



PERÚ

Ministerio
de Energía y Minas

Instituto Geológico Minero
y Metalúrgico - INGEMMET



Monitoreo de los volcanes Ticsani, Sabancaya y Huaynaputina Periodo 2006 - 2012

Boletín N° 53 Serie C
Geodinámica e Ingeniería Geológica



Por:

Yanet Antayhua Vera

Domingo Ramos Palomino

Pablo Masías Álvarez



Lima, Perú
2013



PERÚ

Ministerio
de Energía y Minas

Instituto Geológico Minero
y Metalúrgico - INGEMMET



Monitoreo de los volcanes Ticsani, Sabancaya y Huaynaputina Periodo 2006 - 2012

Boletín N° 53 Serie C
Geodinámica e Ingeniería Geológica

Por:

Yanet Antayhua Vera

Domingo Ramos Palomino

Pablo Masías Álvarez

Lima, Perú
2013

SERIE C GEOLOGÍA AMBIENTAL Y RIESGO GEOLÓGICO,
N° 53, 2013.

Hecho el Depósito Legal en la Biblioteca Nacional del Perú N°
2013-15489

Razón Social: Instituto Geológico Minero y Metalúrgico
(INGEMMET)

Domicilio: Av. Canadá N° 1470, San Borja, Lima, Perú

Primera Edición, INGEMMET 2013

Se terminó de imprimir el 18 de octubre del año 2013 en los
talleres de INGEMMET.

© **INGEMMET**

Derechos Reservados. Prohibida su reproducción

Presidente del Consejo Directivo: Susana Vilca

Secretaria General: Elizabeth Ramos

Comité Editor: Susana Vilca, Lionel Fídel, Víctor Carlotto,

Jorge Chira, Marden Rojas

Dirección encargada del estudio: Dirección de Geología
Ambiental y Riesgo Geológico

Unidad encargada de edición: Unidad de Relaciones
Institucionales.

Corrección Geocientífica: Pablo Samaniego

Digitalización y SIG:

Corrección gramatical y de estilo: Consuelo Meza

Diagramación: Sonia Bermúdez

Portada: Volcanes Ticsani, Sabancaya y Huaynaputina.

Referencia bibliográfica

Antayhua, Y.; Masías, P. & Ramos, D. (2013) - Monitoreo de los
Volcanes Ticsani, Sabancaya y Huaynaputina, *INGEMMET.
Boletín, Serie C: Geología Ambiental y Riesgo Geológico*, 53,
114p.

Contenido

PRESENTACIÓN	1
RESUMEN	3
CAPÍTULO I	
INTRODUCCIÓN	5
CAPÍTULO II	
MONITOREO DEL VOLCÁN TICSANI	13
CAPÍTULO III	
CARACTERIZACIÓN SÍSMICA DEL VOLCÁN SABANCAYA	39
CAPÍTULO IV	
MONITOREO DEL VOLCÁN HUAYNAPUTINA	59
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	91
BIBLIOGRAFÍA	93
ANEXOS	99

PRESENTACIÓN

Este es el primer boletín sobre el monitoreo de los volcanes del Perú. Los datos que se presentan fueron recolectados entre los años 2006 y 2012.

Actualmente, el INGEMMET, como ente rector de los estudios de los peligros geológicos a nivel nacional, ha reunido a un grupo de jóvenes científicos con vasta experiencia en monitoreo y vigilancia de volcanes activos, a fin de dar cumplimiento a una de sus funciones establecidas en el artículo 21 Inciso 2, de su Reglamento de organización de funciones, que a la letra dice: «*identificar, estudiar y monitorear los peligros asociados a movimientos en masa, actividad volcánica, aluviones, tsunamis y otros*» (ROF-INGEMMET, 2007).

En el año 1997, L. Fidel, W. Morche y S. Núñez publicaron un inventario de volcanes del Perú. En este inventario, se mencionan más de cuatrocientas estructuras volcánicas, dentro de las cuales, se consideran 7 como volcanes potencialmente peligrosos (Misti,

Sabancaya, Ubinas, Huaynaputina, Ticsani, Tutupaca y Yucamane). Actualmente el INGEMMET viene realizando estudios de monitoreo sobre estos siete volcanes y otros más (Coropuna y Chachani). Sin embargo, en este boletín solo se presentan los resultados del monitoreo de los volcanes Ticsani, Sabancaya y Huaynaputina. Los resultados obtenidos en los estudios de los demás volcanes se presentarán en boletines posteriores.

Sin duda, el monitoreo de volcanes no es una tarea fácil. Requiere de presupuesto, instrumentación física y programática, constante capacitación técnico-científica en primeros auxilios y preparación física; y por supuesto, mucha disposición. En ese sentido, sólo se puede efectuar un trabajo eficaz si se tienen estos complementos. Así, el INGEMMET y el IGP, como instituciones dedicadas al estudio de los volcanes en el Perú, tienen la importante misión de monitorear conjuntamente los volcanes peruanos a fin de proveer de información oportuna y confiable a las autoridades para una correcta toma de decisiones.

MONITOREO DE LOS VOLCANES TICSANI, SABANCAYA Y HUAYNAPUTINA

El grupo de Monitoreo Volcánico está conformado por:

Yanet Antayhua Vera	Sismología volcánica
Pablo Masías Álvarez	Químico
Domingo Ramos Palomino	Sismología volcánica
Edu Taípe Maquerhua	Geodesia
Rosario Paxi	Sismología volcánica
Fredy Apaza Choquehuayta	Químico

Colaboradores:

Anthony Finizola	VEA Francia	(Francia)
José Úbeda Palenque	UCM	(España)
David Palacios	UCM	(España)
Kenji Joshicawa	UAF	(EEUU)
Juan Lopa Bolívar	UNSA	(Perú)
Rodolfo Van Der Lat	OVSICORI	(Costa Rica)

Director de Geología Ambiental y Riesgo Geológico

Lionel Fídel Smoll

RESUMEN

El Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET), realiza el monitoreo de los volcanes del Perú, desde el año 2005; y particularmente de los volcanes Ticsani, Sabancaya y Huaynaputina, desde el 2006. Este monitoreo se inició con el muestreo de fuentes termales y fumarolas, posteriormente, entre el 2008 y 2010, se realizaron estudios de caracterización sísmica-volcánica. En un futuro próximo, se pretende desarrollar un monitoreo permanente con estaciones multidisciplinarias en cada uno de estos volcanes.

Los resultados de la caracterización sísmica y monitoreo geoquímico de las fuentes de agua y fumarolas de los volcanes Ticsani,

Sabancaya y Huaynaputina, durante el periodo 2006 y 2012, muestran que estos tres volcanes presentan una intensa actividad sísmica asociada a la tectónica local (fallas y lineamientos) y mínimamente a la actividad propia de los volcanes (movimiento de fluidos). Mientras tanto, el monitoreo geoquímico de las fuentes termales de los volcanes Ticsani y Huaynaputina muestran, en el primero, ligeros incrementos en la concentración de cloruros (2011), en las fumarolas, un incremento progresivo de la temperatura registrado desde el año 2006; mientras que en el segundo los valores de temperaturas son similares a los registrados en el volcán Ticsani y relativamente altas con las temperaturas registradas en las fuentes termales asociadas a los volcanes Misti y Ubinas.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

TECTÓNICA DE LA CORDILLERA DE LOS ANDES

La cordillera de los andes se extiende desde el Caribe hasta la Patagonia por más de 7500 km de longitud. Muchas de sus cumbres sobrepasan los 5000 metros de altura y algunos corresponden a potenciales volcanes activos. Esta cordillera está limitada al oeste por la fosa oceánica peruana-chilena y al este por una faja plegada y corrida de trasarco. A la vez, alberga un arco magmático plio-cuaternario en su extremo occidental. La Cordillera de los Andes se ha formado por la subducción de la placa oceánica por debajo de la placa continental y se produce a una velocidad promedio de 7 cm/año (Norabuena et al., 1998).

La principal característica del orógeno andino es una segmentación

longitudinal de los elementos tectónicos, geodinámicos y morfológicos en función de las variaciones de los ángulos de subducción, inferidos a partir de la distribución hipocentral de los sismos (Barazangi & Isacks, 1976) (fig. 1.1). Así, entre los 2 – 15° y entre los 28 – 33.5°, la placa de Nazca subduce a la placa Sudamericana con ángulos de entre 5 a 10 grados. En estas regiones, conocidas como *flat-slabzones*, no existe actividad volcánica posterior a los 24 millones de años (Mioceno). Por el contrario, en las zonas donde la subducción se realiza con un ángulo próximo a los 30° (Jordan et al., 1983b), actualmente existe volcanismo. Este volcanismo ha sido dividido en zonas volcánicas Norte (ZVN), zona volcánica Central (ZVC), zona volcánica del Sur (ZVS) y zona volcánica Austral (ZVA).



Figura 1.1 Segmentación tectónica de los Andes.

EL VULCANISMO EN EL PERÚ

En los Andes centrales, durante el Jurásico al Cretácico Inferior, el arco volcánico estuvo ubicado en la actual zona costera; actualmente existen algunos remanentes en la cordillera de la costa peruano- chilena. Luego, este arco volcánico habría migrado al este y se habría emplazado en el borde oeste de la actual cordillera (Cretácico Inferior al Eoceno Inferior). Finalmente, el arco habría retomado hacia su posición actual (Gregory-Wodzicki, 2000). En este contexto, en el Perú se han reconocido e inventariado más de 400 estructuras volcánicas pliocuaternarias (Fidel et al., 1997). Dentro de estos volcanes, se encuentran los volcanes Ticsani, Sabancaya y Huaynaputina (Fig. 1.2).

UBICACIÓN DE LOS VOLCANES TICSANI, SABANCAYA Y HUAYNAPUTINA

Ubicación del volcán Ticsani

El estrato volcán Ticsani (329700 N, 8146400 E, 5415 msnm) forma parte del sector norte de la Zona Volcánica Central (ZVC) (De Silva & Francis, 1991). Este volcán está ubicado a 60 km al noreste de la ciudad de Moquegua, entre los distritos de San Cristóbal, Cuchumbaya y Carumas, provincia de Mariscal Nieto. Es accesible desde la ciudad de Moquegua por un desvío desde la carretera binacional Perú-Bolivia, a la altura de Humajalso (campamento del proyecto Pasto Grande), con dirección a Ticsani-Calacoa.

Ubicación del volcán Sabancaya

El estrato-volcán Sabancaya (194100 N; 8252000 E; 5980 msnm)

se encuentra ubicado en la provincia de Caylloma, departamento de Arequipa, a 80 km al noroeste de la ciudad de Arequipa. Además, pertenece a la Zona Volcánica Central (ZVC) de los Andes de Sudamérica (Sévrier & Soler, 1991). Es accesible desde la ciudad de Arequipa, por la carretera de acceso a la ciudad de Chivay, mediante un desvío carrozable que se ubica antes de descender hacia el valle del Colca.

Ubicación del volcán Huaynaputina

El volcán Huaynaputina (302000 E, 8161300 N 4850 msnm) se encuentra ubicado entre los distritos de Omate y Quinistaquillas, de la provincia General Sánchez Cerro-Región Moquegua. Está emplazado en la margen derecha del río Tambo a 80 km al ESE de la ciudad de Arequipa y a 65 km al NNE de la ciudad de Moquegua. Este volcán es accesible desde la ciudad de Arequipa mediante la carretera afirmada de acceso a las provincias de Omate y Quinistaquillas. Desde Quinistaquillas, el acceso se realiza mediante acémilas con dirección norte por un sendero empleado para el pastoreo de vacunos. Este sendero pasa por la cima de los cerros Chen y por el flanco derecho del cerro Volcán para finalmente acceder al flanco sur del volcán Huaynaputina.

MARCO GEOLÓGICO

Volcán Ticsani

Estructuralmente el volcán Ticsani es un complejo volcánico conformado por el edificio Ticsani antiguo que comprende dos cráteres destruidos y el edificio Ticsani moderno que comprende



Foto 1.1 Vista del flanco sur del volcán Ticsani. Fotografía tomada desde la carretera binacional Perú-Bolivia.

tres domos y tres cráteres. Se puede observar lineamientos al este del volcán Ticsani lo que habría generado un sistema de fallas.

Morfológicamente posee tres áreas con características diferentes: área de flujos de lavas, área de avalanchas de escombros, caldera de avalancha, área de domos de lava y cráteres, evidentemente afectadas por erupciones explosivas durante los últimos 14000 años, la más importante es de tipo subpliniano.

Volcán Sabancaya

El volcán Sabancaya es un estratovolcán que se localiza en la cordillera del Hualca Hualca, a 5976 m.s.n.m.

Estructuralmente el edificio volcánico del Sabancaya es el más joven del Complejo Volcánico Ampato-Sabancaya. Se evidencia un fallamiento regional que va desde Huambo hasta Chivay afectado por el sistema de fallas de Huanca, Huambo e Ichupampa.

La geomorfología que presenta está sujeta a la deposición de rocas sedimentarias marinas del mesozoico que ocupan una extensa superficie aledaña al macizo volcánico, en el episodio del cenozoico, presenta un vulcanismo intenso. Del eoceno al cuaternario la actividad volcánica fue continua, mientras que en el

holoceno se caracteriza por flujo de lavas andesitas y dacitas con intercalaciones piroplásticas ocasionada por erupciones pliniananas

Volcán Huaynaputina

El volcán Huaynaputina es un estratovolcán situado en la cordillera de los andes, en el departamento de Moquegua.

El Huaynaputina presenta un anfiteatro en forma de herradura seccionado hacia el este, por donde discurre el río Tambo. Dentro del anfiteatro hay 3 cráteres, 2 diques y 1 domo de lava.

Estructuralmente los lineamientos evidencian sistemas de fallas en dirección noroeste y noreste. Este volcán esta compuesto por una considerable capa de tefras y flujos piroclásticos, producto de la erupción del año 1600. Las erupciones que caracterizan a este volcán son plinianas.

OBJETIVO GENERAL

Este boletín tiene como objetivo: Caracterizar y monitorear la actividad sísmica y geoquímica de los volcanes Ticsani, Sabancaya y Huaynaputina, con información recopilada entre los años 2006 y 2012.

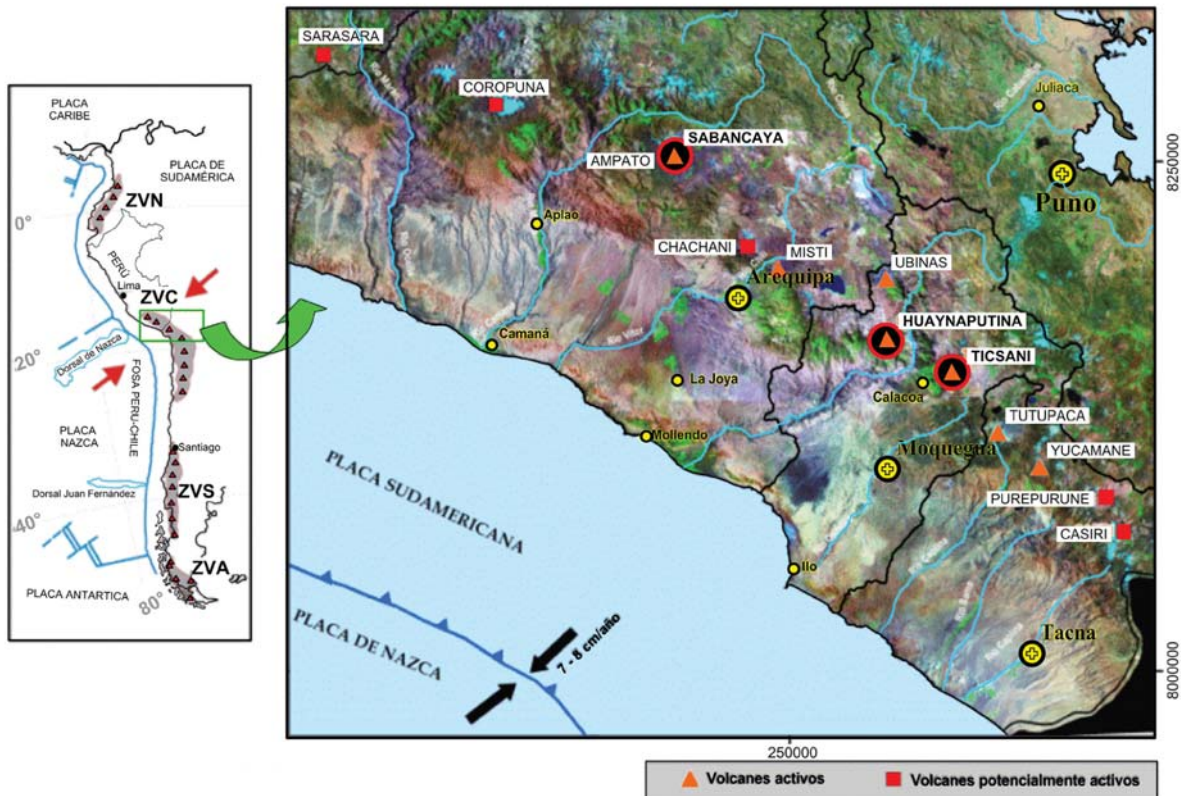


Figura 1.2 Ubicación de los volcanes Sabancaya, Huaynaputina y Ticsani en la ZVC.

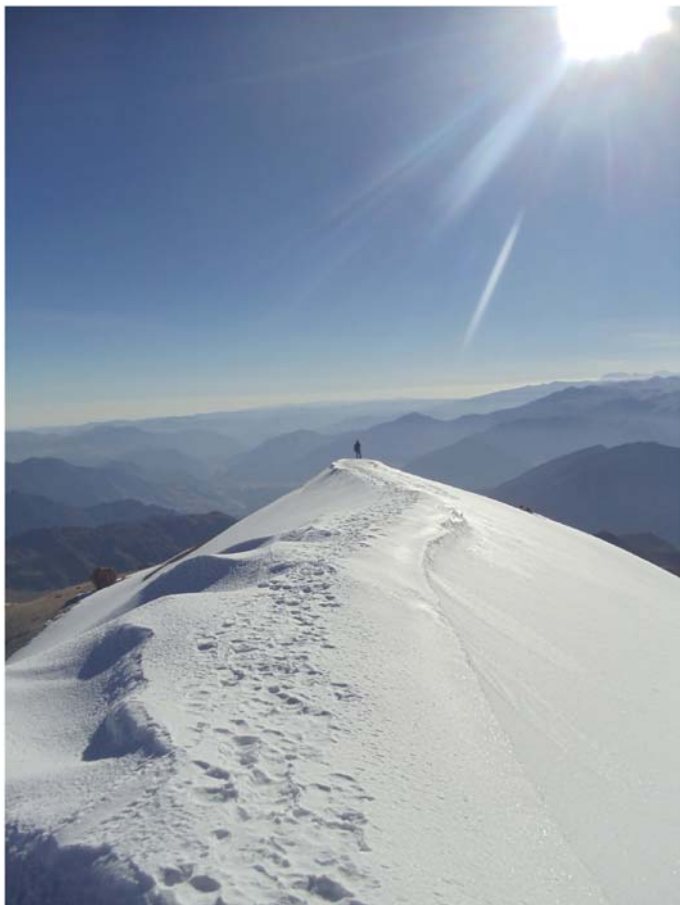


Foto 1.2 Vista hacia el noroeste. Se aprecia el pico más alto del volcán Ticsani.



Foto 1.3 Vista del flanco norte del pico más alto del volcán Ticsani. Fotografía tomada desde el domo 3.



Foto 1.4 Vista hacia el norte, en la cima del cráter del volcán Sabancaya.



Foto 1.5 Vista hacia el noroeste. Se puede apreciar el complejo Ampato-Sabancaya-Hualca Hualca.



Foto 1.6 Vista desde el noroeste. Se puede apreciar los dos domos del volcán Sabancaya.



Foto 1.7 Vista hacia el noreste. Se observa la caldera del volcán Huaynaputina.



Foto 1.8 Vista hacia el noreste. Se aprecia el actual cráter interno del volcán Huaynaputina.



Foto1.9 Vista hacia el noreste. Integrantes del Grupo de monitoreo volcánico, antes del descenso al fondo del cráter del volcán Huaynaputina, para la instalación de equipos de monitoreo volcánico.

CAPÍTULO II

MONITOREO DEL VOLCÁN TICSANI

(2008 - 2009)

MONITOREO SÍSMICO

Debido a la intensa actividad sísmica observada en los alrededores del volcán Ticsani en 1999 y 2005, y la presencia de numerosas fallas y lineamientos locales (Lavallée et al. 2006, 2009; Gonzáles et al., 2009), en abril de 2008, el Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET) instaló 2 sismómetros de banda ancha durante 6 días (15 al 21 de abril de 2008) en las inmediaciones del volcán Ticsani; una de estas estaciones fue instalada en la cima de este volcán, a fin de detectar y registrar sismos de origen volcánico, y la otra en el pueblo de Calacoa, a 7 km al oeste del Ticsani. Posteriormente, del 26 al 29 de agosto de 2008, se instalaron 6 estaciones sísmicas (dos de banda ancha y cuatro de periodo corto) en el domo y localidades aledañas al volcán Ticsani (San Cristóbal, Humalso, Pallatea, Chilota, Huaytire), dentro del marco del proyecto «Monitoreo de volcanes activos del sur del Perú» y del proyecto europeo «VOLcanoes Understandig Mass moVEmment (VOLUME)» del cual formó parte el INGEMMET. Estas estaciones estuvieron operativas hasta febrero de 2009.

