

LOCALIZACION HIPOCENTRAL Y CARACTERISTICAS DE LA FUENTE DE LOS SISMOS DE MACA (1991), SEPINA (1992) Y CABANAONDE (1998 REGIÓN DEL VOLCÁN SABANCAYA (AREQUIPA))

Yanet ANTAYHUA¹, Hernando TAVERA¹, Isabel BERNAL¹
Hector PALZA² y Victor AGUILAR²

¹Centro Nacional de Datos Geofísicos - Instituto Geofísico del Perú. Email: yanet@axil.igp.gob.pe

²Instituto Geofísico de la Universidad Nacional San Agustín. Email: jtavera@geo.igp.gob.pe

RESUMEN

En este estudio se presenta los parámetros hipocentrales de los sismos de Maca, Sepina y Cabanaconde ocurridos en la Región del Volcán Sabancaya (RVS) en los años 1991, 1992 y 1998 respectivamente. Estos sismos produjeron intensidades del orden de VIII y VI MM en las localidades de Maca, Sahuana, Huituhuasi y Cabanaconde (Provincia de Caylloma, Departamento de Arequipa). De acuerdo a su ubicación epicentral, los sismos de Maca y Sepina estarían asociados a la deformación superficial que se desarrollo en Pampa Sepina durante el proceso eruptivo del volcán Sabancaya; mientras que, el sismo de Cabanaconde se debería a deformaciones netamente regionales. Estos sismos ocurrieron a niveles superficiales (5 y 14 km) con magnitudes de 5.4 y 5.0mb. La orientación de la fuente obtenida a partir de la polaridad de la onda P indica que los sismos de Maca y Sepina se debieron a fallamientos de tipo inverso con una gran componente de desgarre y ejes de tensión (T) y presión (P) prácticamente horizontales orientados en dirección N-S y E-W respectivamente. El sismo de Cabanaconde presenta un mecanismo de tipo normal con eje de tensión orientado en dirección N-S y presión prácticamente vertical. A partir del análisis espectral para el sismo de Sepina se ha obtenido un momento sísmico escalar (M_0) de 2.65×10^{23} dinas-cm y un radio de fractura (r_0) de 6 km. La orientación de los esfuerzos P y T de los sismos de Maca y Sepina sugieren que estos deben su origen a procesos de deformación superficial muy compleja, no pudiendo ser correlacionados con las fallas o lineamientos presentes en Pampa Sepina. Mientras que, la orientación del eje T del sismo de Cabanaconde indicaría que se habría producido por esfuerzos netamente extensivos en dirección N-S, coherente con la geometría de la falla Solarpampa-1 dentro del sistema Huambo-Cabanaconde.

ABSTRACT

In this study is presented the hypocenter parameters of the Maca, Sepina and Cabanaconde earthquakes occurred in the Region of the Sabancaya Volcano (RVS) in 1991, 1992 and 1998 respectively. These earthquakes produced intensity of the VIII and VI in Sahuana, Huituhuasi and Cabanaconde cities (Province of Caylloma, Department of Arequipa). The epicentral location the Maca and Sepina earthquake they would be associated with the superficial deformation that is development in Pampa Sepina during the process eruptive of the Sabancaya volcano. The Cabanaconde earthquake has been produced for highly regional deformations. These earthquakes occurred at levels superficial (5 and 14 km) with magnitude of 5.4 and 5.0mb. The focal mechanism is obtained of the polarity from the P-wave and indicates that Maca and Sepina earthquakes has their origin to inverse fault with a great component of strike-slip and tension (T) and pressure (P) axes practically horizontal oriented in direction N-S and E-W respectively. The Cabanaconde earthquake presents a mechanism of normal type with tension axe oriented in direction N-S and practically vertical pressure axe. From spectral analysis for Sepina earthquake has been obtained a seismic moment (M_0) of 2.65×10^{23} dinas-cm and a rupture radio (r_0) of 6 km. The direction of the P and T axes of Maca and Sepina earthquakes suggest that these they should your origin to complex superficial deformation. These earthquakes can not be associated with no present faults in Pampa Sepina. While, the direction of the T axe of the Cabanaconde earthquake would indicate that would have been produced by highly extensive deformation in direction N-S, coherent with the geometry of the fault Solarpampa-1 within system Huambo-Cabanaconde.

INTRODUCCIÓN

La actividad sísmica de Perú esta asociada directamente al proceso de subducción de la Placa de Nazca bajo la Sudamericana, la misma que se desarrolla con una velocidad relativa del orden de 8 cm/año (DeMets, et a., 1990). Como resultado de este proceso continuo, en el continente se ha formado la Cordillera Andina en diferentes etapas orogénicas. La alta velocidad de convergencia de las placas a generado un fuerte acoplamiento entre ellas dando origen con relativa frecuencia a sismos de magnitud elevada a diferentes niveles de profundidad en el borde Oeste de Perú. En el interior del continente, la frecuencia y magnitud de los sismos es menor, especialmente en la zona Sur de la Cordillera Occidental donde se ubica la Región del Volcán Sabancaya (RVS); sin embargo, en la última década esta región fue afectada por tres sismos de magnitud moderada ($m_b < 5.5$), que produjeron daños y destrucción en áreas relativamente pequeñas.

