

## ANÁLISIS DE LA ACTIVIDAD SÍSMICA EN LA REGIÓN DEL VOLCÁN SABANCAYA (AREQUIPA)

Yanet ANTAYHUA, Hernando TAVERA, Isabel BERNAL

*Centro Nacional de Datos Geofísicos. Instituto Geofísico del Perú. E-mail: yanet@axil.igp.gob.pe*

### RESUMEN

El volcán Sabancaya forma parte del gran Complejo Volcánico Ampato-Sabancaya-Hualca Hualca y se ubica a 30 km al SW de la localidad de Chivay y a 80 km de la ciudad de Arequipa. Este volcán entra en reactivación en 1986 después de 200 años con intensa actividad fumarólica acompañado de importante actividad sísmica. En abril de 1990, el Instituto Geofísico del Perú instala seis estaciones sísmicas temporales alrededor del volcán Sabancaya que funcionaron de manera irregular hasta 1993, fecha en la cual se instala la Red Sísmica Telemétrica (RSTS) compuesta por 3 estaciones de período corto y que estuvo operativa hasta finales de 1995. La RSTS registro 212 sismos de tipo tectónico, los mismos que se distribuyen sobre fallas y lineamientos presentes en el área de Pampa Sepina ubicada a 5 km en dirección NE del volcán Sabancaya. Los sismos presentan magnitudes ML menores a 3.0 y profundidades máximas de 24 km. La información geológica, las observaciones visuales del proceso eruptivo del volcán y las características de la sismicidad, sugieren que la cámara magmática del volcán Sabancaya habría sido de menor volumen y que la deformación superficial presente en Pampa Sepina asociada a la importante actividad sísmica registrada entre 1993 y 1995, tendría su origen en los esfuerzos resultantes de la presión que ejerció el magma sobre las capas superficiales durante su propagación antes de llegar a la cámara magmática. Durante el período de funcionamiento de la RSTS, no se registró sismos tectónicos con posible origen en el interior del cono volcánico.

### ABSTRACT.- ANALYSIS OF THE SEISMIC ACTIVITY IN THE SABANCAYA VOLCANO REGION (AREQUIPA)

The Sabancaya volcano is a part of Ampato-Sabancaya-Hualca Hualca volcanic complex, and is located at 30 km from Chivay town and 80 km from Arequipa City. This volcano started an important eruptive activity in 1986 with intensive fumarolic emissions and noteworthy seismic activity. In April 90, the Geophysical Institute of the Peru installed six temporary seismic stations around Sabancaya volcano that was irregularly operated until 1993. Then the IGP installed a Seismic Telemetry Network (RSTS) composed by 3 stations of short period seismometers (SS-1), deployed around Sabancaya volcano. The RSTS was operating during the period 1993 to 1995 and recorded 212 tectonic earthquakes. All these events are analyzed in this study. The earthquakes spatial distribution shows localization on faults and alignments sited in Pampa Sepina, located at 5 km in NE direction from Sabancaya volcano. The earthquakes have ML magnitude < 3.0 and maximum depth of 24 km. Geological information, visual observations of the volcano's eruptive process, and the seismic characteristics, suggests that the magmatic chamber of Sabancaya volcano had a small volume. The superficial deformation in Pampa Sepina is associated to an important seismic activity that would be originated by the stress generated by magma during its ascend to the magmatic chamber. During the period of operation of the RSTS was not registered any tectonic seismicity originated in the interior of the volcanic cone.

### INTRODUCCIÓN

Los volcanes en la región Sur de Perú forman parte del extremo Norte de la denominada Zona Volcánica de los Andes Centrales (Francis y Silva, 1990) y considera la presencia de hasta 12 volcanes activos, siendo el volcán Sabancaya el de más reciente actividad caracterizada por la emisión de fumarolas acompañadas de importante actividad sísmica durante un período de 10 años (1986-1995). Durante el proceso eruptivo del volcán, el Instituto Geofísico del Perú (IGP) realizó una serie de misiones cortas de 2 a 3 días con el objeto de realizar observaciones in situ y así identificar la existencia de posibles patrones

geofísicos que permitan evaluar y analizar su comportamiento y evolución. La primera misión, aérea y terrestre, fue realizada el 24 de Junio de 1988 con la participación de investigadores del Servicio Geológico de los EE.UU., Escuela Politécnica de Ecuador, Laboratorio de Teledetección de la Universidad de París, Ministerio de Medio Ambiente-Delegación de Riesgos Mayores de Francia, Defensa Civil, Universidad Nacional de San Agustín (Arequipa) y el Instituto Geofísico del Perú (IGP). Esta misión, permitió observar el cráter del volcán, evaluar los puntos de emanación de gases y la presencia de fracturas abiertas sobre la misma. Posteriormente, en Agosto de 1988 y Mayo de 1989 se realizan otras misiones

grupo, de distinguen potentes derrames lávicos de andesitas, dacitas y napas ignimbríticas del grupo Barroso del Plioceno Cuaternario representado principalmente por el volcán Sabancaya, actualmente en actividad (Chorowicz et al., 1992). Los productos de erosión actual del volcán Sabancaya, se localizan en los flancos y fondos de los valles de Lari y Chivay constituyendo depósitos de aluviales, coluviales y rellenos lacustres.

