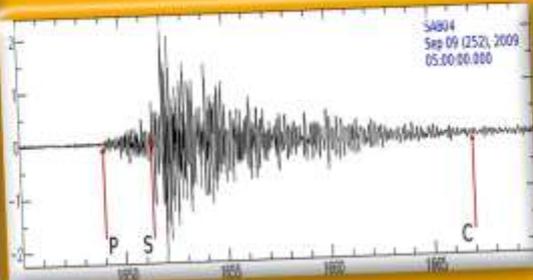


Informe Técnico N° A6567

Sismicidad de la región del volcán Sabancaya Arequipa (periodo 2009-2010)

POR:
DOMINGO RAMOS
YANET ANTAYHUA

MAYO 2011



ÍNDICE

RESUMEN.....	4
1.0 INTRODUCCIÓN.....	5
2.0 ASPECTOS GENERALES	7
2.1 ANTECEDENTES.....	6
2.2 UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	6
2.3 GEOMORFOLOGÍA, VULCANOLOGÍA Y RIESGOS GEOLÓGICOS	7
2.4 MARCO TECTÓNICO	7
2.5 TRABAJOS ANTERIORES.....	9
2.6 OBJETIVOS DE ESTE ESTUDIO.....	11
3.0 LA RED SÍSMICA TEMPORAL DEL SABANCAYA (RESITESA)	12
3.1 DISTRIBUCIÓN DE ESTACIONES SÍSMICAS.....	13
3.1.1 ESTACIONES DE BANDA ANCHA GURALP.....	13
3.1.2 ESTACIONES DE PERIODO CORTO SARA	14
3.1.1 ESTACIONES DE PERIODO CORTO TITAN.....	15
4.0 TRABAJO DE CAMPO	16
4.1 LOGÍSTICA	16
5.0 PROCESAMIENTO	17
5.1 PROCESAMIENTO DE DATA SÍSMICA EN CAMPO.....	17
5.1.1 RECUPERACIÓN DESDE ESTACIONES SARA	17
5.1.2 RECUPERACIÓN DESDE ESTACIONES GURALP.....	17
5.1.3 ESTACIONES TITAN	18
5.2 PROCESAMIENTO DE DATA SÍSMICA EN GABINETE	18
6.0 ANÁLISIS	19
6.1 ANÁLISIS EN EL DOMINIO DE TIEMPO	19
6.2 ANÁLISIS EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA.....	19
6.3 ESTIMACIÓN DE LA ENERGÍA	20
7.0 PROCESAMIENTO Y LOCALIZACIÓN DE SISMOS	22
7.1 PROGRAMA DE LOCALIZACIÓN.....	22
7.2 MODELO DE VELOCIDAD Y RELACIÓN DE VELOCIDAD	22
7.3 CÁLCULO DE MAGNITUD.....	23
8.0 PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.....	24
8.1 TIPOS DE SEÑALES SÍSMICAS.....	24
8.1.1 ONDAS DE MUY BAJA FRECUENCIA.....	24
8.1.2 ONDAS ARMÓNICAS.....	25
8.1.3 SEÑALES SÍSMICAS DE ALTA FRECUENCIA	25
8.1.4 OTRO TIPO DE SEÑALES	26
8.1.5 SISMOS TECTÓNICOS	27

SISMOS CON $TS-TP < 2.5$ S.....	27
SISMOS CON 2.6 S $< TS-TP < 5.0$ S	27
SISMOS CON 5.1 S $< TS-TP < 10.0$ S.....	28
SISMOS CON 10.1 S $< TS-TP < 20.0$ S.....	28
SISMOS CON $TS-TP > 20.0$ S.....	28
8.2 DISTRIBUCIÓN DE LA ENERGÍA SÍSMICA	30
8.3 LOCALIZACIÓN DE LOS SISMOS.....	31
8.4 DISTRIBUCIÓN DE LA SISMICIDAD EN SUPERFICIE	38
8.5 DISTRIBUCIÓN DE LA SISMICIDAD EN PROFUNDIDAD	38
8.6 LA SISMICIDAD Y SU RELACIÓN CON LA TECTÓNICA LOCAL	41
9.0 DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	44
9.1 DIFERENCIAS EN LA SISMICIDAD CON TRABAJOS ANTERIORES	44
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	45
BIBLIOGRAFÍA.....	47

RESUMEN

El estrato volcán Sabancaya ($16^{\circ}13'S$; $71^{\circ}51'O$; 5980 msnm), se encuentra ubicado en la Provincia de Caylloma, Departamento de Arequipa. Su última manifestación eruptiva fue de tipo vulcaniana y freatomagmática, y se produjo entre 1988 a 1998. En un radio de 20 km se ubican los principales poblados de la zona que concentran más de 15 mil habitantes. Así también, próximo a sus flancos Norte y Oeste, se encuentra el canal de riego del proyecto Majes. Este proyecto y la actividad turística del Colca, serían seriamente afectados ante una erupción de este volcán.

Con la finalidad de conocer el estado de la sismicidad actual en el valle del Colca y de caracterizar la sismicidad del volcán Sabancaya, en este volcán se instaló una Red Sísmica Temporal compuesta por 11 estaciones sísmicas. Esta red estuvo conformada por 2 estaciones de banda ancha marca Guralp 6TD, 1 estación de banda cuasi ancha marca Titán, 4 estaciones de periodo corto marca Titan y 3 estaciones de periodo corto marca Sara. 9 de estas estaciones (AMP, SAB3, CLR, CHV, TAY, CBN, HUA, SAB1 y CAJ1) operaron durante un mes y sólo 2 estaciones (SAB02 y SAB04) funcionaron hasta marzo y abril del 2010, respectivamente.

Para la confección de este informe, se presentan los resultados de los análisis en los dominios de tiempo y frecuencias aplicados a la data registrada por la estación SAB04. De estos análisis se han identificado ondas sísmicas de muy baja frecuencia (1.2×10^{-5} Hz) que estaría asociados a efectos de la marea terrestre; ondas armónicas con frecuencias centradas en 5.5 Hz y que estarían asociadas a flujos de masas de viento; ondas de alta frecuencia ($>$ de 20 Hz) y muy corta duración (aproximadamente $<$ 3 s) que estarían asociadas al rompimiento del casquete glaciar; y señales asociadas a pequeños lahares (frecuencias entre 0 y 20 Hz). Así mismo, se han registrado sismos de tipo tectónico y/o volcano-tectónico. Esta sismicidad tectónica fue distribuida en 5 escalas de diferencias de tiempos de arribo de las ondas P y S ($T_s - T_p$). Así, de un total de 11066 eventos sísmicos analizados, el 81.5% corresponde a la escala de 0 a 2.5 s; el 14.8% le corresponde a la $T_s - T_p$ de 2.6 s a 5.0 s; el 2.9 % le corresponde a la escala de 5.1 s a 10.0 s; el 0.6 % corresponde a la escala de 10.1 s a 20.0 s y el 0.4 % le corresponde a la escala de más de 20.1 s.

Por otro lado, se realizó una estimación de la energía para la data registrada en la estación SAB04. La energía calculada se encuentra por debajo de 1 mega joule (MJ). Este parámetro será establecido como umbral de comparación para futuros trabajos sísmicos en el volcán Sabancaya.

Así mismo, se ha realizado la localización hipocentral de 150 sismos locales que fueron registrados en al menos tres estaciones sísmicas. La distribución hipocentral de la sismicidad se encuentra centrada hacia el sector Norte y NNO del Volcán Hualca Hualca y mínimamente en el volcán Sabancaya. Asimismo, estos sismos ocurrieron a profundidades superficiales menores a 14.5 km y con magnitudes entre 0.4 y 2.9 Md.

Los resultados obtenidos de la distribución de los sismos, señalan una sismicidad superficial, asociada principalmente a los diferentes sistemas de fallamiento tectónico de la zona. Así mismo, una comparación con algunos trabajos sísmicos anteriores efectuados en este volcán indicarían una estabilidad en la sismicidad del Sabancaya.

SISMICIDAD DE LA REGIÓN DEL VOLCÁN SABANCAYA, AREQUIPA PERIODO 2009 – 2010

1.0 INTRODUCCIÓN

Este trabajo presenta los resultados preliminares del análisis de las señales sísmicas registradas por la Red Sísmica Temporal instalada en el volcán Sabancaya. Si bien esta red sísmica compuesta por 11 estaciones operó entre mayo 2009 y abril 2010, solo 2 cumplieron con este periodo de registro, pues las demás estaciones tuvieron que ser retiradas del campo por razones de límite de tiempo de internamiento temporal o por mal funcionamiento. Sin embargo, con la data obtenida por esta red sísmica, a pesar de ciertas limitaciones, se han efectuado análisis en los dominios del tiempo y de las frecuencias, distribución sísmica en función de rangos de T_s - T_p y localizaciones hipocentrales.

El desarrollo de este trabajo se describe en 9 capítulos, ordenados de la siguiente manera: 1) La primera parte describe los aspectos generales, tales como los antecedentes, la ubicación de la zona de estudio, la geomorfología, vulcanología y riesgos geológicos, el marco tectónico, los trabajos anteriores y los objetivos de este estudio; 2) La segunda parte, describe la red sísmica temporal del Sabancaya. Se describe la distribución y características principales de las estaciones sísmicas Guralp, Sara y Titan; 3) La tercera parte, trata del trabajo de campo y la logística empleada; 4) La cuarta parte, se ocupa del procesamiento, tanto en campo como en gabinete; 5) En la quinta parte, se describe los métodos utilizados para el análisis de la data sísmica; 6) La sexta parte se describe el procesamiento y los programas utilizados para la localización hipocentral de los sismos y el cálculo de la magnitud; 7) En la séptima parte, se presentan los resultados; así pues, se describe la sismicidad del volcán Sabancaya, se hace una diferenciación de tipos de señales sísmicas tales como: ondas de muy baja frecuencia, ondas armónicas, señales sísmicas de alta frecuencia, y otro tipo de señales. Asimismo, se hace una subclasificación de los sismos tectónicos en función de sus tiempos de arribo T_s - T_p mediante rangos: sismos con T_s - $T_p < 2.5$ s; sismos con 2.6 s $< T_s$ - $T_p < 5.0$ s; sismos con 5.1 s $< T_s$ - $T_p < 10.0$ s; sismos con 10.1 s $< T_s$ - $T_p < 20.0$ s; y sismos con T_s - $T_p > 20.0$ s. También se hace una distribución de la energía sísmica; se describe la localización de los sismos; la distribución de la sismicidad en superficie, en profundidad y se explica su relación con la tectónica local; 8) En la octava parte, se discuten los resultados obtenidos y se plantean algunas diferencias de la sismicidad con trabajos anteriores; y 9) Finalmente, en la novena parte se mencionan las conclusiones a las que se ha llegado con este estudio y se menciona la bibliografía que ha servido de apoyo a la confección de este informe.

2.0 ASPECTOS GENERALES

2.1 ANTECEDENTES

La ejecución del estudio sísmico del volcán Sabancaya estuvo planificada en el Plan Operativo Institucional del INGEMMET para el año 2009 (POI-2009). El plan inicial se realizó sobre la base de 6 sismógrafos: 2 de banda ancha y 4 de periodo corto de propiedad del INGEMMET. El IRD, mediante el proyecto VOLUME estaba ejecutando algunos trabajos sismológicos en el Perú, en ese contexto, el suscrito se contactó con el responsable y le solicitó en préstamo seis estaciones sísmicas digitales de periodo corto. En total, se reunieron 11 estaciones sísmicas que conforman la Red Sísmica Temporal del volcán Sabancaya (RESITESA).

2.2 UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

El estrato-volcán Sabancaya (194100 S; 8252000 E; 5980 msnm) se encuentra ubicado en la Provincia de Caylloma, Departamento de Arequipa, a 80 km al Oeste de la ciudad de Arequipa (Fig. N° 1). Además, pertenece a la Zona Volcánica Central (ZVC; [Sebrier y Soler, 1991](#)) de los Andes de Sudamérica.

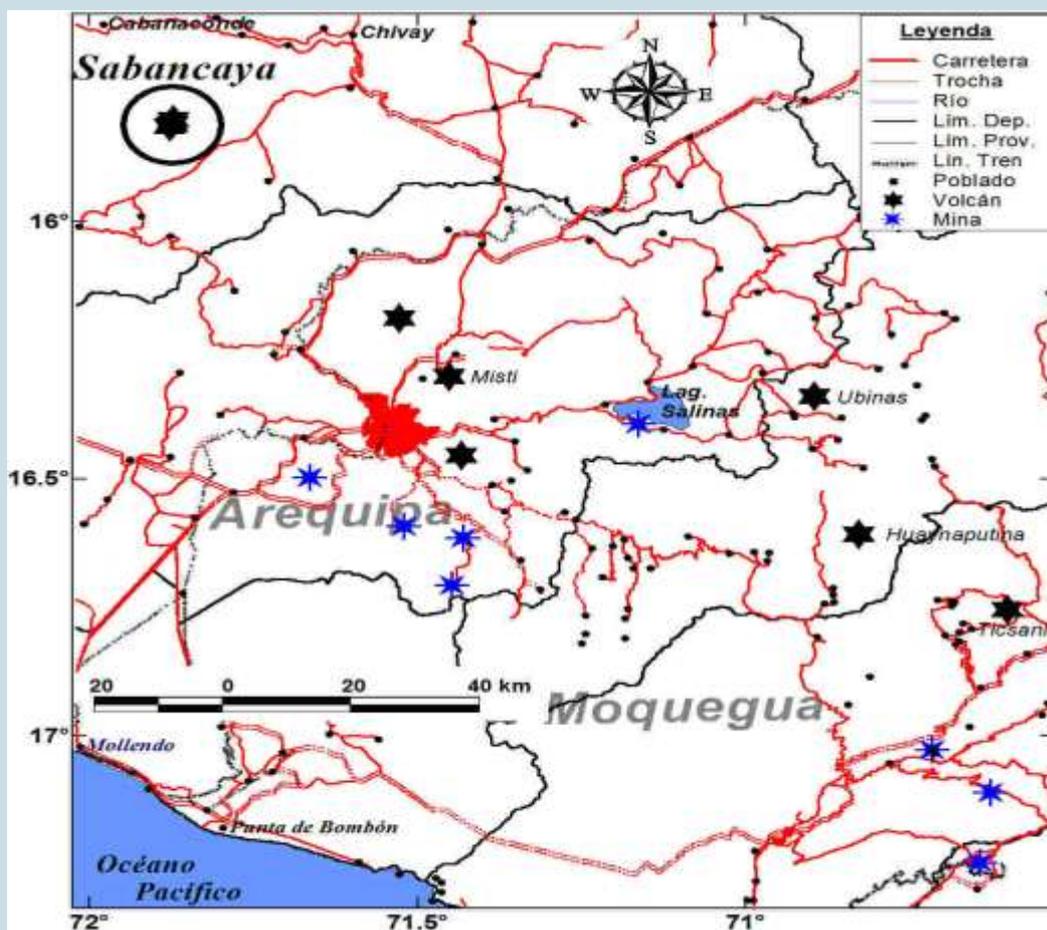


Fig. N° 1. Mapa de ubicación del volcán Sabancaya.

2.3 GEOMORFOLOGÍA, VULCANOLOGÍA Y RIESGOS GEOLÓGICOS

El volcán Sabancaya se encuentra flanqueado por los volcanes Ampato al SO y Hualca Hualca al NNO, conformando el complejo volcánico Ampato-Sabancaya-Hualca-Hualca. Este complejo volcánico se formó entre el Mioceno tardío y el Cuaternario inferior (Bulmer et al., 1998). Los sectores este, sur y oeste de este complejo volcánico (entre 4000 a 4500 msnm) presentan un relieve casi plano. Por el contrario, el sector Norte, el relieve es muy accidentado, debido a la presencia del cañón del río Colca. Hacia el sector NE del Sabancaya, se encuentra el pueblo de Maca, pueblo ha sufrido el embate de movimientos telúricos como consecuencia del emplazamiento de una falla geológica que cruzaría el cañón del Colca.

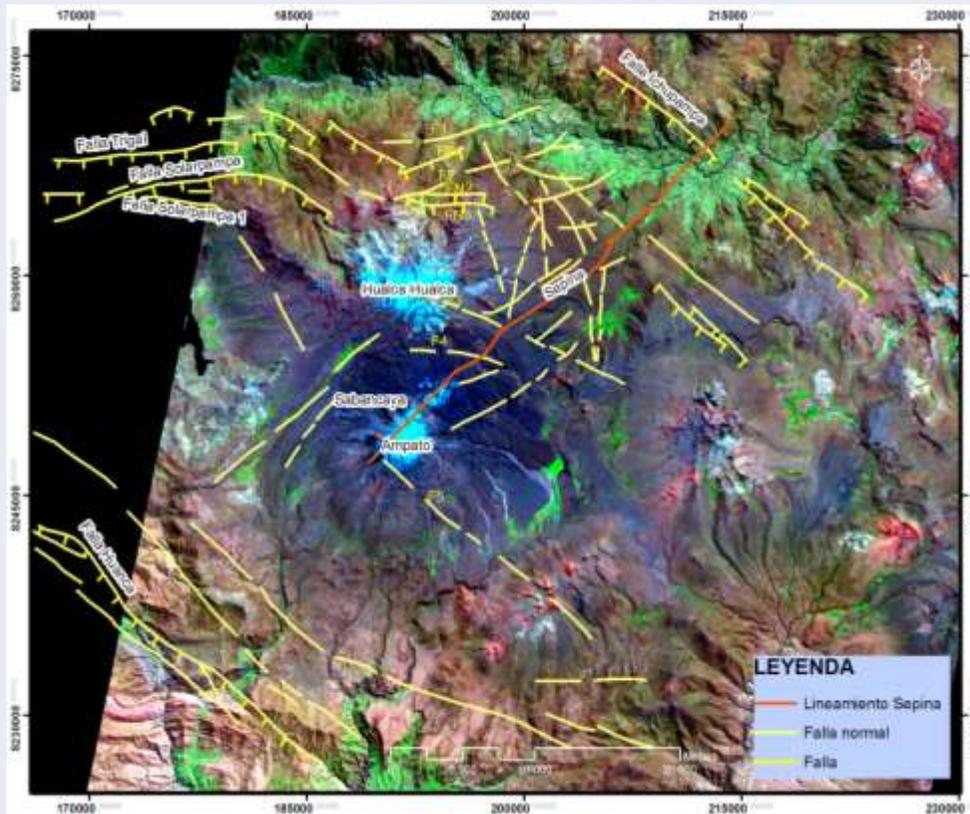
La cumbre del complejo volcánico Ampato – Sabancaya – Hualca – Hualca está cubierta por glaciares de algunas decenas de espesor. En las cotas bajas, el volcán Sabancaya presenta emplazamientos de coladas de lava de apariencia joven aún no datadas y que representan a 14 a 16 eventos efusivos (Fidel et al., 1997).