La RVS se encuentra ubicada en la parte Sur-Central de la provincia de Caylloma, departamento de Arequipa (Figura 1) y a 80 km en dirección NNW de la ciudad de Arequipa. Esta región presenta actividad tectónica

reciente, la misma que ha sido estudiada y analizada a partir de imágenes de satélite SPOT y Landsat MSS, observaciones de campo y análisis microtectónico realizados por Huamán et al., (1993); Huamán, (1995) y Sebrier et al., (1985). Asimismo, en la Figura 1 se observa la presencia de una importante deformación en la RVS 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 et al., 1985). El importante número de lineamientos presentes sobre la parte central del área de estudio, conocida como Pampa Sepina, han sido puestos en evidencia por Huamán et al. (1993) y revisado 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 pasa 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 en el área la presencia de

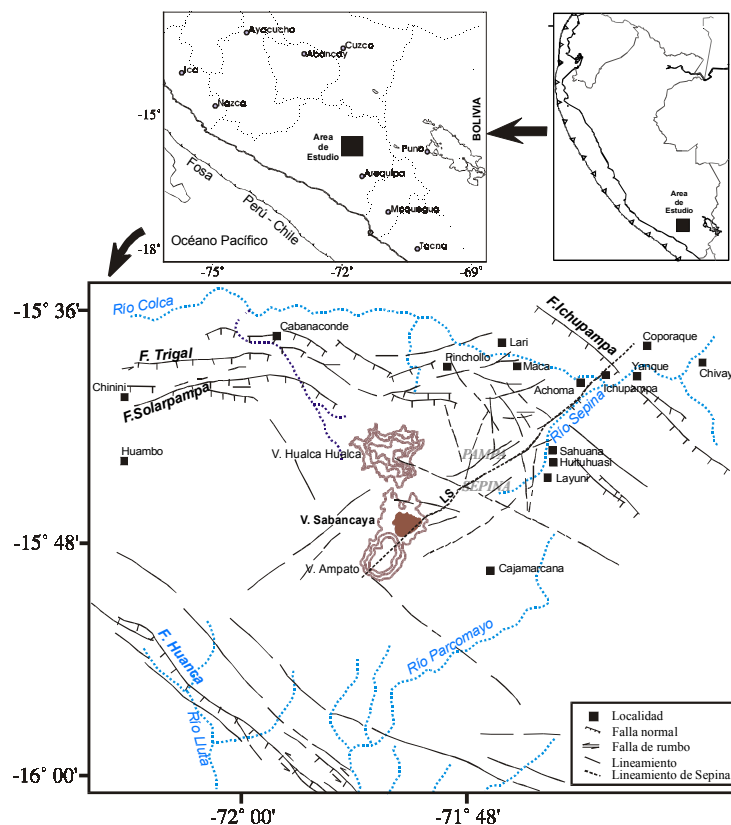


Figura 1. Ubicación y tectónica de la Región del Volcán Sabancaya (RVS).

lineamientos menores orientados en dirección NE-SW y N-S cerca de las localidades de Huituhuasi y Layuni, así como otros orientados en dirección E-W cerca de Lari y Maca. Según Méring et al. (1996), la disposición discontinua de estos lineamientos sugieren que son muy recientes; por lo tanto, podrían haberse formado durante el proceso eruptivo del volcán Sabancaya.

Durante el proceso eruptivo del volcán Sabancaya (1986-1995), la RVS estuvo sometida a una intensa actividad sísmica, motivo por el cual el Instituto Geofísico del Perú en 1990 instala una red sísmica temporal compuesta de cinco estaciones (Cajamarca, Pinchollo, Achoma, Chinini y Cabanaconde), de las cuales solamente Cajamarca y Pinchollo estuvieron operativas hasta fines de 1992. Debido a la continua ocurrencia de sismos, en 1993 la red sísmica temporal es reemplaza por la Red Sísmica Telemétrica del Volcán Sabancaya (RSTS) compuesta por tres estaciones (Patapampa, Pucarilla y Jollo-Jello), las mismas que estuvieron distribuidas alrededor del volcán Sabancaya y operativas hasta 1995. En la Figura 2, se presenta la distribución en superficie de la sismicidad local ocurrida en la RVS durante el período de operatividad de la RSTS (1993 y 1995). En esta figura, se observa que la sismicidad se distribuye de manera muy dispersa en toda la RVS; sin embargo, el mayor agrupamiento de sismos se ubica en el extremo E y NE del

volcán Hualca-Hualca. Sobre el volcán Sabancaya no se observa sismicidad. Esta distribución de la actividad sísmica ha puesto en evidencia la importante deformación superficial a la que estuvo sometida Pampa Sepina como consecuencia del proceso eruptivo del volcán Sabancaya y cuyas características principales han sido ampliamente discutidas por Antayhua et al., (2001) y Antayhua (2002).

En los años 1991, 1992 y 1998, en la RVS ocurrieron tres sismos fuertes con focos superficiales y magnitudes mb de 5.4, 5.0 y 5.2 respectivamente. Estos sismos produjeron en superficie importantes deslizamientos de tierra y asentamientos en otros, además de numerosos desprendimientos de rocas a lo largo de las pendientes del río Colca. Las localidades más afectadas fueron las de Maca, Sahuana, Huituhuasi y Cabanaconde en donde el 80% y 20% de las viviendas fueron destruidas, además de 14 personas fallecidas y numerosos heridos (Imáx=VIII y VI MM en Maca, Sepina y Cabanaconde). En el presente estudio, se analiza los parámetros hipocentrales de los sismos de Maca, Sepina, Cabanaconde y sus réplicas, todos ocurridos en la RVS. Asimismo, se obtiene la orientación de la fuente y de los ejes principales para los tres sismos a partir de sus mecanismos focales y se analiza su relación con la importante deformación superficial presente en Pampa Sepina y con el proceso eruptivo del volcán Sabancaya, desarrollado durante el período 1986 y 1995.