Por otro lado, el volcán Sabancaya se encuentra rodeado de actividad tectónica reciente, la misma que ha sido estudiada y analizada a partir de imágenes de satélite Landsat MSS y observaciones de campo por Huamán et al. (1993) y Huamán (1995). En la Figura 2, se observa la presencia de una importante deformación en la región del volcán Sabancaya representada principalmente por las fallas de Ichupampa, Huanca y el sistema Huambo-Cabanaconde, todas ubicadas en el extremo NE, SW y Norte del complejo volcánico Ampato-Sabancaya-Hualca Hualca (Sébrier, 1985). Asimismo, en la figura se observa la presencia de un importante número de lineamientos sobre la zona central de la región de estudio conocida como Pampa Sepina y que han sido puestos en evidencia por Huamán et al. (1993) y revisadas por Mering, et al. (1996) a partir de imágenes satelitales SPOT y Landsat MSS. Según Huamán et al. (1993), el elemento de deformación más representativo en esta área lo constituye el lineamiento de Sepina (LS), el mismo que parte del volcán Sabancaya pasando por Pampa Sepina y por las localidades de Achoma, Yanque, Coporaque e Ichupampa hasta llegar a cortar a la falla de Ichupampa. Un análisis en detalle realizado sobre las imágenes de satélite obtenidas en 1993, ha permitido identificar la presencia de lineamientos menores en esta área orientados en dirección NE-SW y N-S cerca de las localidades de Huituhasi y Layuni, así como otros orientados en dirección E-W cerca de Lari y Maca. Según Mering et al. (1996) la disposición discontinua de estos lineamientos sugieren que son muy recientes.

#### **COMPLEJO VOLCÁNICO AMPATO-SABANCAYA-HUALCAHUALCA**

En la región Sur de Perú, el mayor complejo volcánico esta formado por los volcanes Nevado Hualca Hualca de 6020 m.s.n.m. (zona Norte), Sabancaya de 5976 m.s.n.m (zona Centro) y Nevado Ampato de 6280 m.s.n.m (zona Sur), todos distribuidos de Sur a Norte entre las localidades de Huanca y Cabanaconde (provincia de Caylloma, departamento de Arequipa). Este complejo volcánico se localiza a 80 km aproximadamente en dirección N-E de la ciudad de Arequipa, siendo su actividad no muy conocida; sin embargo, existen referencias de actividad eruptiva desde inicios de la llegada de los españoles (siglo XVI). Así, a mitad del siglo XVIII las crónicas de Travada y Córdoba (1752) y Barriga (1951) indican que este complejo, conocido entonces como "Ambato" que en el lenguaje quechua significa "Sapo", ha pasado por dos episodios eruptivos, uno en 1752 y

otro en 1784-1785. Estos autores indican: "El volcán de Ambato, como han corrompidos los españoles, está en la provincia de Collagas a veinte y tantas leguas al occidente de la ciudad de Arequipa ... allí, el volcán esta perennemente ardiendo de día y de noche y que no hay noticia de haber hecho estragos en tiempos inmemoriales". Así mismo, un 11 de Julio de 1784 posterior al terremoto del 13 de Mayo de ese año, en un diario elaborado por Zamácola y Jauregui (1804), se lee: "Día, 11.- a las 9 y 56 minutos se sintió un temblor de tierra, con bastante remezón pero no causó ningún daño. Se tuvo noticia de que el pueblo de Lari, jurisdicción de Caylloma, hay un cerro o volcán llamado Ambato, el que a efectos de estos terremotos, el volcán humea y bosteza fuego" (Barriga, 1951). Ninguna de estas descripciones permitió entonces discernir a cual de los tres volcanes se referían, aunque en la actualidad se asume que se trataría del volcán Sabancaya (Rodríguez et al., 1992). Desde entonces, no se tenía noticias de una posible reactivación del volcán Sabancaya hasta 1981, donde las primeras señales de actividad fueron proporcionadas por los habitantes de las localidades más cercanas al mismo. Posteriormente, en 1985 el volcán incrementó notablemente su actividad fumarólica acompañada de ruidos sonoros que hasta entonces eran poco frecuentes (Huamán et al., 1993).

En Noviembre de 1986, el volcán Sabancaya inicia una actividad fumarólica intensa con la consecuente emisión de gases que alcanzaron alturas de 500 y 1000 metros visibles a varios kilómetros, hecho que provocó alarma en los habitantes de los poblados de Chivay y Cabanaconde ubicados en los alrededores del complejo volcánico. Posteriormente, la actividad fumarólica fue disminuyendo paulatinamente hasta mediados de 1987 para luego incrementarse y afectar a las localidades más cercanas con gases y fumarolas cada vez más violentas. Durante el año 1989, la actividad del volcán Sabancaya disminuye y en Mayo de 1990 ingresa a una fase explosiva caracterizada por emisión de fumarolas y caída de rocas acompañadas de ruidos y sismicidad local muy débil.

Ante la evidencia del peligro de una probable erupción del volcán Sabancaya, el Instituto Geofísico del Perú (IGP), la Universidad Nacional de San Agustín y diferentes agencias internacionales participaron en diversas misiones de campo hacia la región del volcán con el objetivo de realizar estudios geológicos, tectónicos y geofísicos y así monitorear su evolución. Como parte de estos estudios, en 1993 el IGP realiza la instalación de una Red Sísmica Telemétrica (RSTS) compuesta por 3 estaciones y cuya información es utilizada en el presente estudio.

#### **DATOS**

##### **Red Sísmica Telemétrica del Volcán Sabancaya (RSTS)**

La Red Sísmica Telemétrica del Volcán Sabancaya (RSTS) estuvo conformada por tres estaciones sísmicas