La última crisis eruptiva del Sabancaya (1988 al 1997) fue de tipo vulcaniano y freatomagmático, con emisiones fumarólicas de ceniza y lapilly (Steinmueller y Zavala, 1997). Actualmente presenta una leve actividad fumarólica que se disipa rápidamente con el viento y no es apreciable a distancia.

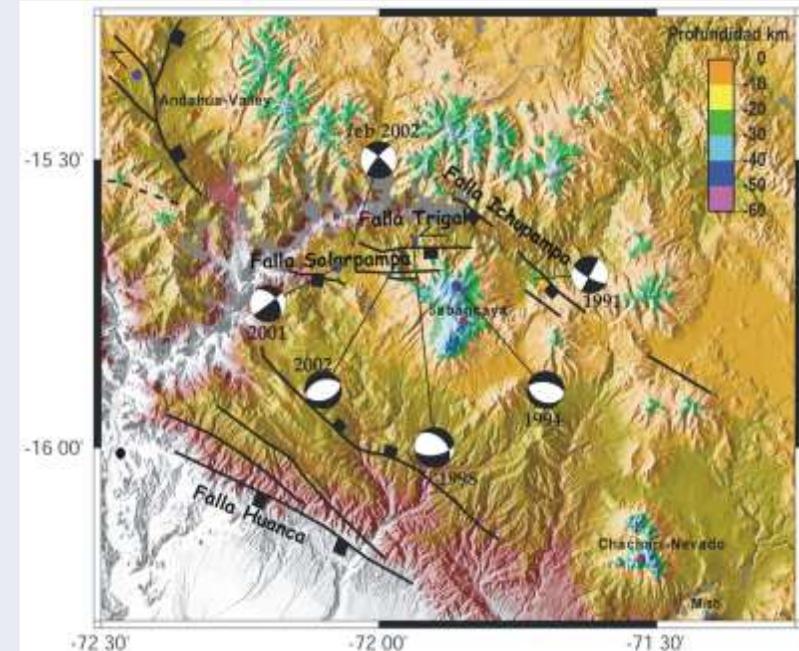
En las proximidades del Sabancaya se han asentado diversos pueblos que albergan a más de 36 mil habitantes en un radio de 30 km. Los riesgos que presenta este volcán son: caída de piroclásticos, flujos piroclásticos y lahares. Así mismo, importantes obras civiles como canales y túneles de irrigación del proyecto Majes, la central hidroeléctrica de Lluta, el sistema vial Chivay – Cabaconde – Huambo, Arequipa – Chivay – Cusco, Arequipa – Caylloma – Orcopampa – Arcata, carreteras vecinas y el sistema turístico del Colca, pueden ser afectados.

2.4 MARCO TECTÓNICO

La región del volcán Sabancaya, presenta un régimen tectónico muy complejo los mismos que se reflejan por la presencia de sistemas de fallas Huanca e Ichupampa (Huamán, 1995; Mering et al., 1996), orientadas en dirección Noroeste-Sureste (NO-SE) y buzamiento hacia el SO, el sistema de fallas Huambo-Cabanaconde representadas por las fallas Trigal, Solarpampa y Solarpampa1 (Sébrier et a., 1985; Huamán 1995), orientadas en dirección E-O y buzamiento hacia el Sur, además del lineamiento Sepina que llega a cortar el volcán Sabancaya y la falla Ichupampa (Fig. N° 2A). Las observaciones estructurales realizadas por Mering et al. (1996), Huamán (1995) y Sébrier et a. (1985), son concordantes con los mecanismos de ruptura obtenidos a partir de los mecanismos focales de 6 sismos de magnitud mayor o igual a 5.0 grados ($M_b \geq 5.0$) analizados por Antayhua et al. (2002) y Claire (2007) entre los años 1991 y 2002 (Fig. N° 2B).



(A)



(B)

Fig. 2. (A). Distribución de los principales sistemas de fallas y lineamientos identificados por Huamán (1995) y Sébrier et al. (1995). (B), se presenta los sistemas de fallas y sus respectivos mecanismos de ruptura obtenidos a partir de los mecanismos focales de sismos con magnitudes $M_b \geq 5.0$ ocurridos entre 1991 y 2002 (tomado de Claire, 2007).

2.5 TRABAJOS ANTERIORES

En la región del volcán Sabancaya se realizaron algunos estudios de carácter geológico, tectónico y sísmico, los cuales se resumen a continuación:

- Vicente et al. (1979), realizaron la descripción de la geología de Arequipa y el valle del Colca. En este estudio mencionan que esta región está conformada por afloramientos de rocas de edad Mesozoica y Cenozoica con unidades discontinuas que descansan sobre un basamento Precámbrico.
- Huamán, R. (1988?), hace un análisis de imágenes SPOT y fotografías aéreas evidenciando cambios térmicos en el cráter del volcán.
- Chorowicz et al. (1992), profundizaron los estudios de Vicente et al. (1979) y menciona que el extremo Este de la Cordillera Occidental está compuesto de rocas volcánicas y volcanoclásticas constituidas de capas de ignimbritas pertenecientes al Grupo Tacaza del Mioceno Inferior, además, sobreyaciendo a este grupo, se distinguen lavas andesíticas, dacíticas y capas ignimbríticas del grupo Barroso del Plioceno-Cuaternario representado principalmente por el volcán Sabancaya.
- Rodríguez y Huamán (1992), realizaron la localización y análisis de 131 sismos registrados durante el periodo 1990-1993. Los resultados mostraron que estos sismos estarían asociados a deformación tectónica local.
- Huamán (1995), analizando imágenes de satélite Landsat MSS y observaciones de campo identificó importante deformación tectónica regional y local representada, principalmente, por los sistemas de fallas Huanca, Ichupampa y el sistema Huambo-Cabanaconde, todas ubicadas en el extremo NE, SO y Norte del volcán Sabancaya.
- González et al. (1996), analizaron la actividad sísmica registrada en el volcán Sabancaya entre los años 1990 y 1994. En total, localizaron 44 sismos en los extremos N y NE del volcán Hualca Hualca y a profundidades menores a 9 km y estarían asociados con la tectónica local.
- Mering et al. (1996) realizaron trabajos complementarios en la región del volcán Sabancaya, utilizando para ello, imágenes satelitales SPOT y Landsat MSS e identifica números lineamientos ubicados al N y NE del volcán Sabancaya.
- Bulmer et al. (1998), analizaron la actividad volcánica y tectónica del Sabancaya utilizando imágenes de satélites Radarsat , Landsat TM y las

observaciones de campo respectivos. Los resultados iniciales de dichos análisis permitieron conocer la historia geológica del volcán Sabancaya.

- Antayhua (2002), analiza la sismicidad de la región del volcán Sabancaya, ocurrida durante el periodo 1991-1993 y los sismos de magnitud moderada: Maca (1991), Sepina (1992) y Cabanaconde (2002). Similar a otros estudios de sismicidad, ésta fue asociada a actividad tectónica local.
- Antayhua y Tavera (2002), hace un análisis sísmico sobre sismogramas obtenidos durante la crisis eruptiva del Sabancaya. Indica que durante la crisis se registraron señales de tipo: Tipo-A, Tipo-B, Periodo largo (LP), Explosiones y Tremores.
- Pitchard (2003), realizó estudios de deformación utilizando la técnica InSAR. El resultado obtenido permite identificar una anomalía de deformación al NE del volcán Hualca Hualca, probablemente asociado al proceso eruptivo del volcán Sabancaya.
- Gerbe, M-C and Thouret J-C., (2004), hacen un análisis petrogenético del magma del último proceso eruptivo del Sabancaya.
- Ocola L. y Gómez, J-C (2005), evaluaron los peligros potenciales que podrían ocurrir en el valle de Colca, además de mejorar la caracterización de los indicadores de peligrosidad.
- Claire D. (2007). Realizó un análisis sismotectónico detallado del valle del Colca, evidenciando que los mecanismos de ruptura coinciden totalmente con la disposición de los principales sistemas de fallas reconocidas en el valle del Colca.
- Gonzáles et al. (2009), utilizando la técnica de InSAR, identificaron 2 anomalías de deformación ubicados al Oeste (O) del volcán Hualca Hualca, estas anomalías están delimitadas por las fallas Solarpampa y Solarpampa 1 y podrían estar asociados a la ocurrencia de sismos de magnitud moderada.
- Alcalá y otros (2009), hace un análisis del retroceso glaciar del complejo Ampato-Sabancaya-Hualca Hualca. Basado en dataciones cosmogénicas ^{36}Cl sobre depósitos de secuencias de morrenas calculó que este complejo se quedaría sin casquete glaciar para el año 2065.
- Zavala et al. (2010), abordaron los temas de riesgo geológico e incluyen una evaluación conjunta de los distritos de Lari, Madrigal y Maca. Inicialmente realizan un alcance de los antecedentes geodinámicos sobre deslizamientos ocurridos en el área.

Actualmente, el INGEMMET está realizando un estudio geológico detallado del complejo Ampato-Sabancaya-Hualca Hualca.

2.6 OBJETIVOS DE ESTE ESTUDIO

Este estudio se ha realizado en función de los siguientes objetivos:

- Conocer la sismicidad de la zona del valle del Colca en el periodo 2009-2010.
- Realizar la caracterización sísmica del volcán Sabancaya para elaborar una línea base sobre la cual se implementará un sistema de vigilancia.
- Determinar y analizar la distribución de los sismos en superficie, en profundidad y correlacionarlo con la tectónica local.

3.0 LA RED SÍSMICA TEMPORAL DEL SABANCAYA (RESITESA)

La Red Sísmica Temporal del volcán Sabancaya (RESITESA) estuvo compuesta por 11 estaciones sísmicas digitales (Cuadro N° 1). La Fig. N° 3 muestra el periodo de operatividad de la RESITESA. Asimismo, se muestra con color verde las estaciones TITAN que fueron prestadas por VOLUME (IRD), en color rojo las estaciones tipo SARA y en color amarillo las estaciones GURALP. El corto periodo de registro de algunas estaciones sísmicas se debieron a las siguientes causas: permiso de internamiento temporal agotado (estaciones TITAN) y fallas técnicas en su funcionamiento (estaciones SARA).

Cuadro N° 1. Principales características de las estaciones sísmicas de la RESITESA.

Estación	Coordenadas WGS84		Elevación (msnm)	Tipo sismógrafo	Localidad
	Longitud	Latitud			
CBN	181247	8270988	3342	Titan	Cabanaconde
TAY	186621	8227276	3373	Titan	Taya
CAJ1	202186	8246486	4460	Titan	Sallalli
HUA	192531	8264698	4696	Sara	V. Hualca Hualca
CHV1	180150	8255127	4390	Titan	Laguna Mucurca
SAB1	193249	8253300	5578	Sara	V. Sabancaya
SAB3	194889	8251768	5547	Titan	V. Sabancaya
SAB2	194237	8251778	5505	Guralp	V. Sabancaya
AMP	194237	8248945	5271	Titan	V. Ampato
CLR	222778	8272464		Titan	Calera
SAB4	195843	8252061	5358	Guralp	V. Sabancaya

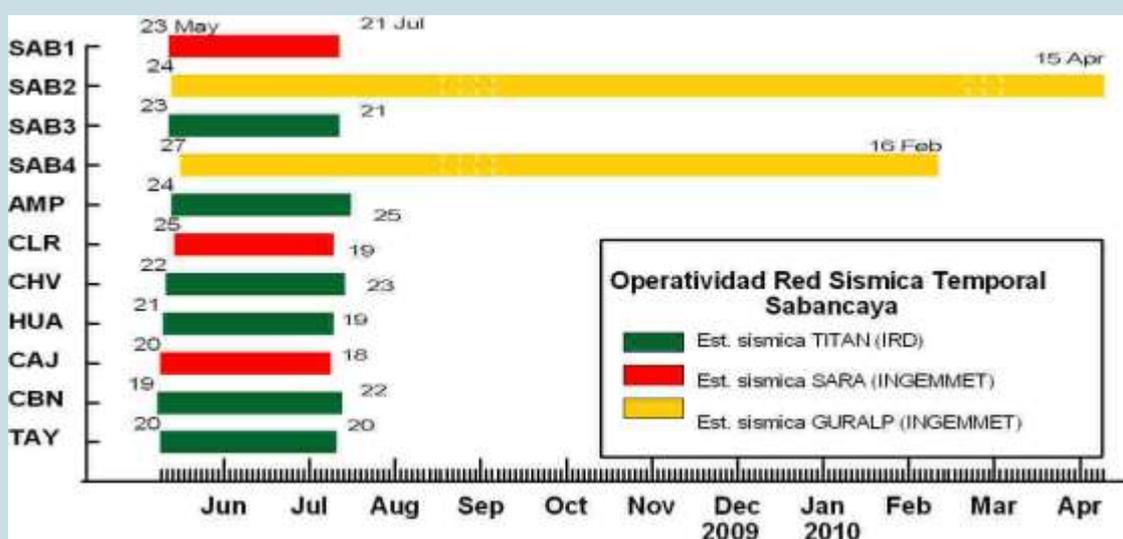


Fig. N° 3. Periodos de operatividad de las estaciones sísmicas que conformaron la RESITESA.

3.1 DISTRIBUCIÓN DE ESTACIONES SÍSMICAS

Las estaciones sísmicas de la RESITESA fueron instaladas sobre la base de tres áreas de investigación. Así, se buscó conocer la sismicidad de orden regional, de orden local y de orden volcánico. La Fig. N° 4 muestra la distribución geográfica de las estaciones sísmicas que conforman la RESITESA.

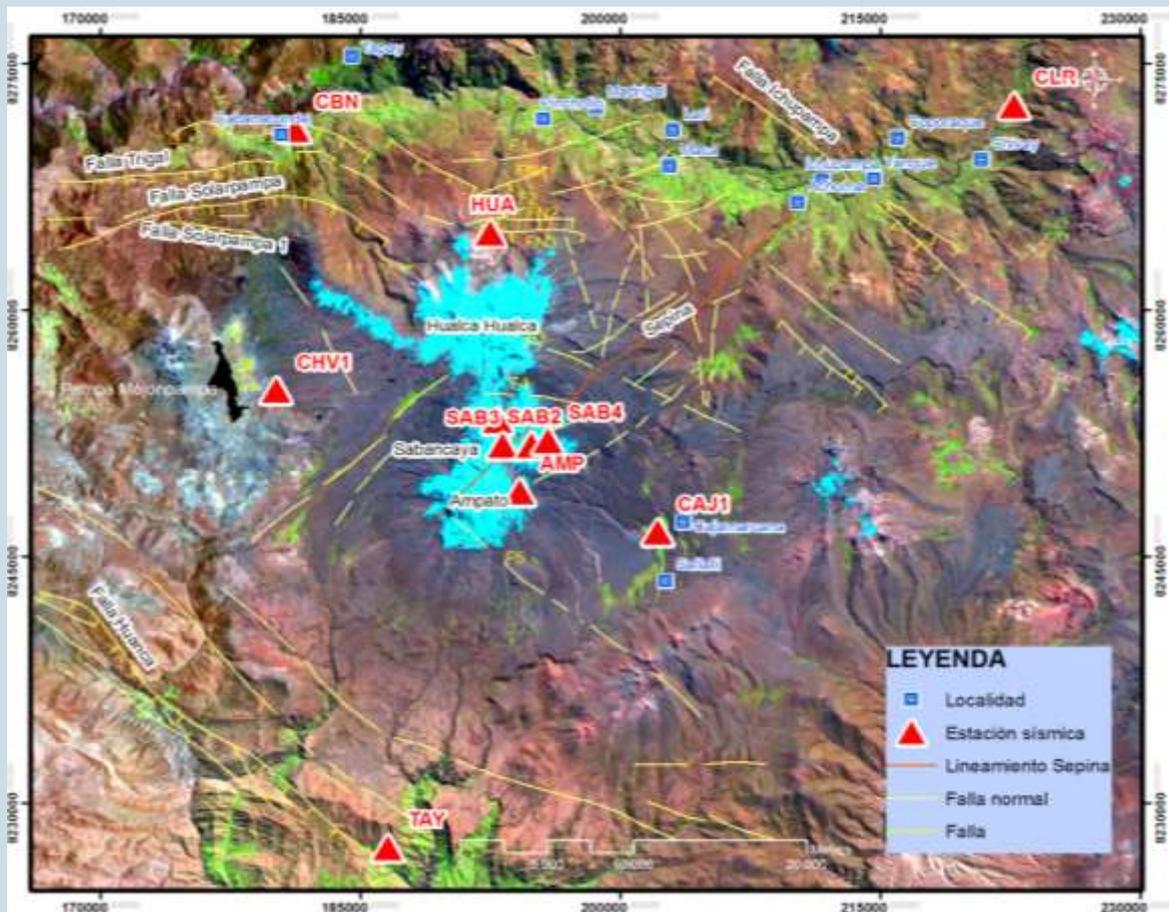


Fig. N° 4. Distribución geográfica de las estaciones sísmicas que conforman la RESITESA instalada alrededor del complejo volcánico Ampato, Sabancaya-Hualca-Hualca.