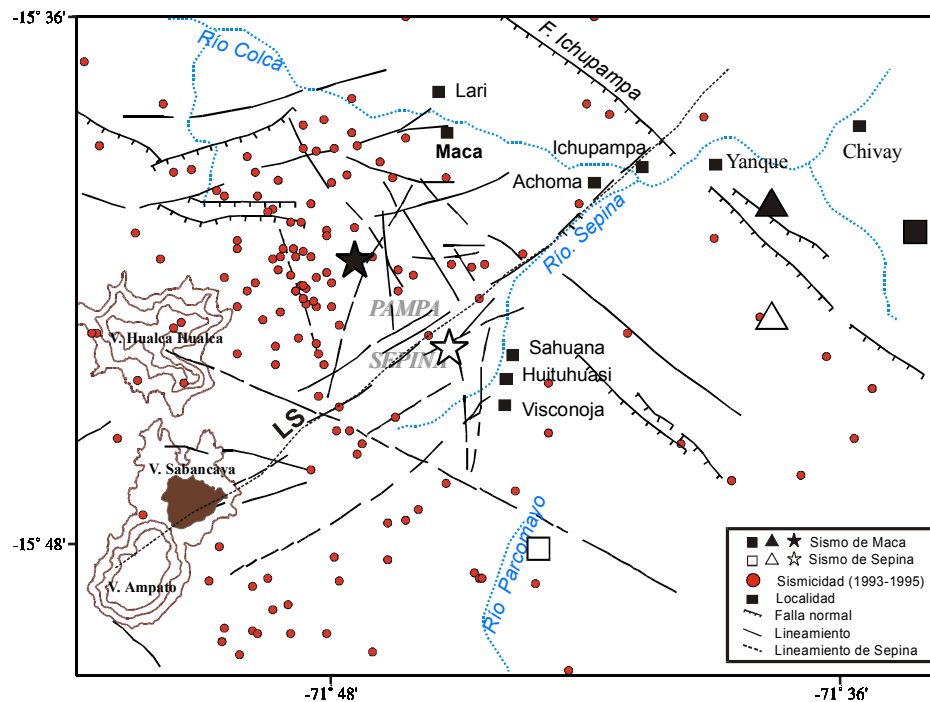


Figura 2. Localización epicentral de los sismos de Maca y Sepina. El cuadrado, triángulo y estrella en color negro corresponde a los epicentros del sismo de Maca y en color blanco a los epicentros del sismo de Sepina, ambos obtenidos por el ISC, NEIC y el IGP respectivamente.

LOS SISMOS DE MACA, SEPINA Y CABANAONDE

Parámetros Hipocentrales de los Sismos de Maca y Sepina

Los parámetros hipocentrales de los sismos de Maca del 23 Julio de 1991 y Sepina del 1 de Febrero de 1992, fueron obtenidos por el Centro Internacional de Sismología (ISC), Centro Nacional de Información Sísmica (NEIC) y por el Instituto Geofísico del Perú (IGP). Para tal fin, las dos instituciones internacionales utilizaron información de las estaciones de la red sísmica mundial; mientras que, para el sismo de Maca el IGP utilizó estaciones de la Red Sísmica Nacional (RSN) y para el de Sepina, la distribución de las intensidades máximas observadas (Rodríguez y Huamán, 1993). Los resultados de la localización hipocentral son mostrados en la Tabla 1. Según Rodríguez y Huaman (1992), el sismo de Maca produjo en la RVS intensidades máximas del orden de VIII (MM) concentrados en las localidades de Maca y Lari; mientras que, el sismo de Sepina intensidades de VI en las localidades de Huituhuasi y Layuni.

En la Figura 2, a diferencia de los epicentros obtenidos por el IGP (estrellas) para los sismos de Maca y Sepina, los calculados por el ISC (cuadrados) y el NEIC (triángulos) se ubican fuera del área de mayor deformación presente en Pampa Sepina. Estas diferencias en la localización epicentral son debidas a que las instituciones internacionales utilizan información de estaciones que integran la red sísmica mundial, las mismas que presentan una deficiente cobertura azimutal alrededor del epicentro y poco control sobre la profundidad del foco. En cambio, el IGP utiliza información de la Red Sísmica Nacional y valores de intensidad máxima local, logrando un mayor control sobre los parámetros hipocentrales de ambos sismos.

