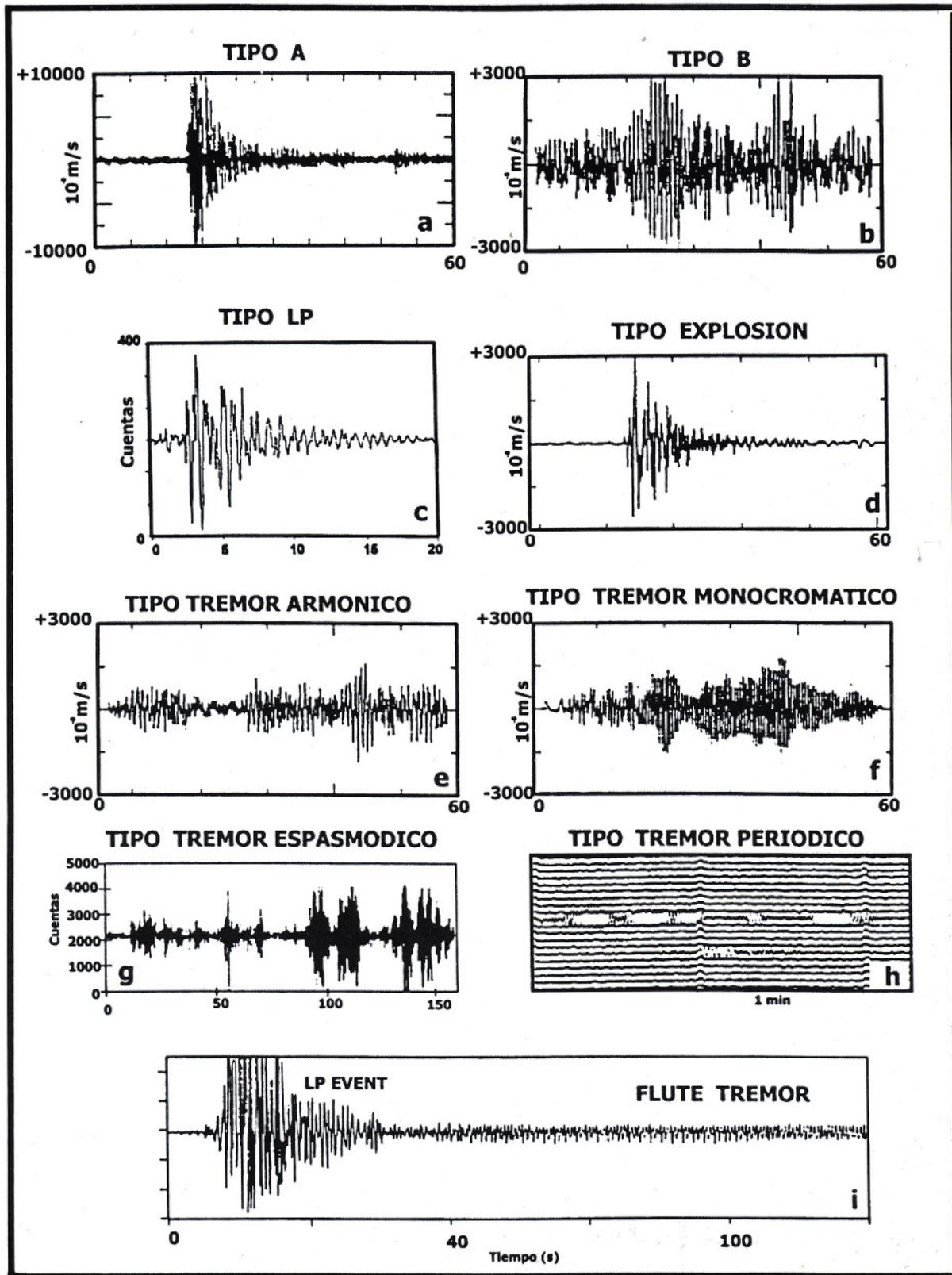


Fig.1: Clasificación general de los diversos tipos de señales sísmicas asociados a sismos volcánicos. Señales de Tipo-A (a), Tipo-B (b), explosión (d), tremor (e) y tremor monocromático (f) según Tsuruga et al, (1997). Señales de Tipo LP (c) y tremor (h) según Gil-Cruz y Chouet (1997). Señales sísmicas de tipo tremor espasmódico (g) y "Flute Tremor" (i) según Gil-Cruz (1999).

fracturamiento de las rocas del cono volcánico, ellas se caracterizan por presentar en su señal diversas fases reflejadas probablemente en las diferentes capas de cenizas y lava a manera de enjambres sísmicos.

Señales Sísmicas de Tipo C. Estas señales sísmicas son similares a los de Tipo-B, aunque se puede identificar muchas más fases derivadas de la ocurrencia de eventos múltiples en una simple secuencia. Este tipo de señal fue observado, por vez primera, por Minakami et al, (1951) durante el proceso eruptivo de los volcanes Showa Shinzan y Usu en Japón. El origen de estas señales parece estar asociado a la etapa de crecimiento del domo de lava.

Señales Sísmicas de Período Largo (LP). Según Chouet (1988, 1992), las señales sísmicas de período largo se caracterizan por presentar frecuencias bajas debido a la resonancia causada por la presión esporádica de los fluidos y gases en las grietas o en el conducto volcánico (Figura 1c). Estas señales son similares a los de Tipo-B; por lo tanto, su ocurrencia e implicancias en los procesos eruptivos no pueden ser apreciadas completamente. Gil-Cruz (1999), asocia este tipo de señal sísmica a la deformación del cráter debido a procesos de desgasificación que duran entre 1-5 minutos.

Señales Sísmicas de Tipo Explosivo. Estas señales sísmicas son generadas por explosiones volcánicas que se producen durante el proceso eruptivo de un volcán. La forma de estas señales puede variar significativamente dependiendo de la fuerza de la explosión, la misma que acondiciona su duración y su frecuencia (Figura 1d).

Señales Sísmicas de Tipo Tremor. El término "tremor" hace referencia al tipo de registro, por naturaleza, característico de los procesos eruptivos de los volcanes. Este tipo de señal proporciona información continua de todo el proceso eruptivo, en contraste con las diferentes señales descritas anteriormente. Por ejemplo, los tremores reflejan la continua vibración que se produce en el cono volcánico ya sea por emanación de gases, cenizas, ruido, caída de rocas y emisiones fumarólicas o por la ocurrencia frecuente de sismos pequeños cuyas codas se superponen. La forma de la señal del tremor varían principalmente en frecuencia y amplitud, características que permite agruparlos en armónicos (Figura 1e), monocromáticos (Figura 1f) y espasmódicos (Figura 1g). Los tremores denominados periódicos, pueden ser causados por geysers superficiales, intrusión de magma o de fluidos volcánicos (Figura 1h). En general, los tremores siempre están presentes en todo el proceso eruptivo de cualquier volcán, siendo estos generados por muchas fuentes y el exacto conocimiento de la naturaleza de estas fuentes es tema de investigación (Aki, et al, 1977; Fehler, 1983; Koyanagi et al, 1987; Chouet, 1992; Tsuruga et al, 1997). Durante el proceso eruptivo del volcán Galeras en Colombia, Gil-Cruz (1999) observó el registro continuo de un ruido que se produjo después del registro de una señal sísmica de tipo LP, siendo el mismo asociado a una emisión continua de vapor de agua y gas. El autor denominó a este tipo de señal sísmica como "Flute Tremor" (Figura 1i).