3.1.1 ESTACIÓN DE BANDA ANCHA GURALP

Es una estación sísmica triaxial (Z, N-S y E-O) de banda ancha (sensibilidad desde 0.033 Hz). Esta estación (Foto N° 2) calibra los tiempos de registro con un GPS tipo CMG, cuya antena se extiende varios metros desde la estación. Tiene los accesorios como el digitalizador, disco de almacenamiento, etc., integrados. En total posee un peso de 2.7 kg. Además, esta estación posee un disco externo para la recuperación (back up) de la data sísmica.



Foto N° 2. Estación sísmica Guralp.

3.1.2 ESTACIÓN DE PERIODO CORTO SARA

El sismómetro de periodo corto marca SARA y modelo SL06 es una estación robusta y compacta. Posee un registrador de datos de 3 canales (Z, E-O y N-S) y accesorios integrados. Su sensibilidad es desde 4.5Hz. Opera bajo dominio del sistema operativo ARM Linux. La principal ventaja es que demanda poco consumo de energía (< 3 Wats).



Foto N° 3. Estación sísmica SARA.

3.1.3 ESTACIÓN DE PERIODO CORTO TITÁN

Dado a su antigüedad, este tipo de instrumento, posee los accesorios como el sensor, el digitalizador y el disco duro, externos (Fotos N° 4 y N° 5). Esta estación opera con discos de almacenamiento SCSI modelo LGIT, registradores Minititan 3XT, GPS titan y sensores Marc Products de periodo corto (sensibilidad desde 1 Hz).

Además, también se empleó una estación cuasi banda ancha marca Titan que operó con un sensor Noemax-0017 (sensibilidad desde 0.1 Hz), registrador Minititan 3XT y GPS marca Titan.



Foto N° 4. Sismómetro TITAN y Disco Duro.



Foto N° 5. Sensor sísmico Marc Products, cables y conectores de la estación Titan.

4.0 TRABAJO DE CAMPO

4.1 LOGÍSTICA

El trabajo de campo tuvo como centro de operaciones la ciudad de Chivay. Así, todas las jornadas de trabajo iniciaban y terminaban en esta ciudad. Para este propósito, se contó con una camioneta 4x4 modelo Hilux 1995 (Foto N° 6), la cual en ocasiones tuvo que hacer más de un viaje hacia las zonas de trabajo para transportar al personal.

Asimismo, la Municipalidad Distrital de Chivay apoyó con 11 ayudantes de campo por un día, quienes transportaron las baterías, paneles solares y demás accesorios.



Foto N° 6. Camioneta HiLux que se empleó para la instalación de la RESITESA. Al fondo. El Hotel de Taya, donde se instaló la estación TAY.

5.0 PROCESAMIENTO

El procesamiento de la información sísmica registrada en las estaciones que conforman la RESITESA se realizó en dos etapas:

La primera etapa consistió en recuperar la data sísmica que fue almacenada en el disco duro de las estaciones sísmicas en campo, la segunda etapa se realizó en laboratorio y consistió en efectuar cambios de formato y la confección de la base de datos.

5.1 PROCESAMIENTO DE DATA SÍSMICA EN CAMPO

Cada una de las estaciones sísmicas posee técnicas propias de descarga o recuperación de data sísmica. Así tenemos:

5.1.1 RECUPERACIÓN DESDE ESTACIONES SARA

Estas estaciones tienen una capacidad de almacenamiento de 2 Gb a 24 bits de resolución. Así que requieren de un backup mensual. Para este proceso se emplean comandos Telnet y FTP.

- Se conecta una Lap Top o CPU a la caja SARA mediante cable serial.
- Empleando consolas DOS y mediante comandos telnet y ftp se accede a la estación sísmica para detener el sistema de registro.

```
ftp 164.16.121.150
root
/SLG/PRO>./stp
```

- Se accede al directorio de almacenamiento y se descarga la data sísmica.

```
/mnt/cf/SLG/EVT>mget 2009*
```

- Finalmente, se reinicia el sistema de adquisición de datos

```
/SLG/PRO>./srt -d DIG_SA2 -c CHA_SA2 -tag -t /root -u 2 &
```

5.1.2 RECUPERACIÓN DESDE ESTACIONES GURALP

Estas estaciones poseen una capacidad de almacenamiento de 8 Gb. Esta capacidad podría cubrir cerca de dos meses de registro.

Para la recuperación de data sísmica, se emplean un disco externo con el cual se procede de la siguiente manera:

- Se apaga la estación sísmica.
- Se conecta el disco externo a la estación y a la fuente de alimentación.
- Se enciende la estación sísmica. Las estaciones GURALP 6TD poseen un sistema automático de descarga.

- Finalizada la descarga, se apaga tanto la estación como el disco externo.
- Se desconecta el disco externo y se enciende la estación sísmica.

5.1.3 RECUPERACIÓN DESDE ESTACIONES TITAN

Este tipo de estaciones posee discos de almacenamiento externo. Así que para recuperar la información, se requiere reemplazar el disco utilizado por uno vacío. Para este proceso se requiere apagar el equipo antes de efectuar el cambio de disco y reiniciar la estación.

5.2 PROCESAMIENTO DE DATA SÍSMICA EN GABINETE

Debido a que la data sísmica fue adquirida con diferentes tipos de equipos, la data sísmica también fue registrada con diferentes formatos. Así por ejemplo, las estaciones SARA generan data en formato seisan, las estaciones GURALP generan data en formato cgf, sac, seisan, etc., y las estaciones TITAN generan data en formato SAC. En este contexto, es necesario que la toda data sísmica adquirida se encuentre en un solo formato de lectura. Para tal efecto, se utilizaron los programas de transformación de **data sac2asc, cgf2sac, sei2asc, asc2sac**, etc., que se distribuyen con ciertas restricciones en internet.

6.0 ANÁLISIS

El análisis de las señales sísmicas registradas por la RESITESA se efectuó tanto en el dominio del tiempo como en dominio de las frecuencias.

Considerando la gran cantidad de información, para la elaboración de este informe se optó por analizar la data comprendida entre junio a agosto de 2009 y registrada en la estación SAB04.

6.1 ANÁLISIS EN EL DOMINIO DE TIEMPO

El análisis de las ondas sísmicas en el dominio del tiempo se realizó con el programa llamado SAC (Seismic Analysis Code). Este programa se desarrolla en plataforma Linux, es de libre distribución y se puede descargar de la siguiente dirección:

http://www.iris.edu/manuals/sac/SAC_Home_Main.html.

Este programa requiere la confección de scrips o pequeños programas y macros que permiten administrar la data sísmica a criterio del analista.

Con ayuda del SAC se ha medido los tiempos de llegada de las ondas P y S y la coda (C) de las señales sísmicas (Fig. N° 5).

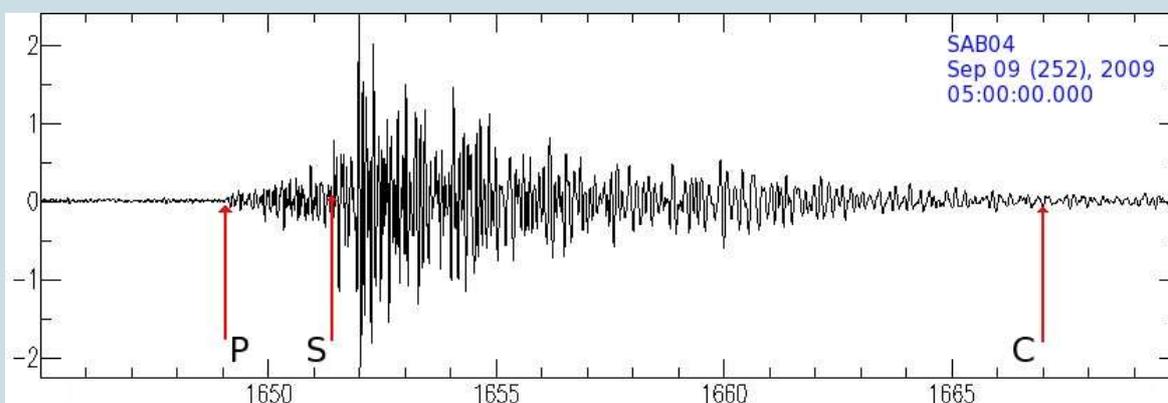


Fig. N° 5. Señal sísmica registrada el 09 de setiembre de 2009 en la estación SAB04. La amplitud está dada en cuentas y la duración está dada en segundos.

6.2 ANÁLISIS EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA

Para efectuar el análisis de las ondas sísmicas en el dominio de las frecuencias se ha empleado el programa VOLCANALISIS. Este programa fue desarrollado en el proyecto europeo VOLUME (2006-2008) del cual formó parte el INGEMMET.

El VOLCANALISIS tiene incorporado el algoritmo matemático FFT (Fast Fourier Transform) con el cual, se hace la transformación de la onda sísmica del dominio del tiempo al dominio de las frecuencias. El resultado de esta transformación es un espectro de frecuencias, en el cual se identifican principalmente tres tipos de frecuencias: la frecuencia inicial (Fi), la frecuencia pico (Fp) y la frecuencia final (Ff) de la señal sísmica (Fig. N° 6).

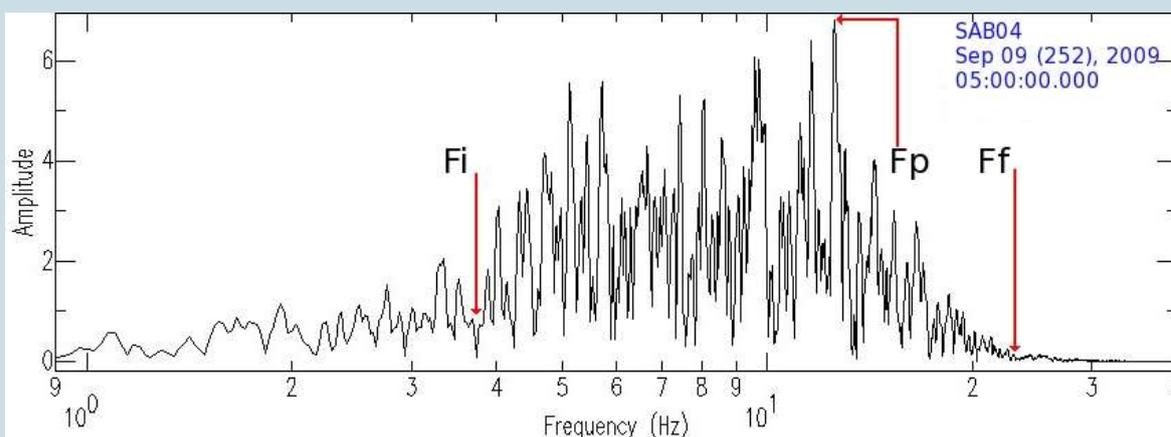


Fig. N° 6. Espectro de la señal sísmica registrada el 09 de setiembre de 2009 en la estación SAB04. Se observan los tres tipos de frecuencias principales (Fi, Fp y Ff) que se registran de las señales volcánicas.

6.3 ESTIMACIÓN DE LA ENERGÍA

Para estimar la energía de las señales sísmicas se ha empleado el programa VOLCANALISIS. Mediante este programa se delimita la señal sísmica con una ventana de tiempo y se calcula la energía de la onda sísmica (Fig. N° 7). Este cálculo se realiza mediante la siguiente expresión:

$$\int a^2 dt$$

Donde **a** es la amplitud de la señal sísmica y **dt** es el paso de muestreo.

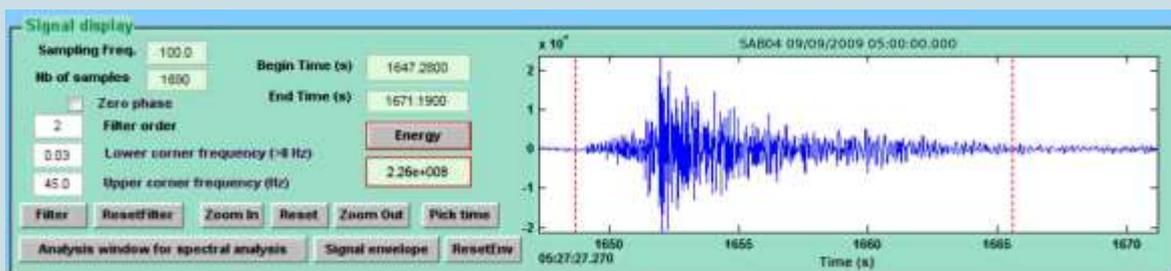


Fig. N° 7. Ejemplo del cálculo de la energía mediante el programa VOLCANALISIS.

Por otro lado, se ha estimado la energía a toda la data sísmica registrada en la estación SAB04. Esta estimación se realizó con un programa desarrollado en fortran (proporcionado por el Dr. J-P. Metaxián del IRD y acondicionado por el suscrito para el volcán Sabancaya) y compilado en la versión de fortran 77.

f77 -g nombre_programa.f -o nombre_programa.exe

Con esta compilación se genera un archivo llamado nombre_programa.exe el cual, al ser invocado, ejecuta las diferentes órdenes que se ha indicado en el programa.

./nombre_programa.exe

Este programa calcula la energía promedio para ventanas de tiempo de 10 segundos. La ecuación matemática que gobierna este programa fue desarrollada para calcular la energía elástica, considerando una fuente isotrópica y un semiespacio homogéneo (Boatwright, 1980):

$$E_{sismica} = 2\pi r^2 \rho_{tierra} C_{tierra} 1/A \int S^2 U(t)^2 dt$$

Donde: ρ_{tierra} , es la densidad del volcán. C_{tierra} , es la velocidad de onda P. U , es la velocidad de la partícula. S , es la corrección por respuesta de sitio y, A , es la corrección por atenuación. Por simplicidad, tanto S como A fueron igualadas a 1 (Johnson, 2005).

Para la data presentada en este informe, se realizó una discriminación de los sismos tectónicos con Ts-Tpmayores a 20 s. Debido a que el instrumento utilizado en la estación SAB04 fue una Guralp 6TD, se empleó la sensibilidad de 800 V/m/s.

7.0 PROCESAMIENTO Y LOCALIZACIÓN DE SISMOS

Aún cuando se instaló 11 estaciones alrededor del complejo volcánico, éstas no estuvieron operativas durante todo el periodo, debido a los diversos problemas técnicos descritos en el ítem 2. Es así que, para construir la base de datos de los sismos registrados en la zona, solamente se consideró el periodo comprendido entre mayo y julio de 2009, tiempo durante el cual estuvieron operativas 3 a más estaciones sísmicas.

Por tanto, para el procesamiento y localización de los sismos correspondientes al periodo mayo a julio del 2009, se ha seguido el siguiente procedimiento:

- a) Se recopiló toda la información sísmica registrada en las estaciones instaladas durante el periodo de estudio.
- b) Se realizó la selección de sismos locales con tiempos de arribo de las ondas P y S menores e iguales a 5.0 segundos ($T_s - T_p \leq 5.0$ s) registrados en 3 o más estaciones tomando como base las estaciones Hualca Hualca (HUA) y Sabancaya 4 (SAB4).
- c) Del total de sismos seleccionados, se generó una base de datos de 150 sismos locales registrados en 3 a más estaciones.
- d) El paso siguiente fue utilizar un programa de localización para la lectura de los tiempos de arribo de las ondas P y S y su posterior localización hipocentral

7.1 PROGRAMA DE LOCALIZACIÓN

El programa de procesamiento utilizado en el presente estudio es el SEISAN versión 8.2.1 (Havskov and Ottemoller, 2009) y con el apoyo del programa de localización Hypocenter (Lienert, 1986). Este programa, similar a otros, utiliza como datos de entrada el nombre, coordenadas geográficas (latitud y longitud) y elevación de las estaciones sísmicas; además de la lectura de los tiempos de arribo de las ondas P y S, la duración total del sismo, una relación de velocidad (V_p/V_s), un modelo de velocidad y la ecuación para el cálculo de la magnitud de duración (M_d).

7.2 MODELO DE VELOCIDAD Y RELACIÓN DE VELOCIDAD

En la actualidad, en el Perú no se han realizado modelos reales que permitan conocer la distribución de la velocidad de las ondas en el interior de la corteza a nivel local y mucho menos en zonas volcánicas como el complejo volcánico Ampato Sabancaya Hualca Hualca, es por ello, que se opta por evaluar diferentes modelos a fin de seleccionar el que resuelva mejor los parámetros hipocentrales de los sismos, los

mismos que pueden reflejarse con errores mínimos en la estimación de estos parámetros.

Debido a la buena resolución obtenida en los parámetros hipocentrales de los sismos registrados en la región del volcán Sabancaya durante el periodo 1993 y 1995 (Antayhua, 2002), se ha optado por utilizar el modelo de velocidad propuesto por Dorbath et al. (1991) (Cuadro 2) y la relación de velocidad $V/V_s=1.65$. Este modelo ha sido utilizado en otros estudios con características similares a la zona del complejo volcánico, un ejemplo de ello puede mencionarse a los estudios de sismicidad local del volcán Ticsani y que corresponden a los periodos: octubre de 2005 (Tavera, 2006) y septiembre a diciembre de 2008 (Antayhua et al., 2008).

Cuadro 2. Modelo de velocidad obtenido por Dorbath et al. (1991). Donde Prof. es la profundidad en kilómetros y V_p la velocidad de la onda P en kilómetros por segundo.