En este estudio se analiza y discute la información sísmica registrada durante los periodos abril 2008 y agosto 2008 a febrero de 2009.

REDES SÍSMICAS TEMPORALES DEL VOLCÁN TICSANI

El trabajo de campo inicial fue realizado el 15 de abril de 2008 con

la instalación temporal de 2 estaciones sísmicas de banda ancha: Ticsani 1 (TCS1) y Ticsani 2 (TCS2). Después de 3 días de operatividad, TCS1 fue trasladada e instalada en la cima del volcán Ticsani (TCS3). Ambas estaciones TCS2 y TCS3 debieron estar operativas durante quince días; sin embargo, durante el sexto día de registro, se presentó un nuevo incremento en la actividad del volcán Ubinas y propició que estas estaciones fuesen trasladadas al Ubinas (abril a mayo de 2008) que en ese momento no contaba con información sísmica.

Posteriormente, en agosto de 2008, se realizó la instalación temporal de 6 estaciones sísmicas en el volcán Ticsani. Estas estaciones estuvieron constituidas por dos sismómetros de banda ancha y cuatro sismómetros de periodo corto. Los sismómetros de banda ancha fueron configurados para registrar en modo continuo, mientras que las estaciones de periodo corto se configuraron para registrar en modo por disparo (por consideraciones técnicas).

En el cuadro 2.1 se presentan las coordenadas de las estaciones sísmicas y en la figura 2.1 la distribución de las mismas alrededor del volcán Ticsani. Tal como se observa en la figura, las estaciones sísmicas instaladas en abril están representadas por triángulos negros, mientras que las instaladas en agosto, por triángulos en color blanco.

Cuadro 2.1
Principales características de las estaciones sísmicas instaladas durante los periodos abril y agosto de 2008

Estación	Coordenadas UTM		Elevación (msnm)	Tipo sismógrafo	Marca y modelo sismógrafo	Localidad
	N	E				
TCS1	8145128	334731	4827	Banda ancha	Guralp 6TD	Ticsani 1
TCS2	8145128	334731	4488	Banda ancha	Guralp 6TD	Ticsani 2
TCS3	8146397	329663	5369	Banda ancha	Guralp 6TD	Ticsani 3
6718	8147405	329495	4972	Banda ancha	Guralp 6TD	Domo
SCR1	8148543	318155	3147	Periodo corto	Sara SL06	San Cristóbal
HUM1	8137138	334951	4426	Banda ancha	Guralp 6TD	Humalso
PAL1	8163140	328607	4384	Periodo corto	Sara SL06	Pallatea
CHI1	8153499	346838	4403	Periodo corto	Sara SL06	Chilota
HUA1	8132642	353515	4492	Periodo corto	Sara SL06	Huaytire

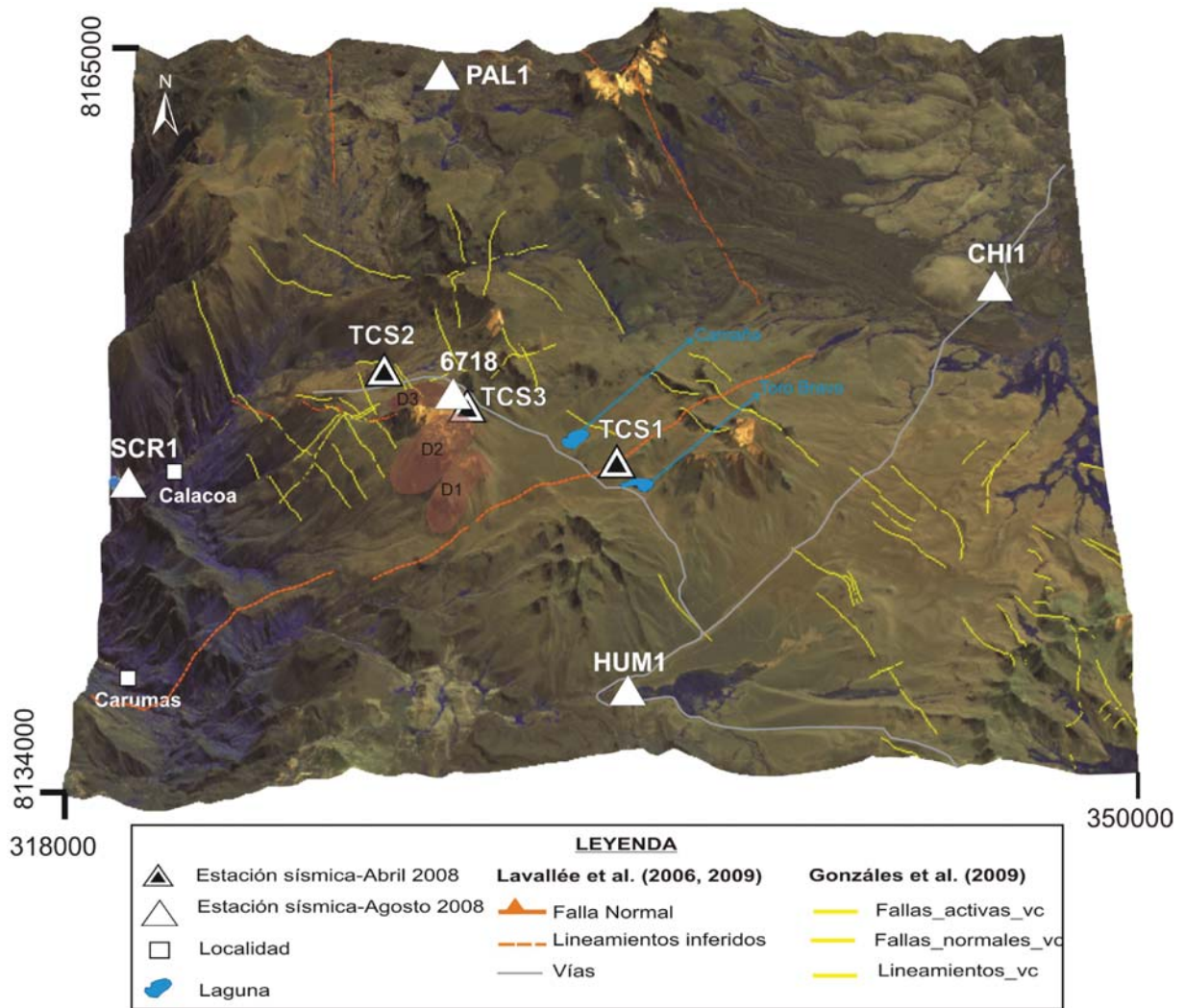


Figura 2.1 Ubicación de las estaciones sísmicas instaladas en abril (triángulos negros) y agosto de 2008 (triángulos blancos) alrededor del volcán Ticsani. D1, D2 y D3 son los domos del volcán Ticsani.

PROCESAMIENTO DE DATOS

Análisis frecuencial

Para realizar el análisis frecuencial y el cálculo de la energía sísmica, se utilizó el programa VOLCANALYSIS (figura. 2.2) desarrollado por Lesage (2009) y la data sísmica registrada en las estaciones más cercanas al volcán Ticsani (TCS2 y 6718).

Periodo abril 2008

La figura 2.2 muestra un ejemplo del análisis frecuencial del sismo registrado el 21 de abril del 2008 (06:39:22 GMT) en la estación TCS2. Esta ventana muestra tres cuadros: En el primer cuadro se observa la señal sísmica en el dominio del tiempo; en el cuadro del medio, el espectrograma de frecuencias; y en el tercer cuadro, el espectro de frecuencias. Así, se observa que este evento presenta las siguientes características: hora inicio: 06:39:22.25, hora final: 06:39:22.13, energía: 0.0484 J (Joules), frecuencia dominante en el tiempo: por debajo de los 10 Hz, frecuencia pico: 11.96 Hz.

Los sismos registrados en este periodo de tiempo, en relación a los

sismos ocurridos durante los años 1999 y 2005, presentaron formas de onda, frecuencias predominantes muy similares entre sí y baja energía.

Periodo agosto-diciembre de 2008

Los eventos sísmicos registrados en este periodo presentan espectros frecuenciales muy similares a los obtenidos en abril de 2008. La figura 2.3 muestra el espectrograma y los espectros de frecuencias de una sucesión de sismos registrados el 16 de octubre de 2008, a las 05:40 GMT, en la estación 6718. Las frecuencias predominantes oscilan entre 8.0 Hz y 20.5 Hz.

LOCALIZACIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE LOS SISMOS

Construcción de la base de datos

Para realizar la localización epicentral (latitud y longitud) e hipocentral (latitud, longitud y profundidad) de los sismos, se ha confeccionado dos bases de datos considerando los siguientes aspectos:

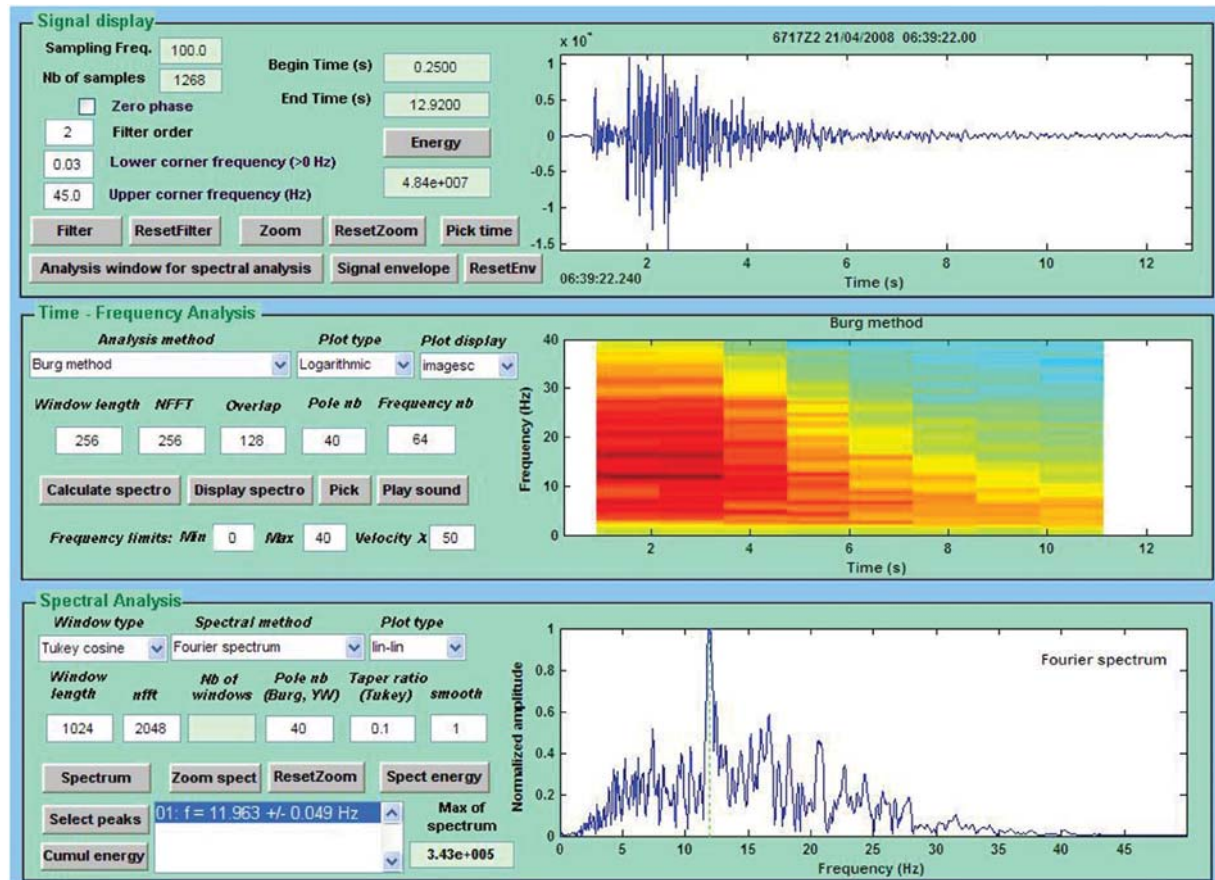


Figura 2.2 Ejemplo de análisis frecuencial y cálculo de energía del sismo registrado en la estación TCS2, el 21 de abril de 2008, a las 06:39 GMT.

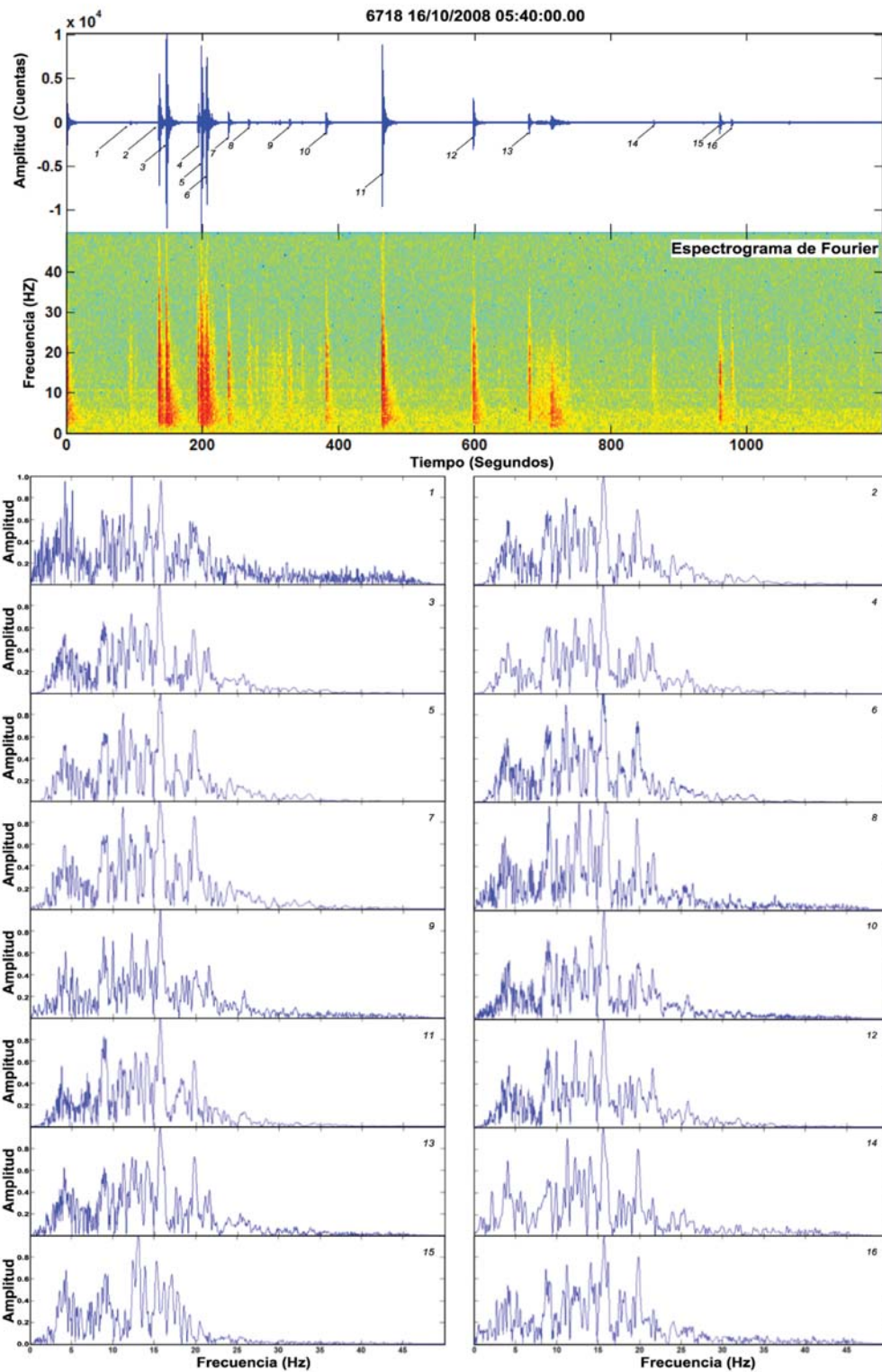


Figura 2.3 Análisis frecuencial de los sismos registrados en la estación Domo (6718). Registro del 16 de octubre de 2008, a las 05:40 GMT

- *Base de datos para localización con registro en una sola estación.* Se seleccionaron 108 eventos sísmicos de los periodos abril y agosto de 2008. Estos eventos presentan claros arribos de las fases P y S. Las lecturas de las fases P y S, duración del sismo (C), amplitud de la onda P y la dirección o polaridad del primer impulso de la fase P se realizaron con el programa SEISAN (Havskov & Otemoller, 2009).
- *Base de datos para localización con registro en tres a más estaciones.* Estuvo conformada por 44 eventos sísmicos correspondientes a los periodos agosto 2008 y febrero 2009. En cada una de estas señales se realizó las lecturas de las fases P y S, y la duración total del sismo (C); para este propósito se ha empleado el programa SEISAN (Havskov & Otemoller, 2009). Además, con la finalidad de discriminar la actividad sísmica local de la regional, se han seleccionado sismos que presentan tiempos de arribo de las ondas P y S $T_{(S-P)} \leq 5.0$ s. En la figura 2.4 se muestra un ejemplo de sismo local registrado en 3 estaciones, con sus respectivas lecturas de tiempos de arribo de las ondas P, S y C. Este sismo se registró el 31 de agosto, a las 04:35 GMT.

Localización epicentral de sismos registrados en una estación sísmica

Para realizar la localización epicentral con una sola estación sísmica, se empleó las lecturas de la *base de datos para localización con registro en una sola estación* y un programa elaborado en Matlab (3Componentes) por Jiménez (comunicación personal).

El programa 3Componentes utiliza como datos de entrada la diferencia de tiempos de arribo de las ondas P y S, la amplitud de la onda P en sus componentes N-S y E-O, la dirección del primer arribo (compresión, dilatación) y la velocidad de la onda P ($V_p=6$ km/s), obtenidos del modelo de velocidad propuesto por Dorbath et al. (1991), que se presenta en el cuadro 2.2. Dada su simplicidad, este programa permite conocer de manera general el epicentro del sismo.

Cuadro 2.2
Modelo de velocidad obtenido por Dorbath et al. (1991).
Prof. es la profundidad en kilómetros y
 V_p es la velocidad de la onda P
en kilómetros por segundo

Prof. (km)	V_p (km/s)
0	5.2
15	6.2
30	6.8
50	8

Distribución en superficie

La figura. 2.5 presenta la distribución en superficie de las principales fallas, lineamientos (Lavallée et al., 2006, 2009; Gonzales et al., 2009) y los sismos localizados con el programa 3Componentes (periodos abril y agosto de 2008), para la zona del volcán Ticsani. Esta distribución muestra una intensa actividad sísmica en los alrededores del volcán y resalta, principalmente, los ubicados al norte y al sur del volcán Ticsani.

Localización hipocentral de los sismos registrados en 3 a más estaciones sísmicas

Periodo agosto 2008 a febrero de 2009

Durante este periodo, se seleccionó 44 sismos registrados en 3 a más estaciones sísmicas. En cada uno de los sismos se realizó la lectura de los tiempos de arribo de las ondas P, S y duración total del sismo (C). Para este propósito, se utilizó el programa de localización hipocentral SEISAN (Havskov & Otemoller, 2009), el mismo que utiliza como datos de entrada estas lecturas de P, S, duración total del sismo y coordenadas de las estaciones sísmicas. Asimismo, se empleó el modelo de velocidad de Dorbath et al. (1991) y la relación de velocidad $V_p/V_s=1.70$ obtenida por Tavera (2006); se analizó la crisis sísmica de octubre de 2005, ocurrida en la zona del volcán Ticsani, y la ecuación de la magnitud de duración (Md) presentada por Klein (1978).

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

Donde: Md 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. Los resultados numéricos de la localización, presentados en el anexo 2.1, muestran que:

- La profundidad de los hipocentros oscilan entre 0.5 y 25 km; los más frecuentes son los ocurridos a profundidades menores a 15 km (figura 2.6).
- La magnitud de los sismos varían entre -0.2 y 1.4 Md; son recurrentes los sismos con magnitudes entre 0.1 y 1.0 Md (figura 2.7); es decir, sismos de magnitudes muy pequeñas comparadas con los ocurridos durante la crisis sísmica de octubre de 2005 (Tavera, 2006).

Distribución en superficie y en profundidad

En la figura. 2.8 se presenta la distribución en superficie de los 44 sismos seleccionados durante el periodo agosto 2008 a febrero 2009. En esta figura se observa que la sismicidad se distribuye en dirección NE-SO, siguiendo la tendencia del lineamiento reconocido por Lavallée et al. (2006, 2009). Otros sismos muy dispersos pueden observarse al oeste, sur y este de la estación Humalso (HUM1).