De acuerdo a lo expuesto anteriormente, no todos los procesos eruptivos de un volcán pueden generar los mismos tipos de señales sísmicas ya que estos dependerán de las características geofísicas de cada volcán.

Así, Dibble (1974) analizando los registros de señales sísmicas del volcán Ruapehu evalúa la clasificación propuesta por Minakami (1974) y describe la existencia de otro tipo de señal al que denominó "tremor de inicio impulsivo", que se caracteriza por presentarse después de las trazas típicas de tremor o después de la ausencia de ellos describiendo una traza de baja amplitud que definirían la parada del tremor.

Este tipo de señal sísmica puede registrarse después de iniciarse el registro de señales sísmicas de Tipo-B. Asimismo, Dibble (1974) propone que los registros de señales explosivas pueden ser divididos en aquellos que son generados por vibraciones acompañadas de erupciones de ceniza o lodo y las acompañadas de inyecciones de andesita en el cráter.

Para clasificar los diferentes tipos de señales sísmicas registradas durante el proceso eruptivo de un determinado volcán, se puede seguir de manera independiente o en conjunto dos criterios. El primer criterio tiene en cuenta el contenido de frecuencias típicas en cada señal sísmica y el segundo las características de los diferentes tipos de señal presentes en el sismograma. Para realizar la clasificación de las señales sísmicas a partir del primer criterio se debe conocer inicialmente la fuente o el origen de la señal, tal como sugiere Latter (1979).

Es sabido que muchas de las señales sísmicas están compuestas por la suma del registro de explosiones, tremores y sismos volcánico-tectónicos; por lo tanto, resulta difícil realizar el análisis de sus frecuencias de manera independiente, más aún si se considera que muchas de las características de las señales son debidas a la atenuación de la energía a lo largo de su recorrido o a la absorción que se produce alrededor de la fuente. Además, se debe considerar que las altas frecuencias sugieren altas aceleraciones y éstas no pueden ser generadas por medios líquidos o semilíquidos.

El segundo criterio para la clasificación de las señales sísmicas considera la observación directa de sus características de cada registro. Para tal objetivo, es importante considerar toda la información disponible sobre el registro de señales típicas a partir de clasificaciones previamente establecidas por otros autores (Minakami, 1974; Gil-Cruz y Chouet, 1997).

Asimismo, a fin de realizar comparaciones directas entre los diferentes registros sísmicos, se debe asumir que en general, los procesos eruptivos de cualquier volcán presentan características similares, siendo estos capaces de producir señales sísmicas idénticas.

Un inconveniente para utilizar este criterio, es que muchos de los sismos volcánicos son registrados con diferentes tipos de instrumentos dificultando la correcta comparación entre ellos.

LA RED SISMICA DEL VOLCAN SABANCAYA

A inicios de 1990, el Instituto Geofísico del Perú realizó la instalación y operación de cinco estaciones sísmicas portátiles alrededor del volcán Sabancaya a fin de evaluar la frecuencia sísmica, la emisión fumarólica y las explosiones que pudieran advertir de una posible erupción mayor. De estas estaciones, únicamente dos quedaron instaladas de manera permanente durante los años 1990 y 1993 en las localidades de Cajamarca (CAJ) y Pinchollo (PIN), ubicadas a 11 y 18 km del volcán (Figura 2). Estas estaciones sísmicas portátiles de tipo MEQ-800, estaban dotadas de un sensor vertical con periodo natural de 1 segundo y sensibilidad de 78 db (Rodríguez y Uribe, 1994). La señal sísmica fue registrada en papel ahumado a una velocidad de 60 mm por minuto.

En Julio de 1993, una Red Sísmica Telemétrica fue instalada alrededor del volcán Sabancaya (RSTS). Esta red consistía de 3 estaciones de período corto y componente vertical con sismómetros tipo SS-1 de período natural de 1 segundo y sensibilidades de 78 y 84 db. La información sísmica era transmitida en tiempo real a la central de registro ubicada en la ciudad de Arequipa, lugar en donde se instaló la estación de Sachaca (SAC) con las mismas características instrumentales que la RSTS. Las estaciones sísmicas fueron ubicadas en los puntos denominados como Pucarilla (PUC), JollaJello (JOL) y Patapampa (PAT), localizados a distancias de 14, 16 y 20 km alrededor del volcán Sabancaya (Figura 2). Los sismos

fueron registrados inicialmente en papel ahumado y en la última etapa de operatividad de la red en papel térmico a razón de 90 mm por minuto. La RSTS funcionó de manera continua durante el año de 1993, seguida de una interrupción de aproximadamente 12 meses para luego continuar operativa hasta finales de 1995. Entre los años 1993 y 1995 y por períodos cortos de una semana, algunas estaciones quedaban inoperativas debido a que eran dañadas por la caída de rayos y lluvias intensas en el área del volcán Sabancaya. Durante el periodo eruptivo más crítico del volcán Sabancaya, sólo fue posible mantener operativa de manera permanente las estaciones sísmicas portátiles de CAJ y PIN con la consecuente pérdida de información. La Red Sísmica Telemétrica comenzó a funcionar cuando el proceso eruptivo del Sabancaya entraba a su etapa final; por lo tanto, esta información aunque importante, no ha permitido conocer la naturaleza de los sismos que se produjeron durante la primera fase del proceso eruptivo de dicho volcán (Rodríguez y Uribe, 1994; Uribe, 1995).

CLASIFICACION DE LOS REGISTROS DEL VOLCAN SABANCAYA

Durante todo el proceso eruptivo del volcán Sabancaya (entre 1986 y 1995), se ha registrado una gran variedad de señales sísmicas. A fin de realizar el análisis de estas señales se ha utilizado sus registros en las