Prof. (km)	V_p (km/s)
0.0	5.2
15.0	6.2
30.0	6.8
50.0	8.0

Asimismo, la relación de velocidad V_p/V_s de 1.65 utilizada en este estudio corresponde al obtenido en el estudio inicial del volcán Sabancaya (Antayhua 2002; Antayhua et al, 2002).

7.3 CÁLCULO DE LA MAGNITUD

Para el cálculo de magnitud de los sismos locales registrados por la red sísmica temporal instalada alrededor del volcán Sabancaya, se ha considerado utilizar la ecuación propuesta por Klein (1978), cuyo requisito principal es tomar la lectura de la duración total del sismo.

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

Donde: M_d es la magnitud de duración en grados, T es la duración total del sismo en segundos, D la distancia epicentral en kilómetros y Z la profundidad del hipocentro en kilómetros.

Cabe señalar que la duración total del sismo no permite medir el tamaño real del sismo; sin embargo, por lo menos permite estimar de manera aproximada la cantidad de energía liberada de los sismos locales.

8.0 PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

8.1 TIPOS DE SEÑALES SÍSMICAS

Del análisis de la data sísmica registrada en la estación SAB4 (periodo junio-agosto 2009), se ha identificado ondas de muy baja frecuencia, ondas armónicas, señales sísmicas asociadas al rompimiento del casquete glaciar, señales sísmicas asociadas a lahares y sismos tectónicos.

8.1.1 ONDAS DE MUY BAJA FRECUENCIA

La Fig. N° 8 muestra un ejemplo de este tipo de señales. Para la confección de este ejemplo se ha considerado el registro continuo de 2 días (13 y 14 de setiembre de 2009), separados por una línea roja. En esta figura se observa una onda cuasi sinusoidal. La frecuencia de esta onda es de 1.2×10^{-5} Hz (Fig. N° 9). Este tipo de ondas estaría asociado a los efectos de la marea terrestre.

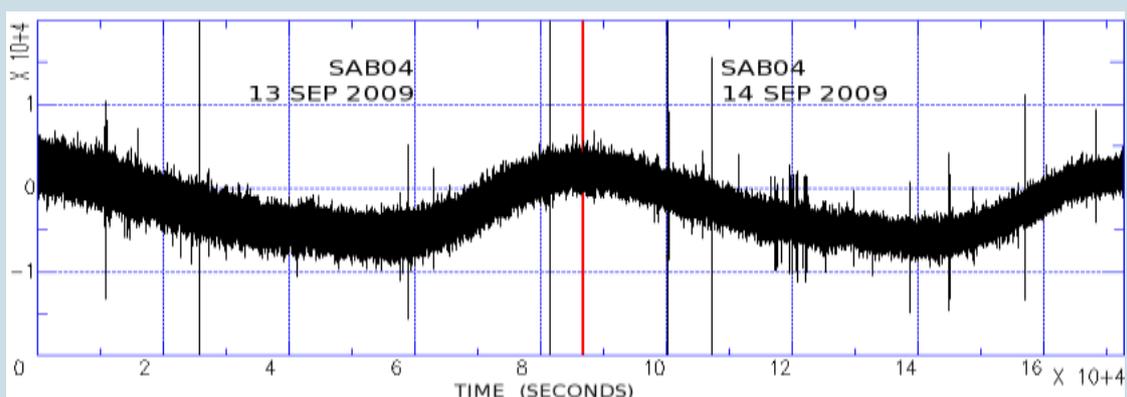


Fig. N° 8. Ejemplo de onda de muy baja frecuencia. Esta señal está compuesta por los registros de los días 13 y 14 de setiembre de 2009 y registrados en la estación SAB04.

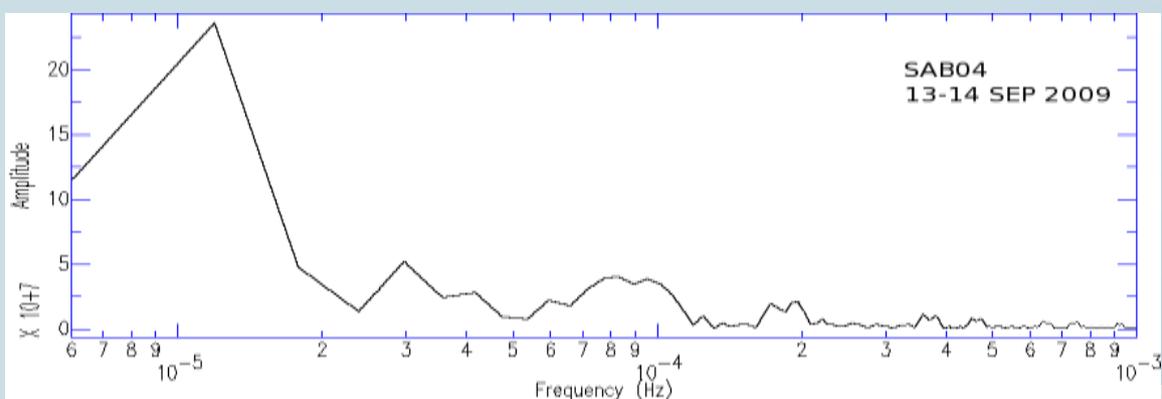


Fig. N° 9. Espectro de frecuencias de la señal compuesta de los días 13 y 14 de setiembre de 2009.

8.1.2 ONDAS ARMÓNICAS

Este tipo de ondas se presentan a manera de tremores, contienen varios trenes de ondas, no presentan fases claras. En la Fig. N° 10 se observa que estas señales están comprendidas en una banda de frecuencias entre 5 y 6 Hz con un pico principal en 5.5 Hz. Asimismo, se observa una banda de frecuencias de menor amplitud entre 10 y 12 Hz. La duración de este tipo de señales es de 60 a 80 s. Por observaciones de campo, se dedujo que estas señales estarían asociadas a flujo de viento.

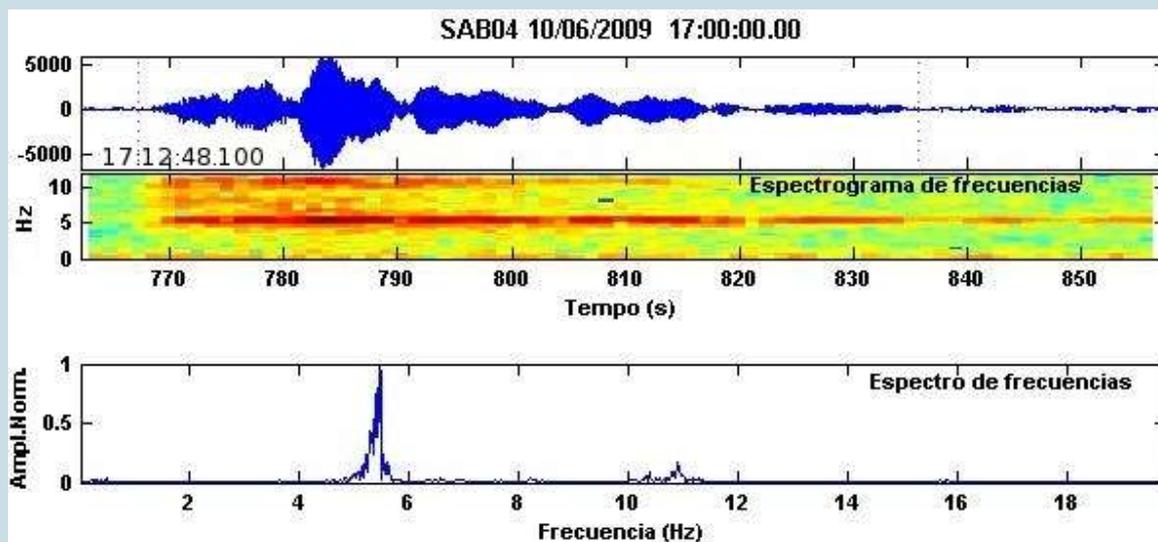


Fig. N° 10. Ejemplo de ondas armónicas registradas en la estación SAB04 el 06 de octubre de 2009 a las 17:12 GMT.

8.1.3 SEÑALES SÍSMICAS DE ALTA FRECUENCIA

Este tipo de señales sísmicas se caracterizan por presentar gran amplitud ($>5E4$ cuentas), corta duración y por supuesto, alta frecuencia.

El ejemplo de la Fig. N° 11 muestra una señal sísmica con TS-TP de 0.25 s y una duración de 2.5 s. Así mismo, se observa que esta señal está comprendida en dos bandas de frecuencias, la primera entre 5 y 25 Hz con pico en 13 Hz y la segunda entre 25 a 48 Hz con un pico en 39 Hz. Este tipo de señales estaría asociado al rompimiento del casquete glaciar en zonas próximas a la estación SAB04.

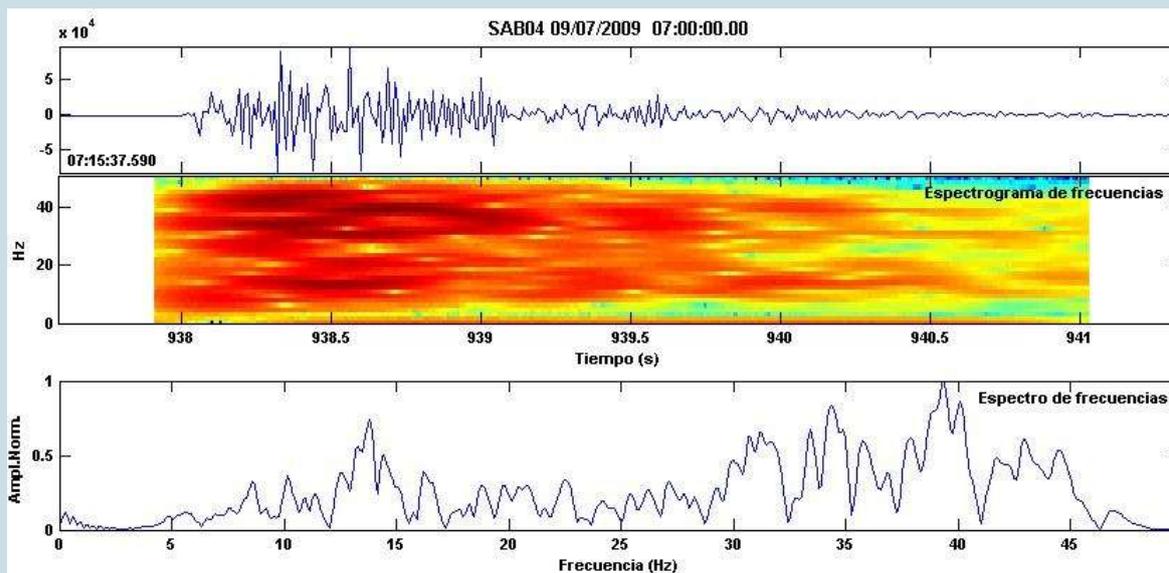


Fig. N° 11. Ejemplo de señal sísmica de alta frecuencia registrada el 09 de julio de 2009 a las 07:15 GMT en la estación SAB04.

8.1.4 OTRO TIPO DE SEÑALES

Este tipo de señales se manifiestan a manera de tremor disarmónico. Tienen un inicio emergente y larga duración. La Fig. N° 12 muestra una señal con más de 120 s de duración y una banda de frecuencias entre 0 y 8 Hz. Por otro lado, para efectos de comparación, se muestra en la Fig. N° 13 otro ejemplo de sismo por lahar, registrado en el volcán Ubinas.

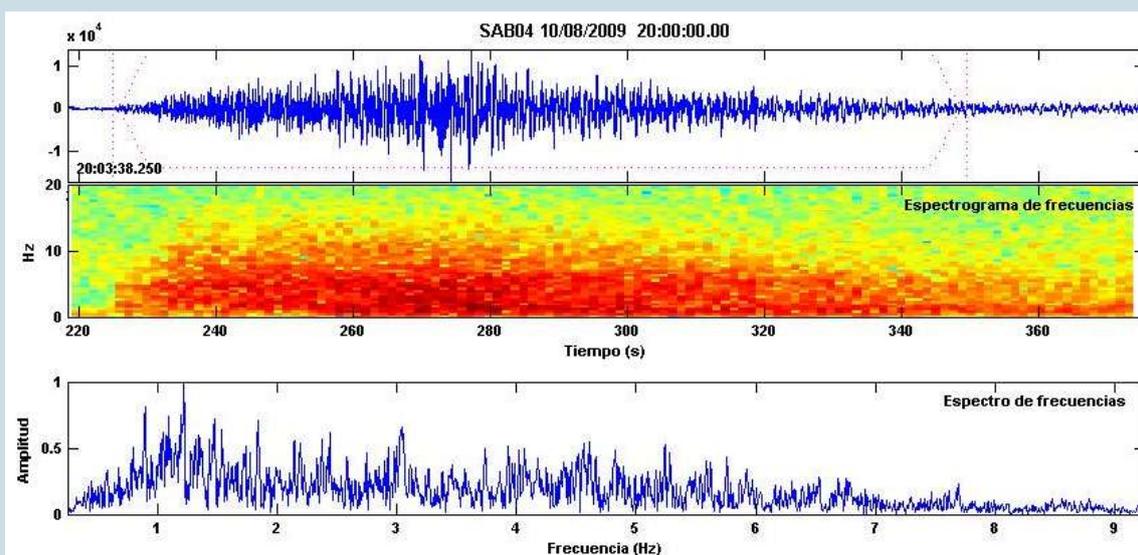


Fig. N° 12. Ejemplo de una señal sísmica asociada a un lahar registrada en la estación SAB04 el 10 de agosto de 2009 a las 20:03 GMT.

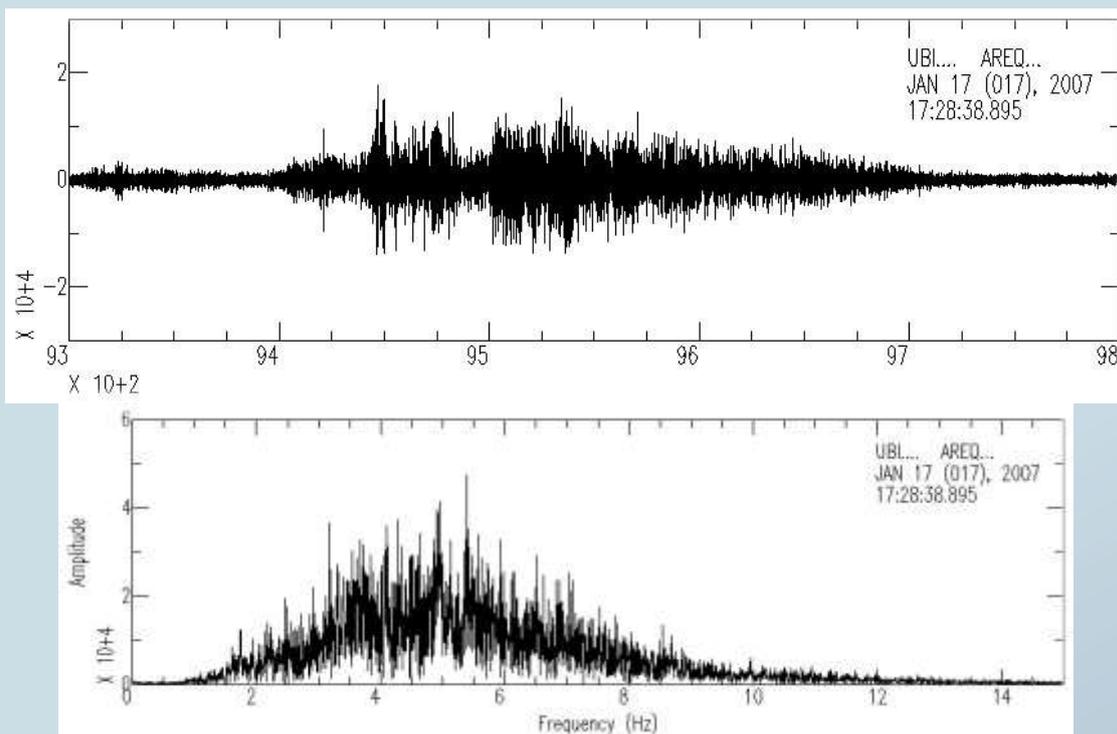


Fig. N° 13. Ejemplo de señal sísmica asociada al lahar del 18 de enero del 2007 (Macedo et al., 2007).

8.1.5 SISMOS TECTÓNICOS

La actividad sismo-tectónica registrada por la RESITESA fue clasificada en función de la diferencia de llegada de las ondas de cuerpo (S-P). Para tal efecto, se ha considerado 5 escalas: $T_s - T_p < 2.5$ s; $2.6 < T_s - T_p < 5.0$ s; $5.1 < T_s - T_p < 10.0$ s; $10.1 < T_s - T_p < 20.0$ s y $T_s - T_p > 20.0$ s. El producto de estas escalas con 5.2, que es la velocidad de las ondas P para capas superficiales (Dorbath et al., 1991), da como resultado una estimación del radio de la fuente sísmica respecto de la estación analizada (SAB04). En ese sentido, para la elaboración de este informe se ha analizado un total de 11066 eventos.

Sismos con $T_s - T_p < 2.5$ s: Esta escala cubre un área aproximada de 13 km alrededor de la estación SAB04. La Fig. N° 14 (a) muestra la distribución sísmica de este rango de $T_s - T_p$ por día. En total, se ha contabilizado un total 8,999 señales sísmicas lo que significa el 81.5% de la sismicidad analizada (Fig. N° 12). Esta sismicidad se presenta a razón de 155 sismos por día.