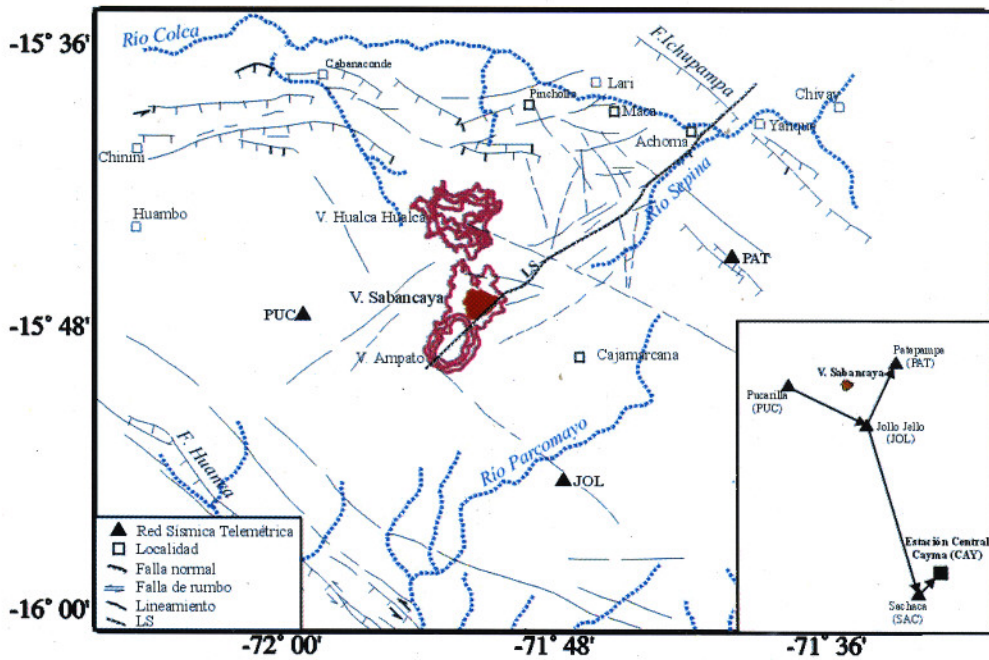


Fig. 2: Mapa tectónico de la región de estudio donde se muestra la localización del Complejo Volcánico Ampato-Sabancaya-Hualca Hualca, las principales fallas, lineamientos y las estaciones de la RSTS en la región de estudio. LS= Lineamiento de Sepina

instaladas en los puntos denominados Patapampa (PAT), Pucarilla (PUC) y Jollo-Jollo (JOL), todas alrededor del volcán Sabancaya y a distancias desde el cráter de 14, 16 y 20 km respectivamente. Las estaciones sísmicas fueron de tipo Sprengnether con sismómetro de periodo corto SS-1 (período natural de 1 segundo) y componente vertical con una sensibilidad variable de 16 a 36 db. Los datos fueron registrados inicialmente en papel ahumado y en su última etapa de operatividad en papel térmico a razón de 90 mm/minuto. La transmisión de los datos se efectuaba por el sistema radio telemétrico en tiempo real hacia una estación repetidora (Sachaca) para luego llegar la señal a la Estación Central ubicada en el distrito de Cayma en Arequipa (Figura 2). La Red Sísmica Telemétrica del Volcán Sabancaya (RSTS) funcionó de manera continua durante el año 1993 y entre Julio y Diciembre de 1995. La mayor información sísmica obtenida de esta RSTS corresponde al año 1993, ya que durante el año 1995 la sismicidad disminuyó considerablemente. Esta información sísmica ha permitido construir una base de datos de 212 sismos de tipo tectónico con sus respectivas lecturas de tiempos de llegada para las fases P y S (información para la localización hipocentral) y lectura de la duración total del registro de la señal en cada una de las estaciones (cálculo de la magnitud del sismo). En la Figura 3, se muestra la señal de un sismo registrado en las 3 estaciones de la RSTS.

#### Algoritmo

La localización hipocentral de los sismos resulta ser uno de los problemas más complejos de la Sismología

y para su solución se han creado distintos algoritmos que permitan conocer las coordenadas geográficas del epicentro, el tiempo origen y la profundidad del foco a partir de los tiempos de llegada de las fases P y S a cada una de las estaciones sísmicas. Para la localización hipocentral de los sismos ocurridos en la región del volcán Sabancaya, se ha utilizado el algoritmo Hypoellipse (Lahr, 1998), el mismo que a diferencia de otros, ha permitido la utilización simultánea de varios modelos de velocidad y corregir de manera automática la diferencia de altitud existente entre cada estación considerando para ello la velocidad de la primera capa del modelo utilizado. Sin embargo, este algoritmo requiere además, los tiempos de llegada de las fases P y S, las coordenadas de las estaciones, una relación  $V_p/V_s$  para corregir la velocidad de la onda S y un modelo de velocidad. El valor  $V_p/V_s = 1.65 \pm 0.01$  ha sido obtenido a partir de la curva de Wadati-Benioff utilizando los tiempos de llegada de las fases P y S de 120 sismos registrados por la RSTS, siendo este coherente con los utilizados en otros estudios de microsismicidad realizados en áreas con características tectónicas similares a la de este estudio (Deverchere et al, 1989; Dorbath et al., 1991; Lindo, 1993).

Por otro lado, para el Perú no existe modelos reales que permitan conocer la distribución de la velocidad de las ondas en el interior de la corteza a nivel local, frecuentemente se opta por evaluar modelos regionales a fin de seleccionar aquel que resuelva mejor los parámetros hipocentrales y por lo tanto, que presente errores mínimos en la estimación de los mismos. En este estudio se evalúa los modelos de velocidad propuestos por James (1971), Grange (1983) y Dorbath et al. (1991), todos utilizados en