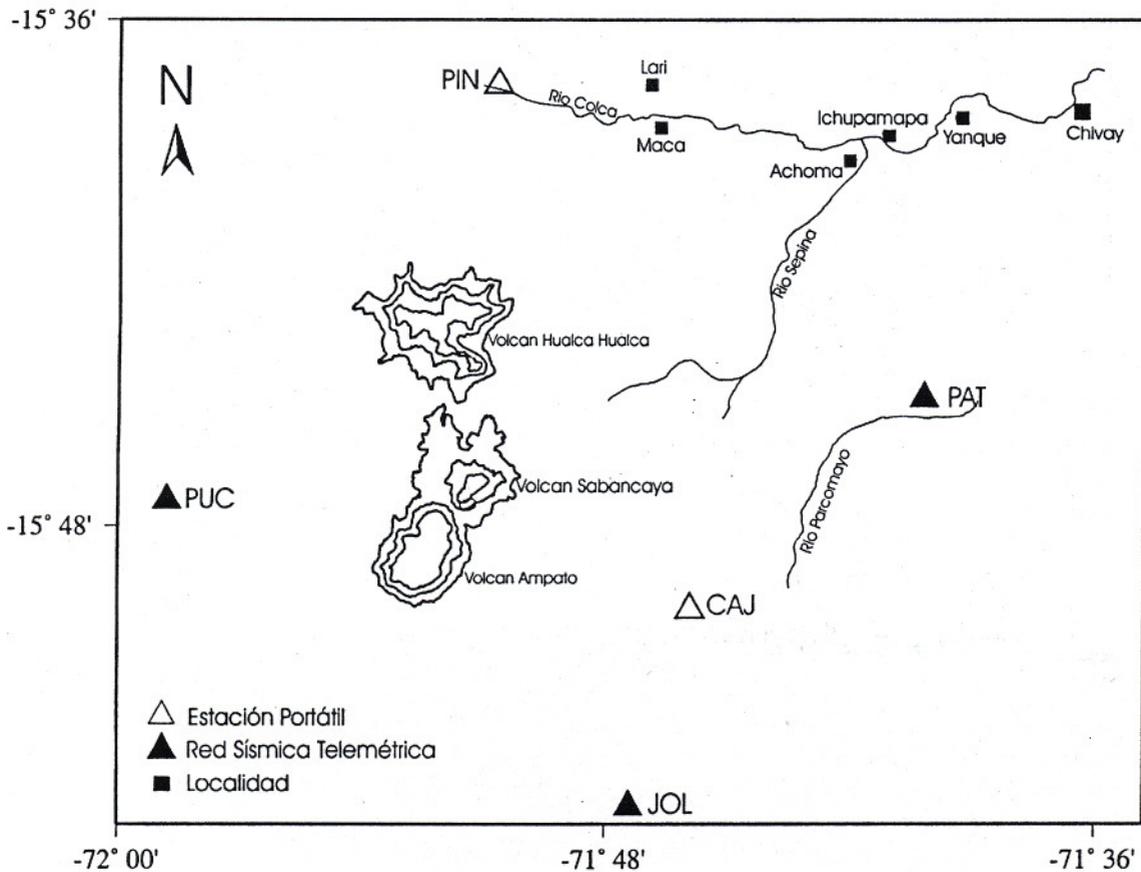


Fig.2: Ubicación del volcán Sabancaya y de las estaciones sísmicas (portátiles y Red Sísmica Telemétrica) instaladas por el Instituto Geofísico del Perú alrededor del volcán entre 1990 y 1995.

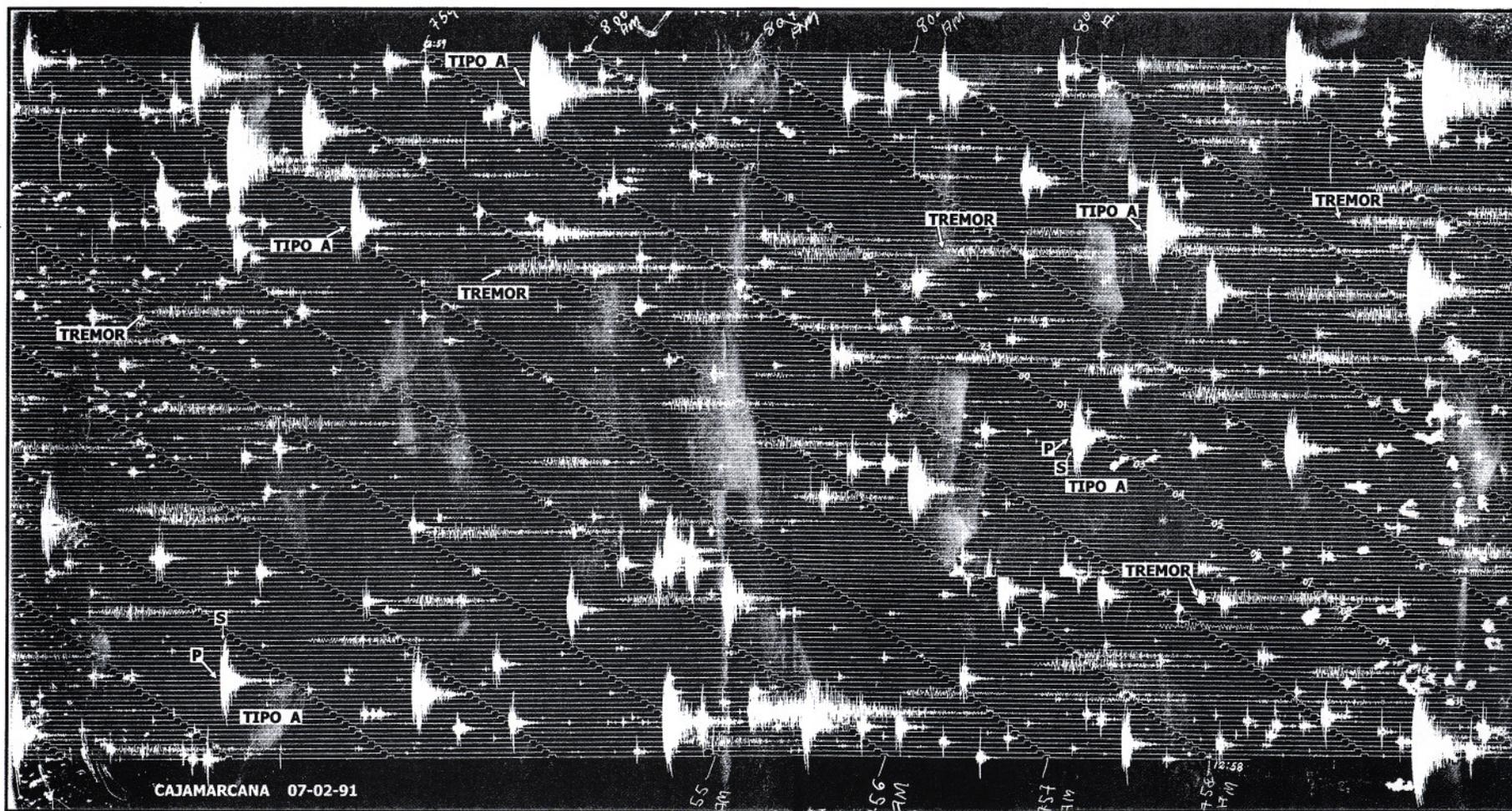


Fig.3: Sismograma de la estación sísmica de Cajamarca (CAJ) del día 7 de Febrero de 1991 (componente vertical).
 Obsérvese el registro de un gran número de señales sísmicas de Tipo-A con claras fases P y S.
 Asimismo, se tiene registros de tremores con duraciones menores a 3 minutos.

estaciones sísmicas de CAJ (portátil próxima al cráter), PUC, JOL, PAT (Red Sísmica Telemétrica) y CAY (Arequipa, centro de registro). De acuerdo a la clasificación de Minakami (1974) y Gil-Cruz (1999), las señales sísmicas producidas por el volcán Sabancaya pueden ser agrupadas en los siguientes tipos.