Sismos con $2.6 \text{ s} < T_s - T_p < 5.0$ s: La zona cubierta por esta $T_s - T_p$ está comprendida entre los 13 y 26 km de radio con centro en la estación SAB04. La distribución sísmica diaria de la Fig. N° 14 (b) muestra mayor actividad el 15 de agosto de 2009 con 195 sismos de un total de 1638 eventos. Este total representa el 14.8% de la sismicidad total analizada

para este informe (Fig. N° 15). Así mismo, esta sismicidad se presenta a razón de 28 sismos por día.

Sismos con $5.1 \text{ s} < T_s - T_p < 10.0 \text{ s}$: Con este rango de $T_s - T_p$ se cubre un área aproximada de 26 a 52 km alrededor de la estación SAB04. La Fig. N° 14 (c) muestra mayor actividad sísmica con esta $T_s - T_p$ los días 05 de julio y 15 de agosto de 2009 con 27 eventos cada día. En total, se ha contabilizado 326 sismos con esta $T_s - T_p$ que representa el 2.9% de la sismicidad total (Fig. N° 15). Esta sismicidad se presenta a razón de 6 sismos por día.

Sismos con $10.1 \text{ s} < T_s - T_p < 20.0 \text{ s}$: Esta $T_s - T_p$ enmarca las zonas entre los 52 y 104 km alrededor de la estación SAB04. La sismicidad diaria de la Fig. N° 14 (d) muestra mayor actividad sísmica los días 13 y 26 de junio de 2009 con 6 eventos cada día. En general se ha contabilizado 64 eventos en este periodo de estudio que representa el 0.6 % (Fig. N° 15). Así mismo, esta sismicidad se presenta a razón de 1 evento sísmico por día.

Sismos con $T_s - T_p > 20.1 \text{ s}$: La zona comprendida por esta $T_s - T_p$ se encuentra por encima de los 104 km. En la Fig. N° 14 (e) se observa que la mayor sismicidad para este rango de $T_s - T_p$ se presentó los días 01 de julio y 12 de agosto de 2009 con 4 sismos cada día. En total se ha contabilizado 39 eventos que representa el 0.4 % de la sismicidad total registrada en el periodo junio-agosto de 2009 (Fig. N° 15). De igual forma, esta sismicidad se presenta a razón de 1 sismo por día.

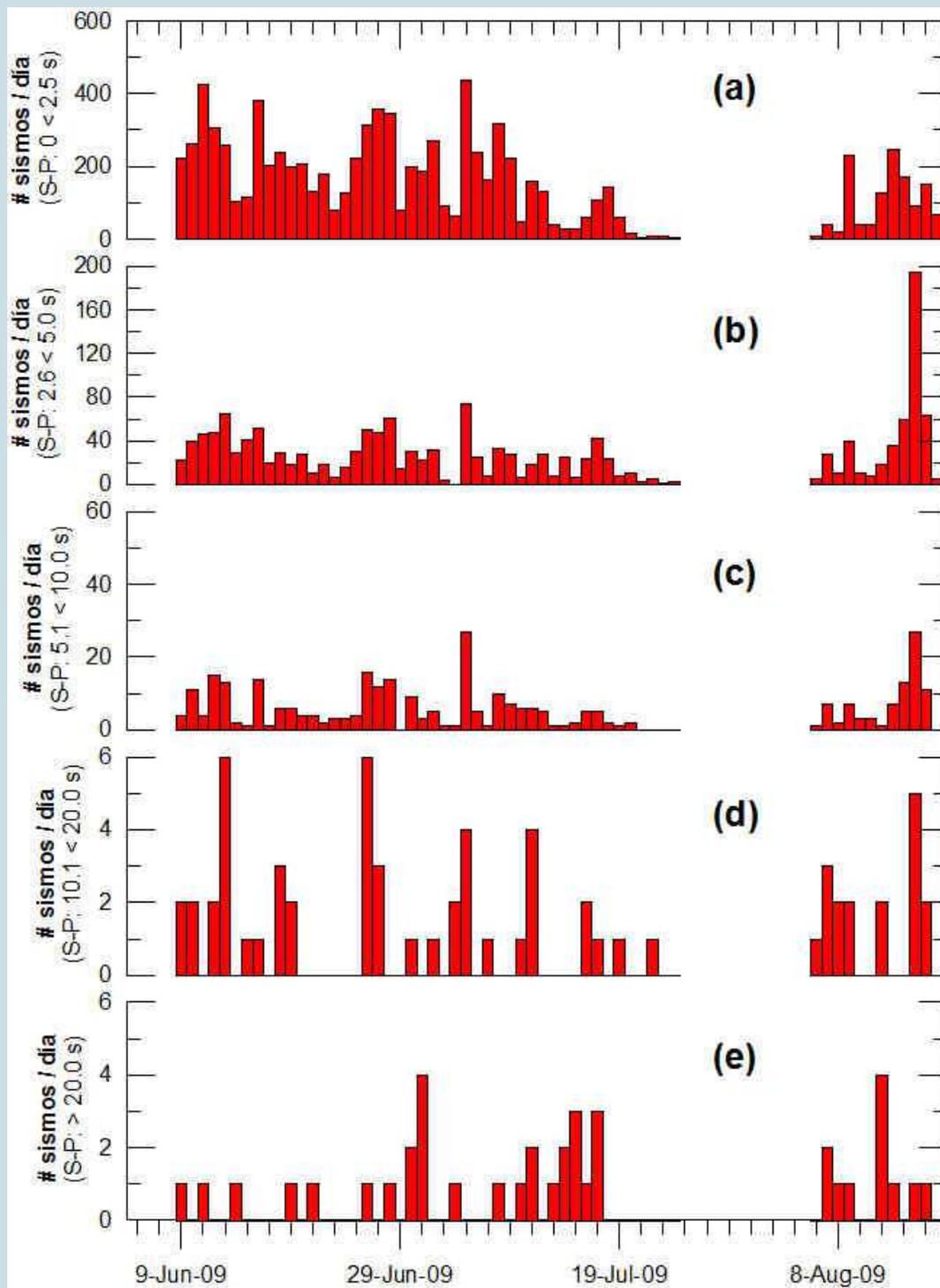
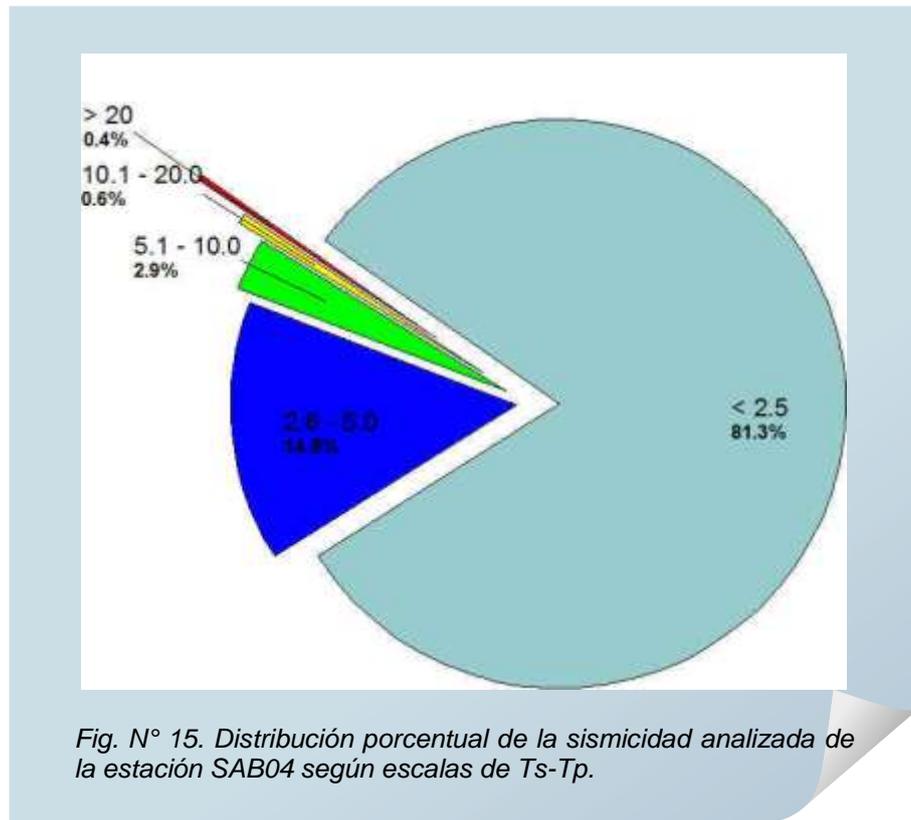
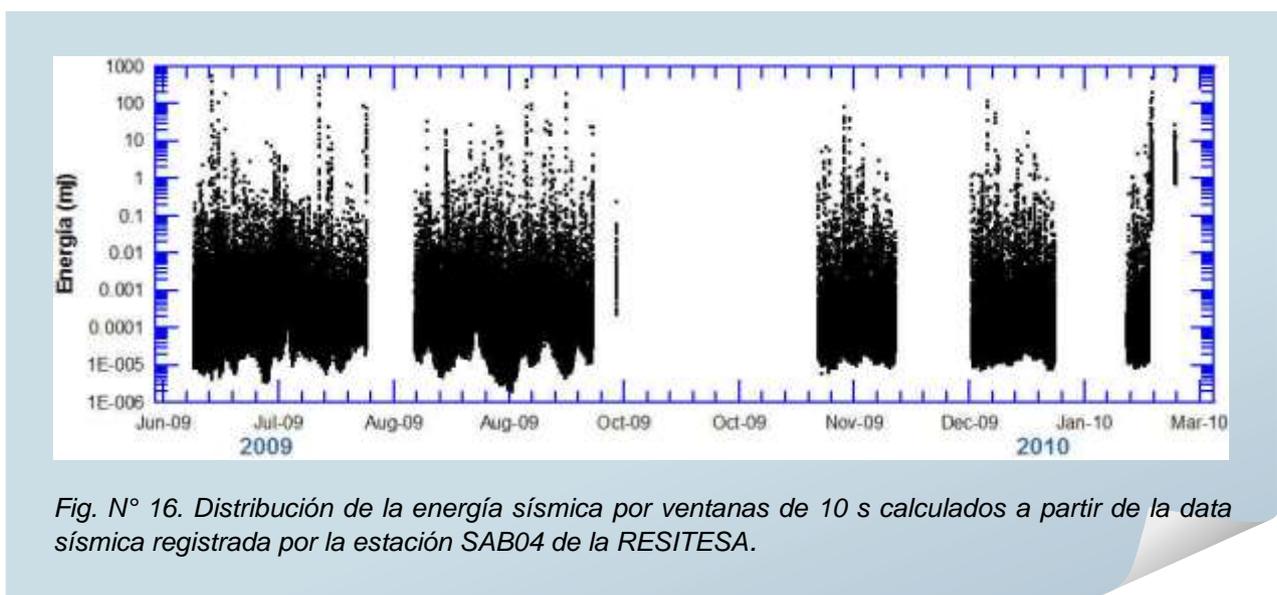


Fig. N° 14. Distribución sísmica diaria según rangos T_s-T_p para el periodo junio-agosto de 2009 registrado por la estación SAB04 de la RESITESA.



8.2 DISTRIBUCIÓN DE LA ENERGÍA SÍSMICA

La Fig. N° 16 muestra la distribución de la energía sísmica calculada para la estación SAB04 de la RESITESA para el periodo junio 2009 a abril 2010. En esta figura, se observan valores muy bajos de energía (< 1 MJ). De este resultado se puede establecer como umbral de energía el nivel de 1 MJ para efectos de comparación con futuros trabajos sismológicos en el volcán Sabancaya.



8.3 LOCALIZACIÓN DE LOS SISMOS

Durante el período de operatividad de la red sísmica temporal, se ha registrado numerosos sismos en una, dos y tres estaciones. Para los fines de localización hipocentral se ha seleccionado, únicamente, aquellas que están registradas en 3 a más estaciones sísmicas. Así, se ha construyó una base de datos de 150 sismos con diferencia de tiempos de arribo de las ondas Ts-Tp ≤ 5 s; de tal manera que, pueden ser considerados como sismos locales.

En la Fig. N° 17, se muestra ejemplos de sismos locales registrados en 3 estaciones con sus respectivas lecturas de los tiempos de arribo de las ondas P y S en segundos y la duración total del sismo (C). Estos sismos se registraron el 13 de junio de 2009, a las 10:24 hora GMT (Fig. N° 17A.) y 1 de julio de 2009, a las 09:58 hora GMT (Fig. N° 17B).

En general, la lectura de los tiempos de arribo Ts y Tp fueron realizados con una precisión de 0.03s para la onda P y de 0.07s para la onda S. se utilizó el modelo de velocidad propuesta por Dorbath et al. (1991) y valor promedio de Vp/Vs=1.65 obtenido por Antayhua (2002) y Antayhua et al. (2002). Con esta información se procedió a obtener los parámetros hipocentrales de 150 sismos utilizando el programa SEISAN.

En el Cuadro 3, se presenta los parámetros hipocentrales de los 150 sismos localizados, allí se puede observar que:

- a) Los errores de localización hipocentral (latitud, longitud y profundidad) son menores a 5 km debido a que el mayor número de sismos se localizan fuera de la cobertura acimutal de las estaciones sísmicas.
- b) La profundidad de los hipocentros son menores a 14.5 km, con excepción de un solo sismo que se localiza a 20.5 km. Sin embargo, el mayor número de sismos ocurren a profundidades menores a 9 km, tal como se puede observar en el rectángulo de color morado de la Fig. N° 18. Los sismos que presentan el valor 0.0, refieren a la baja resolución en el cálculo de la profundidad hipocentral del sismo.
- c) En cuanto a la magnitud de los sismos, éstas varían entre 0.4 a 2.9 grados de magnitud de duración (Md), siendo recurrentes, los sismos con magnitudes entre 1.0 y 2.0 Md (Fig. N° 19). Cabe señalar que, solamente, el sismo N°16 (ver Cuadro N° 3) presenta una magnitud mayor (Md=2.9).

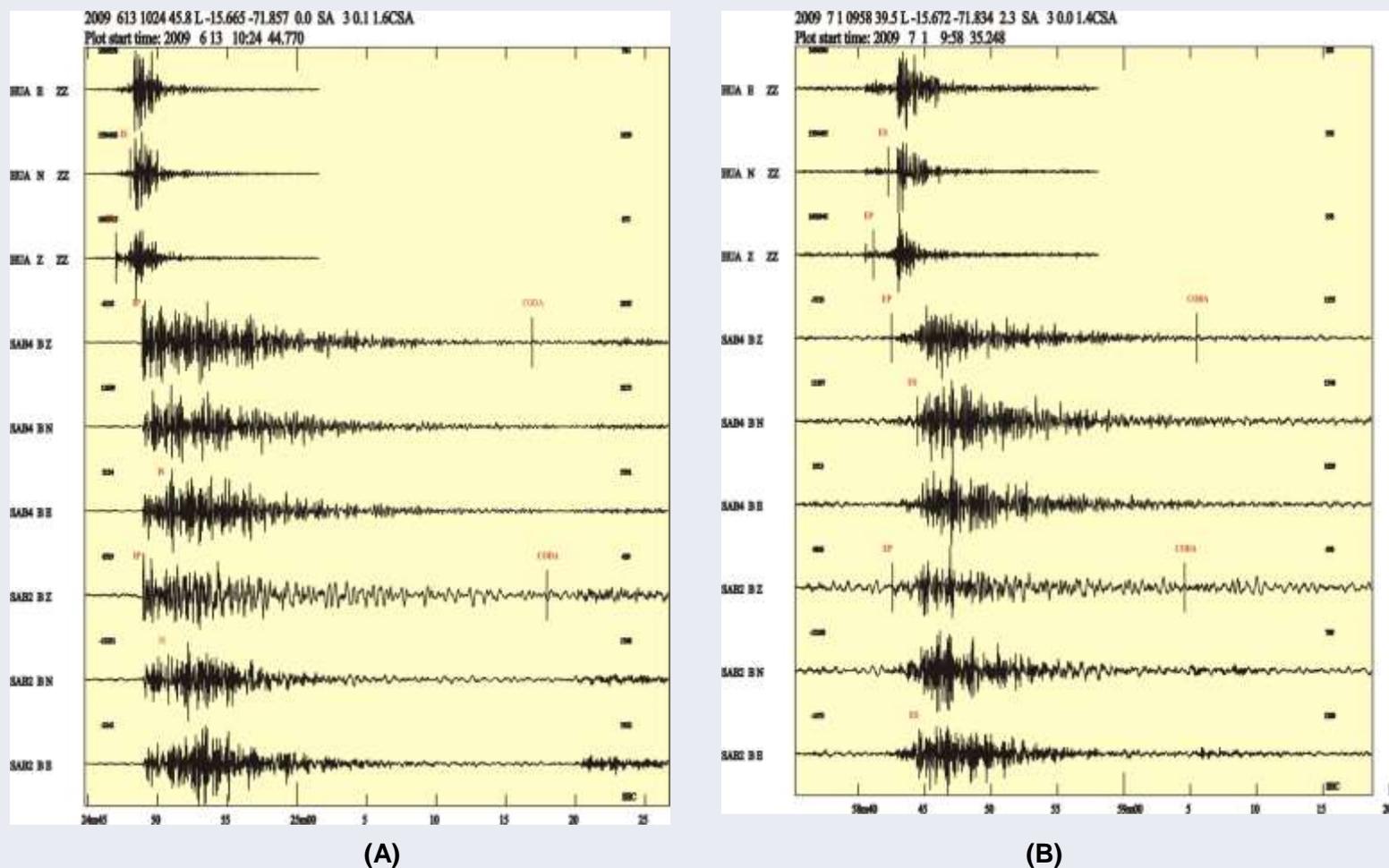


Fig. N° 17. Ejemplos de sismos registrados en 3 estaciones sísmicas entre junio y julio de 2009. (A). Sismo del 13 de junio, a las 10:24 horas GMT. (B). Sismo del 1 de julio de 2009, 09:58 horas GMT. HUA y SAB4, son los códigos de las estaciones Hualca Hualca y Sabancaya 4. IP e IS son las lecturas de los tiempos de arribo de las ondas P, S y C es la lectura de la duración total del sismo en segundos.