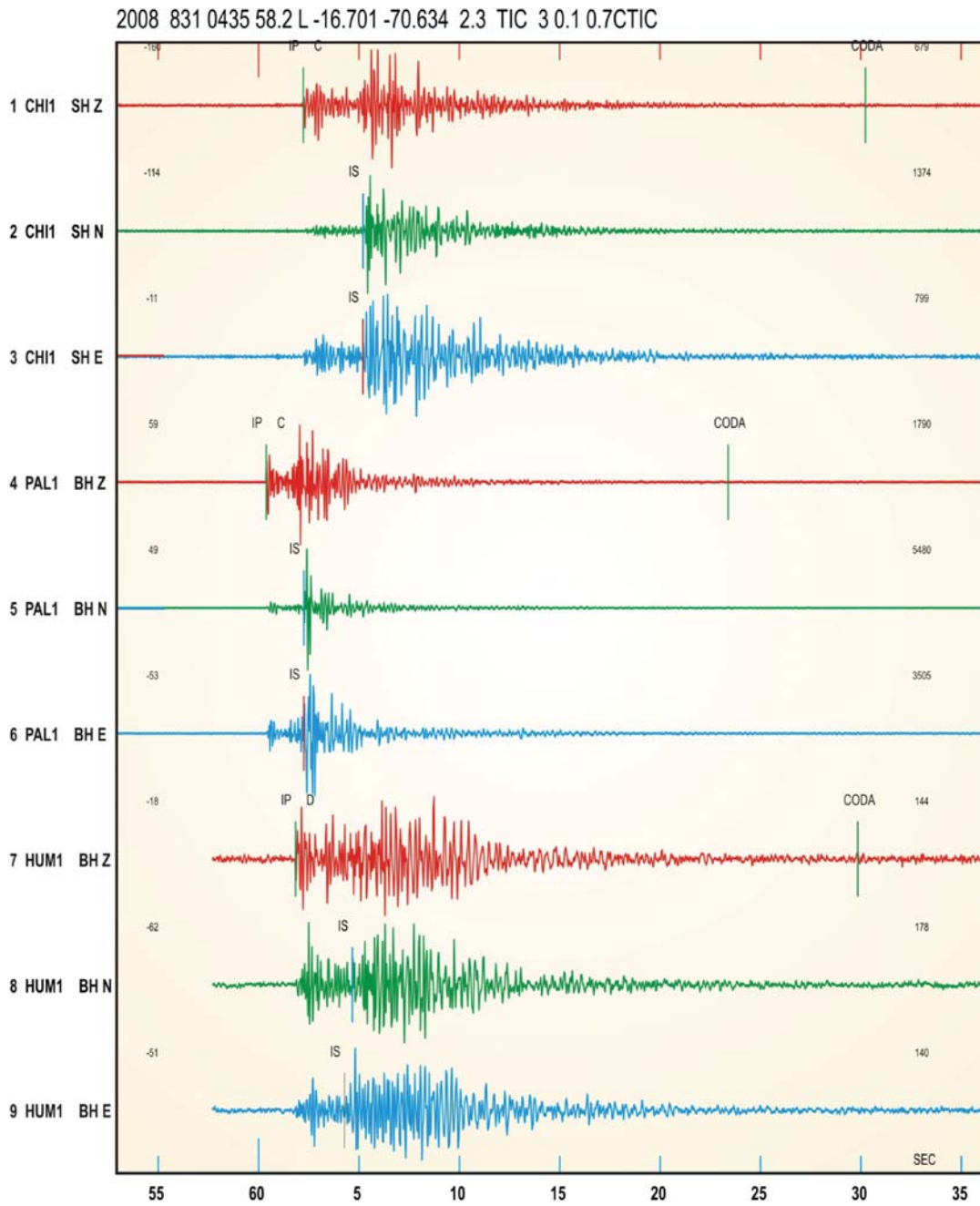


Figura 2.4 Ejemplo de sismo registrado el 31 de agosto de 2008, a las 04:35 GMT, en la estación sísmica instalada en las estaciones Chilota (CHI1), Pallatea (PAL1) y Humalso (HUM1).

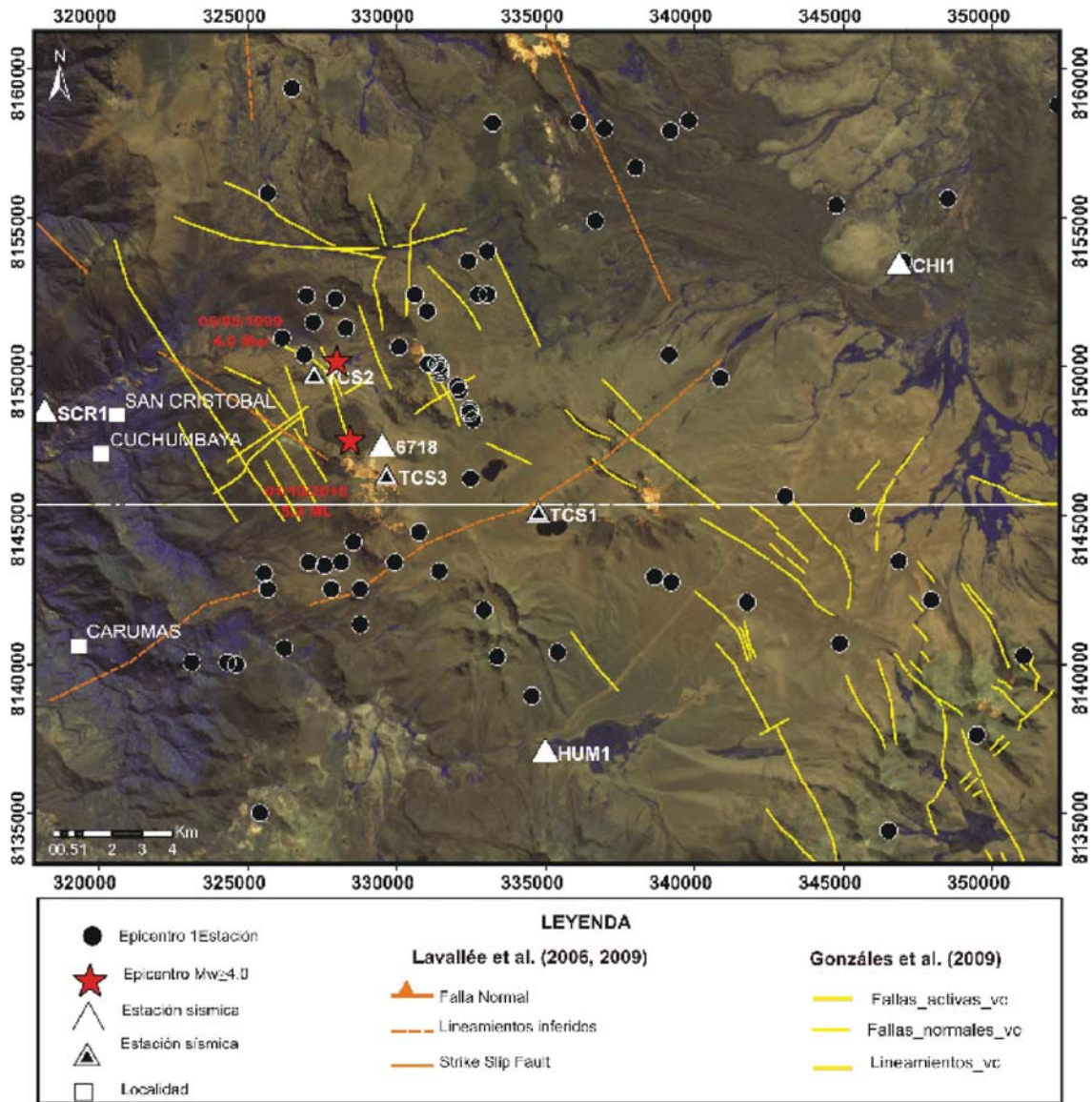


Figura 2.5 Distribución en superficie de los sismos localizados con el programa 3Componentes. Los círculos en color negro corresponden a los registrados en los periodos abril y agosto-diciembre de 2008.

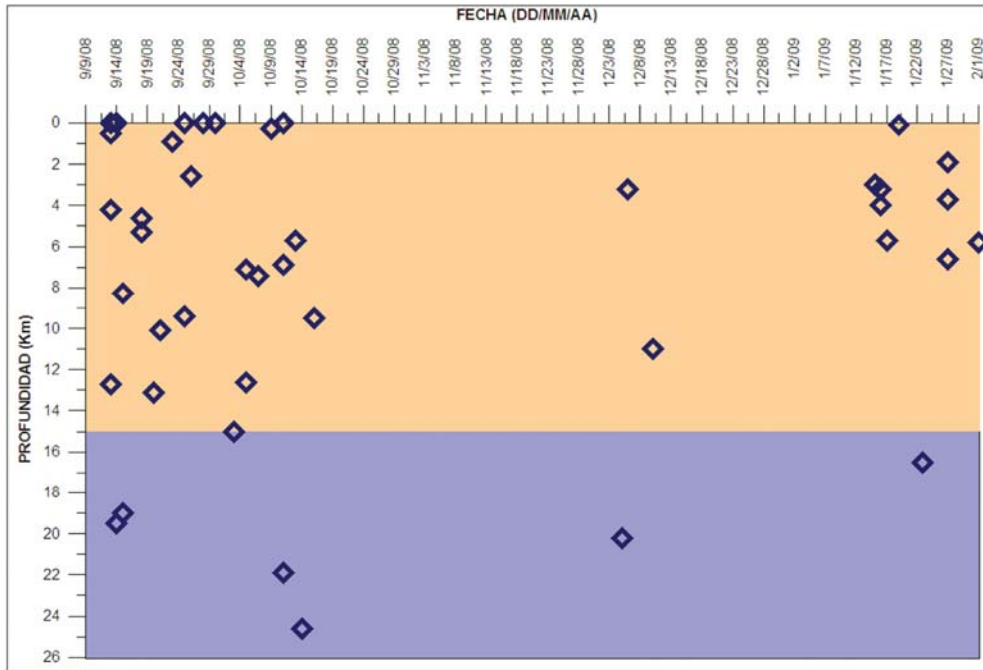


Figura 2.6 Distribución de los 44 sismos en profundidad vs fecha de registro (agosto 2008-febrero 2009). El mayor número de sismos ocurre a profundidades menores a 15 km.

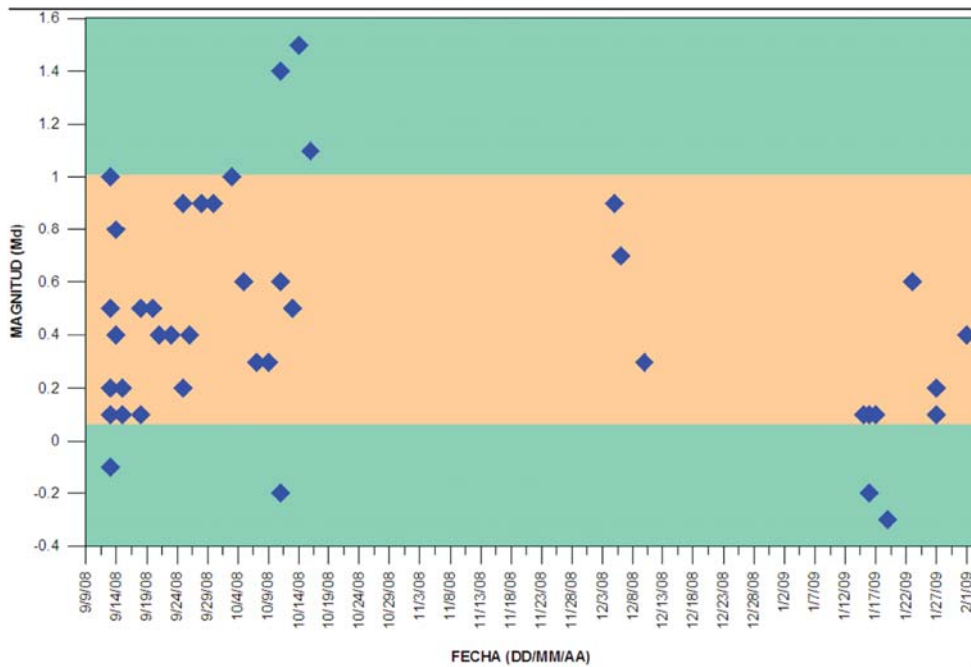


Figura. 2.7 Magnitud de duración (Md) vs fecha de registro de los 44 sismos, registradas en agosto 2008 y febrero 2009. El mayor número de sismos presentaron magnitudes entre 0.1 y 1.0Md.

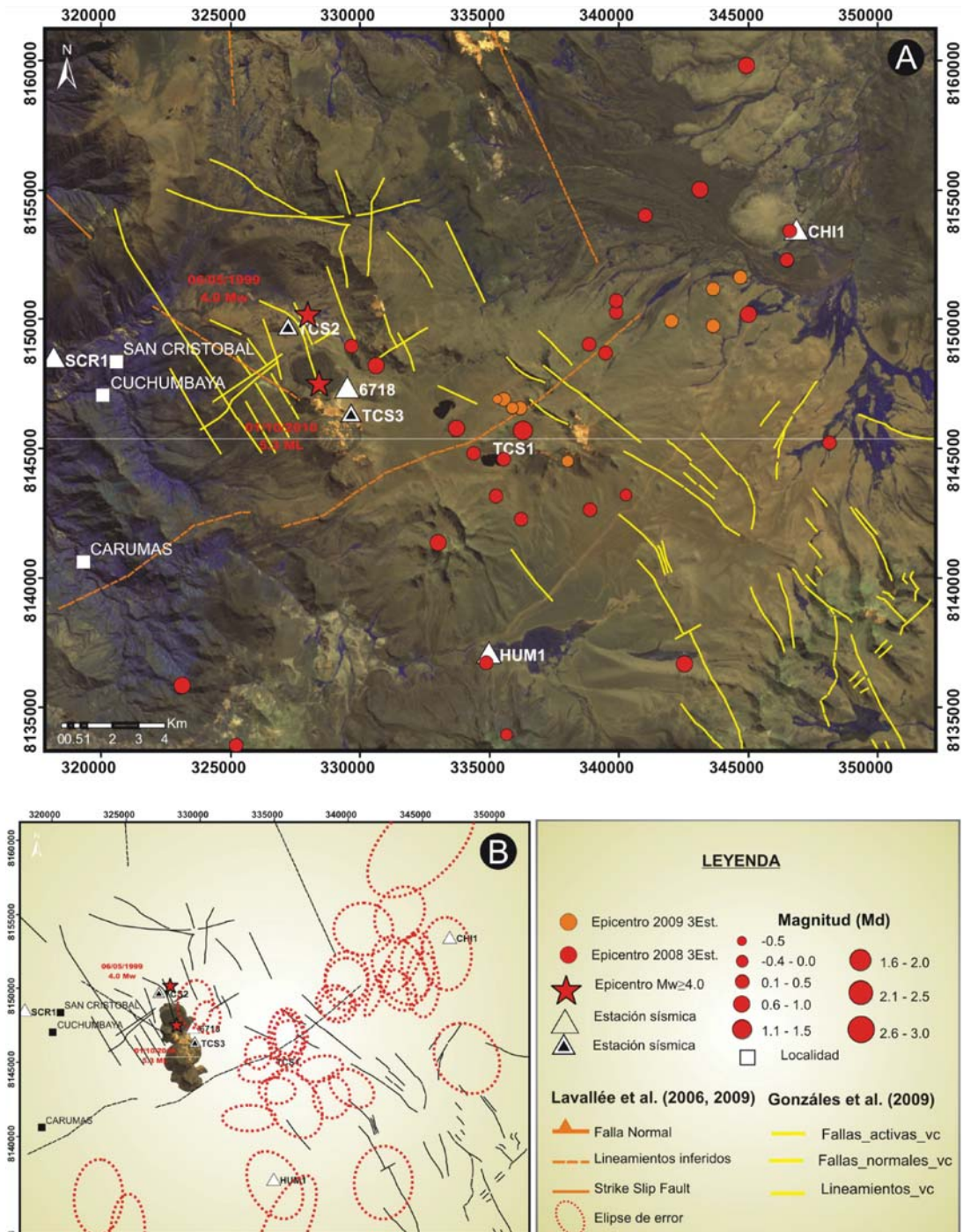


Figura 2.8 A) Distribución en superficie de los sismos localizados con el programa SEISAN. Los círculos rojos y anaranjados corresponden a los periodos agosto-diciembre 2008 y enero-febrero 2009, respectivamente. Las estrellas representan a los epicentros de los sismos de magnitud moderada de 1999 y 2005; B) Elipses de error de la localización de ambos periodos.

La distribución de los sismos en profundidad (figura 2.9) muestra que estos ocurren, con mayor frecuencia, a profundidades menores a 15 km y, mínimamente, a profundidades superiores. Estos resultados son similares a los presentados por Aguilar et al. (2001) y Tavera (2006) durante las crisis sísmicas de 1999 y 2005, en la zona del volcán Ticsani.

LA SISMICIDAD Y SU RELACIÓN CON LA DEFORMACIÓN DE LA ZONA DEL VOLCÁN TICSANI

En los últimos 10 años han ocurrido dos sismos de magnitud moderada en la zona del volcán Ticsani. El primero, el 6 de mayo

de 1999, con magnitud local $ML=4.0$ y una profundidad superficial de 6.5 km (Aguilar et al., 2001); y el segundo, el 1 de octubre del 2005, con magnitud $ML=5.4$ y a una profundidad de 5.7 km (Tavera, 2006). Ambos sismos fueron seguidos de numerosas réplicas que fueron sentidos en las localidades de Calacoa, Cuchumbaya y Carumas con una intensidad de V en la escala de Mercalli Modificada (V MM). Como resultado de estos sismos, las viviendas de adobe y barro (típicos de la zona) fueron destruidas; asimismo, se observó la caída de rocas, derrumbes, reactivación de deslizamientos y agrietamientos de terreno (Rivera et al., 2006). La figura 2.10 muestra los epicentros de los sismos principales y réplicas ocurridas en 1999 (figura 2.10A) y 2005 (figura 2.10B).

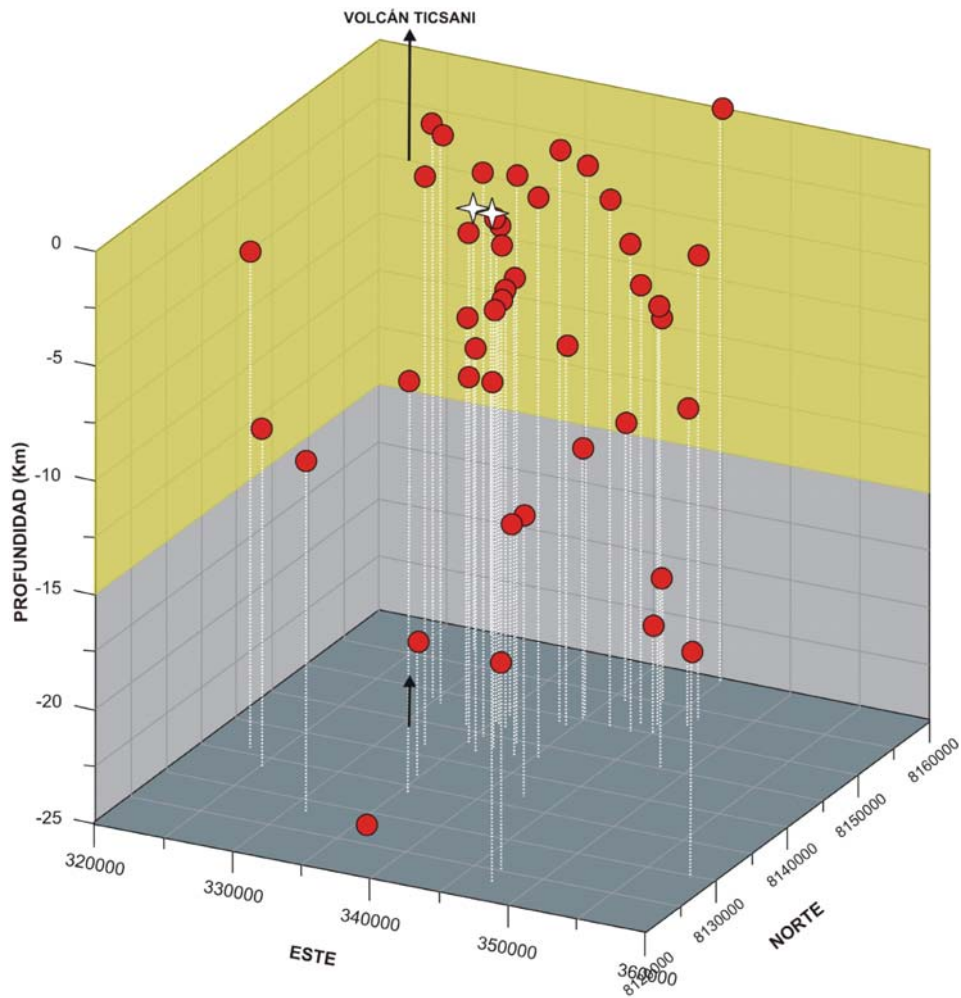


Figura 2.9 Distribución en profundidad de los 44 sismos localizados en la zona del volcán Ticsani. Las estrellas blancas representan a los sismos de magnitud moderada ocurridos en 1999 y 2005.