Señales Sísmicas de Tipo A. Todo el proceso eruptivo del volcán Sabancaya se ha desarrollado con la ocurrencia de sismos volcano-tectónicos, que generaban señales sísmicas de Tipo-A. Durante la primera fase de su proceso eruptivo (emisión fumarólica), el número de registros llegó a 400 por día aproximadamente, decayendo la frecuencia de los mismos entre los años 90 y 92 para luego registrarse al final del año 1995 no más de 10 sismos. En la Figura 3, se presenta el sismograma de la estación CAJ para el día 7 de Febrero de 1991 (24 horas de registro) en el cual se observa aproximadamente 150 sismos con señales de Tipo-A con sus fases P y S perfectamente identificables. La diferencia media entre los tiempos de llegada de estas fases es de 2 a 3 segundos, equivalente a distancias, desde la estación, del orden de 10 a 15 km; por lo tanto, estas señales corresponderían a sismos que se produjeron en el volcán. La duración del registro de señales sísmicas de Tipo-A, durante esta primera fase, fue menor a 50 segundos. Es importante observar que estos registros se caracterizan por presentar altas frecuencias y amplitudes, sugiriendo que deben su origen al fracturamiento de rocas a diferente escala dentro del cráter del volcán.

Señales Sísmicas de Tipo B. Señales de este tipo fueron observados en mayor número durante la segunda etapa eruptiva del volcán Sabancaya (emisión fumarólica y explosiones); por lo tanto, fueron registrados por las estaciones de la Red Sísmica Telemétrica. En la Figura 4 se presenta ejemplos provenientes de las estaciones de Jollajello (JOL) y Pucarilla (PUC). En estos sismogramas se observa que los registros de señales de Tipo-B, estuvieron acompañados del registro continuo de una señal cuyo origen no ha sido posible establecer debido principalmente a que durante su registro, no se observaron cambios importantes en el cráter del volcán o en sus alrededores.

Señales Sísmica de Tipo Período Largo (LP). Estas señales sísmicas fueron numerosas durante la segunda fase del proceso eruptivo del volcán Sabancaya (emisión fumarólica y explosiones), siendo muy notorias en los registros de las estaciones de la RSTS. En la Figura 5 se presenta algunos ejemplos de este tipo de señal, siendo el de mayor amplitud el registrado el 11 de Octubre de 1993 por la estación Patapampa (Figura 5a), con la particularidad que casi todos presentan el mismo tren de ondas. La señal sísmica más complejo corresponde al sismo registrado el 26 de Noviembre de 1993 por la estación de Pucarilla (PUC) y cuyas formas de onda sugieren el registro continuo de dos LP (Figura 5c). El registro de estas señales fue observado previos a procesos de emisión de nubes de gas de menor tamaño o vapor de agua.

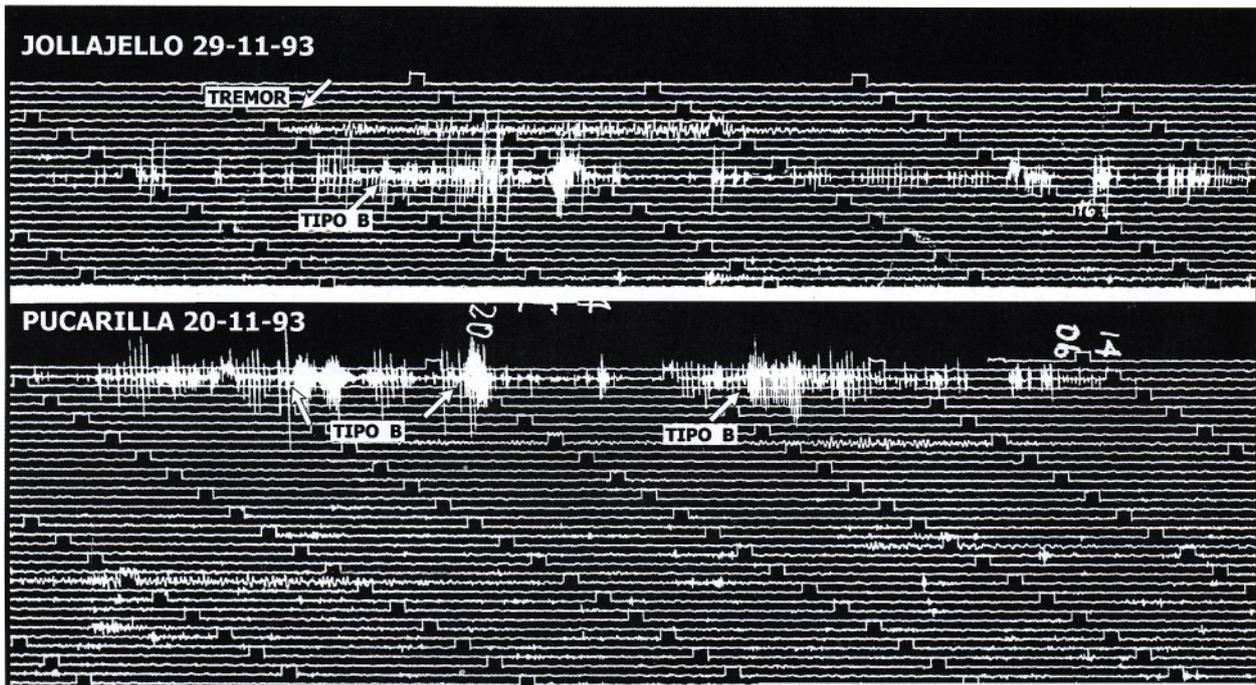


Fig.4: Sismogramas de las estaciones de JollaJello (JOL) y Pucarilla (PUC) mostrando el registro de señales sísmicas de Tipo-B y de algunos tremores.

Señales Sísmicas de Tipo Explosión. Durante la segunda fase del proceso eruptivo del volcán Sabancaya se observó en mayor número este tipo de señales sísmicas (emisión fumarólica y explosiones), las mismas que presentaron diversas duraciones y amplitudes dependiendo de la fuerza de la explosión. En la Figura 6a se presenta algunos ejemplos del registro de una sucesión de hasta cuatro explosiones de diferente tamaño en la estación de Cajamarca durante un período de tiempo del orden de 1 minuto. En la Figura 6b se muestra el registro de las señales sísmicas de dos explosiones precedidos del registro de un tremor de aproximadamente 3 minutos de duración, mientras que las explosiones no duraron más de 1 minuto. Asimismo, en esta figura se observa la presencia de algunas señales sísmicas de Tipo-A.