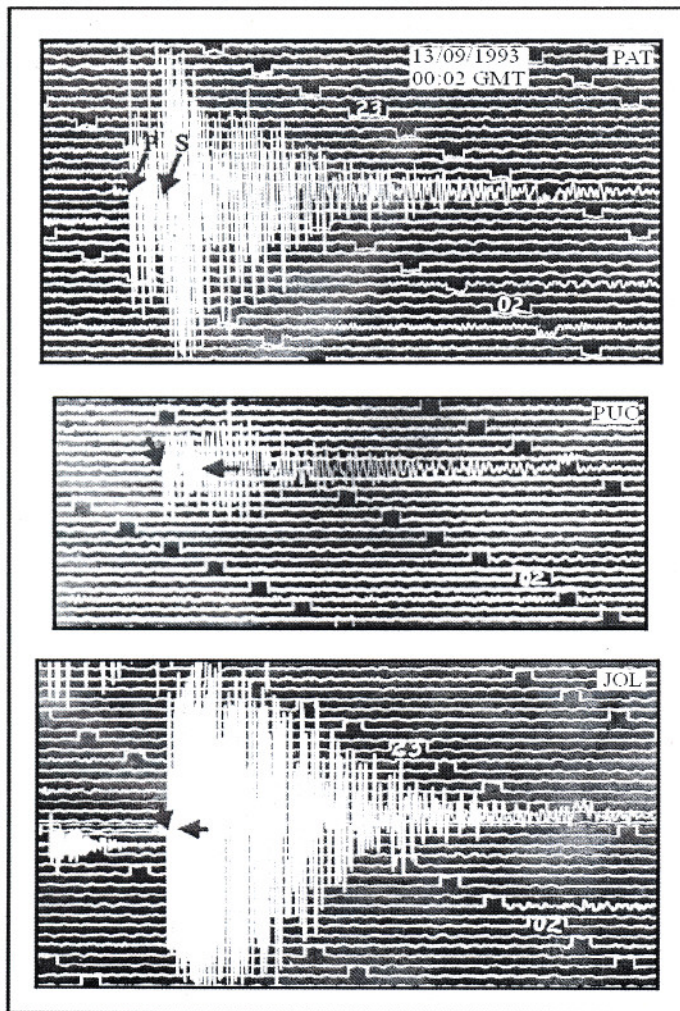


Fig. 3: Ejemplo de sismo de tipo tectónico registrado por las 3 estaciones de la RSTS.

estudios de microsismicidad realizados en Perú (Tabla 1). Así, en la Tabla 2 se presenta los parámetros hipocentrales obtenidos para 10 sismos seleccionados al azar de nuestra base de datos, los mismos que han sido obtenidos utilizando el algoritmo Hypoellipse y la relación  $V_p/V_s$  de 1.65 y cada uno de los modelos de velocidad de la Tabla 1. Los resultados sugieren que en general, las coordenadas epicentrales de cada sismo no varían entre uno u otro resultado, siendo los errores “erh” mínimos en todos los casos (<1.5 km). Sin embargo, los valores obtenidos con cada modelo de velocidad para la profundidad de los focos son muy variables y muestran diferencias considerables llegando a fluctuar entre 0.8 a 4.5 km (“erz”), aunque el sismo ocurrido el 29 de Julio de 1993 presenta un error del orden de 18 km. En general, los resultados obtenidos con el modelo 3 presentan menor error en la localización hipocentral de los sismos (parámetros hipocentrales en negrita, Tabla 2); por lo tanto, se ha considerado utilizar este modelo para el cálculo de los parámetros hipocentrales de todos los sismos que constituyen nuestra base de datos.

Para el cálculo de la magnitud, se ha utilizado el tiempo de duración total del registro de la señal del sismo

leída en cada una de las 3 estaciones que integran la RSTS y la relación propuesta por Klein (1978),

$$ML = -1.1 + 2 \log(T) + 0.007 D + 0.0035 (Z)$$

donde, ML es la magnitud local, T la duración de la señal en segundos, D y Z la distancia epicentral y profundidad del foco en kilómetros.

Aunque la duración del registro no permite medir el tamaño real del sismo, por lo menos facilita realizar de manera aproximada una estimación de la cantidad de energía liberada por el sismo y por lo tanto, es válida para los objetivos del presente estudio.

## SISMICIDAD

Durante el período de operatividad de la RSTS se ha registrado un importante número de señales sísmicas, muchas de ellas asociadas probablemente al proceso eruptivo del volcán Sabancaya (Tavera y Antayhua, 2000). Ante la variedad de registros, se ha visto por conveniente analizar en este estudio los sismos de tipo tectónico, los mismos que al ser numerosos sugieren la existencia de una

<b>MODELO 1</b> James (1971) Vp(Km./s)Prof.(Km.)		<b>MODELO 2</b> Grange (1983) Vp (km./s.)Prof (km)		<b>MODELO 3</b> Dorbath et al. (1991) Vp (km./s.) Prof.(km.)	
5.5	0.0	5.5	0.0	5.2	0.0
6.0	5.0	6.0	5.0	6.2	15.0
6.6	25.0	6.8	30.0	6.8	30.0
7.9	60.0	8.0	50.0	8.0	50.0
8.0	100.0				

Tabla 1. Modelos de velocidad evaluados en este estudio.