Cuadro 3. Parámetros hipocentrales de los 150 sismos localizados. La fecha está dada por año (AA), mes (MM) y día (DD); la hora origen (GMT) en hora (HH), minuto (MM) y segundo (SS); Pro., la profundidad del hipocentro en kilómetros y RMS, la raíz media cuadrática en segundos.

N° sismo	Fecha AA/MM/DD	Hora origen (GMT) HH:MM:SS	Coordenadas WGS84		Prof. (km)	Md (grados)	RMS
			Longitud	Latitud			
1	2009/05/24	19:58:35.3	179508.173	8261208.847	1.5	1.1	0.03
2	2009/05/25	15:18:18.1	181860.356	8261795.790	0.0	0.7	0.04
3	2009/06/09	10:55:21.4	189196.775	8260673.313	0.0	1.0	0.12
4	2009/06/09	11:39:22.2	186100.914	8242361.510	0.0	1.4	1.38
5	2009/06/09	14:19:14.9	178530.163	8262081.108	2.1	0.9	0.03
6	2009/06/13	09:06:25.4	194268.814	8248676.498	0.5	1.0	0.03
7	2009/06/13	09:30:40.3	192650.958	8265156.404	6.4	1.3	0.02
8	2009/06/13	10:24:45.8	193711.808	8266056.727	0.0	1.6	0.11
9	2009/06/13	14:24:14.6	195107.961	8265964.750	2.3	1.5	0.04
10	2009/06/14	13:22:22.0	194057.516	8264289.395	1.4	1.5	0.01
11	2009/06/14	14:54:21.6	194505.988	8262855.697	4.5	1.4	0.01
12	2009/06/14	16:06:39.5	196563.308	8261443.593	0.8	2.1	0.06
13	2009/06/14	18:54:33.9	194324.254	8268390.697	3.6	1.1	0.01
14	2009/06/14	19:19:10.5	193534.600	8263285.594	7.7	1.8	0.00
15	2009/06/14	19:40:16.3	195763.507	8265087.553	6.5	2.3	0.01
16	2009/06/15	13:17:28.6	193777.550	8261184.628	3.3	2.9	0.02
17	2009/06/15	13:31:49.3	198461.567	8263905.329	6.5	1.8	0.07
18	2009/06/15	13:46:21.1	193528.619	8263728.513	4.0	1.7	0.01
19	2009/06/15	14:11:30.6	189669.809	8263454.575	6.5	1.4	0.02
20	2009/06/15	14:11:50.2	194920.169	8263968.757	2.9	1.5	0.03
21	2009/06/15	14:52:13.6	193395.935	8265609.470	4.0	2.0	0.03
22	2009/06/15	15:20:08.0	193609.003	8265723.093	1.8	1.6	0.01
23	2009/06/15	15:25:11.1	193101.028	8263611.985	4.4	1.4	0.02
24	2009/06/15	15:29:43.3	192870.008	8264827.115	7.4	1.9	0.01
25	2009/06/15	15:37:53.1	193291.643	8265386.562	6.7	1.0	0.04
26	2009/06/15	16:22:19.8	194239.285	8266728.323	5.1	1.5	0.01
27	2009/06/15	16:34:41.1	192957.835	8266268.055	1.0	1.4	0.01
28	2009/06/15	17:27:19.0	194038.127	8265728.875	4.0	1.4	0.02
29	2009/06/15	17:35:10.1	194795.041	8265296.059	3.7	1.7	0.02
30	2009/06/15	18:34:25.7	197636.669	8245399.586	0.0	1.5	0.06
31	2009/06/15	18:47:09.6	192748.532	8257958.921	3.3	2.1	0.03
32	2009/06/15	21:44:37.7	195005.138	8265631.125	4.0	1.5	0.05
33	2009/06/15	21:58:40.7	194856.107	8260756.180	2.9	1.5	0.06
34	2009/06/17	07:43:50.5	197629.213	8245953.226	0.8	1.4	0.05
35	2009/06/17	07:52:51.6	198885.741	8248185.046	3.3	1.1	0.11
36	2009/06/17	15:06:19.7	194143.918	8265841.048	3.4	1.3	0.01
37	2009/06/19	01:38:04.1	194131.999	8266726.880	6.9	1.3	0.01
38	2009/06/19	02:06:52.0	193807.160	8266944.007	0.0	1.3	0.02

N° sismo	Fecha AA/MM/DD	Hora origen (GMT) HH:MM:SS	Coordenadas WGS84		Prof. (km)	Md (grados)	RMS
			Longitud	Latitud			
39	2009/06/19	03:43:22.2	195110.932	8265743.293	7.6	1.5	0.02
40	2009/06/19	20:30:14.2	195271.734	8261758.511	4.5	1.3	0.02
41	2009/06/19	23:11:34.2	194032.165	8266171.791	2.7	1.4	0.00
42	2009/06/20	09:19:06.8	194333.178	8267726.324	0.8	1.6	0.03
43	2009/06/20	19:31:05.5	194505.988	8262855.697	5.7	1.0	0.02
44	2009/06/21	00:19:32.6	193606.017	8265944.552	6.7	1.6	0.02
45	2009/06/21	03:18:01.9	193814.616	8266390.361	6.6	1.3	0.01
46	2009/06/21	06:24:21.1	190043.020	8267557.531	10.0	1.6	0.06
47	2009/06/21	11:23:53.0	193938.304	8265173.784	6.1	1.3	0.02
48	2009/06/22	23:39:43.6	197512.383	8262674.490	5.8	1.3	0.04
49	2009/06/23	03:14:16.0	192971.300	8265271.485	1.9	1.1	0.03
50	2009/06/23	07:56:01.1	194173.740	8263626.465	3.7	1.4	0.01
51	2009/06/23	17:41:01.3	199642.012	8247752.177	3.2	1.2	0.02
52	2009/06/24	02:49:00.1	192594.686	8261390.116	0.0	1.9	0.10
53	2009/06/24	14:18:59.3	195872.266	8264978.262	8.4	1.4	0.01
54	2009/06/24	18:06:33.8	194525.471	8269390.134	0.5	1.6	0.02
55	2009/06/25	18:38:45.7	197279.448	8256026.565	7.6	1.3	0.02
56	2009/06/26	00:24:27.0	199089.039	8265131.848	8.6	1.7	0.07
57	2009/06/26	03:54:16.0	196146.151	8260552.022	4.6	1.9	0.01
58	2009/06/26	14:24:25.3	194091.857	8261742.621	1.9	1.0	0.01
59	2009/06/26	18:47:21.0	193080.075	8265162.205	3.1	1.2	0.02
60	2009/06/27	01:09:04.4	192126.570	8264263.295	4.0	0.9	0.04
61	2009/06/27	05:22:58.1	193702.677	8250883.818	0.0	0.7	0.03
62	2009/06/27	05:28:44.5	191887.659	8250305.298	0.0	0.9	0.03
63	2009/06/27	17:13:34.5	193211.062	8271365.957	1.2	1.6	0.01
64	2009/06/27	18:41:56.1	194075.427	8262960.644	2.9	1.3	0.06
65	2009/06/27	19:54:25.7	193170.909	8266381.682	0.9	1.5	0.05
66	2009/06/28	01:42:44.4	193813.125	8266501.090	0.7	1.0	0.05
67	2009/06/28	06:03:50.6	192363.637	8262605.243	3.0	1.4	0.04
68	2009/06/28	12:14:58.6	192889.482	8263387.623	2.7	1.5	0.03
69	2009/06/28	13:12:50.6	196753.802	8247270.406	0.6	0.4	0.04
70	2009/06/28	13:22:24.5	193509.190	8265167.999	0.0	1.2	0.05
71	2009/06/28	19:42:04.3	197334.826	8259903.454	8.5	1.2	0.01
72	2009/06/29	11:09:48.8	194860.581	8260423.993	1.4	1.0	0.01
73	2009/06/29	11:10:10.2	192485.922	8261499.392	2.2	1.1	0.02
74	2009/06/29	11:10:51.2	195082.545	8259873.238	0.2	0.8	0.01
75	2009/06/29	11:12:05.6	193889.297	8260853.888	0.9	0.8	0.00
76	2009/06/29	11:36:27.0	194158.603	8248896.501	0.0	0.6	0.04
77	2009/06/29	11:51:28.8	194310.860	8261413.327	1.6	0.8	0.01
78	2009/06/29	12:49:07.7	196354.725	8260997.809	0.2	0.8	0.03
79	2009/06/29	13:17:53.0	195401.323	8260099.026	0.4	1.0	0.04
80	2009/06/29	17:09:11.4	195270.245	8261869.240	2.1	1.1	0.02

N° sismo	Fecha AA/MM/DD	Hora origen (GMT) HH:MM:SS	Coordenadas WGS84		Prof. (km)	Md (grados)	RMS
			Longitud	Latitud			
81	2009/06/29	21:30:48.0	195331.343	8257329.365	0.5	1.3	0.05
82	2009/06/30	01:25:51.6	184601.658	8273020.616	5.0	1.1	0.06
83	2009/06/30	15:44:50.0	195592.525	8269847.410	5.0	1.9	0.03
84	2009/07/01	09:58:39.5	196189.651	8265314.751	2.3	1.4	0.01
85	2009/07/01	11:54:02.8	196181.822	8257894.550	5.8	1.9	0.03
86	2009/07/01	11:55:51.8	196726.942	8257237.380	6.0	1.4	0.01
87	2009/07/01	14:15:50.8	192658.450	8264602.752	10.6	1.5	0.02
88	2009/07/01	16:46:33.7	192305.137	8266923.734	7.6	1.7	0.02
89	2009/07/02	05:05:58.4	193509.190	8265167.999	1.2	2.0	0.08
90	2009/07/03	00:32:13.6	194351.952	8250449.637	0.8	1.0	0.03
91	2009/07/03	03:58:56.9	202324.739	8272040.454	13.3	2.0	0.02
92	2009/07/04	02:36:35.0	198567.129	8247959.283	4.8	1.3	0.01
93	2009/07/05	03:28:57.8	192139.753	8255403.350	1.1	1.4	0.04
94	2009/07/06	06:27:07.9	193628.395	8272257.560	5.6	1.3	0.01
95	2009/07/06	07:32:10.8	194242.263	8266506.865	1.1	1.3	0.04
96	2009/07/06	14:35:04.9	190886.320	8268676.523	4.2	1.2	0.01
97	2009/07/08	05:48:05.1	199236.965	8245974.817	7.5	1.8	0.04
98	2009/07/08	11:24:55.8	197333.346	8260014.181	6.3	1.5	0.02
99	2009/07/09	15:39:42.3	200280.728	8248092.938	4.4	1.8	0.03
100	2009/07/09	22:44:46.2	194517.920	8261969.864	7.2	1.5	0.03
101	2009/07/10	09:33:34.6	198254.455	8271433.252	14.3	1.7	0.04
102	2009/07/10	10:46:31.0	196226.697	8262546.561	7.2	1.6	0.01
103	2009/07/10	12:31:33.9	198580.759	8271105.334	11.7	1.7	0.04
104	2009/07/10	15:26:51.0	197701.839	8264559.700	9.4	2.0	0.05
105	2009/07/10	19:40:58.6	191883.028	8258500.907	0.9	1.1	0.03
106	2009/07/11	01:51:34.8	190221.297	8262354.580	8.2	1.3	0.03
107	2009/07/11	03:18:46.1	198644.659	8250175.258	7.0	1.5	0.02
108	2009/07/11	07:00:47.3	194802.479	8264742.416	5.8	1.6	0.03
109	2009/07/11	11:09:15.9	194498.870	8255435.386	3.8	0.9	0.03
110	2009/07/11	15:00:45.1	196243.015	8261328.555	6.7	1.4	0.02
111	2009/07/11	15:49:43.1	193521.579	8280230.024	20.5	1.7	0.03
112	2009/07/11	17:09:31.1	192357.076	8271022.201	11.3	2.0	0.03
113	2009/07/11	18:47:05.2	193206.803	8263724.166	3.5	1.2	0.04
114	2009/07/12	00:25:09.9	192492.780	8268919.779	7.8	1.5	0.01
115	2009/07/12	02:02:53.8	197505.001	8263228.123	8.9	1.5	0.02
116	2009/07/12	04:48:05.1	198142.706	8263679.599	9.5	2.2	0.02
117	2009/07/12	09:08:46.0	193021.802	8269480.666	6.7	1.3	0.01
118	2009/07/12	16:00:37.1	192793.766	8270474.341	2.8	1.2	0.04
119	2009/07/12	17:54:40.1	195078.272	8268179.314	7.9	1.3	0.00
120	2009/07/12	19:53:02.2	192935.981	8259954.983	2.6	1.9	0.02
121	2009/07/12	23:08:12.5	194762.280	8259758.174	4.3	1.7	0.02
122	2009/07/13	00:20:30.3	193020.732	8261617.392	0.4	1.0	0.05

N° sismo	Fecha AA/MM/DD	Hora origen (GMT) HH:MM:SS	Coordenadas WGS84		Prof. (km)	Md (grados)	RMS
			Longitud	Latitud			
123	2009/07/13	00:57:07.0	194920.169	8263968.757	3.1	1.5	0.03
124	2009/07/13	08:36:01.8	193775.873	8269269.319	5.4	1.3	0.02
125	2009/07/13	09:29:11.1	194108.298	8260524.597	7.0	1.8	0.01
126	2009/07/14	05:31:57.2	195344.798	8264306.704	3.4	1.1	0.05
127	2009/07/14	06:23:26.1	195347.770	8264085.248	4.6	1.7	0.03
128	2009/07/14	06:40:11.8	195097.566	8266739.848	4.6	1.6	0.01
129	2009/07/14	07:25:53.6	193308.091	8264168.535	6.4	1.4	0.02
130	2009/07/14	07:26:49.0	193594.079	8266830.387	5.3	1.7	0.01
131	2009/07/14	07:38:49.2	191077.930	8262477.017	9.0	1.6	0.03
132	2009/07/14	10:42:52.1	195230.095	8264858.906	6.3	1.9	0.02
133	2009/07/14	11:46:55.1	193959.199	8263623.574	6.4	2.0	0.05
134	2009/07/14	12:30:46.2	195241.985	8263973.080	4.4	1.9	0.04
135	2009/07/14	13:20:01.3	192014.789	8264594.032	4.8	1.7	0.06
136	2009/07/14	20:08:21.3	193997.909	8268718.559	2.9	1.7	0.04
137	2009/07/14	21:10:06.7	193400.383	8273251.238	2.9	1.6	0.01
138	2009/07/15	01:24:31.0	194793.647	8257432.863	7.6	1.4	0.05
139	2009/07/16	02:23:53.9	193343.700	8269485.002	0.0	1.4	0.10
140	2009/07/16	22:41:42.1	188394.686	8262551.066	13.2	1.7	0.03
141	2009/07/17	01:07:49.6	190414.901	8256044.293	2.1	1.6	0.02
142	2009/07/17	05:25:31.3	194929.100	8263304.385	7.7	1.6	0.06
143	2009/07/17	05:56:48.6	192028.308	8263597.455	2.6	1.5	0.02
144	2009/07/17	07:23:23.4	192743.267	8266265.156	4.7	1.7	0.01
145	2009/07/17	07:51:16.6	195396.855	8260431.211	5.5	1.3	0.01
146	2009/07/17	08:57:03.8	194833.747	8262417.113	6.8	0.6	0.02
147	2009/07/17	09:40:32.4	194301.902	8262077.702	7.7	1.1	0.02
148	2009/07/17	22:20:43.4	196115.731	8270851.117	6.6	1.8	0.01
149	2009/07/18	07:42:54.9	193904.017	8267720.555	2.2	1.5	0.02
150	2009/07/18	11:45:15.3	190792.562	8267678.483	6.5	1.6	0.00

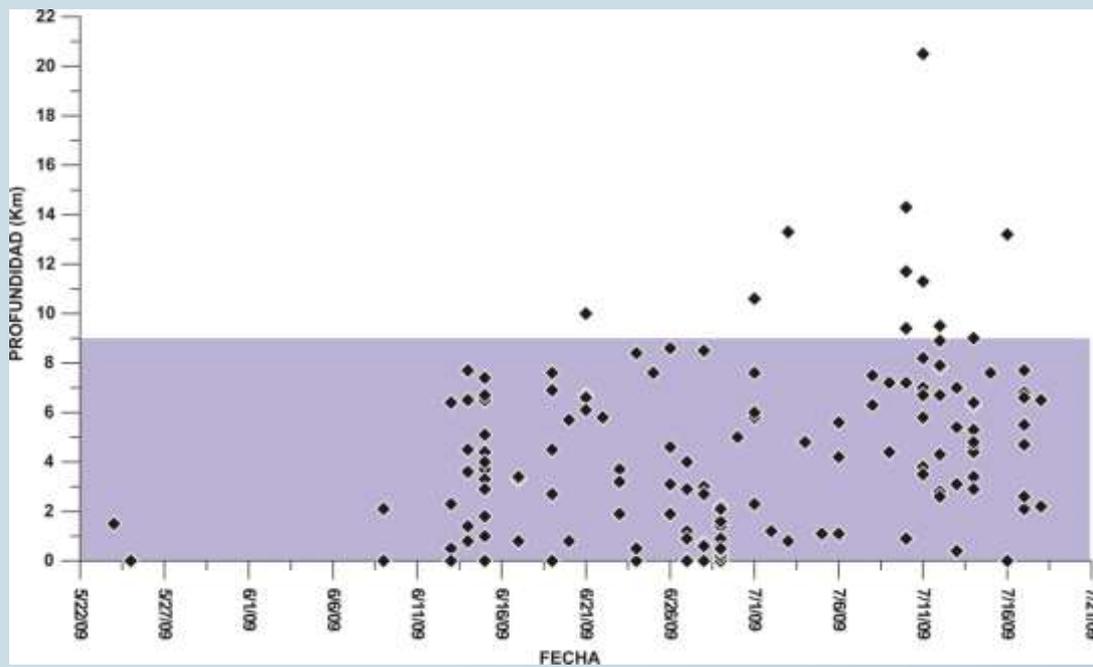


Fig. N° 18. Distribución los 150 sismos en profundidad vs. el periodo de monitoreo (mayo a julio de 2009). El rectángulo en color morado muestra que el mayor número de sismos ocurren a profundidades menores a 9 km.