Señales Sísmicas de Tipo Tremor. El proceso eruptivo del volcán Sabancaya fue acompañado de un gran número

de procesos físico-químicos y tectónicos que permitieron el registro de diversas señales sísmicas de tipo Tremores, las mismas que se caracterizaban por presentar formas de onda bastante complejas. En general, el origen de estos tremores estaría asociado a una importante emisión fumarólica de diferente tamaño, así como a caída de cenizas y rocas volcánicas, las mismas que frecuentemente eran acompañadas de ruido. En la Figura 7 se presenta parte del sismograma de CAJ para el día 18 de Febrero de 1992 en el cual se observa el registro de gran variedad de tremores de diferente tamaño y duración, además del registro de algunas señales sísmicas de Tipo-A. Asimismo, registros de tremores pueden ser observados en las Figuras 3, 4, 5 y 6 respectivamente. De acuerdo a la diversidad de señales sísmicas asociados a tremores, se ha registrado tremores monocromáticos de tipo armónico (Figuras 8b,d) y espasmódicos (Figura 8c).

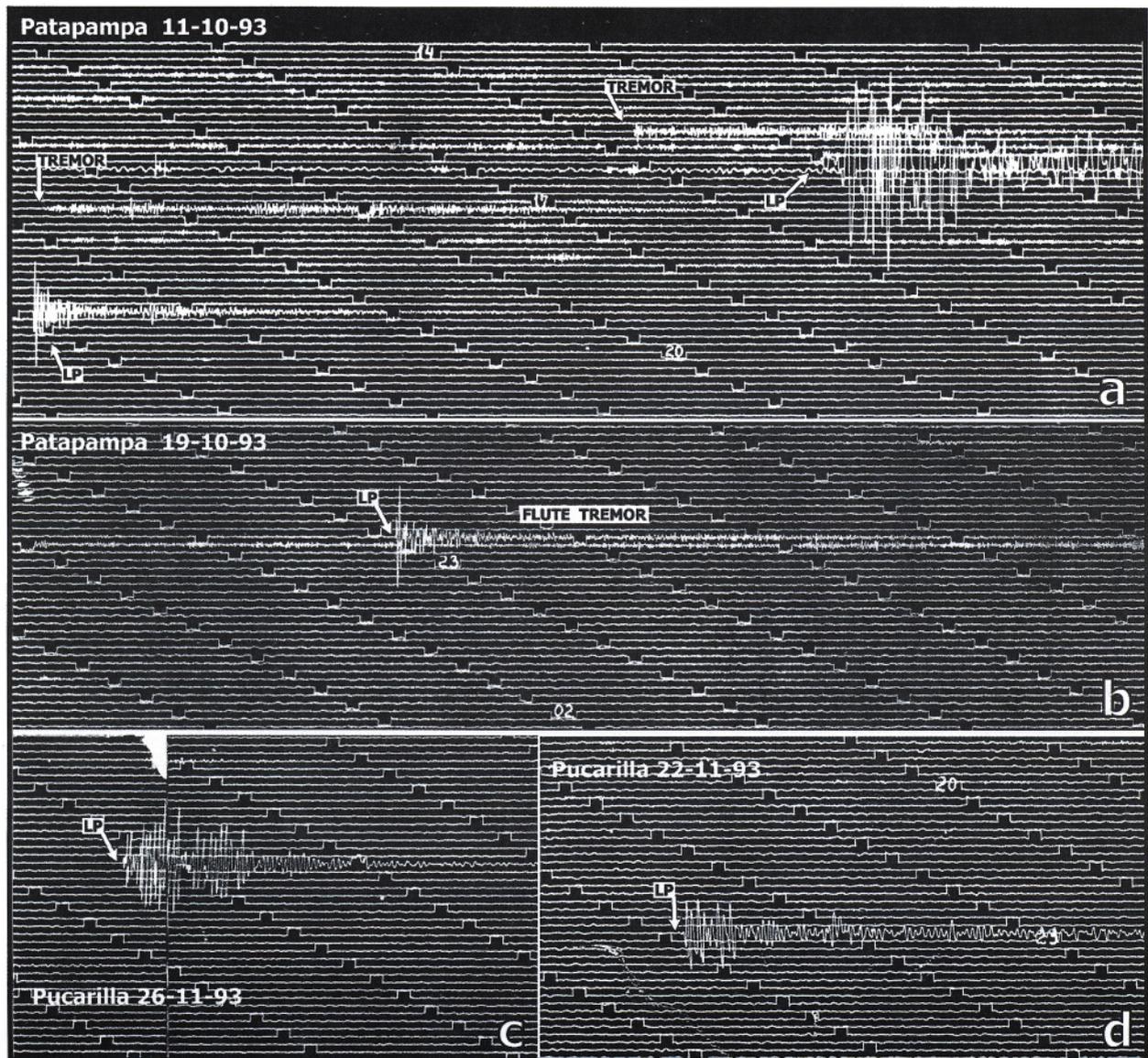


Fig.5: Sismogramas de las estaciones de Patapampa (PAT) y Pucarilla (PUC) mostrando ejemplos de típicos del registro de señales sísmicas de Tipo-LP.

En la figura (b), obsérvese el registro de un "Flute Tremor" después del registro de una señal Tipo-LP.