Fecha aa /mm/dd	Hora h:min:seg	Origen	Latitud (grados)	Longitud (grados)	Prof. (km)	ML	rmc (km)	st	erh (km)	erz (km)	M
1993/07/17	4:14: 9.51		-15.689	-71.796	11.8	2.2	0.2	3	0.63	1.80	M1
1993/07/17	4:14: 9.51		-15.679	-71.791	13.8	2.2	0.2	3	1.16	2.25	M2
<b>1993/07/17</b>	<b>4:14: 9.51</b>		<b>-15.680</b>	<b>-71.791</b>	<b>13.8</b>	<b>2.2</b>	<b>0.2</b>	<b>3</b>	<b>0.30</b>	<b>2.29</b>	<b>M3</b>
1993/07/29	2:38:52.76		-15.731	-71.822	8.2	2.3	0.2	3	0.51	18.43	
1993/07/29	2:38:52.83		-15.724	-71.822	11.3	2.3	0.2	3	0.91	2.56	
<b>1993/07/29</b>	<b>2:38:52.81</b>		<b>-15.725</b>	<b>-71.822</b>	<b>11.3</b>	<b>2.3</b>	<b>0.2</b>	<b>3</b>	<b>0.97</b>	<b>2.35</b>	
1993/08/01	17: 8: 9.59		-15.710	-71.805	5.9	2.2	0.2	3	0.47	2.04	
1993/08/01	17: 8: 9.59		-15.702	-71.801	8.3	2.2	0.2	3	0.97	3.62	
1993/08/01	17: 8: 9.59		-15.701	-71.800	8.7	2.2	0.2	3	1.07	2.99	
1993/08/22	22:34:15.68		-15.722	-71.801	10.8	2.1	0.1	3	0.53	2.11	
1993/08/22	22:34:15.67		-15.717	-71.797	13.3	2.2	0.1	3	0.97	2.19	
<b>1993/08/22</b>	<b>22:34:15.63</b>		<b>-15.717</b>	<b>-71.797</b>	<b>13.2</b>	<b>2.2</b>	<b>0.1</b>	<b>3</b>	<b>0.04</b>	<b>2.11</b>	
1993/08/26	3:53:26.10		-15.820	-71.839	10.0	2.1	0.1	3	0.65	2.16	
1993/08/26	3:53:26.09		-15.832	-71.842	12.4	2.1	0.1	3	0.90	2.00	
<b>1993/08/26</b>	<b>3:53:26.10</b>		<b>-15.832</b>	<b>-71.842</b>	<b>12.4</b>	<b>2.1</b>	<b>0.1</b>	<b>3</b>	<b>0.19</b>	<b>1.89</b>	
1993/09/02	2: 6:54.44		-15.927	-71.821	26.3	2.4	0.0	3	0.86	0.87	
1993/09/02	2: 6:54.49		-15.935	-71.821	27.0	2.4	0.0	3	1.42	1.31	
<b>1993/09/02</b>	<b>2: 6:54.63</b>		<b>-15.940</b>	<b>-71.821</b>	<b>27.5</b>	<b>2.4</b>	<b>0.0</b>	<b>3</b>	<b>1.39</b>	<b>0.30</b>	
1993/09/02	15: 6: 3.06		-15.824	-71.823	8.5	2.5	0.1	3	0.89	2.97	
1993/09/02	15: 6: 3.06		-15.825	-71.823	8.8	2.5	0.1	3	0.79	2.42	
<b>1993/09/02</b>	<b>15: 6: 3.05</b>		<b>-15.813</b>	<b>-71.823</b>	<b>6.2</b>	<b>2.5</b>	<b>0.1</b>	<b>3</b>	<b>0.38</b>	<b>1.74</b>	
1993/09/02	23: 4:20.55		-15.806	-71.830	9.4	2.3	0.1	3	0.65	2.91	
1993/09/02	23: 4:20.55		-15.816	-71.831	12.2	2.3	0.1	3	0.83	2.12	
<b>1993/09/02</b>	<b>23: 4:20.54</b>		<b>-15.816</b>	<b>-71.831</b>	<b>12.2</b>	<b>2.2</b>	<b>0.1</b>	<b>3</b>	<b>0.81</b>	<b>1.98</b>	
1993/09/03	5:24:53.86		-15.716	-71.859	13.8	2.9	0.1	3	1.05	2.16	
1993/09/03	5:24:53.84		-15.716	-71.859	13.7	2.9	0.1	3	1.14	2.13	
<b>1993/09/03</b>	<b>5:24:53.86</b>		<b>-15.721</b>	<b>-71.854</b>	<b>11.6</b>	<b>2.8</b>	<b>0.2</b>	<b>3</b>	<b>0.56</b>	<b>1.85</b>	
1993/10/30	7:58:42.98		-15.691	-71.818	5.5	2.3	0.2	3	0.52	3.44	
1993/10/30	7:58:42.97		-15.680	-71.816	7.6	2.3	0.2	3	1.09	4.51	
<b>1993/10/30</b>	<b>7:58:42.94</b>		<b>-15.678</b>	<b>-71.816</b>	<b>8.0</b>	<b>2.3</b>	<b>0.2</b>	<b>3</b>	<b>1.25</b>	<b>2.25</b>	

rmc=raíz media cuadrática (km), st=número de estaciones, erh y erz =error en la horizontal y vertical (km), M = modelos de velocidad.

Tabla 2. Comparación entre los parámetros hipocentrales para 10 sismos ocurridos en la región del Volcán Sabancaya obtenidos con el algoritmo Hypoellipse y los 3 modelos de velocidad de la Tabla 1.

actividad tectónica activa en la región de estudio. Durante los años 1993 y 1995 se ha registrado un total de 212 sismos tectónicos con  $T_s-T_p \leq 5$  segundos, equivalente a distancias medias de 25-30 km del área de interés, de ahí que pueden ser considerados como sismos locales. De estos sismos, 38 corresponden a sismos localizados con 3 fases P y 3 fases S (Grupo A) y los restantes con 3 fases P y 2 fases S (Grupo B). En general, todos los sismos presentan magnitudes ML menores a 3.0 y errores en sus parámetros hipocentrales menores a 2.5 km.

En la Figura 4a, se muestra la distribución espacial de la sismicidad ocurrida en la región del volcán Sabancaya entre 1993 y 1995, y en ella se observa que los sismos correspondientes al Grupo A (círculos rojos) se distribuyen principalmente en el área de Pampa Sepina, la misma que se caracteriza por presentar un gran número de fallas y lineamientos puestos recientemente en evidencia por Mering et al. (1996). Mientras que, un grupo pequeño de 5 sismos se distribuye de manera muy dispersa al SE del volcán Sabancaya sin mostrar tendencia alguna. Los sismos del Grupo B (círculos verdes), al igual que los del grupo A, se distribuyen sobre el área de Pampa Sepina circunscritos por las estaciones de la RSTS y el río Colca. La mayor concentración de sismos se produce sobre un lineamiento ubicado al Este del volcán Hualca-Hualca con aparente orientación en dirección N-S. Agrupamientos secundarios se presentan sobre otros lineamientos, pero al ser menor el número de los mismos no es posible correlacionarlos. En el resto del área, los sismos se distribuyen de manera dispersa. En general, la sismicidad se concentra sobre un área de  $112 \times 112 \text{ km}^2$  y su distribución espacial sugiere que durante el periodo de operatividad de la RSTS, el área de Pampa Sepina fue la que soportó la mayor deformación tectónica y no el volcán Sabancaya como se suponía.

A fin de analizar la distribución de los sismos en función de la profundidad de sus focos, se ha elaborado secciones verticales sobre 4 lineamientos caracterizados por presentar agrupamientos importantes de sismos y otra sección paralela al río Sepina a fin de considerar el total de la sismicidad ocurrida en la región del volcán Sabancaya. Estas secciones son presentadas en la Figura 4b y sus características principales son:

*Sección A-A'*: En esta sección los sismos alcanzan una profundidad máxima de 20 km y forman dos alineaciones aparentes, una vertical y otra casi vertical con pendiente en dirección NE y que probablemente correspondan a L1.