Parámetros Hipocentrales del Sismo de Cabanaconde

Los parámetros hipocentrales del sismo de Cabanaconde del 12 de Abril de 1998, han sido obtenidos a partir de la información contenida en 6 estaciones de la Red Sísmica Nacional (RSN) a cargo del IGP y de la estación ARE a cargo del Instituto Geofísico de la Universidad Nacional San Agustín. Para tal fin, se ha utilizado el algoritmo Hypoellipse (Lahr, 1998), una relación de velocidades $V_p/V_s=1.65$ y el modelo de velocidad de Dorbath et al. (1991), todos utilizados en el estudio de la sismicidad ocurrida en la región

del volcán Sabancaya por Antayhua et al., (2001). Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 3 y en la Tabla 1, los mismos que en comparación con los obtenidos por el NEIC permiten ubicar al epicentro del sismo de Cabanaconde a 9 km al Sur de la localidad de Cabanaconde y 13 km al NE de Huambo sobre la traza de la falla Solarpampa-1, que junto a las fallas Trigal y Solarpampa forman parte del sistema de sistema de fallas Huambo-Cabanaconde.

Réplicas. Después de ocurrido el sismo de Cabanaconde, el Instituto Geofísico de la Universidad Nacional de San Agustín (IGUNSA) instaló una red sísmica temporal compuesta por las estaciones de Cabanaconde (CAB), Huambo (HMB) y Pinchollo (PIN), todas ubicadas alrededor del epicentro del sismo (Figura 3a) y que estuvieron operativas entre el 18 y 21 Abril de 1998. Esta red sísmica temporal, ha permitido registrar hasta 454 réplicas que en mayor número corresponden a la estación CAB, la más cercana al epicentro. Del total de replicas, solo 17 han sido registradas por las tres estaciones y sus parámetros hipocentrales han sido calculados utilizando el mismo algoritmo, relación de velocidades y modelo de velocidad considerados en la localización del sismo de Cabanaconde. La magnitud de las replicas ha sido estimadas a partir de la duración de su registro utilizando la relación de Klein (1978). Los errores obtenidos en los parámetros que definen la localización hipocentral de las replicas son menores a 0.1 km y la magnitud de los sismos oscila entre 2 y 4 ML.

En la Figura 3a se presenta la distribución espacial de las 17 replicas y el epicentro del sismo de Cabanaconde obtenidos en este estudio, además del registrado por el NEIC. Tal como se observa en la figura, las replicas se distribuyen entre las localidades de Huambo y Cabanaconde y sobre las fallas Trigal, Solarpampa y Solarpampa-1 (FS-1). A fin de analizar la distribución de las réplicas y el sismo principal en función de la profundidad de sus focos, en la Figura 3b se ha elaborado una sección vertical perpendicular a las fallas Trigal, Solarpampa y Solarpampa 1, según la línea (B-B') indicada en la Figura 3a. En dicha figura, se observa que la profundidad de los focos de las réplicas es menor a 15 km y sugieren la presencia de 2 posibles alineamientos. El primero incluiría al sismo principal y seguiría una alineación con pendiente de 30° hasta cortar en superficie a la falla Solarpampa-1 (FS1); mientras que, el segundo alcanza en superficie