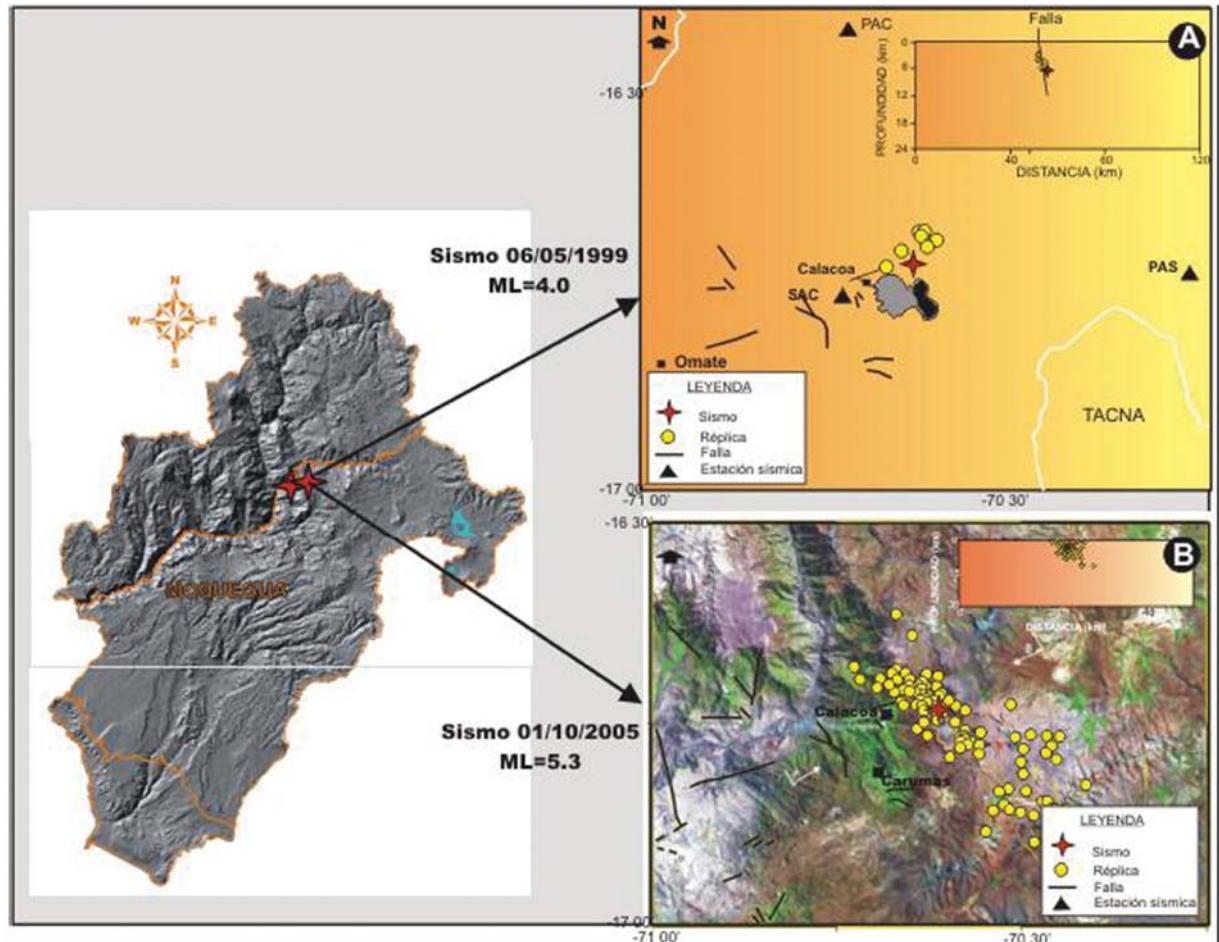


Figura 2.10 Epicentros de sismos y réplicas principales en la zona del volcán Ticsani (Moquegua). A) Epicentro del 6 de mayo de 1999 y B) Epicentro del sismo del 1de octubre de 2005. Modificado de Aguilar et al. (2001) y Tavera (2006).

Inicialmente, se pensó que posiblemente estos sismos estaban asociados a una reactivación del volcán Ticsani, pero los estudios sísmicos, geológicos y de deformación mediante InSAR, realizados por Gonzáles et al., (2009), demostraron que su origen fue netamente tectónico, asociado al sistema de fallas que cruza el volcán Ticsani en dirección NO-SE (figura 2.11).

Con respecto a la sismicidad registrada en abril de 2008 y agosto 2008-febrero 2009, las características de las señales sísmicas, sus magnitudes M_d pequeñas y recurrentes entre 0.1 y 1.0 M_d , su distribución en superficie y profundidad superficial (≤ 15 km) se concluye que esta sismicidad estaría asociada a la tectónica local, activación y/o reactivación de fallas y lineamientos locales que se ubican en el volcán Ticsani y alrededores (Lavallée et al., 2006, 2009; Gonzalez et al., 2009). Asimismo, en este periodo de estudio no se han identificado sismos netamente volcánicos asociados a movimiento de fluidos. Al sobreponer la sismicidad registrada en abril de 2008 y agosto 2008-febrero de 2009 al interferograma de deformación (obtenido y analizado por Gonzáles et al., 2009) mediante la técnica InSAR, con imágenes satelitales ENVISAT-ASAR adquiridas el 01/12/2004 y el 10/05/2006), se observa que el mayor número de sismos se distribuye a lo largo del lineamiento en dirección NE-SO (Lavallée et al., 2006, 2009), y en menor número y más dispersos sobre las anomalías de deformación.

MONITOREO GEOQUÍMICO

Con el objetivo de determinar las fuentes propicias para implementar el monitoreo geoquímico del volcán Ticsani, en octubre del 2005, durante la crisis sísmica de Calacoa, personal del INGEMMET realizó la caracterización de 6 fuentes termales y 2 lagunas (Cruz, 2006).

Posteriormente, en el 2007, se caracterizó 5 fuentes más, lo que hacen un total de 13 fuentes de muestreo en los alrededores del volcán Ticsani, donde se toman muestras y se miden parámetros físicoquímicos, tales como T° , pH, CE, TDS. Asimismo, en las fumarolas del volcán (TCS-F1, TCS-F2, TCS F3), se realizan mediciones de T° y pH.

LAS FUENTES TERMALES Y FRÍAS DEL VOLCÁN TICSANI

En el cuadro 2.3 y figura 2.12 se presentan las coordenadas y ubicación geográfica de cada una de las 13 fuentes que fueron muestreadas para la caracterización geoquímica del volcán Ticsani. Como se observa en la figura 2.12, estas fuentes se ubican en las cuencas de los ríos Putina (SEC, PA1, PA2, PU2), Cuchumbaya (SQ1, SQ2, RFT, HIB, CU2), en la zona alta del volcán (TX1 y TX2) y en el altiplano (CAM y TOB).

Cuadro 2.3
Ubicación de las fuentes termales muestreadas para la caracterización del volcán Ticsani

N°	Fuente	Código	Coordenadas UTM		Inicio mediciones
			N	E	
1	Hierba Buena	HIB	8146953	320563	mar-06
2	Putina Puente A 1	PA1	8149105	319623	mar-06
3	Putina Puente A 2	PA2	8149046	319545	mar-06
4	Río Putina	PU1	8149033	319317	jul-07
		PU2			mar-06
5	Ticsani 1	TX1	8149218	325390	mar-06
6	Ticsani 2	TX2	8150200	328837	oct-06
7	Soquesane 1	SQ1	8142977	326329	oct-06
8	Soquesane 2	SQ2	8142764	325708	oct-06
9	Rincón F. Termales	RFT	8142680	324404	mar-06
10	Secolaque	SEC	8151066	322090	oct-06
11	Cuchumbaya 2	CU2	8147230	320637	oct-06
12	Laguna Toro bravo	TOB	8144433	334754	mar-06
13	Laguna Camaña	CAM	8144636	332869	mar-06

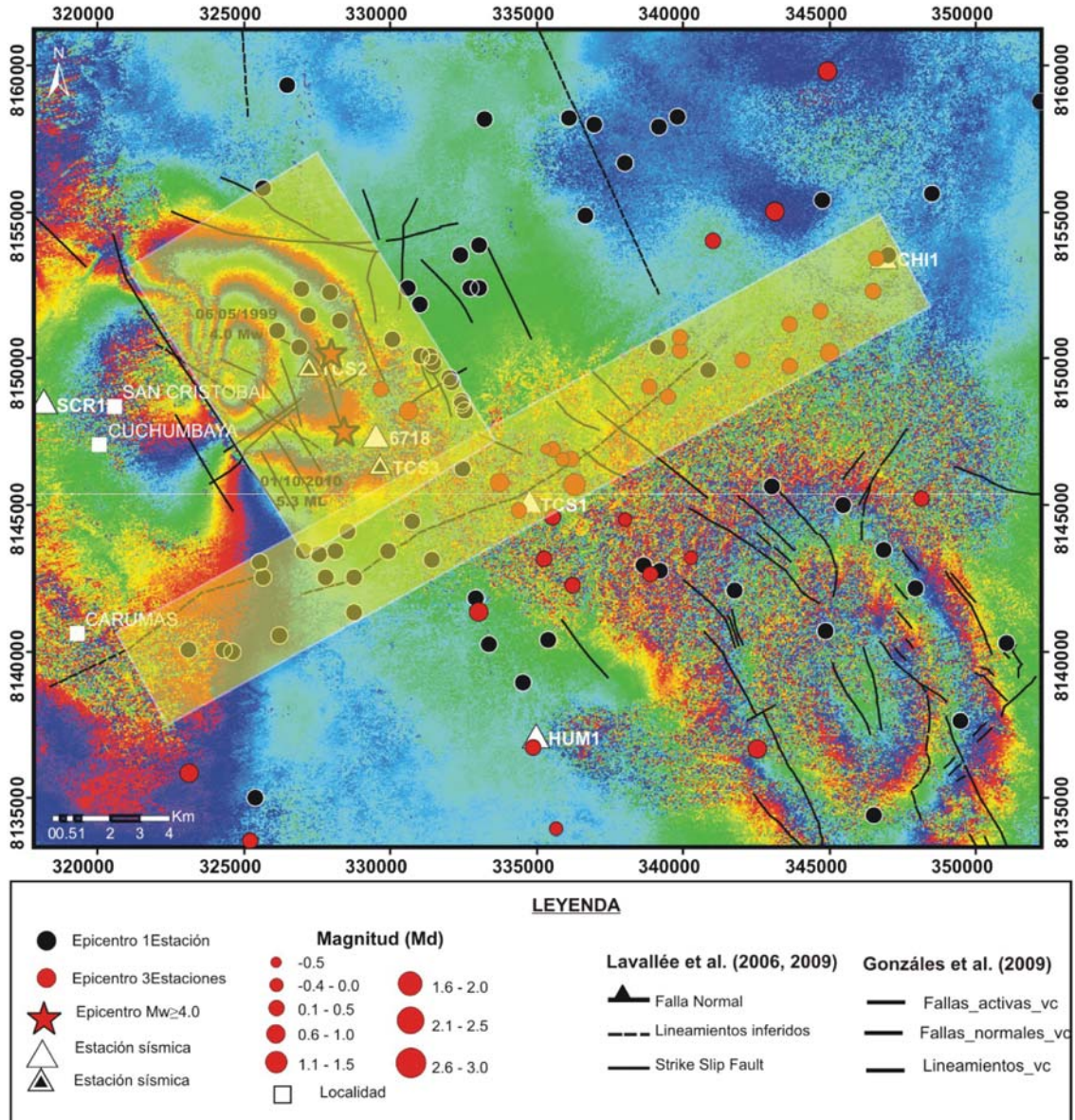


Figura 2.11 Epicentros de sismos registrados en abril y agosto 2008- febrero de 2009. El mayor número de sismos se distribuye a lo largo de los lineamientos orientados en dirección NE-SO (rectángulo amarillo). Un menor número de sismos se localiza sobre las anomalías de deformación identificadas mediante InSAR.

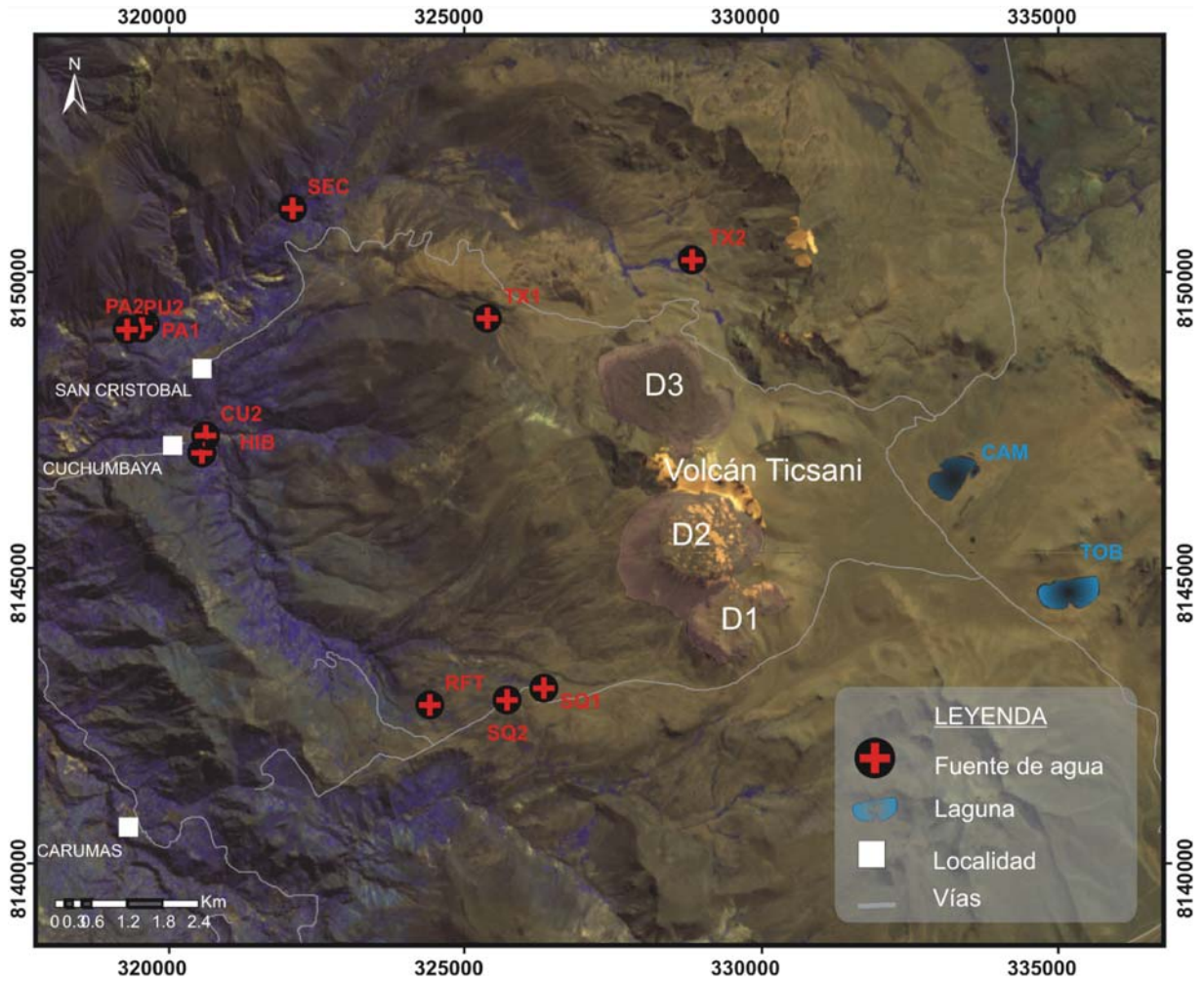


Figura 2.12 Ubicación de las 13 fuentes muestreadas para la caracterización del volcán Ticsani.

Análisis geoquímico de las fuentes termales y frías del volcán Ticsani

Para realizar la caracterización de las 13 fuentes del volcán Ticsani que se presenta en este boletín, se empleó la información recopilada en el año 2007. En cada una de estas fuentes se han tomado muestras y luego enviado al laboratorio para su análisis respectivo. Asimismo, *in situ*, se midieron parámetros fisicoquímicos tales como T°, pH, CE y TDs. Con los resultados de los análisis de estas muestras se elaboraron diagramas de Piper-Hill-Langelier para identificar los tipos de agua según sus iones mayoritarios (Cruz & Franca, 2006), el diagrama Ternario SO₄-Cl-HCO₃ de Nicholson (1993) para conocer su posible origen y el geotermómetro de Giggenbach (1988) para conocer la temperatura en el reservorio.

Diagrama de Piper-Hill-Langelier

De acuerdo al diagrama de Piper-Hill-Langelier (figura 2.13), las fuentes de agua asociadas al volcán Ticsani son de 4 tipos:

- 1) CLORURADAS Y/O SULFATADAS ALCALINAS TÉRREAS (Cl-SO₄/Na+K). Las fuentes CU2, PA1, PA2, PU1 y SEC.
- 2) SULFATADAS Y/O CLORURADAS ALCALINAS TÉRREAS (SO₄-Cl/Ca – Mg). Las fuentes HIB y TX2.

- 3) BICARBONATADAS ALCALINAS TÉRREAS (HCO₃/Ca – Mg). La fuente TX1.
- 4) BICARBONATADAS ALCALINAS (HCO₃/NA+K). Las lagunas CAM y TOB.

Además, las fuentes RFT, SQ1 y SQ2 se encuentran en el límite de las aguas SULFATO Y/O CLORURO ALCALINAS TÉRREAS y BICARBONATADAS ALCALINAS.

De acuerdo al diagrama Ternario de SO₄-Cl-HCO₃ de Nicholson (1993), se han identificado 2 tipos de aguas (figura 2.14).

- 1) Aguas con origen en condensados volcánicos y aguas diluidas. Las fuentes: PA1, PU2, PA2, CU2 SEC y HIB.
- 2) Aguas calentadas por vapor y/o vapor condensado. Las fuentes: TX1, SQ1, SQ2, RFT, TX2, TOB y CAM.

Geotermómetro NA-K-Mg

Los resultados obtenidos del geotermómetro Na-K-Mg (figura 2.15) muestran lo siguiente:

- La fuente PA1 se encuentra en la zona de equilibrio parcial, con una temperatura en el reservorio > 200 °C.

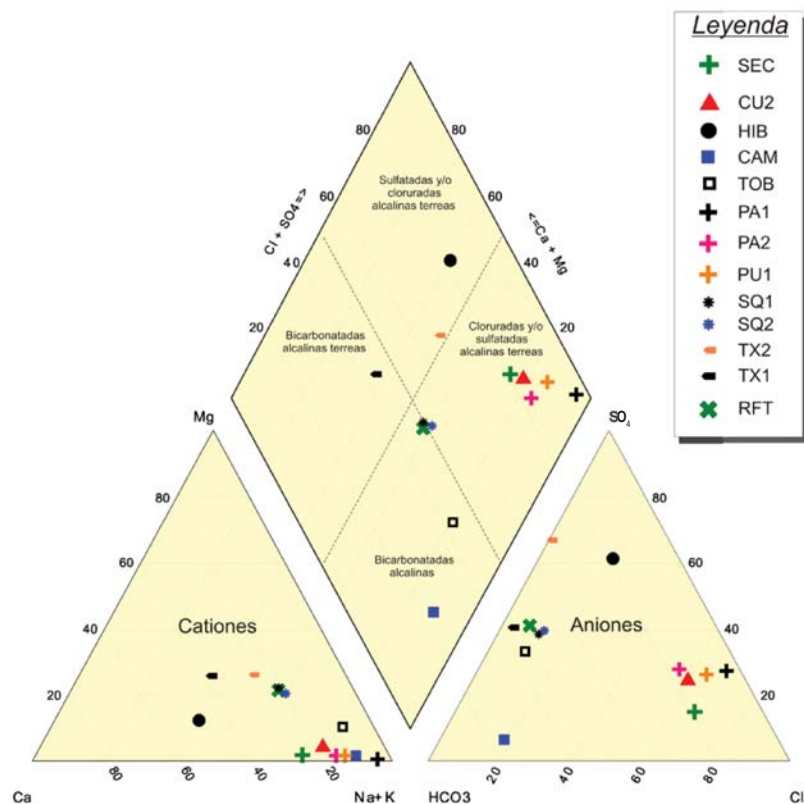


Figura 2.13 Diagrama de Piper-Hill-Langelier, donde se identificaron los 4 tipos de agua a las cuales pertenecen a las fuentes asociadas al volcán Ticsani.

- Las fuentes PA2, PU2, SEC y CU2 se encuentran cerca al equilibrio parcial, posiblemente con temperaturas cercanas a los 150 °C en el reservorio.
- Las fuentes RFT, TX1, TX2, HIB, SQ1 y SQ2 se encuentran muy cerca al vértice del Mg, por lo que estas aguas podrían estar diluidas con aguas meteóricas y tener temperaturas $\leq 100^\circ\text{C}$ en su reservorio.
- Las lagunas CAM y TOB se han clasificado como aguas de poco recorrido o superficiales.

Caracterización geoquímica de las fuentes termales y frías del volcán Ticsani

Del análisis de las 13 fuentes asociadas al Ticsani, se concluyó que las fuentes **PA1, PU2, CU2, SEC y PA2** tendrían un origen volcánico y constituirían fuentes ideales para el monitoreo volcánico. Sin embargo, todas estas fuentes están ubicadas en zonas de ocurrencia de derrumbes, en el lecho de los ríos y con posibilidades de sufrir migración del punto de emanación; estas condiciones imposibilitan la instalación de estaciones de monitoreo continuo.

Las fuentes **HIB, TX1, TX2, SQ1, SQ2 y RFT**, si bien presentan menores condiciones geoquímicas que las anteriores, también tendrían un origen volcánico. Además, su ubicación geográfica más segura las hace más factibles para implementar estaciones de monitoreo permanente.

Las lagunas Camaña (**CAM**) y Toro Bravo (**TOB**), al ser consideradas como aguas superficiales, no aportan información de la actividad volcánica del Ticsani.

MONITOREO DE FUENTES TERMALES

De la caracterización geoquímica de las fuentes del volcán Ticsani, se eligió realizar el monitoreo de 7 fuentes de agua termal: **HIB, PA1, PA2, PU2, RFT, TX1 y SEC** (figura 2.16), que reflejarían las condiciones internas del volcán.