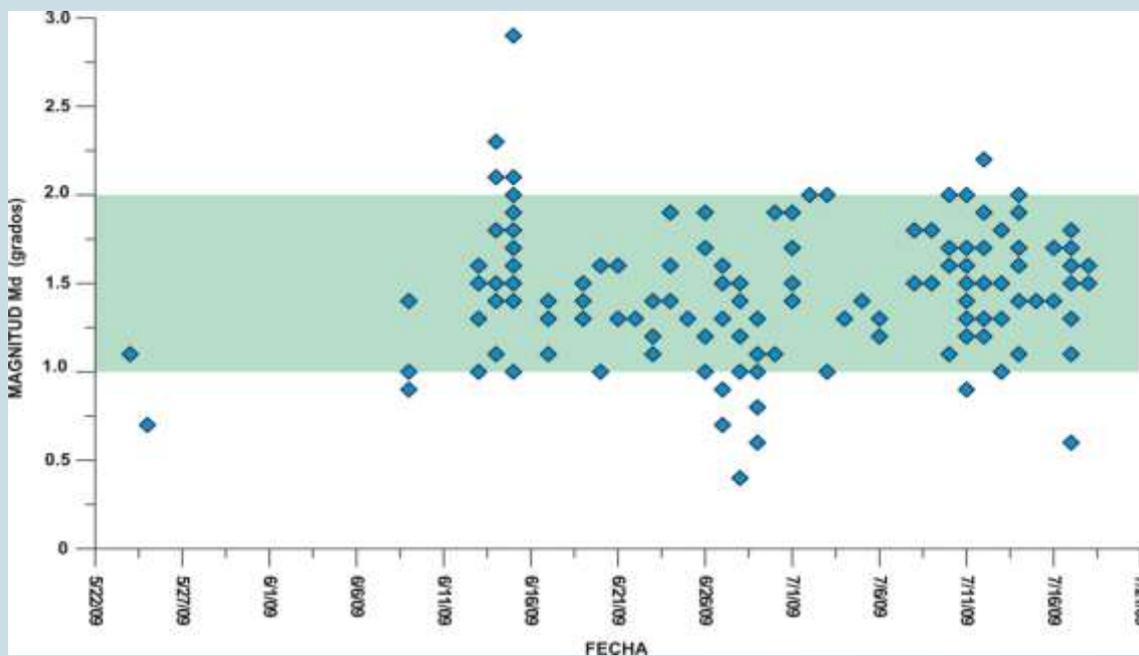


Fig. N° 19. Distribución los 150 sismos según su magnitud de duración (Md) vs. el periodo de monitoreo (mayo a julio de 2009). El rectángulo en color verde muestra que el mayor número de sismos presentan magnitudes Md entre 1.0 y 2.0 grados.

8.4 DISTRIBUCIÓN DE LA SISMICIDAD EN SUPERFICIE

En la Fig. N° 20, se presenta el mapa de la región del volcán Sabancaya, con la ubicación de las principales localidades asentadas a lo largo del valle del Colca, la distribución de los sistemas de fallas, lineamientos reconocidos y las estaciones sísmicas. Sobre este mapa se ubican los epicentros de los 150 sismos correspondientes al periodo mayo a julio de 2009.

Tal como se observa en la Fig. N° 20, los epicentros se distribuyen principalmente en dirección Norte del volcán Hualca Hualca (hacia el valle del Colca), siguiendo una orientación N-S, donde el mayor número de dichos sismos se localizan sobre fallas normales con buzamiento hacia el Sur. En menor número se observan sobre el volcán Hualca Hualca y en dirección SE de los volcanes Ampato y Sabancaya.

En la Fig. N° 20B, se realiza una ampliación de la zona de mayor acumulación de sismicidad, donde se observa que estos sismos se concentran, principalmente, entre la falla 1 (F1) y la falla normal FN3; otros sismos con epicentros más dispersos, incluido el sismo de magnitud mayor $M_d=2.9$ se ubican al N, NE y S del volcán Hualca Hualca.

8.5 DISTRIBUCIÓN DE LA SISMICIDAD EN PROFUNDIDAD

Para conocer la distribución en profundidad de los 150 sismos localizados en el complejo volcánico Ampato Sabancaya Hualca Hualca, se ha elaborado 2 perfiles: el perfil A-A' y el perfil B-B' orientados en dirección N-S y O-E e indicadas en la Fig. N° 20.

En el Perfil A-A' orientada en dirección N-S (Fig. N° 20A), se observa que los sismos se localizan a profundidades menores a 14.5 km, con una mayor concentración entre los 0 y 9.0 km, por debajo de las fallas F1, FN1, F2, FN2, FN3 y entre la falla FN3 y el volcán Hualca Hualca. Entre el volcán Sabancaya y la falla F5, los hipocentros se localizan a profundidades menores a 1 km y entre 3.5 y 7.5 km.

Los resultados obtenidos en el perfil B-B' orientado en dirección O-E (Fig. N° 20B), son similares a los obtenidos en el perfil A-A', sin embargo, considerando la dirección con la cual fue elaborado, parece seguir una tendencia lineal entre los 0 y 9 km.

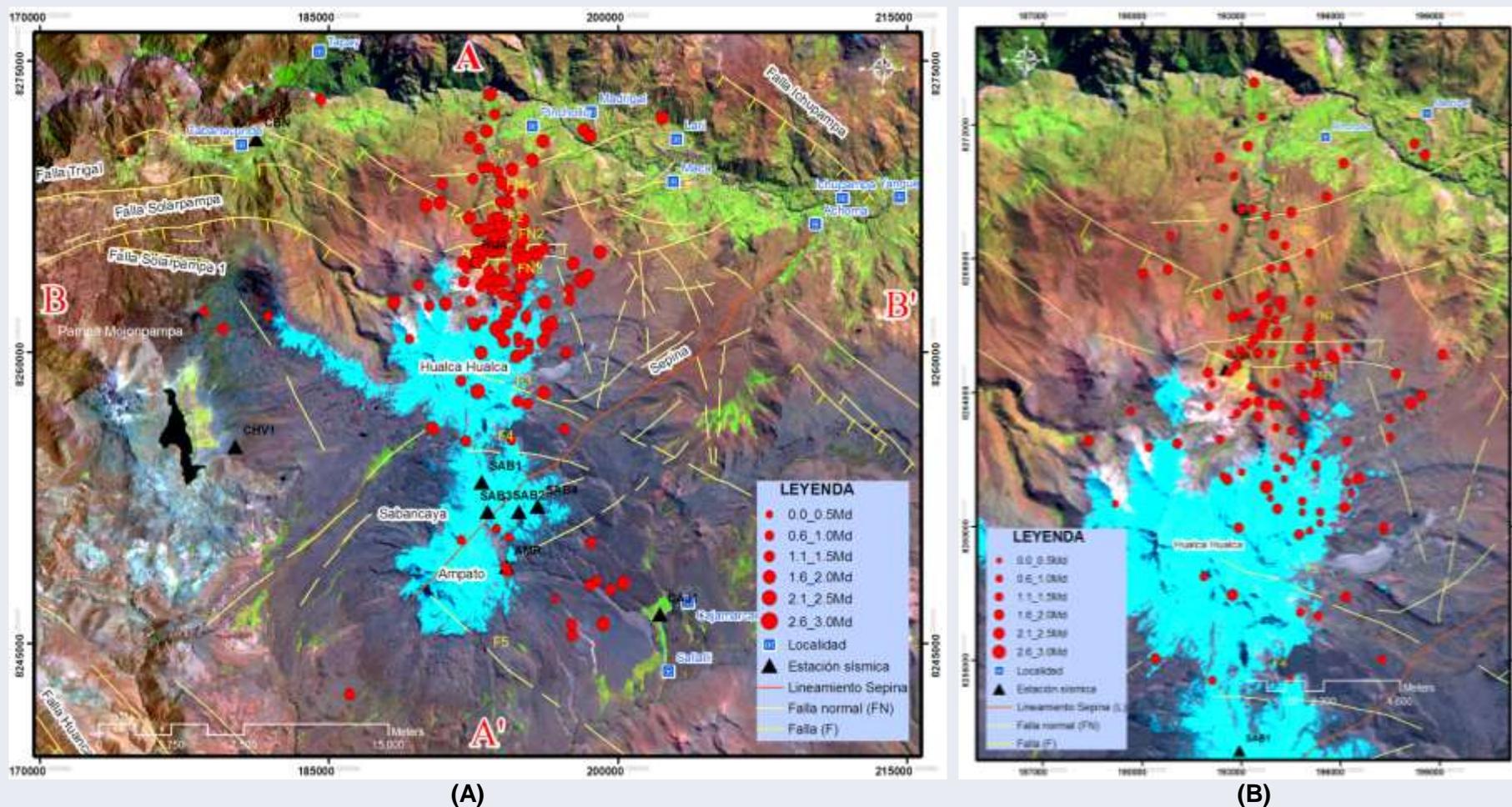
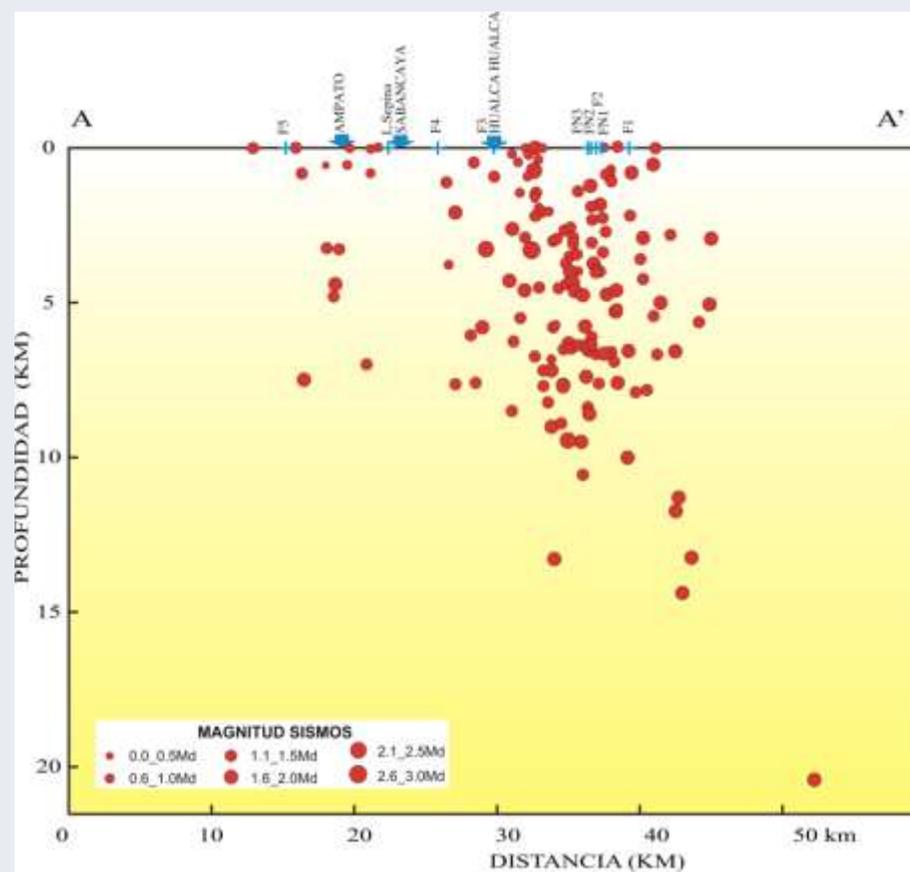
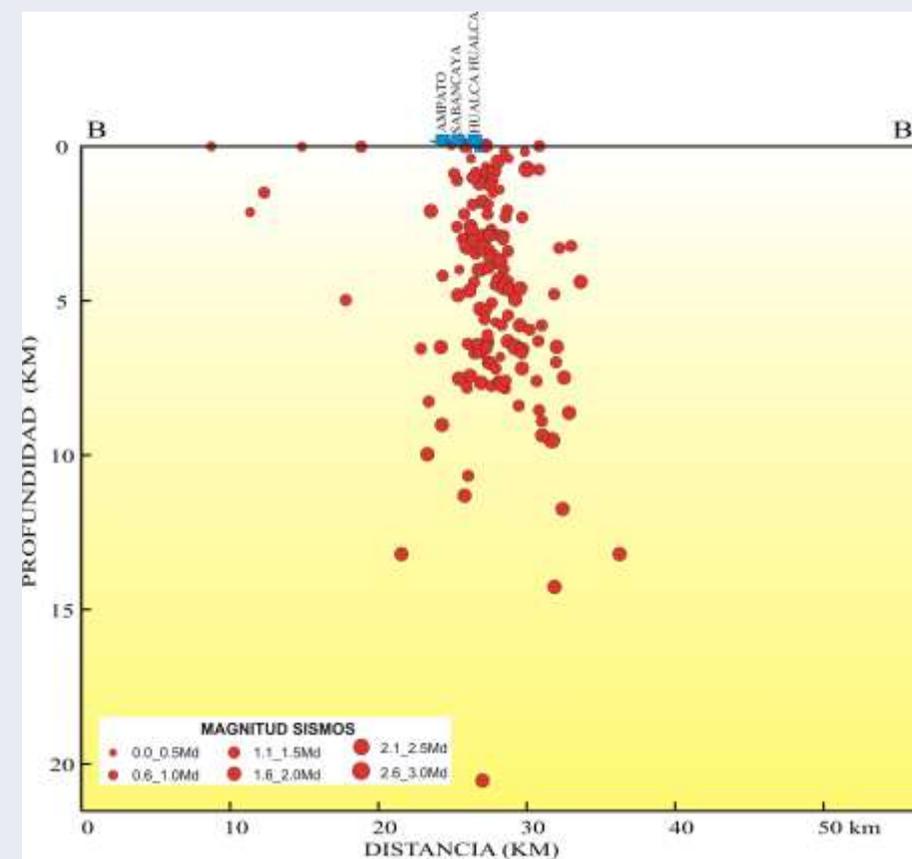


Fig. N° 20 (A). Distribución en superficie de los 150 sismos registrados y localizados en la región del volcán Sabancaya. A-A' y B-B' son los perfiles sísmicos orientados en dirección N-S y O-E. (B). Ampliación de la zona de mayor actividad sísmica.



(A)



(B)

Fig. N° 21. Distribución de los sismos en profundidad, según las direcciones consideradas en la Fig. N° 20. (A). Perfil sísmico A-A' orientado en dirección N-S. (B). Perfil B-B' orientado en dirección O-E.

8.6 LA SISMICIDAD Y SU RELACIÓN CON LA TECTÓNICA LOCAL

Los primeros estudios del contexto tectónico de la región del volcán Sabancaya fueron realizados por Huamán (1993), Huamán (1995), Méring et al., (1996) y Sébrier et al. (1985), mediante el análisis de imágenes satelitales y de observaciones en campo. Los resultados de dichos análisis evidenciaron la presencia de importantes sistemas de fallas normales: Huanca, Ichupampa, Huambo-Cabanaconde conformada por las fallas Trigal, Solarpampa y Solarpampa 1, además de numerosas fallas y lineamientos como el de Sepina que atraviesa el volcán Sabancaya y la falla Ichupampa (Huamán, 1993). Mering et al. (1996), sugieren que la disposición discontinua de los lineamientos están relacionados a una actividad reciente. Claire (2007), confirma que estas observaciones estructurales coinciden totalmente con los mecanismos de ruptura de 6 sismos con magnitudes $M_b \geq 5.0$ grados que ocurrieron en estas fallas, entre los años 1991 y 2002 (ver Fig. N° 2)

El inicio de un nuevo proceso eruptivo del volcán Sabancaya entre 1985-1986 y de mayor actividad entre 1990-1992 (De Silva y Francis, 1991; Chorowicz et al., 1992; Simkin and Siebert, 1994), centró la atención de instituciones como el Instituto Geofísico de la Universidad Nacional de San Agustín (IGUNSA) y el Instituto Geofísico del Perú (IGP) para realizar estudios sísmológicos en la zona, a fin de conocer, a priori, la evolución de la erupción y sus implicancias en la tectónica local.

Con este fin, en 1990, el IGUNSA instaló 3 estaciones sísmicas y estuvieron operativas entre 1990 y 1994; asimismo, el IGP instaló 5 estaciones y estuvieron operativas, de manera irregular, entre junio de 1990 e inicios de 1993. Los resultados de los estudios sísmicos obtenidos por Lazo et al. (1991), Gonzáles et al. (1996), personal del IGUNSA y el IGP (Rodríguez y Huamán, 1992; Antayhua, 2002), mostraron que la sismicidad se concentró al N y NE del volcán Hualca Hualca, a profundidades menores a 15 km.