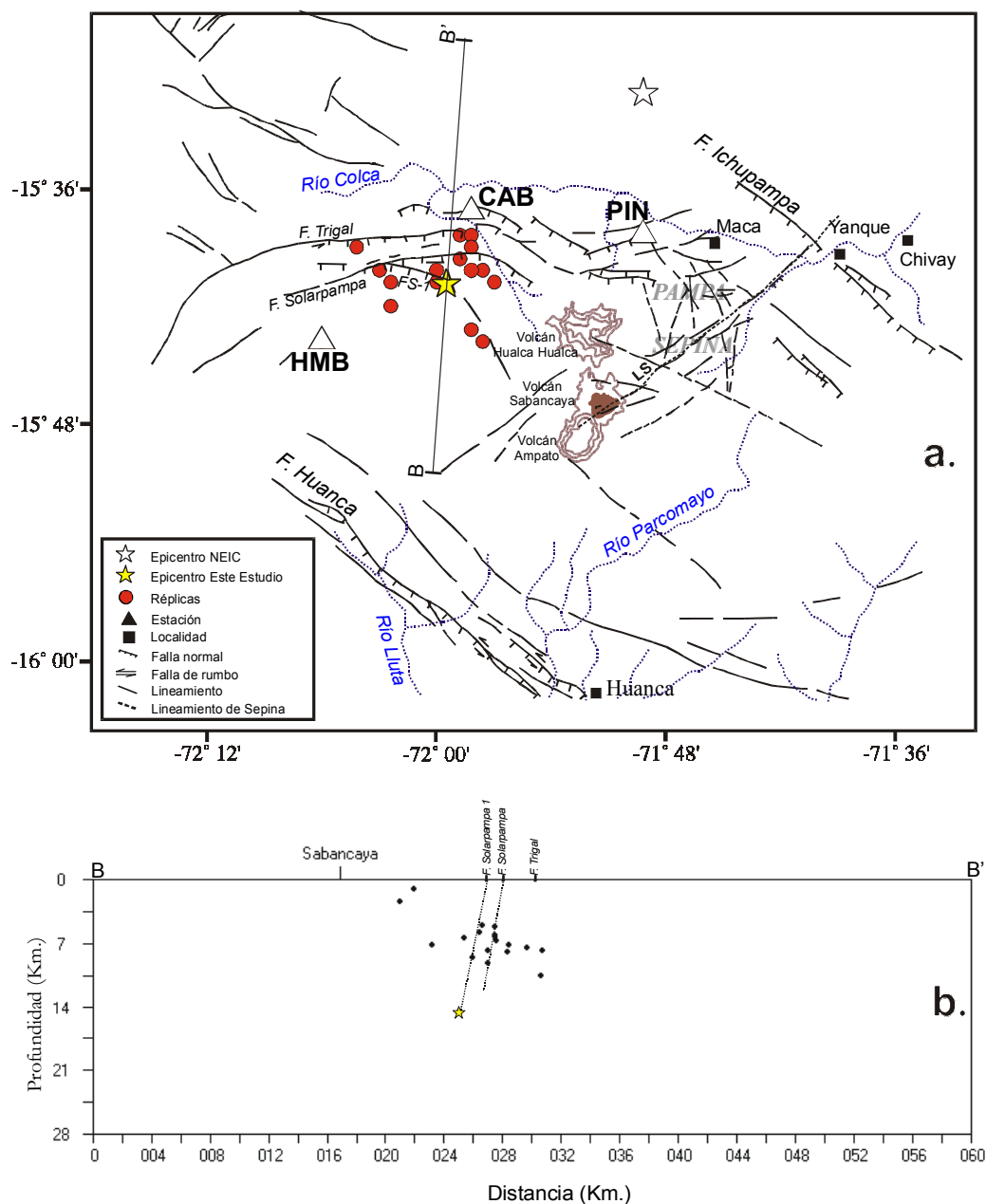


Figura 3. (a) Distribución en superficie de las réplicas del sismo de Cabanaconde; (b) Sección vertical de réplicas perpendicular a las fallas Trigal, Solarpampa y Solarpampa 1 (FS-1) de acuerdo a la Figura 3a.

Sismo de Maca					
Hora Origen	Latitud	Longitud	Mag (mb)	Prof. (km)	Agencia
19:44:50.20	-15.68°	-71.57°	5.0	5.0	ISC
19:44:50.20	-15.67°	-71.63°	5.0	5.0	NEIC
19:45:00.00	-15.69°	-71.79°	5.4	3.6	IGP
Sismo de Sepina					
17:22:50.20	-15.80°	-71.72°	5.0	5.0	ISC
17:22:44.90	-15.71°	-71.62°	5.0	5.0	NEIC
17:22:00.00	-15.72°	-71.75°	5.0	5.0	IGP
Sismo de Cabanaconde					
23:49:35.40	-15.52°	-71.79°	33.0	5.8	NEIC
23:49:32.10	-15.69°	-71.99°	15.0	5.2	EE

Tabla 1. Parámetros hipocentrales de los sismos de Maca (1991), Sepina (1992) y Cabanaconde (1998).

a la falla Solarpampa. El resto de la sismicidad se distribuye bajo la falla Trigal sin mostrar alguna tendencia. Estas características de la sismicidad, sugieren que el sismo de Cabanaconde tuvo su origen en la reactivación de la falla Solarpampa-1 (FS-1) y de manera simultánea habría causado también la reactivación de las fallas Trigal y Solarpampa.

ORIENTACIÓN DE LA FUENTE

A fin de conocer los parámetros de la fuente que generó a los sismos de Maca, Sepina y Cabanaconde, se ha procedido a elaborar los mecanismos focales de dichos sismos utilizando para ello, la distribución del sentido del primer impulso de la onda P identificados en las estaciones de la Red Sísmica Nacional a cargo del IGP y en algunas estaciones de la red sísmica mundial. Para tal efecto se siguió la metodología descrita por Brillinger et al., (1998), la misma que ha sido ampliamente utilizada para el estudio de sismos ocurridos en Perú por Tavera y Buforn (2001), Tavera et al., (2002) y Antayhua (2002). Los ángulos de incidencia y azimutes han sido generados utilizando los parámetros hipocentrales de la Tabla 1 y asumiendo un semi-espacio de velocidad constante para la onda P (6.0 km/seg). En la Figura 4, se presenta las soluciones obtenidas para el sismo de Maca, Sepina y Cabanaconde.

Para el sismo de Maca (Figura 4a), el mecanismo focal es de tipo inverso con una gran componente de desgarre y ejes de tensión

(T) y presión (P) prácticamente horizontales orientados en dirección N-S y E-W respectivamente, similar a la solución obtenida por la Universidad de Harvard a partir del método CMT (Centroid Moment Tensor); sin embargo, si se proyecta la solución obtenida por el CMT sobre los datos utilizados en este estudio, se observa que los planos nodales no satisfacen la distribución de algunos valores de dilatación; por lo tanto, se asume que la solución obtenida en este estudio es correcta.

En la Figura 4b, se muestra la solución obtenida para el sismo de Sepina y al igual que el sismo de Maca, el mecanismo es de tipo inverso con una gran componente de desgarre y ejes de tensión (T) y presión (P) prácticamente horizontales orientados en dirección N-S y E-W respectivamente.

Para el sismo de Cabanaconde (Figura 4c), el mecanismo focal es de tipo normal con planos nodales orientados en dirección E-W buzando ambos con ángulos de aproximadamente 45° y eje de Tensión (T) orientado en dirección N-S y eje Presión (P) prácticamente vertical. Esta solución difiere poco del reportado por la Universidad de Harvard (CMT); sin embargo, si se proyecta su solución sobre los datos utilizados en este estudio, se observa que esta no satisface la distribución de los valores de compresión y tensión; por lo tanto, se considera que la solución obtenida en este estudio es correcta, aunque en ambas soluciones la orientación de los ejes T y P son similares.