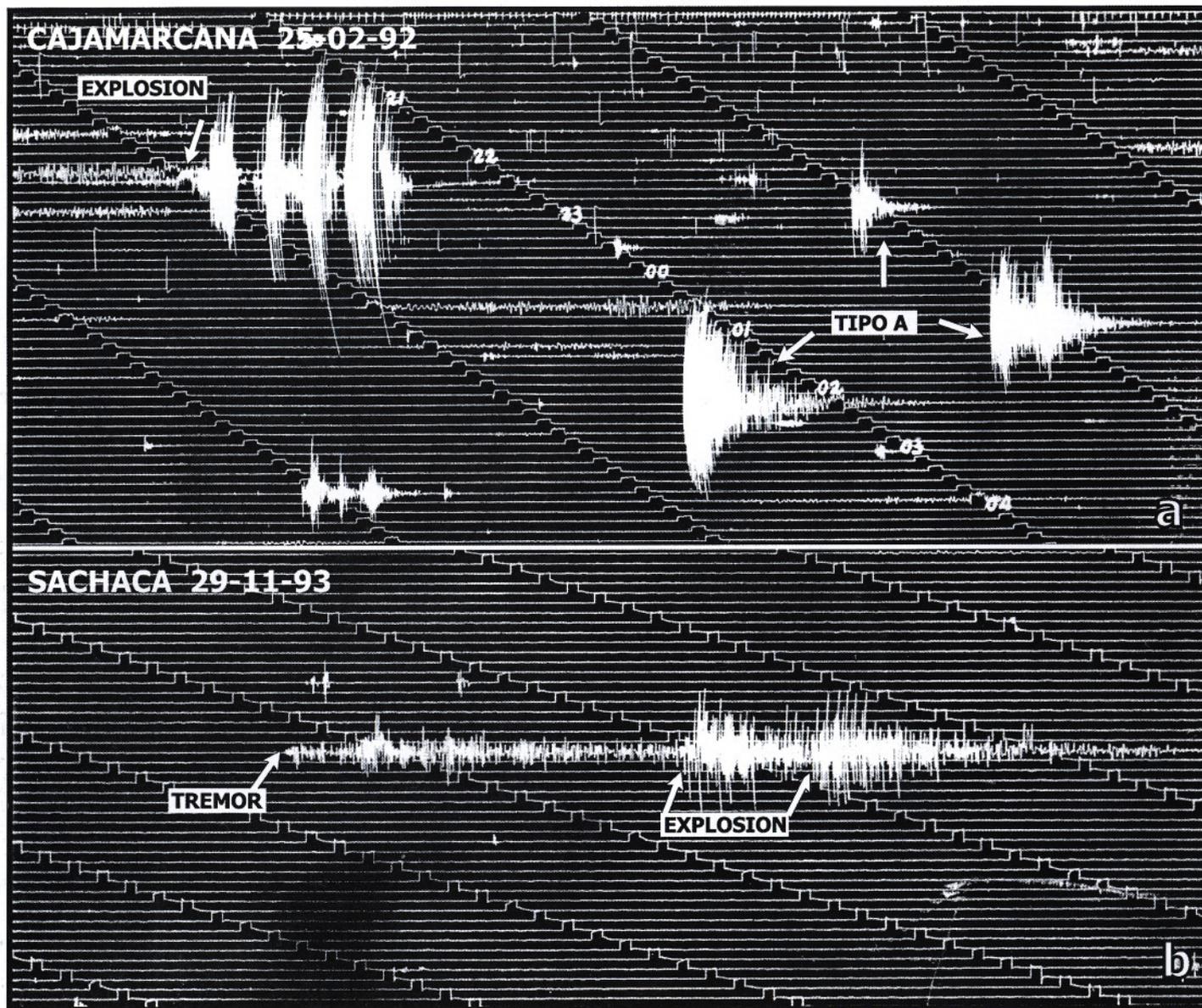


Fig. 6 a) Sismograma de la estación de CAJ mostrando el registro sucesivo de cuatro señales sísmicas de tipo explosión y señales de Tipo -A.
b) Sismograma de la estación de Sachaca (SAC) en la ciudad de Arequipa. Obsérvese el registro de dos explosiones después del registro de un tremor armónico.

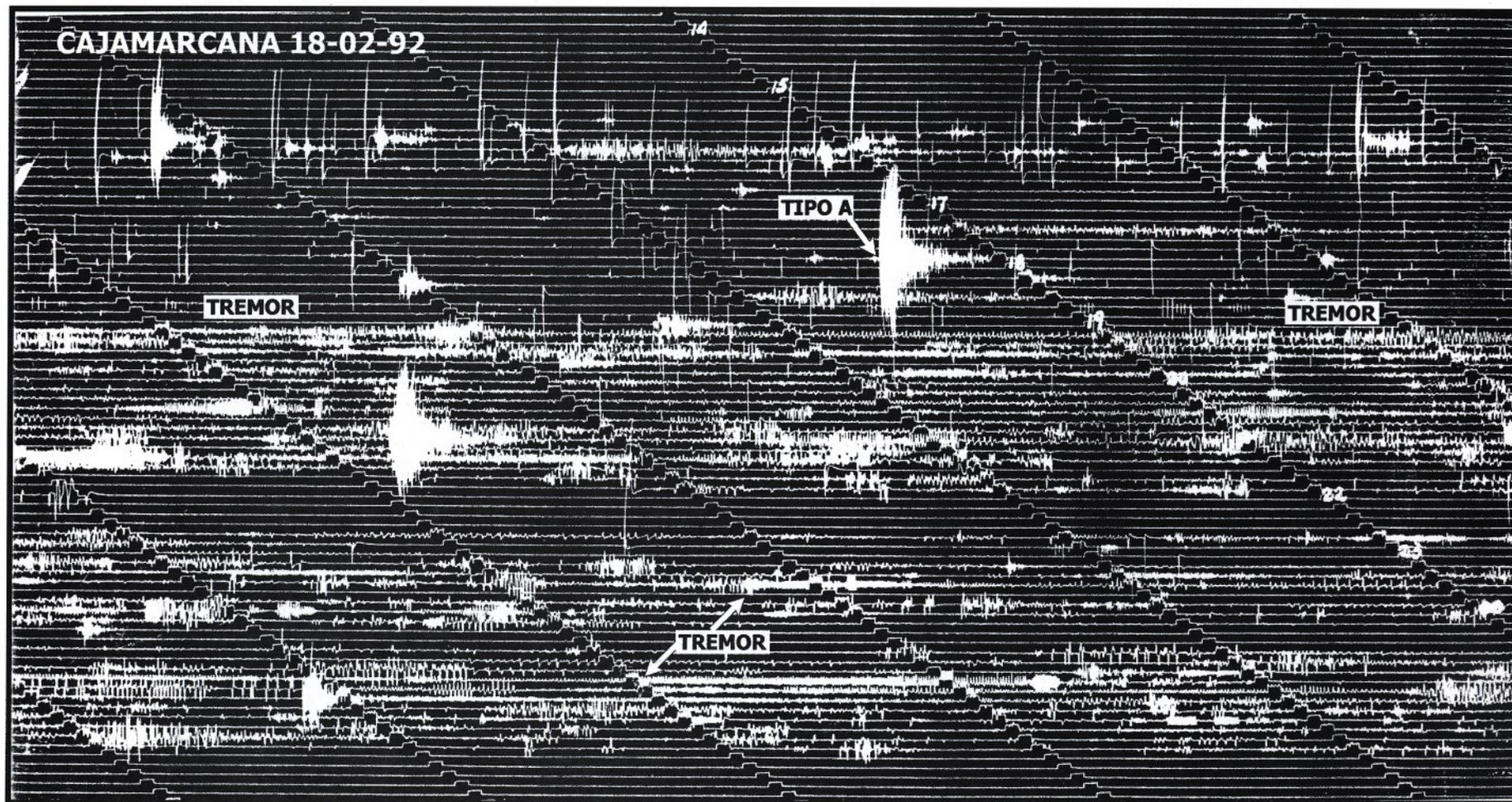


Fig.7: Sismograma de la estación de Cajamarca (CAJ) en el cual se puede observar el registro de diversos tipos de tremores. Obsérvese el registro de "Flute Tremor" de corta duración en la parte inferior del sismograma.