En general, el monitoreo consiste en el muestreo periódico de fuentes para su análisis en laboratorio y en medición de parámetros físico-químicos *in situ*.

Además, en **HIB** se instaló un registrador de medición de temperatura permanente. Las fuentes **PA1, PA2, PU1-PU2 y SEC** no siempre son accesibles, sobre todo en épocas de lluvia. La figura 2.17 permite ver los periodos de muestreo en las 7 fuentes del Ticsani.

La figura 2.18 expone fotos del muestreo y medición de parámetros físico-químicos en las fuentes HIB (figura 2.18A), PA1 (figura 2.18B), PA2 (figura 2.18C), PU1 (figura 2.18D), PU2 (figura 2.18E), RFT (figura 2.18F), SEC (figura 2.18G) y TX1 (figura 2.18H).

Resultados de los análisis de las muestras de agua

Los resultados de los análisis químicos de las 109 muestras obtenidas en las 7 fuentes del volcán Ticsani son presentados en el anexo 2.2. A su vez, estos resultados han permitido obtener relaciones **SO₄/Cl**, en busca de cambios asociados a fluidos profundos magmáticos y relaciones **SO₄-Cl-HCO₃** para conocer las variaciones en el origen de las aguas de las fuentes termales.

Relación SO₄/Cl

Con la premisa de que la relación SO₄²⁻/Cl⁻ se incrementa antes de una erupción volcánica (Irabayashi et al., 1982; Williams et al., 1986; Giggenbach & Glover, 1975; Martín-Del Pozo et al., 2002), en la figura 2.19 se muestran los resultados expresados en SO₄²⁻/Cl⁻ para las fuentes de monitoreo del volcán Ticsani. En esta figura se puede observar que en el 2011, la fuente TX1 presenta un ligero descenso en esta relación.

Composición química del agua monitoreada (2006-2012)

Las figuras 2.20A y 2.20B muestran el monitoreo de la concentración química (sulfatos, calcio, cloruros, sodio, bicarbonatos, magnesio, estroncio y potasio) de las 7 fuentes de monitoreo del volcán Ticsani. En estas figuras se observa, durante el 2011, una variación significativa en los iones cloruros en las fuentes SEC, PA1, PU2 con más de 200 ppm, y menor intensidad en HIB con cerca de 40 ppm; un efecto similar se registró en el ión estroncio en las mismas fuentes. Estos incrementos disminuyeron en el 2012, lo que nos podría hacer pensar que durante el 2011 hubo un mayor aporte de fluidos profundos. Sin embargo, estas variaciones no representan un riesgo inminente de erupción.

Diagrama Ternario SO₄-Cl-HCO₃

La figura 2.21 presenta el diagrama Ternario SO₄-Cl-HCO₃ de las 7 fuentes de monitoreo del volcán Ticsani. Como se puede apreciar en esta figura, las muestras analizadas en cada una de las fuentes de monitoreo presentan ligeras variaciones para el periodo 2006-2012. Estas variaciones han sido marcadas en zonas que representan el *back-ground* o nivel de referencia comparable en la relación SO₄-Cl-HCO₃ de cada una de las fuentes del Ticsani.

Resultados obtenidos en la medición de los parámetros físico-químicos

La relación temperatura Vs TDS (Total de Sólidos Disueltos) se muestra en la figura 2.22. En esta figura se observa una relación lineal para las fuentes PA1, PA2, PU1-PU2, RFT, SEC y TX1. La fuente HIB se encuentra ligeramente desvinculada a esta relación. La figura 2.23 muestra el pH de cada una de las 7 fuentes de monitoreo en el periodo 2006-2012.

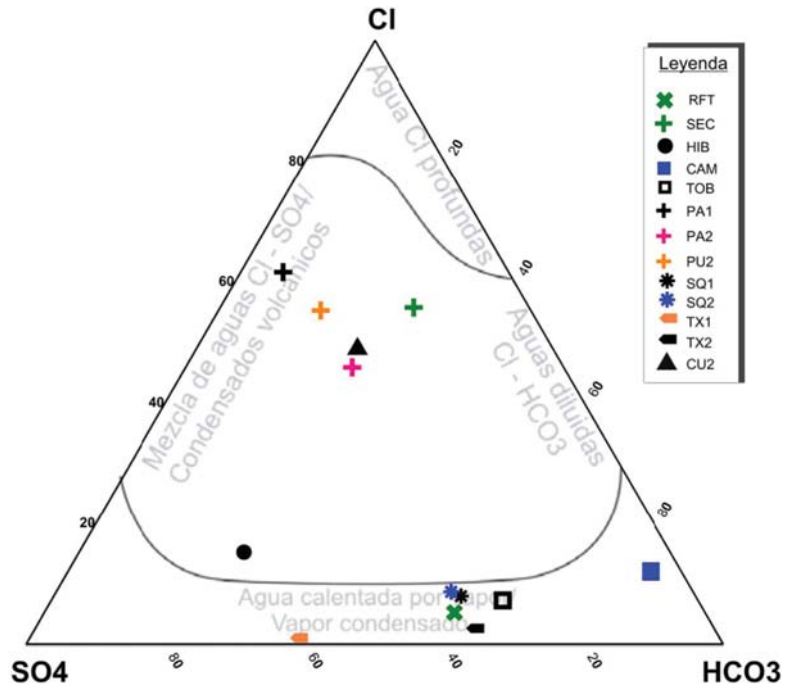


Figura 2.14 Diagrama ternario SO4-Cl-HCO3 (Nicholson, 1993).

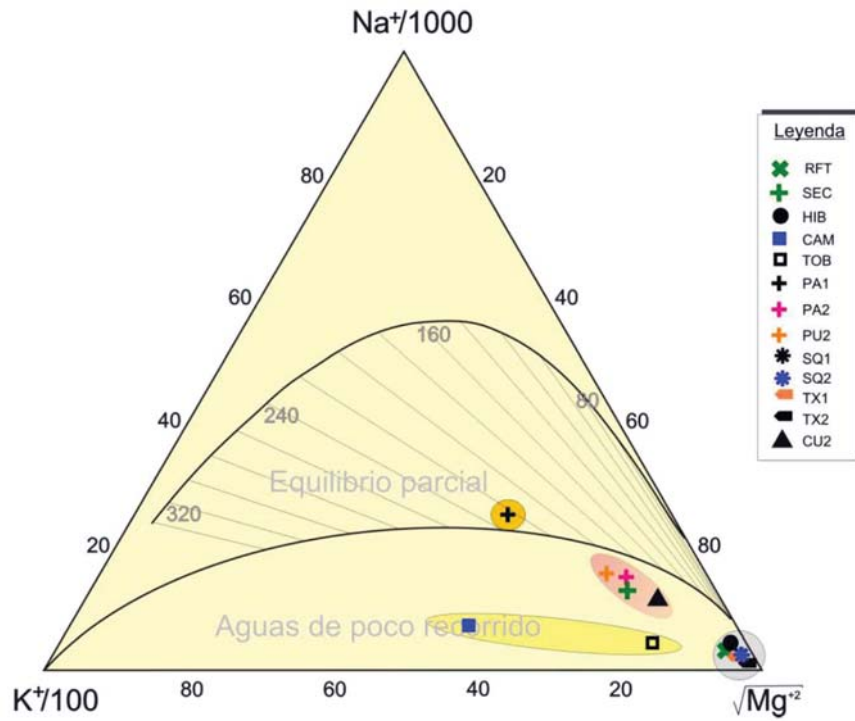


Figura 2.15 Diagrama del geotermómetro Na-K-Mg de Giggenbach (1988).

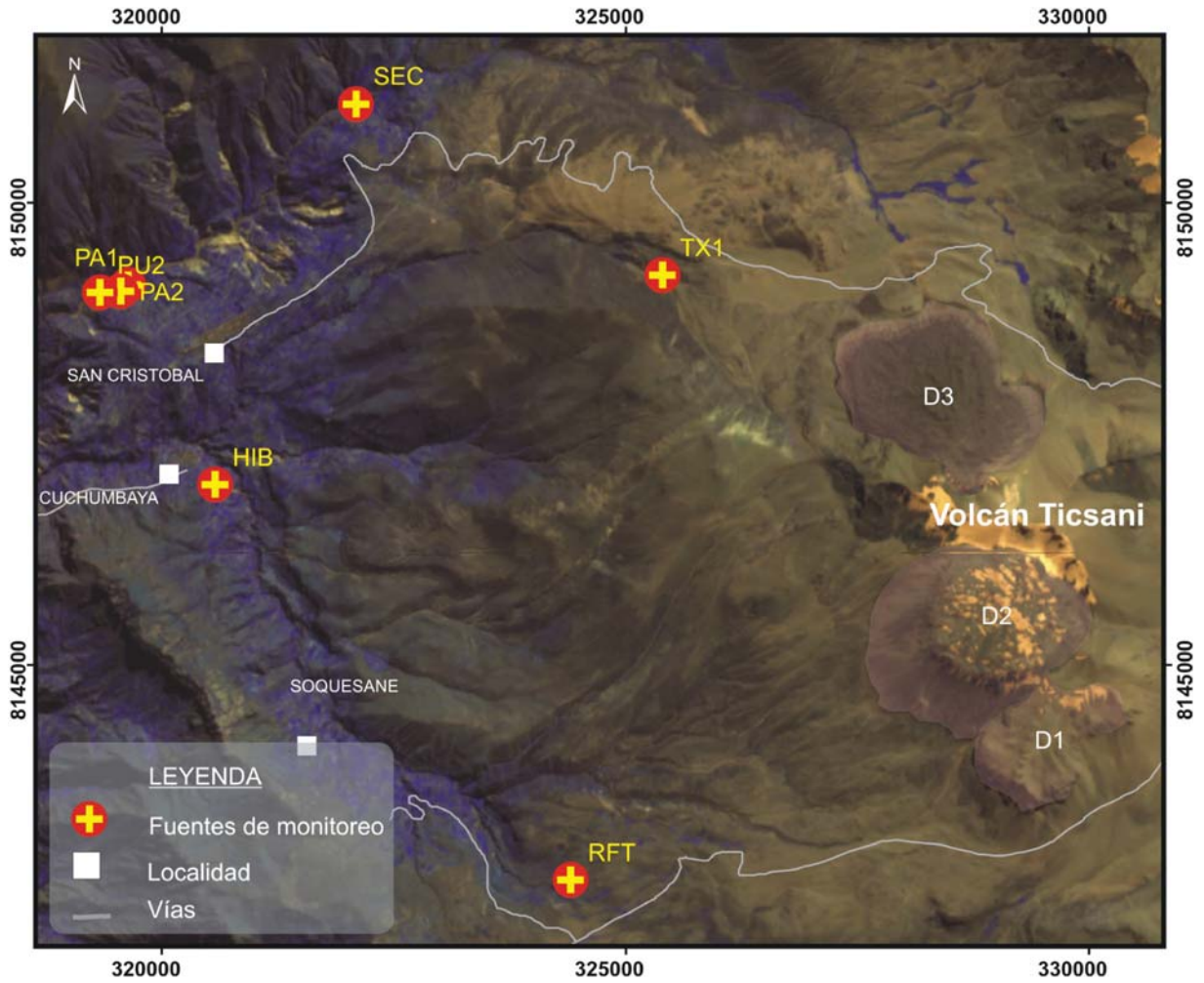


Figura 2.16 Mapa de ubicación de las fuentes termales donde se realiza el monitoreo del volcán Ticsani.

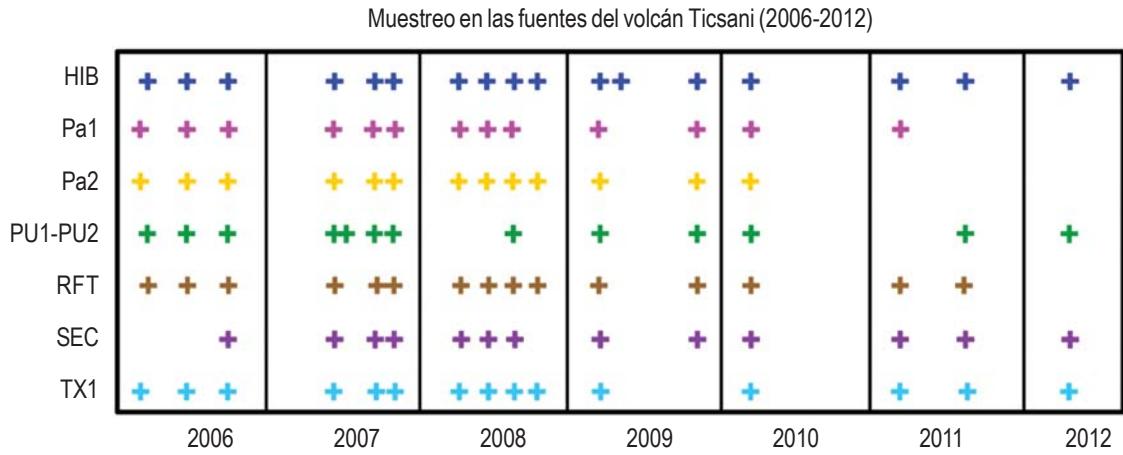


Figura 2.17 Adquisición de datos de las 7 fuentes termales donde se realiza el monitoreo del volcán Ticsani, entre marzo 2006 y abril 2012.



Figura 2.18 Fotografías de muestreo de agua realizadas en las fuentes: A) HIB, B) PA1, C) PA2, D) PU1, E) PU2, F) RFT, G) SEC y H) TX1

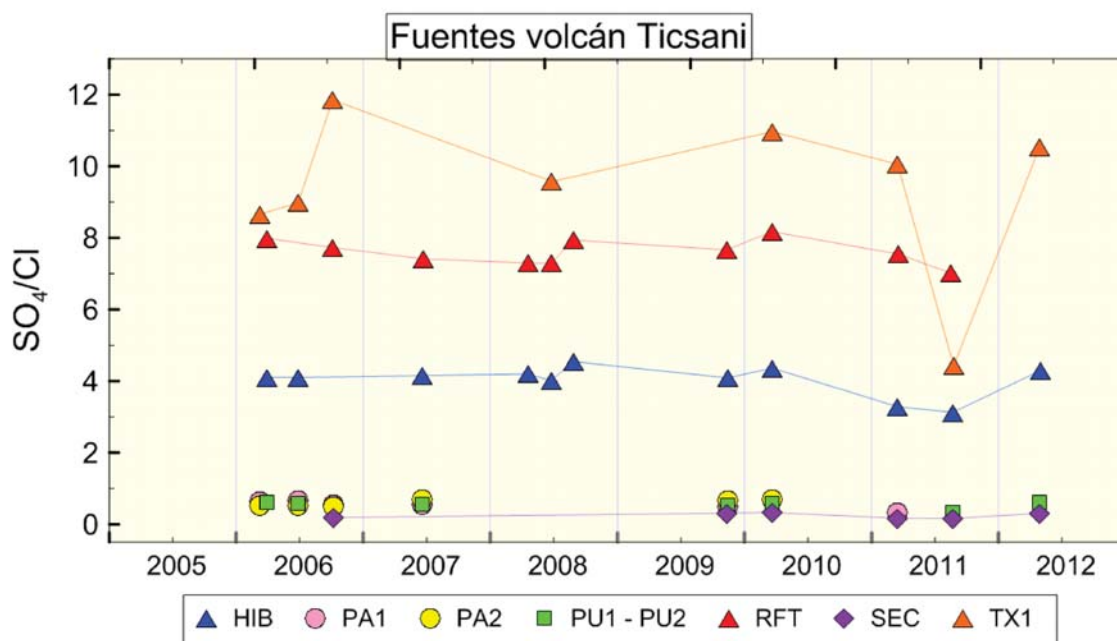


Figura 2.19 Resultados expresados en SO_4/Cl para las 7 fuentes de monitoreo del volcán Ticsani, entre marzo de 2006 y abril 2012.

Los valores varían entre 6.0 y 9.8; en algunas fuentes como PA1, PU2, HIB y RFT las variaciones fueron inferiores a 1, mientras que en las fuentes PA2 y SEC, cercano a 2 unidades. Durante los años 2006 y 2011, las variaciones en TX1 fueron ligeramente mayores a 2 unidades.

Monitoreo de la temperatura en la fuente HIB

La figura 2.24 muestra cuatro ventanas con los resultados de la medición continua de la temperatura en la fuente **HIB** (periodo 2006-2009). En la ventana superior, se muestra el registro completo del monitoreo, dividido en tres tramos (colores rojo: A, azul: B y naranja: C); el primer tramo (A) fue registrado con un termómetro Tinytag con muestreo de cada 3 horas; el segundo tramo (B) se registró con un termómetro HOBO U12-15 con muestreo de cada 15 minutos; y el tercer tramo (C) se registró con un termómetro Tinytag con muestreo de cada 1 hora. Las tres ventanas siguientes muestran el detalle de cada uno de estos tramos.

En los tramos A y B se observan algunas variaciones abruptas que podrían estar asociadas a problemas técnicos y de estabilización. Estos problemas posteriormente fueron solucionados y se logró obtener lecturas más estables (tramo C). En general, se observan temperaturas entre 41.5 y 42 °C.

MONITOREO DE LAS FUMAROLAS

Desde el año 2006, el INGEMMET realiza el monitoreo continuo de la temperatura de la fumarola TCS-F1; además, se realiza mediciones periódicas de la temperatura de las fumarolas en TCS-F2 y TCS-F3 (figura 2.25).

Identificación de zonas de emisión de fumarolas

Las fumarolas del volcán Ticsani están ubicadas en la zona de la cumbre que se encuentra en el borde de un antiguo cráter (figura 2.25) dentro del cual se emplazó un complejo de domos (Mariño et al., 2006). El emplazamiento de estas fumarolas se encuentra entre los 5300 y 5400 msnm, tienen una dirección este-oeste y una longitud aproximada de 600 m (figura 2.25). Se pueden destacar 4 zonas de emisión de fumarolas (A, B, C, D) con temperaturas que van desde 18 °C hasta los 82 °C. Estas fumarolas no son visibles desde los poblados próximos al volcán. Las fumarolas de mayor tamaño se encuentran en la zona D y solo alcanzan algunos metros de elevación, ya que son dispersados rápidamente por los vientos de la zona (figura 2.26).

Antiguamente se extraía azufre de las zonas A y D. Además, las fumarolas ubicadas en estas zonas son las más calientes y presentan el olor característico del ácido sulfhídrico (huevos podridos).

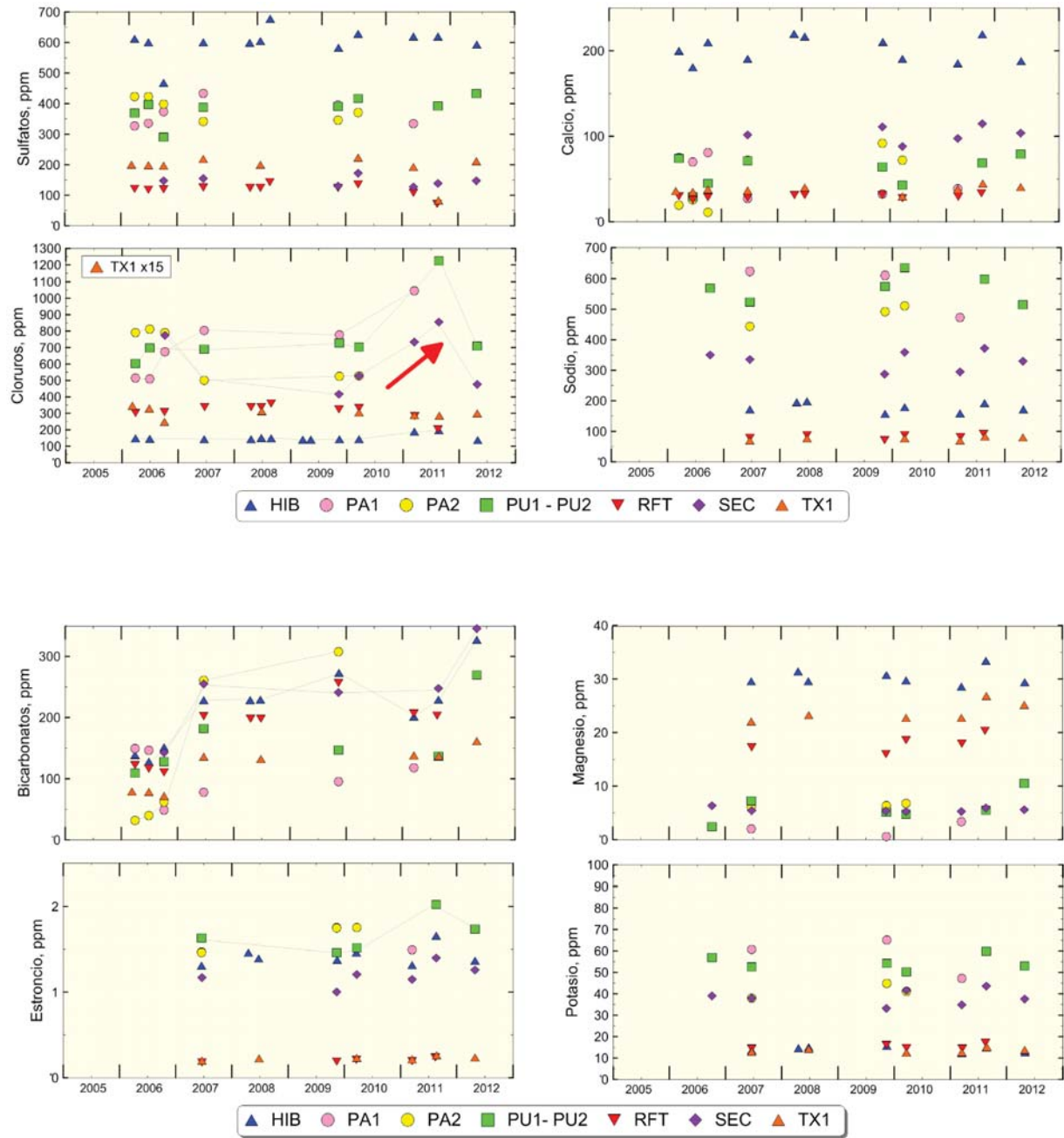


Figura 2.20 A) Resultados de los sulfatos, calcio, cloruros y sodio de las fuentes HIB, PA1, PA2, PU1, PU2, RFT, SEC y TX1, entre el 2006 y 2012. Para efectos de visualización, la concentración de cloruros de la fuente TX1 se multiplicó por un factor de 15; B) Resultados de los bicarbonatos, magnesio, estroncio y potasio de las fuentes HIB, PA1, PA2, PU1, PU2, RFT, SEC y TX1, entre el 2006 y 2012.