*Sección B-B'*: Según la sección, los sismos alcanzan una profundidad 24 km y se distribuyen formando hasta cuatro alineaciones aparentes, todos por debajo de F1 y L2.

*Sección C-C'*: En la sección los sismos no sobrepasan los 24 km de profundidad y se distribuyen de manera dispersa al SE del lineamiento L3.

*Sección D-D'*: En esta sección se observa que el total de la sismicidad se distribuye hasta una profundidad de 24 km, siendo este nivel menor por debajo del volcán Sabancaya y de la falla Ichupampa. La mayor concentración de sismos se presenta en el centro de la

sección y que en superficie corresponde a Pampa Sepina. Por debajo del volcán Sabancaya, no se observa la presencia de actividad sísmica.

## DISCUSIÓN Y RESULTADOS

La distribución espacial de los sismos en la región del volcán Sabancaya, permite observar que estos se encuentran sobre toda el área denominada Pampa Sepina, observándose una mayor concentración de los mismos en el extremo superior entre el río Colca, el Volcán Hualca-Hualca y la localidad de Maca. Estas características de la sismicidad, permite sugerir que ésta tuvo su origen en la importante deformación superficial producida en Pampa Sepina durante el período en que se desarrolló el proceso eruptivo del volcán Sabancaya. El análisis realizado sobre imágenes de satélite tomados antes del proceso eruptivo del volcán, permitió observar en toda la región la ausencia de evidencias de deformación superficial; sin embargo, cuando se analiza las imágenes tomadas después de dicho proceso, es notable el número de fallas y lineamientos presentes en Pampa Sepina, todas distribuidas sin mostrar tendencia alguna (Huamán et al, 1993; Mering et al, 1996; Sebrier et al, 1996). Muchas de las fallas y lineamientos presentes en Pampa Sepina fueron correctamente identificados sobre el terreno por Huamán et al, (1993) y estos sugieren la presencia de una importante deformación acumulativa en el tiempo, la misma que probablemente llegó a su máximo cuando ocurrieron los sismos de Maca (1991) y Sepina (1992), ambos con magnitud mb del orden de 5.0. Evidentemente, la ocurrencia de estos sismos incrementó el número de fallas y lineamientos acompañados de deslizamientos de masas de tierra en los alrededores del Cañón del Colca y quebrada de Sepina.

Estas apreciaciones sugieren que la actividad sísmica ocurrida en Pampa Sepina podría estar relacionada con la reactivación del volcán Sabancaya, aunque debe considerarse que es poco frecuente que procesos eruptivos con diferentes fases en desarrollo estén asociados a deformaciones corticales que se producen a distancias mayores a 5 km. Aunque, algunos autores como Rodríguez et al. (1992) y Kosaka et al. (1996) sugieren que la sismicidad presente en Pampa Sepina está asociada a la geometría de la cámara magmática. Debido a la complejidad del proceso eruptivo del volcán y a la falta de estudios netamente geofísicos (prospección gravimétrica y eléctrica), los resultados obtenidos en este estudio no brindan información suficiente como para proponer una geometría simple o compleja para la cámara magmática del volcán Sabancaya. Además, no se tiene cuantificada de manera precisa la historia sísmica del volcán y sus alrededores entre 1986 y 1992, período en el cual se habría desarrollado hasta tres fases diferentes dentro de todo el proceso eruptivo del volcán. Esta información, habría permitido disponer de mayores argumentos para proponer probables geometrías para la cámara magmática. De los estudios geológicos (Thouret et al., 1995a y Thouret et al., 1995b) y de la evaluación visual del proceso eruptivo