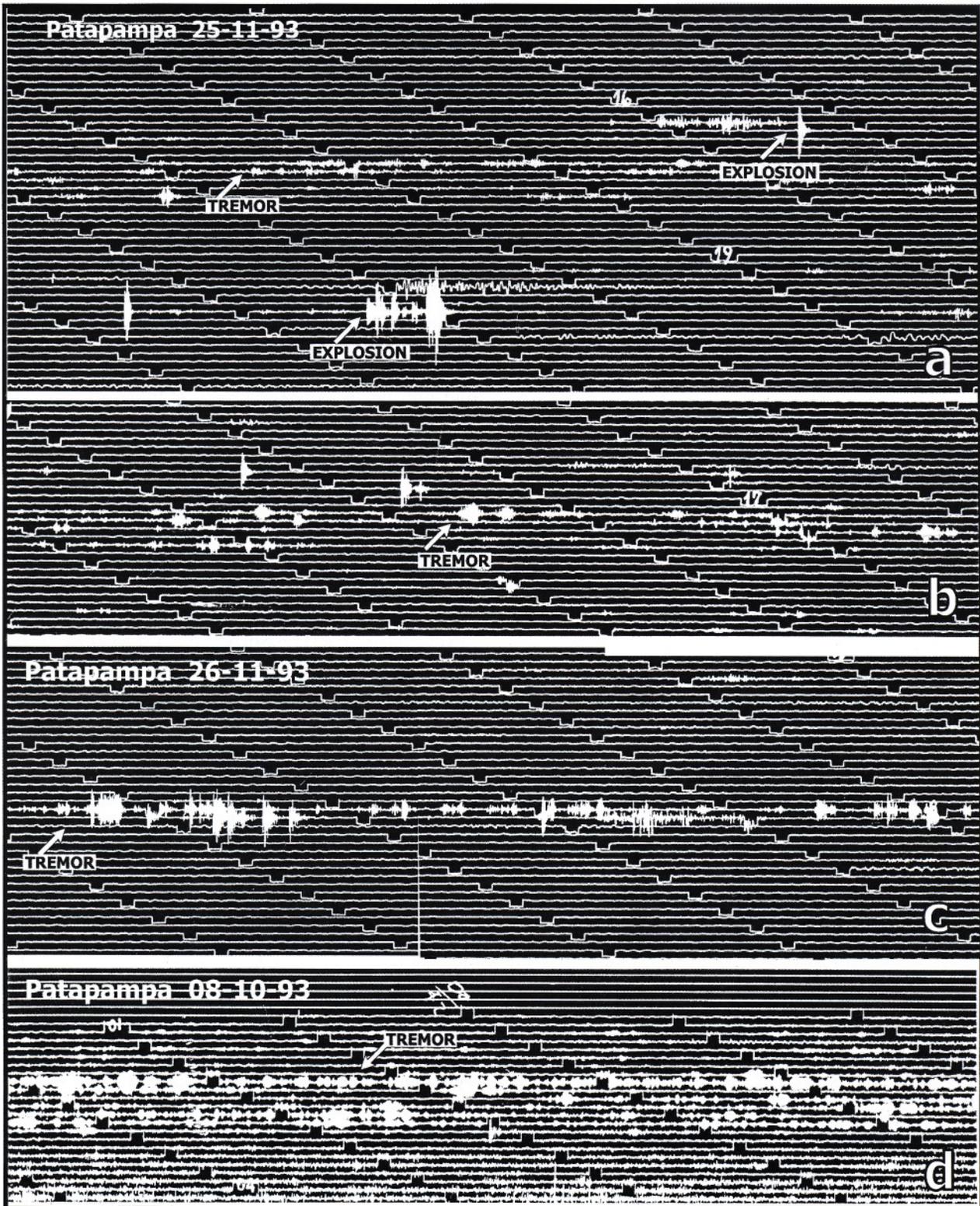


Fig.8: Sismogramas mostrando diversos tipos de tremores. a) tremores y explosiones, b y c) tremor de tipo monocromático y d) tremor de tipo espasmódico

Gil-Cruz (1999) analizando los registros de temores producidos por el volcán Galeras de Colombia, observó que el registro de la señal sísmica de Tipo-LP fue seguido de un temer, que en el momento de su registro emitía un sonido continuo, motivo por el cual le dio el nombre de "Flute Tremor" (Figura 1i), siendo el mismo observado y registrado durante un periodo de 20 días aproximadamente. Durante el proceso eruptivo del volcán Sabancaya, se presentó similar fenómeno, siendo el "Flute Tremor" registrado de manera esporádica y con duraciones del orden de dos minutos como máximo, tal como se observa en la Figura 7. Por otro lado, es importante resaltar el registro de este tipo de señal en la estación Patapampa, la más cercana al volcán, durante el día 19 de Octubre de 1993. Este temer se registró de manera continua por un período de 17 minutos aproximadamente, después del registro de una señal de Tipo-LP (Figura 5b). Según observaciones de campo, durante el proceso eruptivo del volcán Sabancaya era muy frecuente observar emisiones de gases acompañados de un ruido continuo por varios minutos principalmente durante la segunda fase de su proceso eruptivo.

CONCLUSIONES

El monitoreo sísmico del volcán Sabancaya fue realizado por el Instituto Geofísico del Perú entre 1990 y 1995. Durante este período y durante la primera fase eruptiva del volcán se instaló de manera permanente dos estaciones sísmicas portátiles y de una red sísmica telemétrica compuesta por tres estaciones, ambas utilizaron sensores verticales de periodo corto (1 Hz). Durante todo el proceso eruptivo del volcán Sabancaya, se ha registrado una gran variedad de señales sísmicas generadas por los diferentes procesos físico-químicos y tectónicos que tuvieron lugar entre los años 1986 y 1995, período en el cual se desarrolló todo el proceso eruptivo de dicho volcán.

El análisis y clasificación de la diversidad de señales sísmicas asociados a sismos volcánicos han sido realizados considerando como base la clasificación propuesta por Minakami (1974) y complementada con los resultados obtenidos por Tsuruga et al, (1997), Gil-Cruz y Chouet (1997) y Gil-Cruz (1999). Durante el proceso eruptivo del volcán Sabancaya se ha registrado, en su primera fase, un gran número de señales sísmicas de Tipo-A, explosiones y diversidad de temores, siendo los más importantes los "Flute Tremor" de corta duración registrados por la estación de Cajamarca, CAJ (Figura 7). Las señales sísmicas de Tipo-B, período largo (LP) y temores armónicos y espasmódicos fueron registradas durante la segunda fase del proceso eruptivo del volcán. El 19 de Octubre de 1993, la estación de Patapampa registró una señal sísmica de Tipo-LP acompañado del registro de un "Flute Tremor" durante 17 minutos aproximadamente y que según observaciones de campo produjo ruido de manera permanente.

La gran diversidad de señales sísmicas observadas sobre los registros obtenidos de las diferentes estaciones sísmicas instaladas alrededor del volcán Sabancaya, ha permitido un análisis de las formas de onda, duración y posible fuente de origen de los eventos. Se ha identificado todos los tipos de señales sísmicas consideradas en la clasificación propuesta por Minakami (1974), además de señales cuyo origen aún es tema de discusión, aunque ya han sido observados durante los procesos eruptivos de otros volcanes en el mundo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento al Dr. Orlando Macedo, quien proporcionó el total de los sismogramas obtenidos de las estaciones sísmicas instaladas para la vigilancia del Volcán Sabancaya a fin de que uno de los autores (Y.A.) elabore su tesis de Licenciatura. A la Sra. I. Perez-Pacheco por su asistencia en la elaboración de todas las figuras que acompañan al presente estudio. La atenta revisión de Hansjürgen Meyer permitió mejorar este artículo.