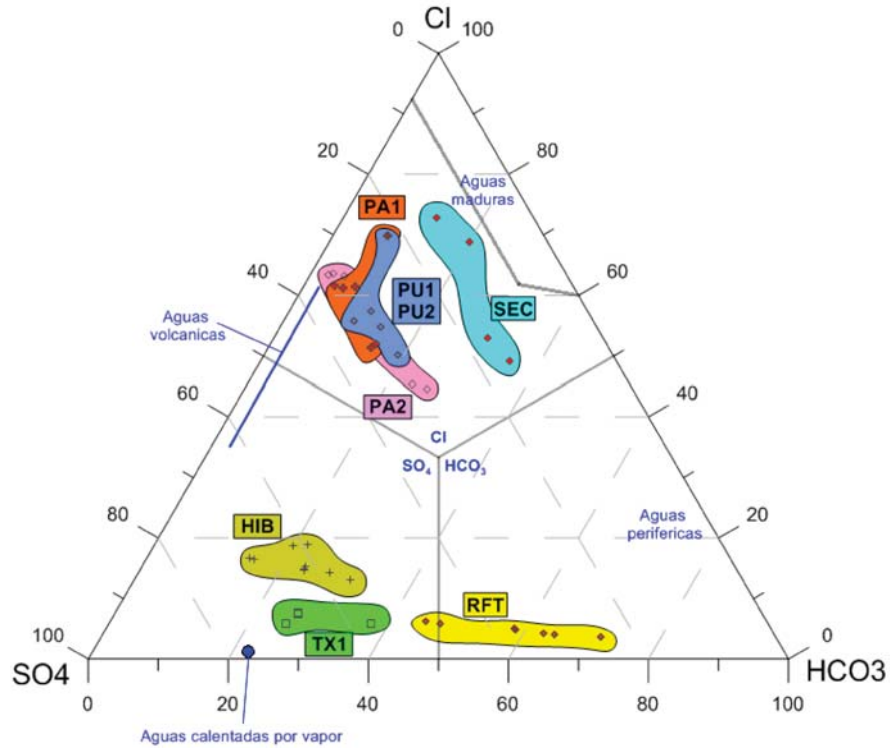


Figura 2.21 Resultados del monitoreo en las fuentes HIB, PA1, PA2, PU1, PU2, RFT, SEC y TX1, entre el 2006 y 2012, graficados en el diagrama Ternario SO_4 -Cl- HCO_3 (Giggenbach, 1988).

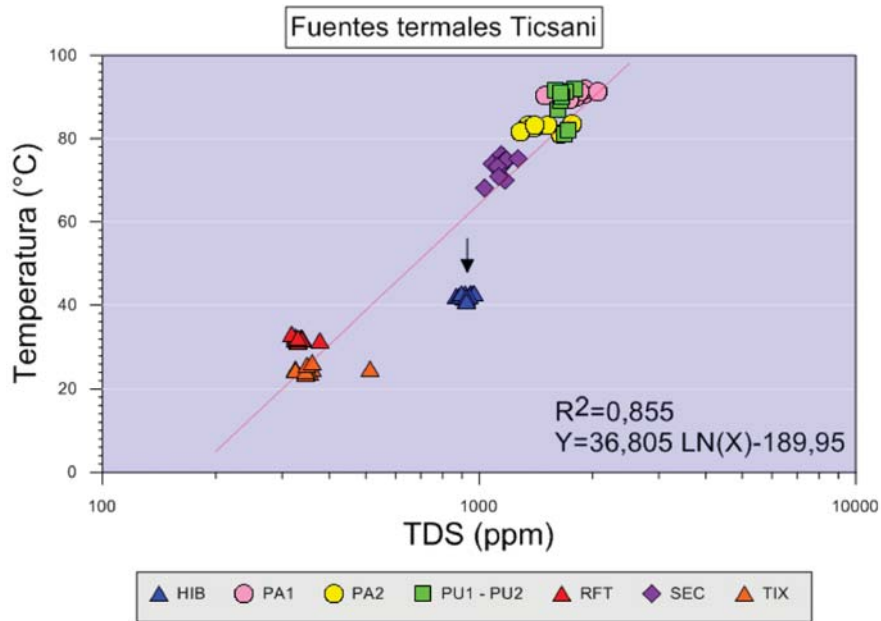


Figura 2.22 Gráfico donde se compara la temperatura con el TDS. Resultados del monitoreo en las fuentes HIB, PA1, PA2, PU2, RFT, SEC y TX1, entre el 2007 y 2010.

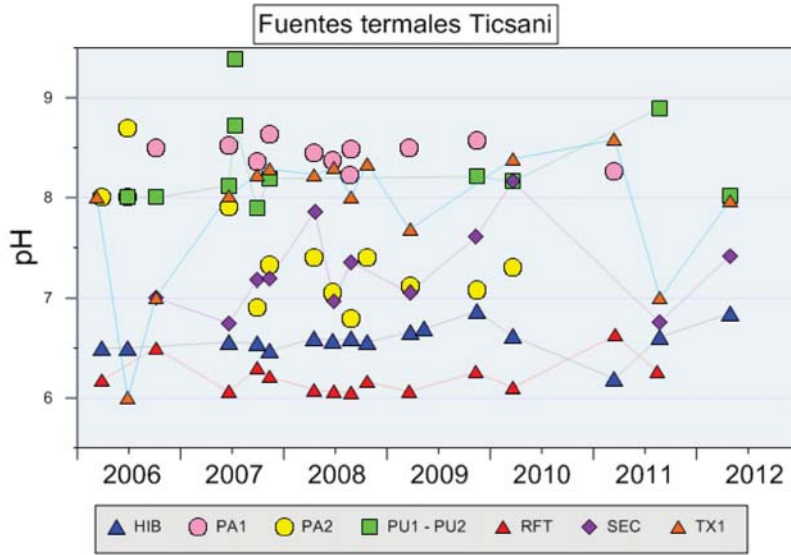


Figura 2.23 Monitoreo del pH en las fuentes HIB, PA1, PA2, PU1, PU2, RFT, SEC y TX1, entre el 2006 y 2012.

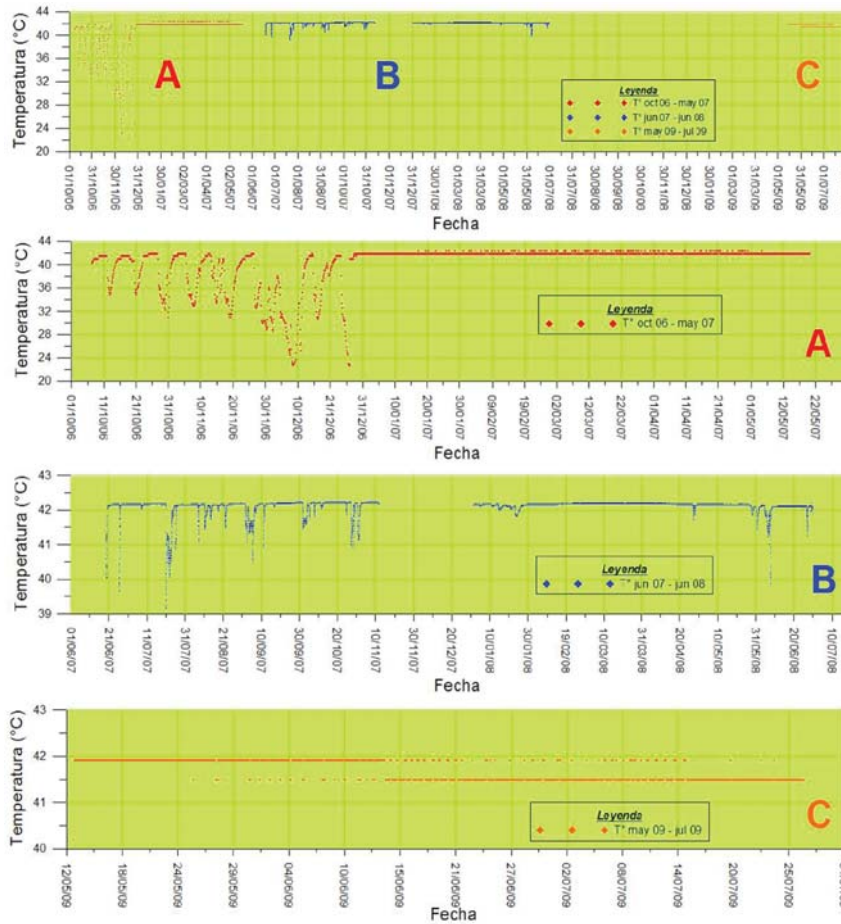


Figura 2.24 Monitoreo de la temperatura en la fuente HIB, entre octubre 2006 y julio 2009.



Figura 2.25 Ubicación de las zonas de emisión de fumarolas en la cumbre del volcán Ticsani.



Figura 2.26 Fumarolas del volcán Ticsani, zona D.

Estaciones de monitoreo de las fumarolas

El cuadro 2.4 muestra las coordenadas de las estaciones de monitoreo TCS-F1, TCS-F2 y TCS-F3 correspondientes a las zonas C, A y D, respectivamente. En el cuadro 2.5 se detallan los equipos empleados en el monitoreo de la estación TCS-F1.

Cuadro 2.4
Ubicación de las estaciones de monitoreo de las fumarolas Ticsani Fumarola 1 (TCS -F1), Ticsani Fumarola 2 (TCS-F2) y Ticsani Fumarola 3 (TCS -F3)

Estación	Coordenadas UTM		Altura (msnm)
	N	E	
TCS-F1	8146413	329662	5397
TCS-F2	8146512	329154	5306
TCS-F3	8146399	329346	5306

Resultados de la medición de la temperatura de las fumarolas

La medición de la temperatura de la estación TCS-F1 en el periodo 2006-2012 se muestra en la figura 2.27. En color rojo se muestra la temperatura de la fumarola medida en la fuente. En promedio general, esta temperatura es de 17.3 °C. En color celeste se muestra el promedio diario de esta temperatura. Se puede apreciar una tendencia positiva de estos valores que va desde 16.1 °C en

el año 2006 a 20.3 °C en el año 2012, a una razón de 4.2 °C por año. Asimismo, en color azul se muestra la temperatura ambiente de esta estación (TCS-F1). El valor de la temperatura promedio es de -0.9 °C y permanece estable en todo el periodo de estudio (2006-2012). La estabilidad de la temperatura ambiente respecto de la temperatura de la fumarola eliminaría alguna posibilidad de influencia exógena.

Por otro lado, en la estación TCS-F2 (periodo 2008-2012), se han realizado 9 mediciones manuales de temperatura, como se aprecia en el cuadro 2.6 y la figura 2.28. Si bien los valores presentan variaciones entre 78.4 y 79.5 °C, estas variaciones no son significativas.

Cuadro 2.6
Datos del registro de la temperatura de la estación TCS-F2

N°	Fecha	Hora	T °C
1	19/04/2008	12:11	79
2	24/06/2008	13:00	78.9
3	28/08/2008	11:41	78.4
4	20/03/2009	09:39	78.4
5	13/05/2009	14:05	78.6
6	09/11/2010	09:02	78.6
7	23/03/2010	13:15	78.6
8	13/08/2011	10:30	78.6
9	29/04/2012	14:40	79.5

Cuadro 2.5
Periodo de registro en la estación TCS-F1, equipos utilizados, ubicación y el intervalo de registro

Estación	N.º	Equipo	Fecha y hora de inicio de registro	Fecha y hora final de registro	Intervalo (minutos)
TCS-F1	Instalación				
Fumarola	1	UTL-1	08/10/2006 00:00	22/06/2007 10:48	72
	2	UTL-1	26/10/2007 12:39	10/03/2008 14:59	30
	3	UTL-1	10/07/2008 14:51	28/08/2008 12:51	30
	4	UTL-1	21/10/2008 00:40	30/01/2009 14:00	30
	5	UTL-1	20/03/2009 22:30	01/09/2009 23:29	30
	6	UTL-1	23/03/2010 12:30	05/09/2010 00:00	30
	7	HOBO UA002	15/08/2011 00:00	29/04/2012 15:15	15
Ambiente	1	UTL-1	01/10/2006 00:00	22/06/2007 09:36	72
	2	UTL-1	02/10/2007 12:42	10/03/2008 05:42	30
	3	LASCAR USB-1	19/03/2009 21:44	30/05/2009 19:14	30
	4	UTL-1	10/11/2009 13:30	23/03/2010 14:00	30

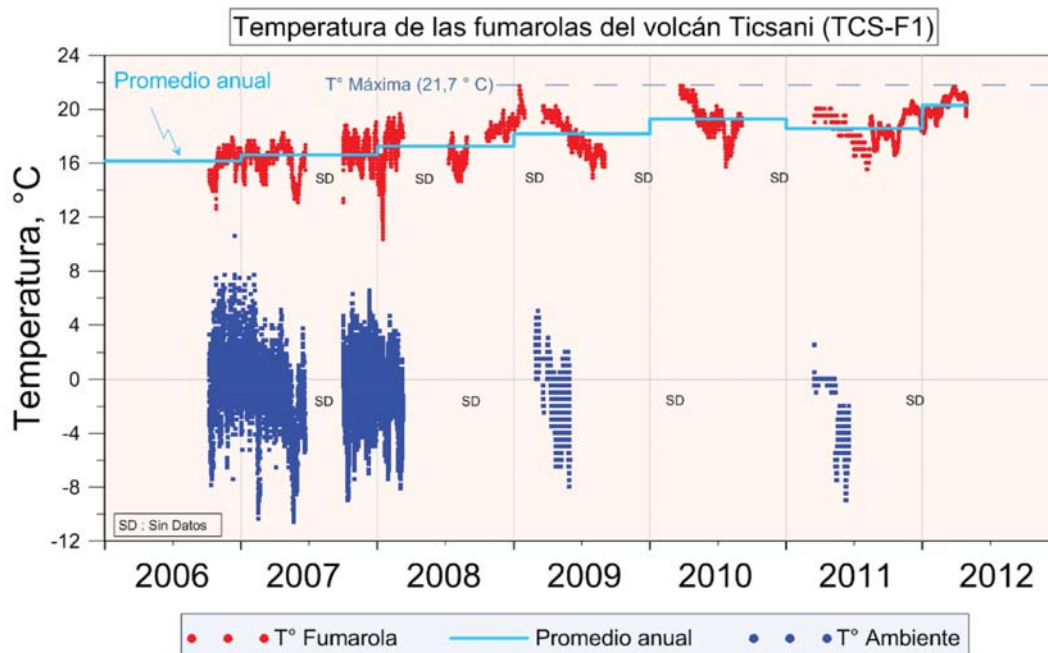


Figura 2.27 Gráfica de la temperatura registrada en la estación TCS-F1. Mediciones en las fumarolas y en el ambiente entre octubre 2006 y abril 2012.

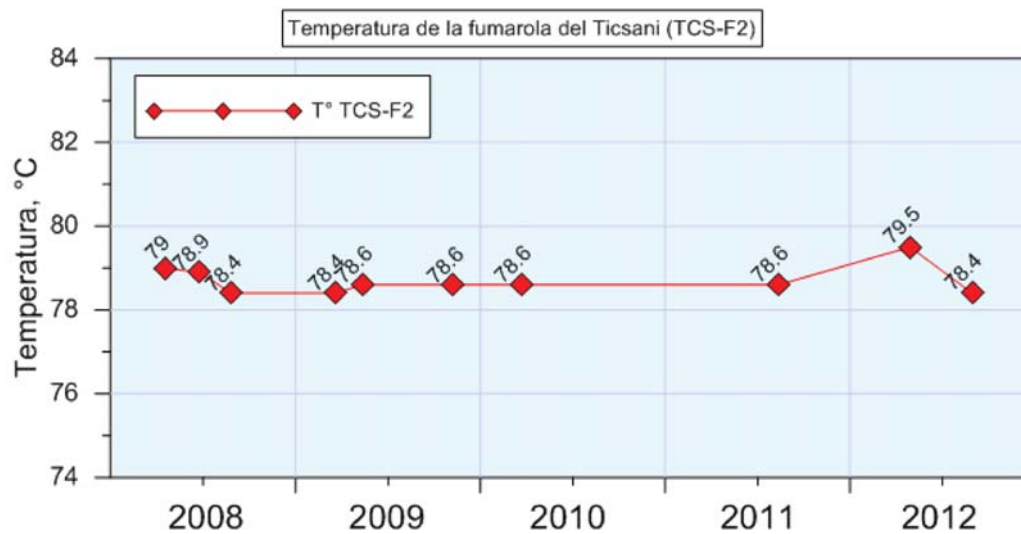


Figura 2.28 Gráfica de la temperatura registrada en la estación TCS-F2. Medición realizada entre marzo de 2008 y abril de 2012.

CAPÍTULO III

CARACTERIZACIÓN SÍSMICA DEL VOLCÁN SABANCAYA

ANTECEDENTES

Huamán (1993, 1995), Méring et al., (1996) y Sébrier et al., (1985) realizaron los primeros estudios de la tectónica de la región del volcán Sabancaya 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 (Huamán, 1995), que atraviesa el volcán Sabancaya, y la falla Ichupampa (figura 3.1). Méring 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 $M_b < 5.0$ que ocurrieron en estas fallas entre los años 1991 y 2002.

El inicio de un nuevo proceso eruptivo del volcán Sabancaya entre 1985-1986 y de mayor actividad entre 1990-1992 (De Silva & Francis, 1991; Chorowicz et al., 1992; Simkin & 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). Se realizaron estudios sismológicos en la

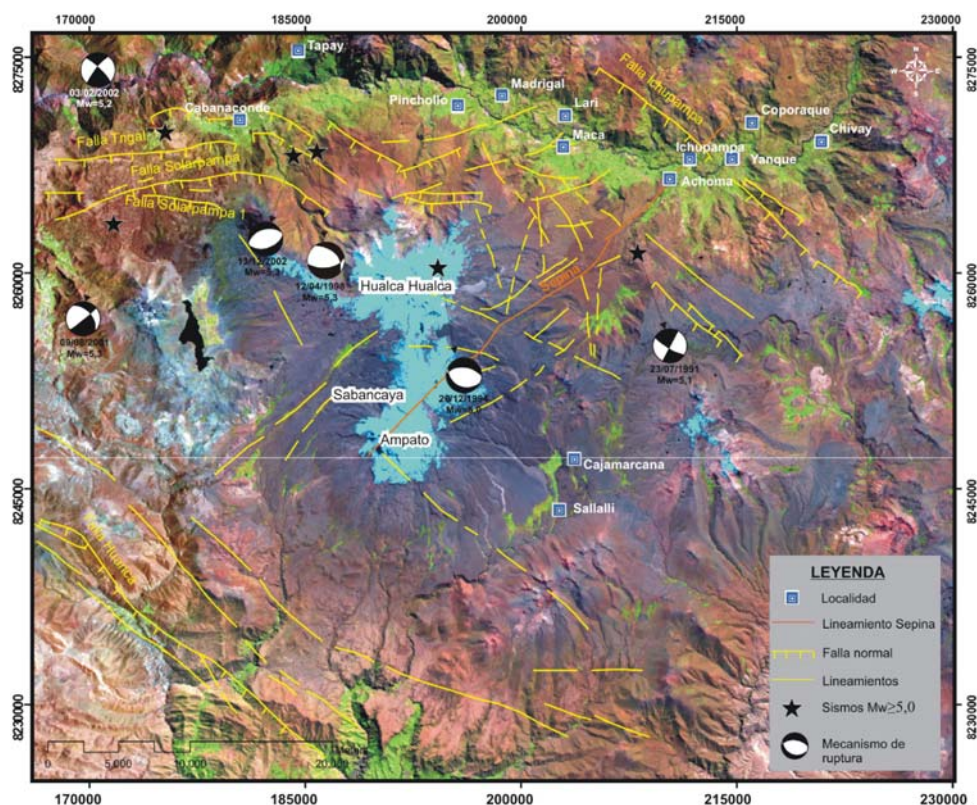


Figura 3.1 Principales sistemas de fallas y lineamientos identificados por Huamán (1995), Sébrier et al., (1985) en la zona del volcán Sabancaya. Las estrellas en color negro representan a los epicentros de sismos con $M_w \geq 5.0$ y sus mecanismos de ruptura (Claire, 2007).