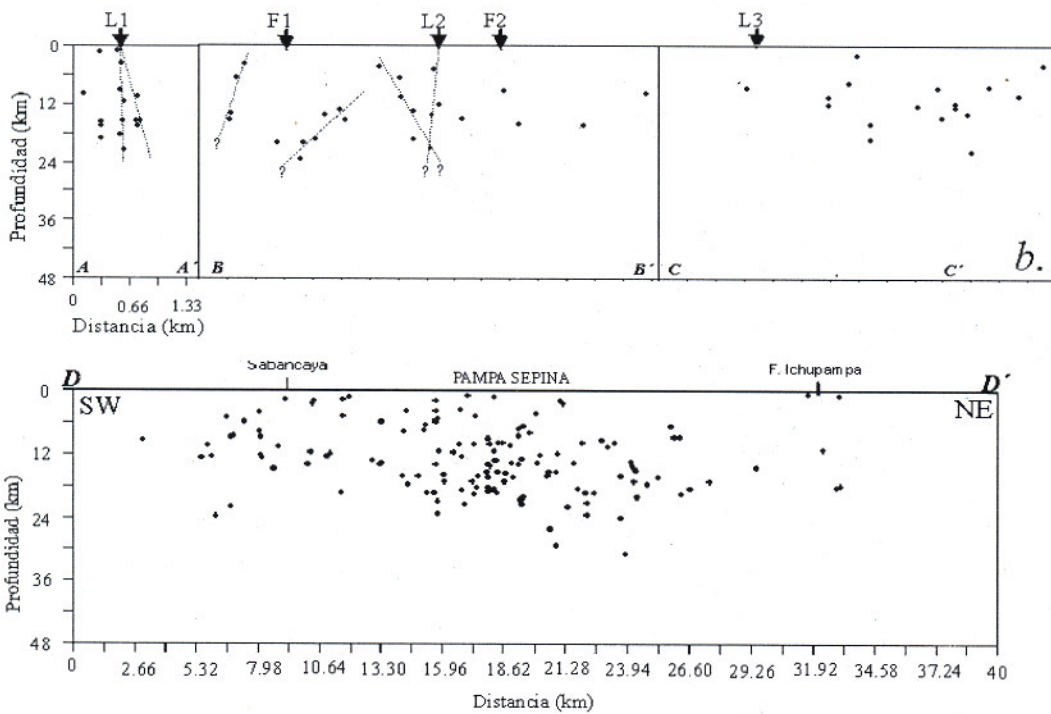
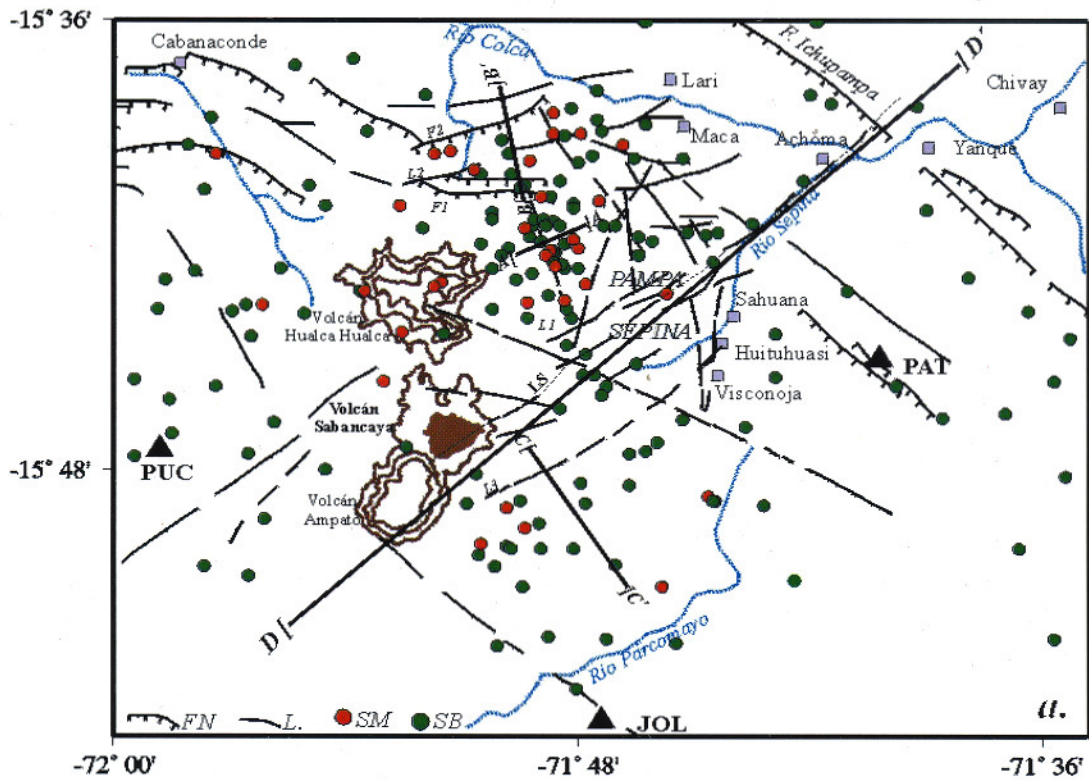


Fig. 4: a). Distribución de la actividad sísmica ocurrida en la región del volcán Sabancaya durante el periodo 1993 y 1995. b). Secciones verticales de sismicidad según las líneas indicadas por AA', BB', CC' y DD' sobre la Fig. 4a. En las secciones verticales, las líneas discontinuas indican la probable relación entre los sismos y las fallas o lineamientos en superficie. FN= falla normal; L= lineamiento; SM= sismos maestros; SB= sismos del grupo B; LS=lineamiento de Sepina; L1 y L2=lineamientos 1 y 2; F1 y F2=fallas 1 y 2.

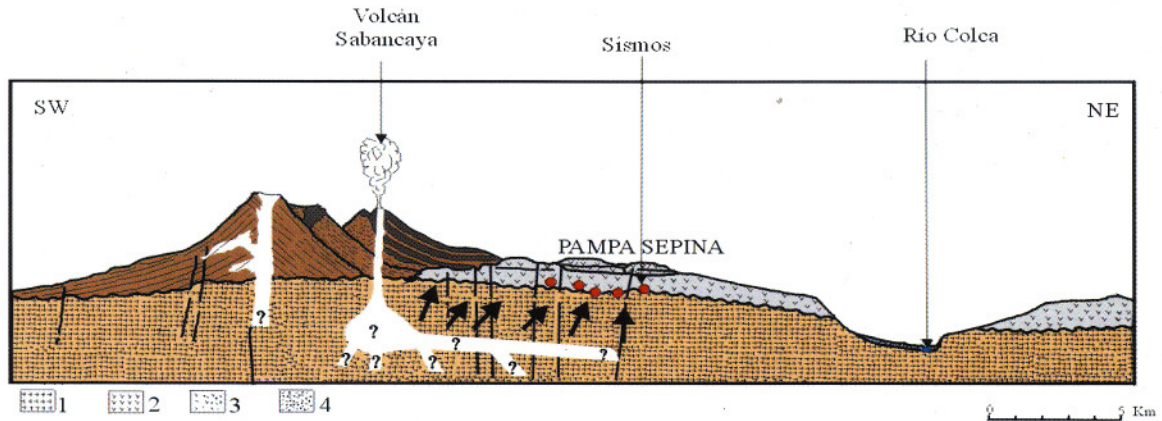


Fig. 5: Esquema sismotectónico propuesto para la región del volcán Sabancaya. La orientación de la sección es en dirección NE-SW. Los círculos en negro indican el área de mayor sismicidad y las flechas la dirección de los esfuerzos de deformación (esquema modificado de Huamán, 1995). 1=Terrenos Pre-Terciarios; 2=volcanismo Cuaternario (grupo Tacaza); 3=volcanismo Cuaternario-Pleistoceno; 4=depósitos fluvio-lacustres.

del volcán Sabancaya (Rodríguez et al., 1992; Rodríguez y Huamán, 1992), se considera que este estuvo caracterizado por,

- La ocurrencia de importante actividad fumarólica.
- Decaimiento exponencial con el tiempo de la altura de las fumarolas.
- Expulsión de bloques pequeños de rocas a distancias cortas.
- Ocurrencia continua de sismos de diferente magnitud.
- Importante deformación superficial en Pampa Sepina.