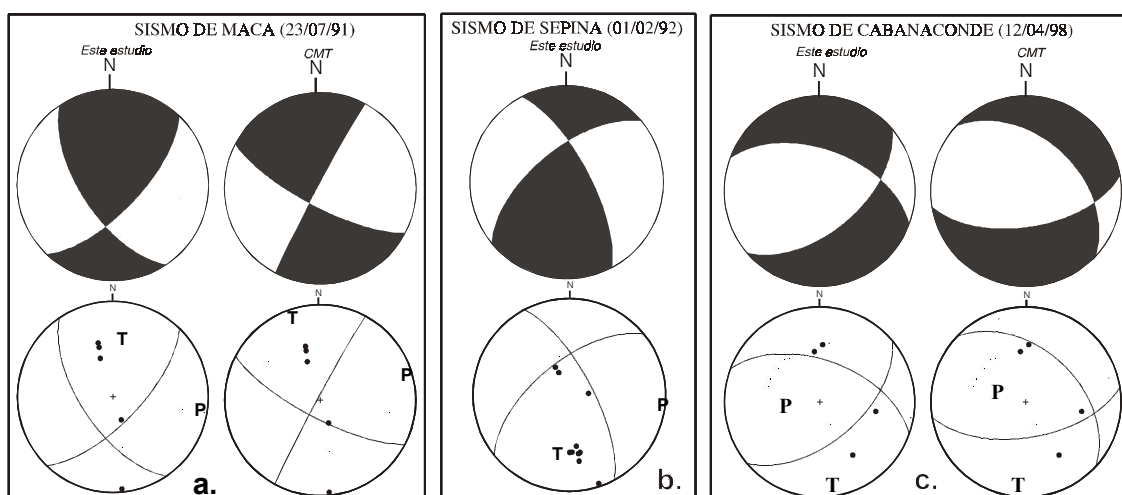


Figura 4. Mecanismos focales obtenidos en este estudio (EE) y el CMT. (a) Sismo de Maca, (b) Sepina y (c) Cabanaconde.

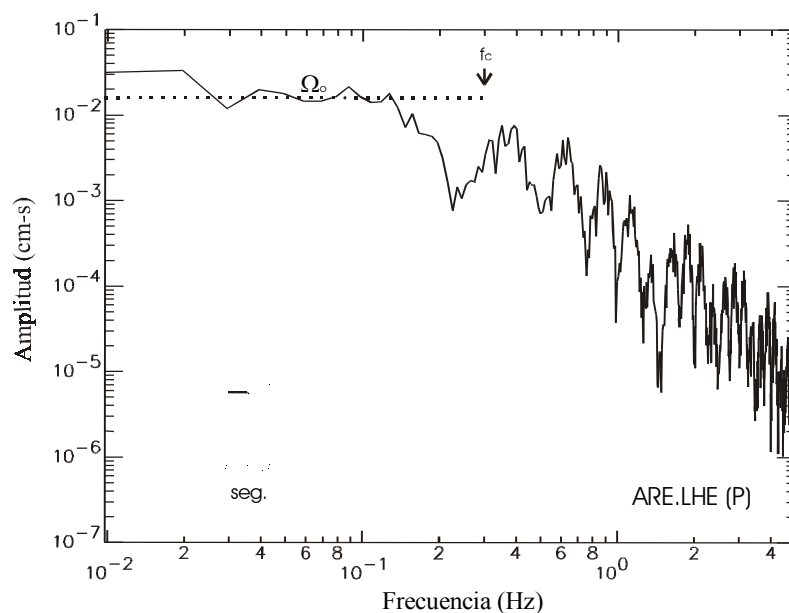


Figura 5. Espectro de la amplitud del desplazamiento de la onda P del sismo de Sepina (1992). El registro corresponde a la onda P en la componente LHE de la estación de ARE (Instituto Geofísico de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa). Ω_0 =parte plana del espectro; f_c =frecuencia esquina.

ANÁLISIS ESPECTRAL

Según Brune (1970), para un modelo de dislocación por cizalla, el momento sísmico escalar y el radio de fractura de un sismo pueden ser calculados a partir de las dos características más importantes de los espectros de amplitud del desplazamiento de las ondas de volumen; esto es, la parte plana del espectro a bajas frecuencias (Ω_0 , proporcional al Momento sísmico escalar (M_0) y la frecuencia esquina (f_c) inversamente proporcional al radio de fractura (r_0). Estas características serán utilizadas para estimar el tamaño del sismo de Sepina.

Debido a la magnitud moderada de los sismos de Maca y Sepina (5.4 y 5.0 mb), no fue posible obtener información de las formas de onda de ambos sismos, aunque la estación ARE del Instituto Geofísico de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa (IGUNSA), la más cercana al epicentro, con algunos problemas mecánicos logró registrar los primeros impulsos de la onda P; sin embargo, para el sismo de Sepina se logró recuperar aproximadamente 10 segundos de señal en la componente E-W (LHE). Esta señal fue digitalizada con un muestreo de 0.01s (Figura 5) y utilizada para estimar el momento sísmico escalar (M_0) y el radio de fractura (r_0).