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 que estuvieron operativas entre 1990 y 1994; asimismo, el IGP instaló 5 estaciones que operaron de manera irregular entre junio de 1990 e inicios de 1993. Los resultados de los estudios sísmicos obtenidos por Lazo et al., (1991), Gonzales et al., (1996), personal del IGUNSA y el IGP (Rodríguez & Huamán, 1992; Antayhua, 2002) mostraron que la sismicidad se concentró al N y NE del volcán Hualca Hualca (figura 3.2A), a profundidades menores a 15 km.

Por otro lado, los 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 Pritchard (2003), entre 1997 e inicios de 1999, muestra una anomalía de deformación al NO del volcán Hualca Hualca (figura 3.2B), probablemente relacionada a la erupción del volcán Sabancaya. Mientras tanto, el interferograma calculado entre mayo de 2002 y 2003 por Gonzales et al., (2009) muestra 2 anomalías de mayor y menor deformación (figura 3.2C). La primera anomalía se ubica al oeste del volcán Hualca Hualca en la zona denominada Pampa Mojonpampa; está delimitada hacia el norte por la falla Solarpampa. La segunda anomalía está delimitada por las fallas Solarpampa y Solarpampa 1. Ambas deformaciones localizadas en el sistema de fallas Huambo-Cabanaconde se habrían producido luego de la ocurrencia de varios sismos de magnitud moderada.

RED SÍSMICA TEMPORAL DEL SABANCAYA (RSTS)

La Red Sísmica Temporal del volcán Sabancaya (RSTS) estuvo compuesta por 11 estaciones sísmicas digitales con sensores de velocidad de 3 componentes: norte-sur, este-oeste y vertical. Estas estaciones sísmicas fueron de 3 tipos: 7 sismógrafos TITAN (figura 3.3A y 3.3B) prestados por el proyecto europeo VOLUME (IRD); 2 sismógrafos Sara (figura 3.3C) y 2 sismógrafos Guralp (figura 3.3D) propiedad del INGEMMET.

En el cuadro 3.1 se presentan las principales características y en la figura 3.4, la distribución superficial de la RSTS. Esta red cubre acimutalmente el complejo volcánico Ampato-Sabancaya-Hualca Hualca y los principales elementos tectónicos presentes en esta región.

Operatividad de la RSTS

La figura 3.5 muestra el periodo de operatividad de la RSTS. Como se observa en la figura, las estaciones Guralp estuvieron operativas durante todo el periodo de estudio, desde mayo 2008 hasta abril de 2010; las estaciones Sara fueron retiradas por fallas técnicas en su funcionamiento, y las estaciones TITÁN se devolvieron al proyecto europeo debido a que concluyó el periodo de internamiento en el país. En general, todas las estaciones sísmicas de la RSTS estuvieron operativas, simultáneamente, entre mayo y julio de 2009.

Cuadro 3.1
Principales características de las estaciones sísmicas

Código estación	Coordenadas UTM		Altura (msnm)	Tipo sismógrafo	Localidad
	N	E			
CBN	8270988	181247	3342	TITAN	Cabanaconde
TAY	8227276	186621	3373	TITAN	Taya
CAJ1	8246486	202186	4460	TITAN	Sallalli
HUA	8264698	192531	4696	Sara SL06	V. Hualca Hualca
CHV1	8255127	180150	4390	TITAN	Laguna Mucurca
SAB1	8253300	193249	5578	Sara SL06	V. Sabancaya
SAB3	8251768	194889	5547	TITAN	V. Sabancaya
SAB2	8251778	194237	5505	Guralp 6TD	V. Sabancaya
AMP	8248945	194237	5271	TITAN	V. Ampato
CLR	8272464	222778		TITAN	La Calera
SAB4	8252061	195843	5358	Guralp 6TD	V. Sabancaya

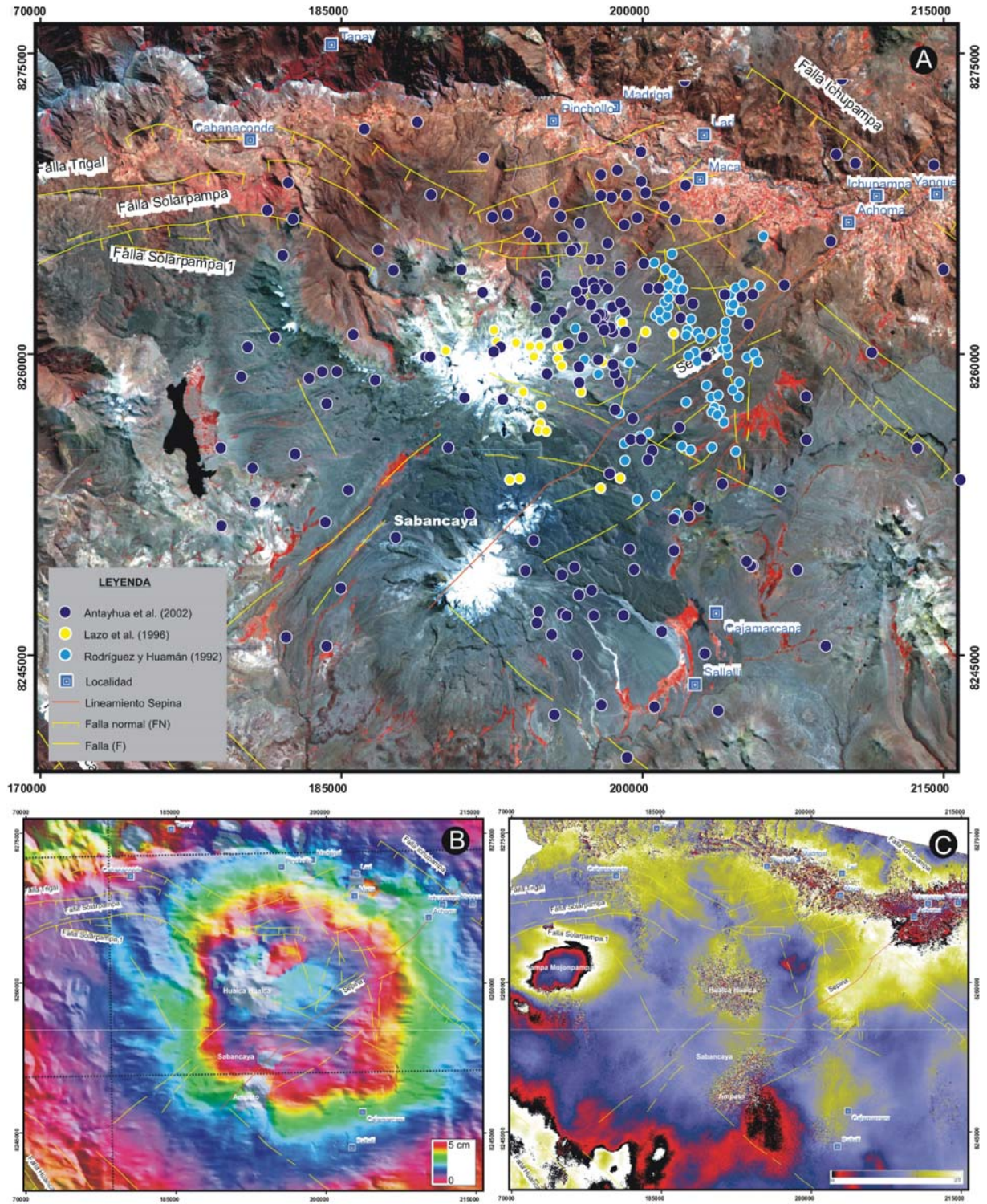


Figura 3.2 A) Sismicidad registrada en la zona del volcán Sabancaya y su relación con la tectónica local (modificado por Antayhua, 2002); B) Interferograma obtenido por Prichard (2003) entre 1997 y 1999; C) Interferograma obtenido por Gonzales et al., (2009) y registrados entre 2002 y 2003.



Figura 3.3 Estación sísmica TITAN. A) Registrador y discos de almacenamiento; B) Sensor sísmico y accesorios.

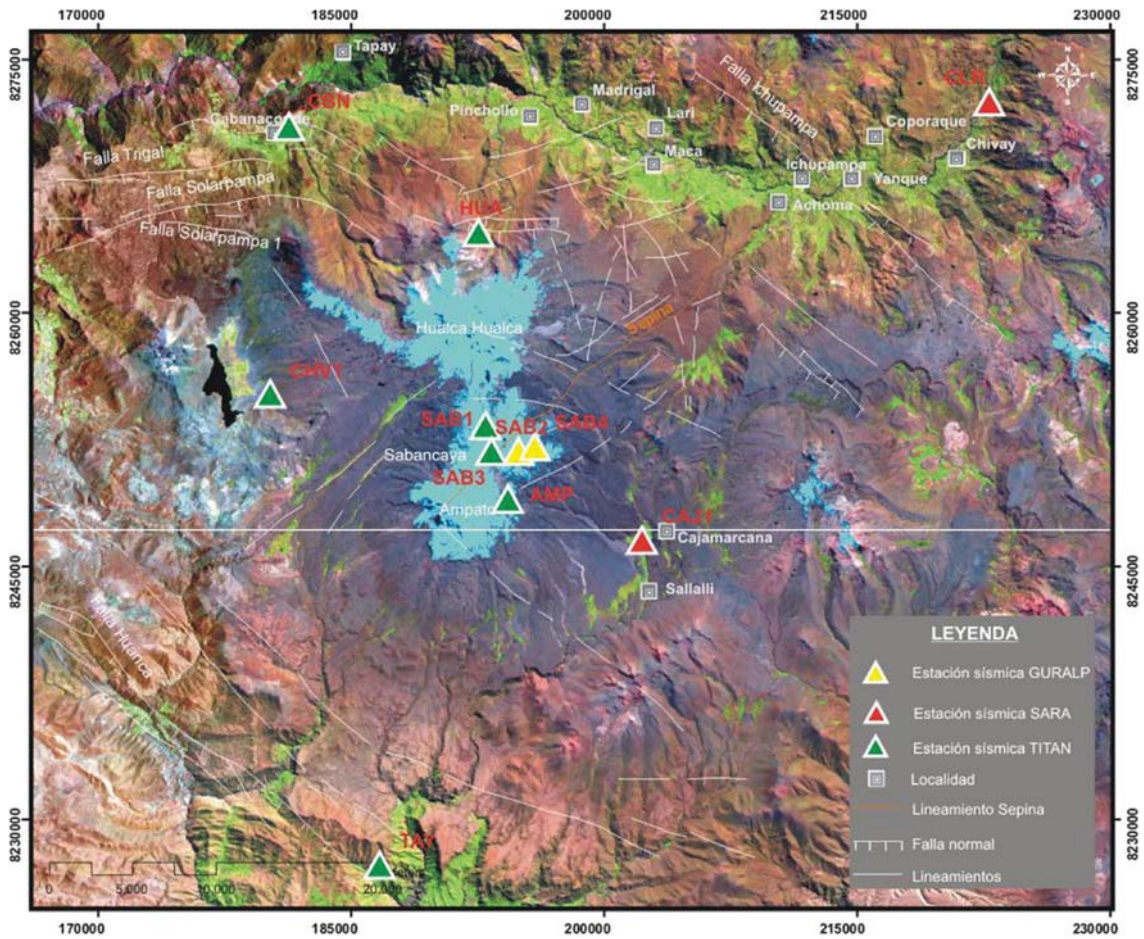


Figura 3.4 Localización de las estaciones sísmicas que conforman la RST. Están instaladas alrededor del complejo volcánico Ampato-Sabancaya-Hualca Hualca.

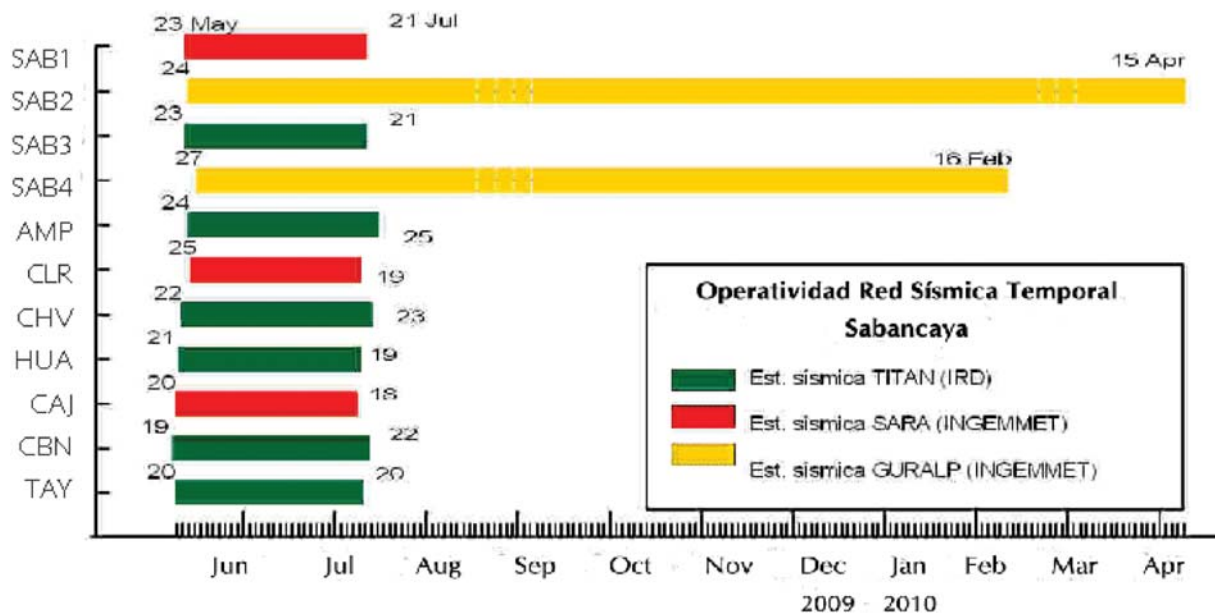


Figura 3.5 Periodos de operatividad de las estaciones sísmicas que conformaron la RSTS

PROCESAMIENTO DE DATOS

Para el procesamiento y localización de sismos registrados por la RSTS, durante el periodo mayo a diciembre de 2009, se ha efectuado lo siguiente:

- Recopilar el registro sísmico de la estación SAB4 para identificar los tipos de señales sísmicas registradas, conocer la diferencia de los tiempos de arribo de las ondas P y S ($T_{(S-P)}$), realizar el análisis frecuencial y obtener la energía de los sismos.
- Recopilar la data sísmica proveniente de todas las estaciones sísmicas y seleccionar los registros sísmicos de eventos locales grabados en 3 a más estaciones sísmicas.

En este sentido, se tomó como base las estaciones SAB2 y SAB4 debido a que ambas estaciones estuvieron ubicadas sobre el volcán Sabancaya (figura 3.4), motivo del presente estudio.

Identificación de señales sísmicas registradas en la estación SAB4

Para identificar los tipos de señales sísmicas registradas en la estación SAB4 en el periodo comprendido entre junio y diciembre de 2009, se utilizaron los programas de procesamiento y análisis

SAC (Seismic Analysis Code) de distribución libre y VOLCANALYSIS desarrollado por Lesage (2009).

Del análisis de la información sísmica, se identificaron 5 tipos de señales sísmicas:

- Señal de muy baja frecuencia
- Señales armónicas
- Señales sísmicas de alta frecuencia
- Otros tipos de señales
- Sismos tectónicos

Señales de muy baja frecuencia

La figura 3.6A muestra un ejemplo de este tipo de señales. Para la confección de este ejemplo, se consideró el registro continuo de 2 días correspondientes al 13 y 14 de septiembre 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 (figura 3.6B). Este tipo de señales estaría asociado a los efectos de la marea terrestre.

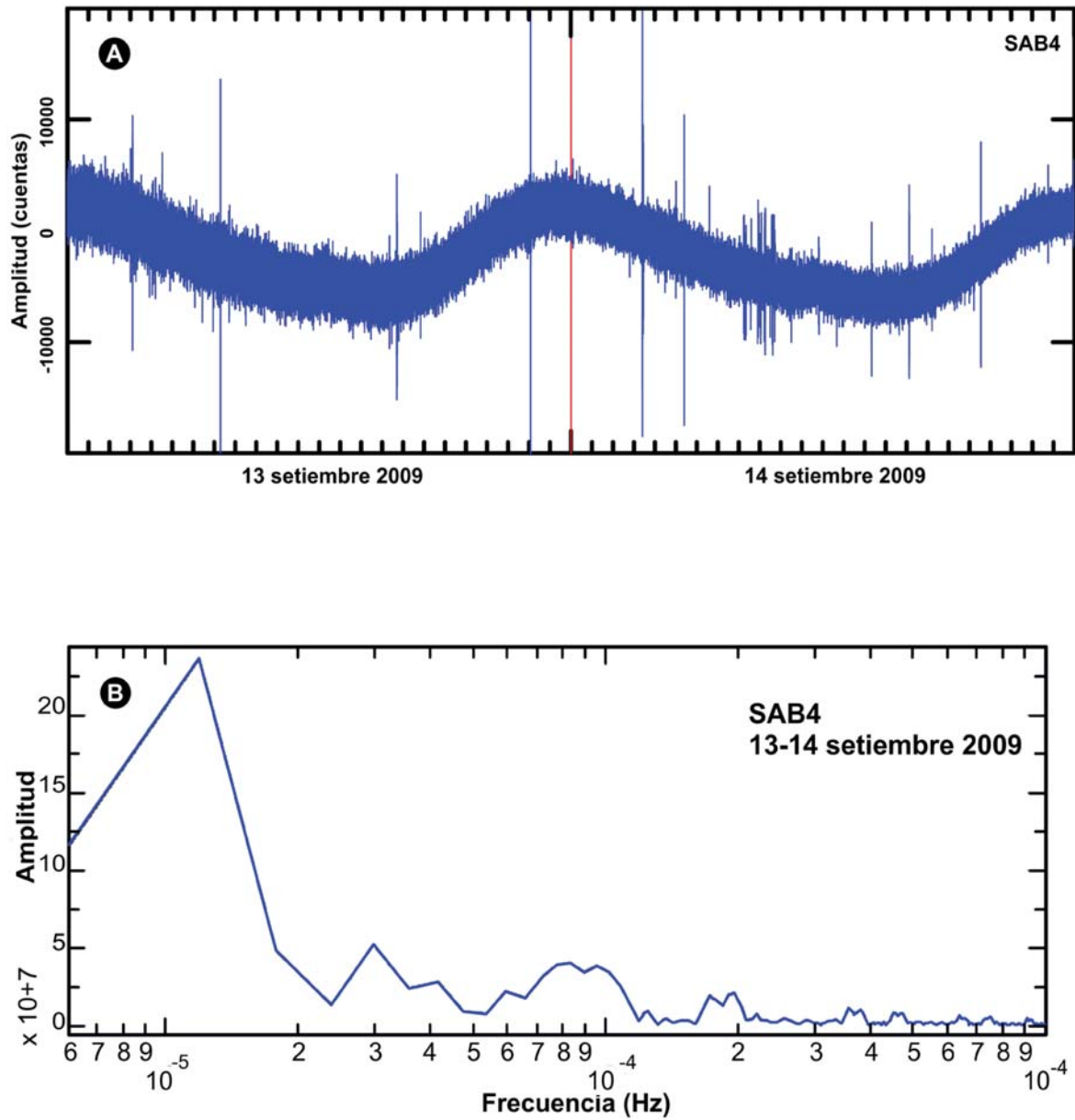


Figura 3.6 A) Ejemplo de onda de muy baja frecuencia. Esta señal está compuesta por los registros de la estación SAB4, los días 13 y 14 de septiembre de 2009; B) Espectro de frecuencias de la señal registrado los días 13 y 14 de septiembre de 2009.

Señales armónicas

Este tipo de señales se presentan a manera de tremores. Contienen varios trenes de ondas y no presentan fases claras (figura 3.7A). El espectrograma de frecuencias (figura 3.7B) muestra mayor predominio de frecuencias alrededor de 5 Hz, cerca de 90 s, y alrededor de 10 Hz durante 50 s, aproximadamente. Por otro lado, el espectro de frecuencias muestra dos bandas frecuenciales:

la primera banda principal comprendida entre 5 y 6 Hz con pico en 5.7 Hz, y la segunda banda secundaria entre 10 y 12 Hz con pico en 10.8 Hz. Asimismo, se observa que la duración de este tipo de señales es de 100 s, aproximadamente. Si bien no se ha podido determinar el origen de estas señales, probablemente se trate de señales de origen antrópico, puesto que se registraron en dos horarios: 12 y 17 horas, aproximadamente.