Estas apreciaciones permiten sugerir la hipótesis de que la cámara magmática del volcán Sabancaya, involucrada en su proceso eruptivo, fue de menor volumen y posiblemente alimentada de magma por medio de conductos ramificados los cuales podrían ser mayores en número y longitud, y estar distribuidos en dirección NE por debajo de Pampa Sepina, siendo la profundidad de los mismos, difícil de estimar. La deformación superficial presente en Pampa Sepina y que produjo el importante índice de sismicidad, tendría su origen en los esfuerzos generados por la presión que ejercía el magma durante su propagación por los conductos antes de llegar a la cámara magmática del volcán Sabancaya. En la Figura 5, se muestra un esquema del complejo volcánico Ampato-Sabancaya-Hualca Hualca elaborado en función de los resultados e hipótesis planteados en este estudio. En la Figura se observa que en el extremo NE del volcán existen capas sedimentarias del Cuaternario de gran potencia; mientras que, en el extremo SW los terrenos son más compactos probablemente debido a la existencia de materiales volcánicos de antiguas erupciones (Terciario). Por lo tanto, cualquiera fuese la geometría de la cámara magmática del volcán Sabancaya los terrenos sedimentarios serían más fáciles de deformarse.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Dirección Técnica del Instituto Geofísico del Perú por el apoyo brindado durante el desarrollo del presente estudio. Asimismo, a M. Uribe por sus críticas, comentarios y sugerencias. Publicación No 010-2001-CNDG-IGP.

## BIBLIOGRAFÍA

- CHOROWICZ J., DEFFONTAINES B., HUAMÁN R., GUILLANDE R., LEGUERN F. & THOURET J.-C.** (1992).- Spot satellite monitoring of the eruption de Nevado Sabancaya Volcano (Southern Peru). *Remote Sens. Environ.* 42: 43-49.
- BARRIGA V.** (1951).- Los Terremotos en Arequipa: 1582-1868. La Colmena S.A., Arequipa. 332 pp.
- DEVERCHERE, J., DORBATH, C. Y DORBATH, L.** (1989). Extension related to a high topography. Results from a microearthquake survey at the Andes of Peru and tectonics implications. *Geophys. J. Int.* 98. 281-292
- DORBATH L., DORBATH C., JIMENEZ E. & RIVERA L.** (1991).- Seismicity and tectonics deformation in the eastern cordillera and the sub-andean zone of central Peru. *Jour. of South American Earth Sciences.*, 4, 13-24.
- FRANCIS P. & SILVA S.** (1990).- Application of the Landsat Thematic Mapper to the identification of potentially active volcanoes: a new satellite, technique, *Nature*, 338: 144-146.
- GRANGE F.** (1983).- Etude sismotectonique détaillée de la subduction lithosphérique au Sud Pérou. These pour



docteur 3e cycle *Univ. Scientifique et Médicale de Grenoble*. 400p.

**HUAMÁN D., CHOROWICZ J., DEFFONTAINES B., GUILLANDE R. & RUDANT J.** (1993).- Cadre structural et risques géologiques étudiés à l'aide de l'imagerie spatiale: la région du Colca (Andes du Sud Peru): *Bull. Soc. Geol. France*, t.164, 6, 807-818.

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

**JAMES D.** (1971).- Andean crustal and upper mantle structure: *Jour. Geoph. Res.*, v. 76, 14, 3246-3271.

**KLEIN F.** (1978).- Hypocenter location program Hypoinverse. *U.S. Geological Survey*. OpenFile Report, 78-694.

**KOSAKA M., GONZALES E. & MINAYA A.** (1996).- Sismicidad del volcán Sabancaya y el Hualca-Hualca. Segundo Seminario Latinoamericano: Volcanes, Sismos y Prevención. Arequipa-Perú.

**LAHR J.** (1998).- Hypoellipse a computer program for determining local a regioanl earthquake hypocentral parameters, magnitude, and first motion pattern

**LINDO R.** (1993).- *Sismotectonique des Andes du Perou Central: apport des dones sismologiques de haute precision*. These de doctorat á l Université Louis-Pasteur de Strasbourg. 74p.

**MÉRING C., HUAMÁN D., CHOROWICZ B. & GUILLANDE R.** (1996).- New data on the geodynamics of southern Peru from computerized análisis of SPOT and SAR ERS-1 images: *Tecthon.*, 259, 153-169.

**RODRÍGUEZ A., LEÓN I., CUENCA J. & RIVERA M.** (1992).- Actividad de los volcanes Ubinas y Sabancaya:

*Inf. Int. IGP.* 12p.

**RODRÍGUEZ A. & HUAMÁN D.** (1992).- Teleánalisis geológico y sismicidad del sector comprendido entre el volcán Sabancaya y el poblado de Ichupampa: El Sistema de fallas Sepina. *Inf. Int. IGP.*, 8p.

**SÉBRIER M.** (1985).- Informe resumido de algunas observaciones en los departamentos de Ica, Arequipa, Tacna, Cuzco, Apurímac, Ayacucho y Junín: *Inf. Int. Inst. Geof. Perú.*

**TAVERA H. & ANTAYHUA Y.** (2000).- Señales sísmicas de volcanes activos: ejemplos del volcán Sabancaya, Arequipa (Perú). *Bol. Soc. Geol. Perú*, v. 90: p. 107-119.

**THOURET J-C., GOURGAUD A., GUILLANDE R. & 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. & SALAS G.** (1995b).- Geomorphological and geological survey and remote sensing of the current activity of nevado Sabancaya strato volcano (South Perú): assessment for hazard-zone mapping. *Z. Geomorph.* N-E., 39, 4, 515-535.

**TRAVADA & CÓRDOBA V.** (1752).- El suelo de Arequipa convertido en cielo (historia general de Arequipa): primer festival del libro Arequipeño, 1958, 15p.

**VICENTE J., SEQUEIROS F., VALDIVIA A. & ZAVALA J.** (1979).- Sobre el escurrimiento Cincha-Lluta: elemento del accidente mayor andino al NW de Arequipa. *Bol. Soc. Geol. Peru*, T. 61 pp. 67-99.

**ZAMÁCOLA & JAÚREGUI J.** (1804).- Apuntes para la historia de Arequipa, 1804.