El espectro obtenidos se presenta en la Figura 5 y una vez identificado los valores de (Ω_0 y f_c , el momento sísmico y radio de fractura fueron estimados utilizando las relaciones descritas por Thacher y Hanks (1973) y Brune (1970). El sismo de Sepina

liberó energía equivalente a un momento sísmico escalar de 2.65×10^{23} dinas-cm y produjo un radio de fractura del orden de 6 km. Una vez conocidos el M_0 y r_0 , la caída de esfuerzos ($\Delta\sigma$), el desplazamiento medio (ΔU) y la magnitud de momento (M_w) han sido calculados a partir de las relaciones establecidas por Brune (1970) y Kanamori (1977). Así, para el sismo de Sepina se obtiene un $\Delta\sigma$ de 4 bar, un ΔU de 3 cm y una magnitud M_w de 4.9.

ANÁLISIS SISMOTECTÓNICO

Tal como se muestra en la Figura 6, la Región del Volcán Sabancaya presenta un régimen tectónico muy complejo representado principalmente por las fallas Huanca, Ichupampa, Trigal, Solarpampa. El sistema de lineamientos tectónicos mayores ubicados en Pampa Sepina, fue identificado mediante imágenes satélites y observaciones de campo realizados antes y después del proceso eruptivo del volcán Sabancaya. Las fallas principales se ubican en los extremos del área de estudio orientados en dirección NW-SE (Huanca e Ichupampa) y E-W (Trigal, Solarpampa y Solarpampa-1). A fin de realizar una interpretación de los procesos de deformación presentes en esta región, Huamán (1993), Mering et al. (1996) y Sébrier et al. (1985) realizaron diferentes estudios de microtectónica sobre las fallas antes mencionadas y sugieren que estos sistemas corresponden a fallas normales originados por procesos netamente extensivos y cuyos ejes de tensión se orientarían

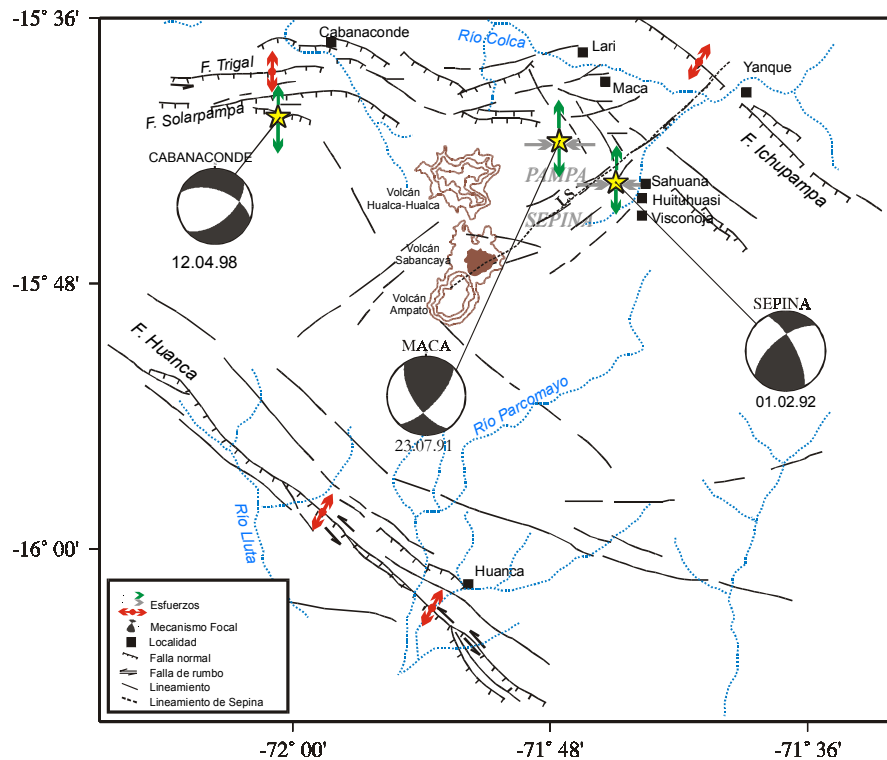


Figura 6. Interpretación sismotectónica y distribución de esfuerzos en la región del volcán Sabancaya. Las flechas en rojo corresponden a esfuerzos de Tensión (T) obtenidos a partir de estudios de microtectónica y las flechas en verde y plomo, son los esfuerzos de Tensión y Presión obtenidos de los mecanismos focales de los sismos de Maca, Sepina y Cabanaconde.

en dirección N-S y buzamiento en dirección Sur (Trigal y Solarpampa), y NW-SE con buzamiento en dirección SW (Huanca e Ichupampa). Por lo tanto, la región del volcán Sabancaya estaría circunscrita principalmente por deformaciones de carácter extensivo, a excepción de su extremo Sur en donde no se observa presencia de fallas.