BIBLIOGRAFIA

- AKI K., CHOUET B. & DAS S. (1977).**- Source mechanism of volcanic tremor: Fluid-driven crack models and their applications to the 1963 Kilauea eruption. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 2, 259-287.
- ANTAYHUA Y. (2001).**- *Análisis y evaluación de la actividad sísmica en la región del volcán Sabancaya (Arequipa) y de los terremotos de Maca (1991), Sepina (1992) y Cabanaconde (1998)*. Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa. En Preparación.
- BANKS N., TILLING R., HARLOW D. & EWERT J. (1989).**- Volcano monitoring and short-term forecasts: *American Geophysical Union*, 51-62.
- BULMER M., ENGLE F. & JOHNSTON A. (1997).**- Nevado Sabancaya. *Global Volcanism Network Bulletin*, 22, 7, 14-15.
- CHOUET B. (1988).**- Resonance of a fluid-driven crack: radiation properties and implications for the source of long-period events and harmonic tremor., *J. Geophys. Res.*, 93, 4373-4400.
- CHOUET B. (1992).**- A seismic model for the source of long-period events and harmonic tremor. In: *Volcanic Seismology*. P. Gasparini, R. Scarpa and K. Aki (eds), IAVCEI Proc. Volcanol. 3, 133-156.
- DIBBLE R. (1974).**- Volcanic Seismology and accompanying activity of Ruapehu Volcano, New Zealand. In: *Physical Volcanology*. Civetta, L., Gasparini, P., Luongo, G. and Rapolla, A. (eds), Elsevier, Amsterdam, 333 p.

- FEHLER M.** (1983).- Observations of volcanic tremor at Mount St. Helens volcano. *J. Geophys. Res.* 88, 3476-3484.
- GERBE M-C. & THOURET J-C.** (1999).- Petrogenetic study of lavas erupted through the persistent explosive activity of the Nevado Sabancaya Volcano, Peru (1990-1998). *EUGX*, Strasbourg, France.
- GIL-CRUZ F. & CHOUET B.** (1997).- Long-period events, the most characteristic seismicity accompanying the emplacement and extrusion of a lava dome in Galeras Volcano, Colombia, in 1991. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 77, 121-158.
- GIL-CRUZ F.** (1999).- Observations of two special kinds of tremor at Galeras volcano, Colombia (1989-1991). *Annali di Geofisica*, 42, 3, 437-449.
- GUILLANDE R. & THOURET J-C.** (1992).- L'activité éruptive actuelle du Volcan Nevado Sabancaya (Sud du Pérou) et l'évaluation des menaces et des risques: géologie, cartographie et imagerie satellitaire. *Rapport Délégation aux Risques Majeurs, Ministère de l'Environnement*, Paris, France, 133p.
- HUAMAN D.** (1989).- *Exploitation des données SPOT pour l'analyse géologique et la localisation du risque naturel dans la vallée du Colca*. Rapport de DESS de Teledetection, Methodes et Application. GDTA et Labo. De Geol. Structurale et Teledetection., Paris VI, 30 p.
- HUAMAN D.** (1991).- Actividad volcánica del Nevado Sabancaya. Observaciones de Campo y de Satélite. VII Congreso Peruano de Geología. *Sociedad Geológica del Perú*. 1 p.
- HUAMAN D., ANTALLACA A. & AGUILARA.** (1992).- Comisión de viaje al Volcán Sabancaya: Efectos del Sismo del 01-02-92 en el área de Sepina. Informe Técnico, Instituto Geofísico del Perú, 15 p.
- HUAMAN D.** (1995).- *Métodos y aplicaciones de las imágenes de satélite en la cartografía geológica. El caso del seguimiento y evolución de la amenaza volcánica del Sabancaya (Región del Colca, Arequipa, Perú)*. Tesis de Ingeniería. Univ. San Agustín, 137 p.
- JUVIGNÉ E., THOURET J-C., GILOT E., LECLERCQ L. & GOURGAUD A.** (1998).- L'activité du volcan Nevado Sabancaya (Pérou) au cours de l'Holocène. *Quaternaire*, 9, 1, 45-51.
- KOSAKA R. & LAZO M.** (1990).- Estudio Preliminar de la sismicidad del volcán Sabancaya. *Informe del Instituto Geofísico de la Universidad Nacional San Agustín de Arequipa*, 35 p.
- KOYANAGIR., CHOUET B. & AKIK.** (1987).- Origin of volcanic tremor in Hawaii. Part. I. Data from the Hawaiian Volcano Observatory 1969-1985. In: R. Decker, T. Wright and P. Stauffer (eds), *Volcanism in Hawaii*, U.S., Geol. Surv., Prof. Pap., 1350, 1221-1257.
- LATTER J.** (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, 60 pp.
- LAZO M., KOSAKA R., MINAYA A., GONZALES E. & SOTO J.** (1991).- Evaluación de la actividad sísmica del volcán Sabancaya. *VII Congreso Peruano de Geología, Lima, Perú*. Resúmenes Extendidos, 19-21.
- MINAKAMI T.** (1963).- A note on earthquakes originating from volcanoes. In: Geophysical papers dedicated to Professor Kenzo Sassa. Kyoto University Geophysical Institute, Kyoto. 277-283 p.
- MINAKAMI T.** (1974).- Seismology of volcanoes in Japan. In: L. Civetta, P. Gasparini, G. Luongo y A. Rapolla (eds), *Physical Volcanology*. Elsevier, Amsterdam, 1-27.
- MINAKAMI T., ISHIKAWA T. & YAGIK.** (1951).- The 1944 eruption of volcano Usu in Hokkaido, *Japan Bulletin Volcanologique.*, 11, 45-157 p.
- RODRIGUEZ A. & URIBE M.** (1994).- Participación del Instituto Geofísico del Perú en relación con la reactivación del volcán Sabancaya, Provincia de Caylloma, Región Arequipa. *Informe Técnico del Instituto Geofísico del Perú*, 43 p.
- THOURET J-C., GUILLANDE R., HUAMAN D., GOURGAUD A., SALAS G. & CHOROWICZ J.** (1994).- L'activité actuelle du Nevado Sabancaya (Sud Pérou): reconnaissance géologique et satellitaire, evaluation et cartographie des menaces volcaniques. *Bull. Soc. Geol. France*, 165, 49-63.
- THOURET J-C., GOURGAUD A., GUILLANDE R. & SALAS G.** (1995.a).- 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 288. Lima, Perú.
- THOURET J-C., GOURGAUD A., URIBE M., RODRIGUEZA, GUILLANDE R. & SALAS G.** (1995b).- 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, 515-535.
- TSURUGA K., YOMOGIDA K., HONDA S., ITO H., OHMINATO T. & KAWAKATSU H.** (1997).- Spatial and temporal variations of volcanic earthquakes at Sakurajima Volcano, Japan. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 75, 337-358.
- URIBE M.** (1995).- Evaluación de la Actividad Sísmica en relación con el proceso eruptivo del volcán Sabancaya y el Valle del Colca. Resúmenes Extendidos. Seminario Taller: *Evaluación de la litósfera en los Andes peruanos y sus márgenes*. Programa PICG 288. Lima, Perú.