Asimismo, estudios de deformación mediante la técnica de Interferometría de Radar (InSAR) en la zona del valle del Colca, muestran deformaciones por procesos de subsidencia. El interferograma calculado por Pitchard (2003), entre 1997 e inicios de 1999, muestra una anomalía de deformación al NE del volcán Hualca Hualca (Fig. N° 22), probablemente relacionado a la erupción del volcán Sabancaya. Mientras tanto, el interferograma, calculado entre mayo de 2002 y 2003 por Gonzáles et al. (2009), muestra 2 anomalías de mayor y menor deformación respectivamente (Fig. N° 23); la primera se ubica al O del volcán Hualca Hualca, en la zona denominada Pampa Mojonpampa y está delimitada hacia el N, por la falla Solarpampa, mientras que la segunda está delimitada por las fallas Solarpampa y Solarpampa1, ambas deformaciones localizadas en el sistema de fallas Huambo-Cabanaconde se habrían producido luego de la ocurrencia de varios sismos de magnitud moderada.

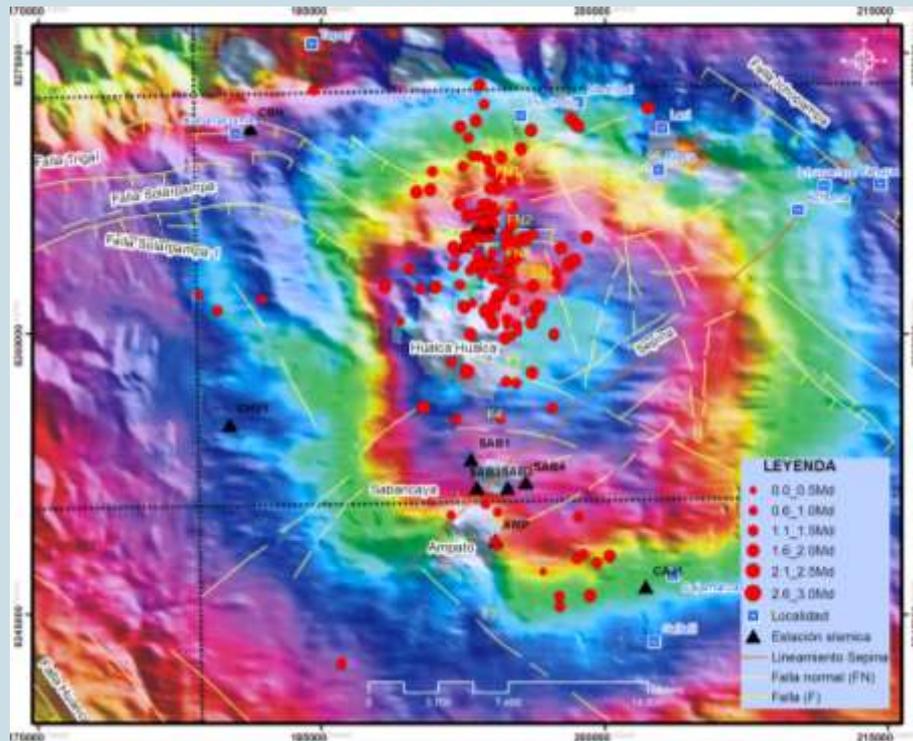


Fig. N° 22. Interferograma calculado por Pitchard (2003) para el valle del Colca. La anomalía de deformación corresponde al periodo 1997 a 1999.

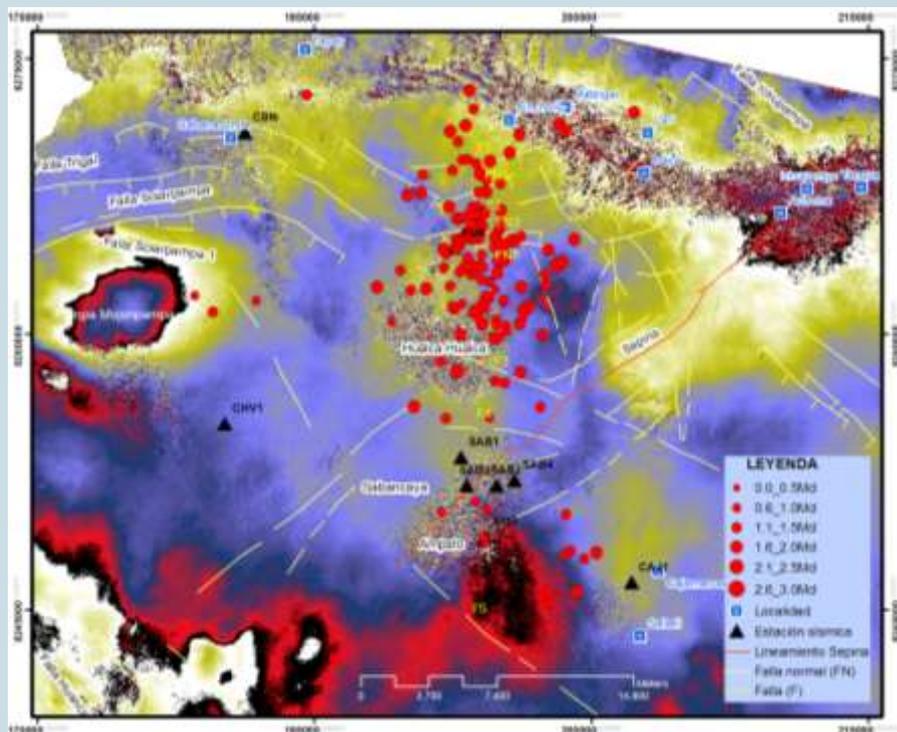


Fig. N° 23. Interferograma calculado por González et al. (2009) para el valle del Colca. Se observan dos anomalías de deformación. La anomalía mayor localizada en la pampa Mojonpampa y otra menor entre las fallas Solarpampa y Solarpampa 1.

Comparando los resultados de la actividad sísmica registrada entre 1990-1994, con los obtenidos en este estudio (periodo mayo a julio de 2009) y mediante la técnica InSAR, se puede observar que los sismos se concentran principalmente al N y NE del volcán Hualca Hualca, con magnitudes menores a 3Md y profundidades menores a 15 km (aunque con mayor frecuencia entre 0 y 9 km), sugiriendo así que esta sismicidad estaría correlacionada con la tectónica local, aunque cabe señalar que esta deformación no es claramente evidenciada con InSAR, en la zona de mayor actividad sísmica registrada durante el periodo de este estudio.

9.0 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El análisis en los dominios del tiempo y frecuencias se realizó con la data almacenada en la estación SAB04. Esto en razón de que esta estación era la más próxima al cráter activo del volcán Sabancaya.

La distribución sísmica por escalas de Ts-Tp, concentra mayor actividad sísmica en el rango Ts-Tp < 2.5 s. Esta mayor sismicidad (81.3%) estaría influenciada por sismos asociados a caídas de bloques o a rompimiento del casquete glaciar y fallas, debido a que en un radio de 20 km alrededor del Sabancaya se concentran importantes sistemas de fallas y lineamientos.

9.1 DIFERENCIAS EN LA SISMICIDAD CON TRABAJOS ANTERIORES

A diferencia de otros trabajos sísmicos realizados en el Sabancaya, en esta oportunidad, la sismicidad obtenida en este periodo de registro (2009-2010), presenta predominancia de sismos VT y por el contrario, ausencia absoluta de sismos tipo LP.

La localización hipocentral está centrada hacia el Norte y NNO del volcán Hualca Hualca y mínimamente la zona del volcán Sabancaya. Esta distribución sísmica coincide con los obtenidos por González et al. (1996), Rodríguez y Huamán (2002), Antayhua (2002). Con estos resultados podemos deducir que la actividad sísmica del volcán Sabancaya y sus alrededores se mantiene relativamente estable.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Con la finalidad de conocer el estado de la sismicidad actual del valle del Colca y caracterizar la sismicidad del volcán Sabancaya, se instaló una Red Sísmica Temporal (RESITESA) compuesta por 11 estaciones sísmicas entre junio de 2009 y abril de 2010. Problemas técnicos y administrativos forzaron a que se desinstalen y recuperen 9 estaciones (AMP, SAB3, CLR, CHV, TAY, CBN, HUA, SAB1 y CAJ1) y sólo 2 (SAB02 y SAB04) extendieron su registro hasta el 2010.

El análisis de la data sísmica registrada se realizó en la estación SAB04, por ser la más cercana al cráter activo del Sabancaya y con mayor tiempo de registro.

El resultado de los análisis muestran señales de muy baja frecuencia (1.2×10^{-5} Hz), asociado a los efectos de la marea terrestre; ondas armónicas con frecuencias centradas en 5.5 Hz, asociadas a flujos de viento; señales sísmicas de alta frecuencia ($>$ de 20 Hz), asociadas a rompimiento del casquete glaciar y señales caóticas, asociadas a lahares. También se registraron sismos tectónicos, los cuales fueron clasificados en función de escalas de Ts-Tp. Así tenemos: $Ts-Tp < 2.5$ s; 2.6 s $< Ts-Tp < 5.0$ s; 5.1 s $< Ts-Tp < 10.0$ s; 10.1 s $< Ts-Tp < 20.0$ s y $Ts-Tp > 20.1$ s. En esta distribución, se ha calculado una razón de 155, 28, 6, 1 y 1 sismo por día respectivamente.

Adicionalmente, se ha realizado el cálculo de la energía por ventanas de 10 segundos de toda la data sísmica registrada en la estación SAB04. Estos resultados indican que la sismicidad registrada por esta estación se encuentra por debajo de 1 megajoule (MJ) de energía para el periodo junio 2009 a abril 2010.

Del análisis de la actividad sísmica registrada en la región del volcán Sabancaya y su correlación con la tectónica local se concluye:

- 1) La red sísmica temporal del volcán Sabancaya permitió construir una base de datos de 150 sismos tectónicos locales, registrados en 3 a más estaciones sísmicas.
- 2) La localización hipocentral de los 150 sismos presentan errores menores a 5 km en sus parámetros hipocentrales: latitud, longitud y profundidad focal.
- 3) La profundidad de los hipocentros son menores a 14.5 km, sin embargo el mayor número de ellos ocurren a profundidades menores a 9 km.
- 4) La magnitud de los sismos oscilan entre 0.4 y 2.9 Md, siendo los más recurrentes los sismos con magnitudes entre 1.0 y 2.0 Md
- 5) La distribución de la sismicidad en superficie y en profundidad, muestra una concentración importante al N del volcán Hualca Hualca y mínimamente en los extremos NE y S del mismo volcán, donde también se ubica el volcán Sabancaya.
- 6) Esta sismicidad registrada al N del volcán Hualca Hualca, estaría correlacionada con las fallas y lineamientos presentes en esta región. Esta distribución es concordante con los obtenidos en estudios anteriores (1990-1994); por lo tanto, podría indicar una relativa estabilidad en el proceso de ocurrencia de sismos en esta región.
- 7) Los estudios de deformación mediante InSAR, realizados en el valle del Colca, permitieron identificar 2 zonas de deformación por subsidencia: la primera ubicada

al NE del volcán Hualca Hualca asociada probablemente al proceso eruptivo del volcán Sabancaya (1997-1999); la segunda al Oeste del mismo volcán, en la zona conocida como Pampa Mojonpampa (donde se ubican las fallas Solarpampa, Solarpampa 1) que estaría asociada a la ocurrencia de varios sismos de magnitud moderada. Sin embargo, en la zona de mayor actividad sísmica registrada en este estudio, no se identificó anomalías de deformación, esto podría deberse a que el análisis de InSAR se realizó entre 1997-1999 y 2002-2003 respectivamente.

Aún cuando no se observa sismicidad asociada directamente a procesos volcánicos en la región del volcán Sabancaya, es imprescindible continuar con el monitoreo volcánico, utilizando diversas técnicas como el sísmico, geoquímico, deformación y visual, a fin de registrar y analizar los cambios que podrían ocurrir en la estructura volcánica y/o corroborar la relativa estabilidad sísmica asociada a procesos netamente tectónicos como los registrados hasta la actualidad.

Por lo tanto se recomienda:

- 1) Implementar un sistema de monitoreo continuo, a fin de registrar e identificar los posibles cambios que podrían ocurrir en la estructura volcánica y sus alrededores.
- 2) Intensificar el monitoreo de deformación, mediante la técnica InSAR y ampliar la investigación en zonas donde se identificaron anomalías de deformación.

BIBLIOGRAFÍA

Alcalá, J., Palacios, D., Zamorano, J. y Vásquez, L. (2009). Glacial evolution of the Ampato Complex (Peru). *Geophy. Res. Abstracts*, v. 11, EGU2009-7820-1. 3 p.

Antayhua (2002). Análisis de la actividad sísmica en la región del volcán Sabancaya y los sismos de Maca (1991) Sepina (1992) y Cabanaconde (1998). Universidad Nacional de San Agustín (Arequipa). Tesis de Ingeniero. 146 p.

Antayhua, Y., Tavera, H., Bernal, I., Palza, H. y Aguilar, V. (2002). Localización hipocentral y características de las fuentes de los sismos de Maca (1991), Sepina (1992) y Cabanaconde (1998), Región del volcán Sabancaya, *Bol. Soc. Geol.*, v 91, p. 63-72

Boatwright, J. (1980). A spectral theory for circular seismic sources: simple estimates of source dimension, dynamic stress drop, and radiated seismic energy. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 70 (1), 1– 27.

Bulmer, M., Johnson, A. and Engle, F. (1998). Analysis of Sabancaya volcano, Southern Perú using Radarsat and Landsat TM data. Center for Earth Planetary, Studies. National Air and Space Museum, Smithsonian Institution. Report, 10 p.

Claire D. (2007). Comportamiento actual del ante-arco y del arco del codo de Arica en la orogénesis de los Andes Centrales. Universidad de Chile, Facultad de Ciencia Físicas y Matemáticas, Departamento de Geología. Tesis de Doctor en Ciencias. 280 p.

Chorowicz, Deffontaines, B., Huaman, R., Guillande, R., Leguern, F y Thouret, J-C. (1992). SPOT Satellite monitoring of the eruption de Nevado Sabancaya Volcano (Southern Peru). *Remote Sens. Environ.* 42: p. 43-49.

Dorbath, L., Dorbath, C., Jimenez, E. & Rivera, L. (1991). Seismicity and tectonics deformation in the eastern cordillera and the sub-andean zone af central Peru. *Jour. Of South American Earth Sciences*, v. 4, p. 13-24.

De Silva, L. and Francis, P. (1991). *Volcanoes of the central Andes*. Springer-Verlag, New York.

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

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

Havskov, J. and Ottemoller, L. (2009). SEISAN. The earthquake analysis software. Versión 8.2.1. Institute of Solid Earth Physics, University of Bergen, Bergen, Norway. 250 p

Huamán, D., Chorowicz, J., Deffontaines, B., Guillande, R. y Rudant, J. (1993). Cadre structural et risques géologiques étudiés á l'aide de l'imagerie spatiale: la région du Colca (Andes du Sud Perú): Bull. Soc. Géol. France, t.164, no 6, p. 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, Universidad Nacional San Agustín, Arequipa. 138 p

Johnson J.B. and Aster R.C. (2005). Relative partitionning of acoustic and seismic energy during strombolian eruptions.- *JVGR*, 148, 334-354.

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

Lazo, M., Kosaka, R., Minaya, A., Gonzales, E. y Soto, J. (1991). Evaluación de la actividad sísmica del volcán Sabancaya: VII Congreso Peruano de Geología, Lima: volumen de resúmenes extendidos, p. 19-21.

Fidel Smoll, L., Morche, W., y Núñez Juarez, S. (1997). Boletín N° 16 Serie C: Geodinámica e ingeniería geológica. Proyecto: Album de mapas de riesgos volcánicos de las principales ciudades del Suroeste del Perú. Riesgo volcánico en el Sur del Perú. Lima-Perú. Mayo, 1997. 100 p.

Liener, B., Berg, E. y Frazer L. (1986). Hypocenter: An earthquake location method using centered, scaled and adaptively least squares. *Bull. Seism. Soc. Am.* Vol 76, p. 771-783.

Macedo, O., Taipe, E., y Ramos, D. (2007). Informe de campo: Observaciones asociadas al lahar ocurrido el 17 de Enero 2007 en el valle de Ubinas. Instituto Geofísico del Perú. Arequipa-Perú. Enero, 2007. 14 p.

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.

Pitchard, M. (2003). Recent crustal deformation in west-central South America. Thesis de grado para optar el grado de Doctor de Filosofía. California Intitute of Technology, Pasadena, California. 251 p.

Rodríguez y Huamán, D. (2002). Teleanálisis geológico y sismicidad del sector comprendido entre el volcán Sabancaya y el poblado de Ichupampa: el sistema de fallas Sepina. *Inf. Int. IGP.*, 8p.

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.

Sébrier, M. and Soler, P. (1991). Tectonics and magmatism in the Peruvian Andes from late Oligocene time to present. In: Harmon RS, Rapela CW (eds) Andean magmatism and its tectonic setting, Geol Soc Amer Spec Paper 265, pp 259–278

Simkin, T. and Siebert, L. (1994). Volcanoes of the world, Geoscience, Press, Tucson.

Tavera, H. (2006). Características sismotectónicas de la crisis sísmica de octubre de 2005 en la región del volcán Ticsani (Moquegua). Instituto Geofísico del Perú. Informe técnico. 77 p.

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

Vicente, J., Sequeiros, F., Valdivia, A. y Zavala J., (1979). Sobre el escurrimiento Cincha-Lluta: elemento del accidente mayor andino al NW de Arequipa. Bol. Soc. Geol. Perú, T. 61 pp. 67-99, 12 fig.

Zavala, B., Vílchez, Manuel y Rosado, M. (2010). Aspectos geodinámicos en los distritos de Iari, Madrigal y Maca (provincia de Caylloma, Región Arequipa). Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, INGEMMET. Informe técnico. 24 p.