Asimismo, en la Figura 6 se presenta la distribución de esfuerzos principales (T y P) estimados a partir de estudios de microtectónica (Sébrier et al., 1985) y de los mecanismos focales de los sismos de Maca, Sepina y Cabanaconde obtenidos en este estudio. En dicha figura, se observa que el mecanismo focal del sismo de Cabanaconde corresponde a una fallamiento de tipo normal con eje de tensión orientado en dirección N-S y eje de presión vertical, similar a la dirección de esfuerzos obtenidos para las fallas Trigal, Solarpampa y Solarpampa-1 por Sébrier et al. (1985); por lo tanto, el sismo de Cabanaconde se debe a procesos tectónicos regionales. Los mecanismos focales de los sismos de Maca y Sepina corresponden a fallas inversas con una gran componente de desgarre y ejes de tensión (T) y presión (P) prácticamente horizontales en dirección N-S y E-W respectivamente, siendo difícil correlacionarlos con los principales lineamientos tectónicos presentes en Pampa

Sepina. Evidentemente, Pampa Sepina al estar circunscrita por tres principales sistemas de fallas puede desarrollar diferentes tipos de deformación, tal como sugiere Antayhua (2002) a partir del estudio de la actividad sísmica local registrada por una red sísmica telemétrica conformada por tres estaciones, la misma que estuvo operativa entre 1993-1995. Según este autor, los sismos de Maca y Sepina se habrían producido al final de todo el proceso de deformación superficial que se produjo en la Región del Volcán Sabancaya, paralelo a la evolución de su proceso eruptivo. Los mecanismos focales de los sismos de Maca y Sepina son coherentes con el complejo proceso de deformación superficial que se desarrolló en Pampa Sepina, pudiendo ser éste de tipo compresional o tensional, pero en ambos casos, las fuerzas que dieron origen a estos sismos fueron prácticamente horizontales.

CONCLUSIONES

Del estudio de localización hipocentral, mecanismos focales y distribución de esfuerzos de los sismos de Maca, Sepina y Cabanaconde se concluye que los sismos de Maca y Sepina se ubican sobre el área en el cual se desarrolló la mayor deformación superficial durante el proceso eruptivo del volcán

Sabancaya; mientras que, el sismo de Cabanaconde se ubica sobre la falla Solarpampa-1, la misma que corresponde al sistema de fallas Huambo-Cabanaconde.

La distribución espacial de 17 réplicas asociadas al sismo de Cabanaconde, sugiere que las fallas Solarpampa y Solarpampa-1 buzan en dirección Sur con pendientes casi verticales y profundidades menores a 15 km.

Los mecanismos focales de los sismos de Maca y Sepina sugieren que estos se deben a fallas inversas con una gran componente de desgarre y ejes T y P prácticamente horizontales y orientados en dirección N-S y E-W respectivamente. Estos mecanismos serían coherentes con el complejo proceso de deformación superficial que se desarrolló en Pampa Sepina durante el periodo 1986-1995, siendo difícil establecer si fueron producidos por procesos extensivos o compresivos, aunque la orientación de los ejes de tensión es coherente con la deformación regional.

El mecanismo focal del sismo de Cabanaconde es de tipo normal con planos nodales orientados en dirección E-W y eje de tensión en dirección N-S coherente con la geometría de la falla Solarpampa-1 (sistema de fallas Huambo-Cabanaconde). Este sismo estaría asociado a la deformación regional presente en Pampa Sepina; por lo tanto, no estaría asociada a la crisis volcánica desarrollada durante el periodo 1986 y 1995 en toda la Región del Volcán Sabancaya.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Dr. Hernán Montes por su apoyo en el desarrollo de los diferentes estudios que se realizan en el CNDG. Al Director y personal del Instituto Geofísico de la Universidad Nacional de San Agustín por brindarnos la información sísmica necesaria para el estudio del sismo de Cabanaconde. Publicación N°013-2002/CNDG-IGP.

BIBLIOGRAFÍA

ANTAYHUA, Y. (2002). Análisis de la actividad sísmica en la Región del Volcán Sabancaya y los sismos de Maca, Sepina y Cabanaconde. Tesis de Ingeniería, Universidad Nacional de San Agustín – Arequipa, 200 p.

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

BRILLINGER, D., UDIAS, A., BOLT, B., (1998). Probability model for regional focal mechanism solutions. Bull. Seism. Soc. Am. 70, 1479-1485.

BRUNE, J. (1970). Tectonics strain and the spectra of seismic shear waves from earthquakes. J. Geophys. Res. 75, 4997-5009.

DORBATH, L., DORBATH, C., JIMENEZ, E., Y 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.

DEMETS, C., GORDON, R., ARGUS, D., Y STEM S. (1990). Current Plate Motions. Jour. Geophys. Res. Into. 101, 425-478.

HUAMÁN, D., CHOROWICZ, J., DEFFONTAINES, B., GUILLANDE, R. Y RUDANT, J. (1993). Cadre structural et risques géologiques étudiés à l'aide de l'imagerie spatiale: la région du Colca (Andes du Sud Pérou): Bull. Soc. Géol. France, t.164, no 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. 138p.

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

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

MERING, C., HUAMÁN, R., CHOROWICZ, B. Y GUILLANDE, R. (1996). New data on the geodynamics of southern Perú from computerized analysis of SPOT and SAR ERS-1 images: Tecton., 259, 153-169

SÉBRIER, M., MERCIER, J., MEGARD, F., LAUBACHER, G., CAREY-GAILHARDIS, E. (1985). Quaternary normal and reverse faulting and the state of stress in the central Andes of Perú. Tectonics. 7, 895-928.

TACHER, W. Y HANKS, T. (1973). The use of body-wave spectra in the determination of seismic-source parameters. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 67, 561-589.

TAVERA, H Y BUFORN, E. (2001). Source mechanism of earthquakes in Perú. *Jour. of Seism.* V. 5. 4, 519-540.

TAVERA, H., BERNAL, I., VILCAPOMA, L., ANTAYHUA, Y. (2002). The Arequipa (Peru) earthquake of June 23, 2001. *Jour. of Seism.* (in press.)