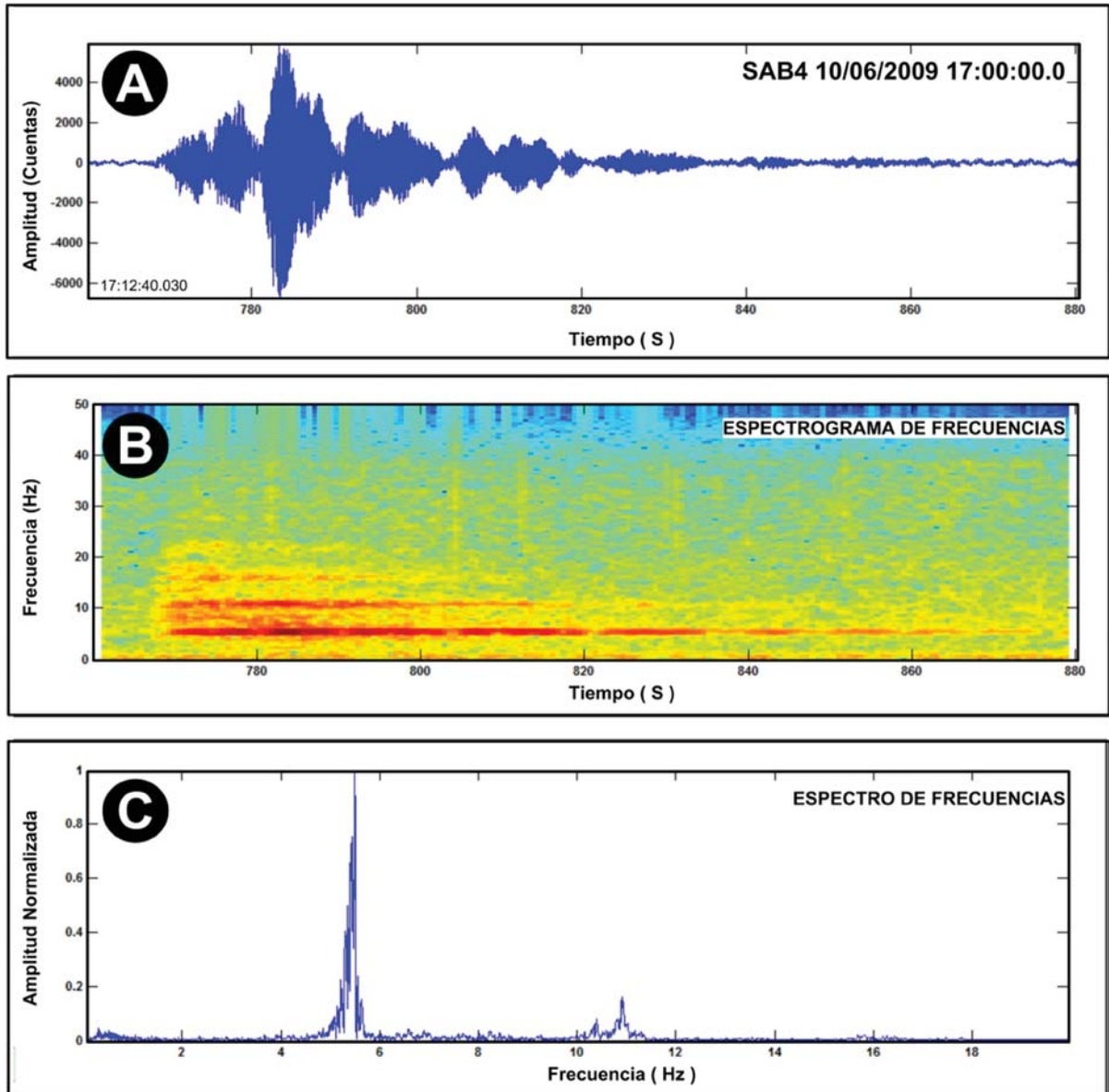


Figura 3.7 A) Ejemplo de ondas armónicas registradas en la estación SAB4 el 10 de junio de 2009, a las 17:12 GMT; B) Espectrograma de frecuencias.

Señales sísmicas de alta frecuencia

Este tipo de señales sísmicas se caracteriza por presentar gran amplitud, corta duración y, por supuesto, alta frecuencia.

El ejemplo de la figura 3.8A muestra una señal sísmica con $T_{(S-P)}$ de 0,25 s, una amplitud de $5E4$ cuentas. En la figura 3.8B se puede

apreciar que las frecuencias predominantes de esta señal (tonalidades en rojo) tienen una duración de 5 s. Por otro lado, el espectro de frecuencias muestra que esta señal está comprendida en dos bandas frecuenciales: la primera entre 5 y 24 Hz con pico en 13 Hz y la segunda entre 24 a 45 Hz con un pico en 31 Hz (figura 3.8C).

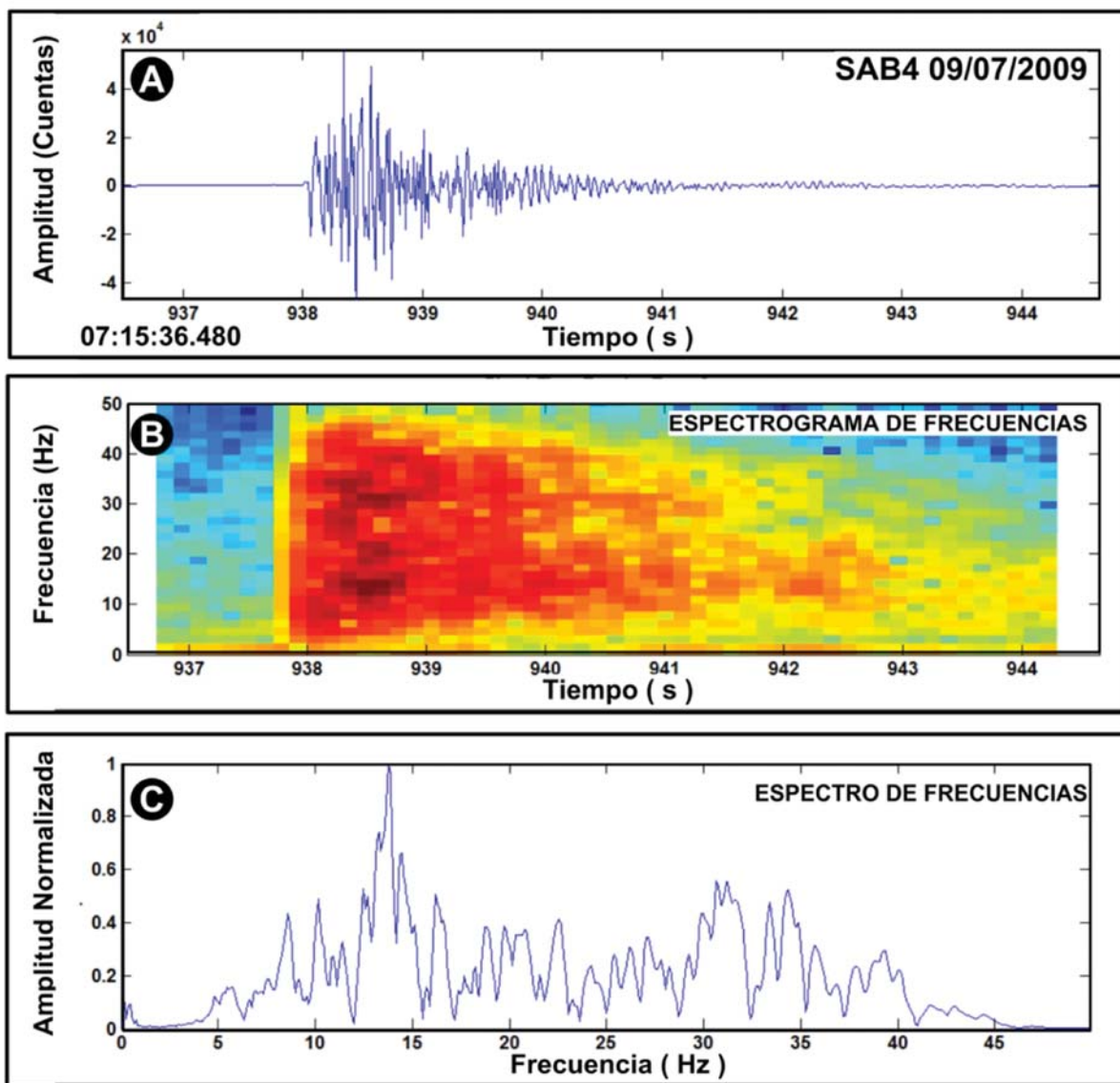


Figura 3.8 A) Ejemplo de señal sísmica de alta frecuencia registrada el 09 de julio de 2009, a las 07:15 GMT en la estación SAB4; B) Espectrograma; C) Espectro de frecuencias.

Otro tipo de señales

Este tipo de señales se manifiesta a manera de tremor disarmónico. Tiene un inicio emergente y larga duración. La figura 3.9A muestra una señal con más de 120 s de duración y una banda de frecuencias entre 0 y 8 Hz (figura 3.9B). Para efectos de comparación, en la figura 3.9C se muestra otro ejemplo de una señal sísmica asociada con el tránsito de un lahar registrado en el volcán Ubinas (Macedo et al., 2007) en una banda de frecuencia de 1 y 8 Hz (figura 3.9D).

Sismos tectónicos

La actividad sismo-tectónica registrada por la estación SAB4 de la RSTS se clasificó en función a la diferencia de tiempos de arribo de las ondas P y S ($T_{(S-P)}$). Para tal efecto, se ha considerado 5 escalas: $T_{(S-P)} < 2.5$ s; $2.6 < T_{(S-P)} < 5.0$ s; $5.1 < T_{(S-P)} < 10.0$ s; $10.1 < T_{(S-P)} < 20.0$ s y $T_{(S-P)} > 20.0$ s.

A fin de conocer el radio de la fuente sísmica de estos diferentes valores de $T_{(S-P)}$, respecto de la estación SAB4, se ha multiplicado por 5.2 km, que corresponde a la velocidad de la onda P en la primera capa del modelo de velocidad propuesto por Dorbath et al., (1991). En total, se han analizado 11 066 eventos.

- **Sismos con $T_{(S-P)} < 2.5$ s.** Esta escala cubre un área aproximada de 13 km alrededor de la estación SAB4. La figura 3.10A muestra el número de sismos por día con este rango de $T_{(S-P)}$. En total, se ha contabilizado 8999 señales sísmicas a razón de 155 sismos por día.
- **Sismos con $2.6 < T_{(S-P)} < 5.0$ s.** La zona cubierta por este rango de $T_{(S-P)}$ está comprendida entre los 13 y 26 km de radio con centro en la estación SAB4. La distribución sísmica diaria mostrada en la figura 3.10B evidencia una mayor actividad el 15 de agosto de 2009, con 195 sismos, de un total de 1638 sismos.
- **Sismos con $5.1 < T_{(S-P)} < 10.0$ s.** Con este rango de $T_{(S-P)}$ se cubre un área aproximada de 26 a 52 km alrededor de la estación SAB4. La figura 3.10C muestra mayor actividad sísmica durante los días 5 de julio y 15 de agosto de 2009, con registros de 27 sismos cada día. En total, se ha contabilizado 326 sismos a razón de 6 sismos por día.
- **Sismos con $10.1 < T_{(S-P)} < 20.0$ s.** La zona cubierta por este rango de $T_{(S-P)}$ está entre los 52 y 104 km alrededor de la estación SAB4. La sismicidad diaria (figura 3.10D) muestra mayor actividad sísmica los días 13 y 26 de junio de 2009 con 6 eventos cada día. En general, se ha contabilizado 64 sismos a razón de 1 evento sísmico por día.

- **Sismos con $T_{(S-P)} > 20.1$ s.** La zona comprendida por esta $T_{(S-P)}$ se encuentra por encima de los 104 km. En la figura 3.10E se observa que la mayor sismicidad para este rango se presentó los días 1 de julio y 12 de agosto de 2009, con 4 sismos cada día. En total, se han contabilizado 39 sismos a razón de 1 sismo por día.

Representación porcentual de la ocurrencia de sismos tectónicos

La representación porcentual de estos sismos tectónicos a diferentes escalas de $T_{(S-P)}$ aparece en el cuadro 3.2 y la figura 3.11; allí se observa que los mayores valores porcentuales corresponden a los rangos $T_{(S-P)} < 2.5$ s y $2.6 < T_{(S-P)} < 5.0$ s, con valores de 81.5 y 14.8 %, respectivamente; mientras que las 3 últimas escalas están por debajo del 3 %.

Para los fines de localización hipocentral, se ha considerado seleccionar, únicamente, los sismos registrados con $T_{(S-P)} < 2.5$ s y $2.6 < T_{(S-P)} < 5.0$ s; se les denominó sismos locales (L) debido a que estos rangos de $T_{(S-P)}$ corresponden, aproximadamente, a 26 km de radio con centro en la estación SAB4; por tanto, cubren azimutalmente la zona de interés de este estudio.

Cuadro 3.2
Escalas y porcentajes de sismos tectónicos.
Se consideraron 5 escalas de diferencias de tiempos de arribo de las ondas P y S, $T_{(S-P)}$.

Escala $T_{(S-P)}$ (s)	N° total de sismos	Porcentaje (%)
$T_{(S-P)} < 2.0$	8999	81.5
$2.6 < T_{(S-P)} < 5.0$	1638	14.8
$5.1 < T_{(S-P)} < 10.0$	326	2.9
$10.1 < T_{(S-P)} < 20.0$	64	0.6
$T_{(S-P)} > 20.1$	39	0.4

Distribución de la energía sísmica

La figura 3.12 muestra la distribución de la energía sísmica calculada para el periodo junio 2009 a febrero 2010 en la estación SAB4. En esta figura, se observan valores muy bajos de energía, menores a 1 Megajoules (<1 MJ). Debido a que no se cuenta con información de la energía sísmica en esta región, el nivel de 1 MJ se estableció como umbral de energía para efectos de comparación con futuros trabajos sismológicos que se realicen en el volcán Sabancaya y en sus alrededores.

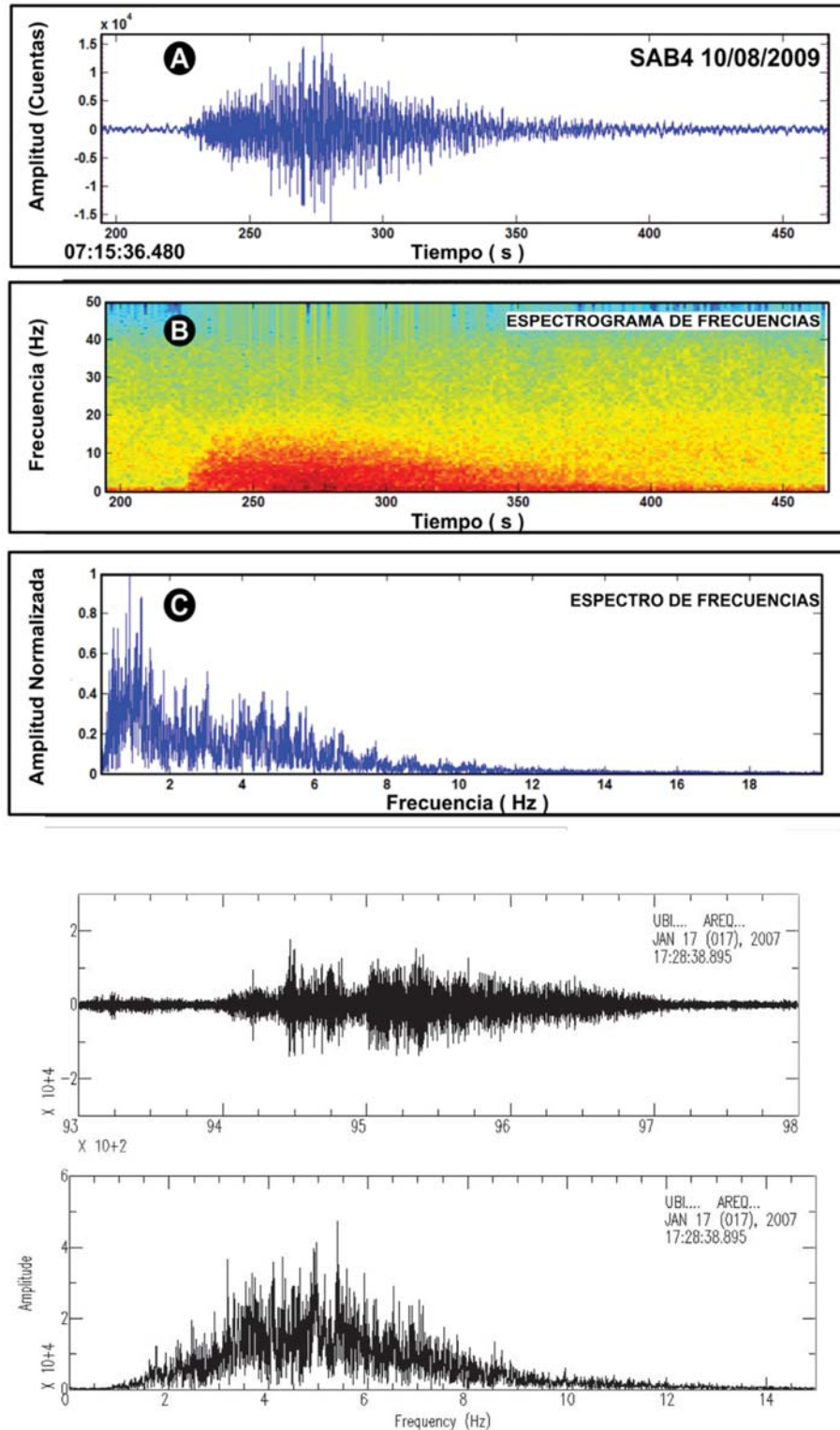


Figura 3.9 A) Ejemplo de una señal sísmica asociada a un lahar. Se registró en la estación SAB4 el 10 de agosto de 2009, a las 20:03 GMT; B) Espectro de frecuencias del lahar; C) Ejemplo de señal sísmica asociada al lahar del 18 de enero de 2007 (Macedo et al., 2007); y D) Su respectivo espectro de frecuencias.

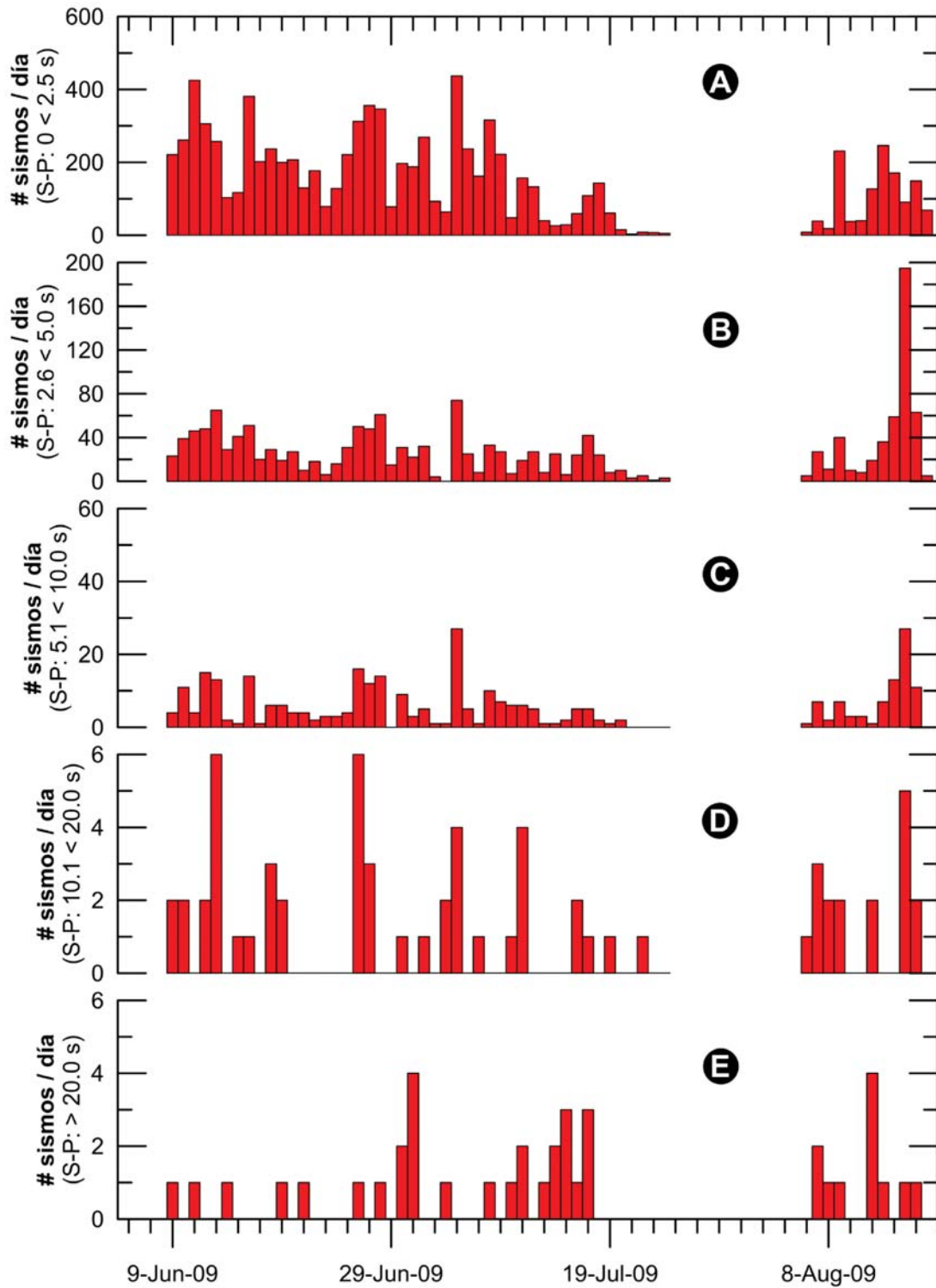


Figura 3.10 Distribución diaria de la sismicidad, según escalas de $T_{(S-P)}$ para el periodo junio-agosto de 2009, registrada por la estación SAB4. A) $T_{(S-P)} < 2.5$ s; B) $T_{(S-P)}$ entre 2.6 y 5.0 s; C) $T_{(S-P)}$ entre 5.1 s y 10.0 s; D) $T_{(S-P)}$ entre 10.1 y 20.0 s; E) $T_{(S-P)} > 20.0$ s.

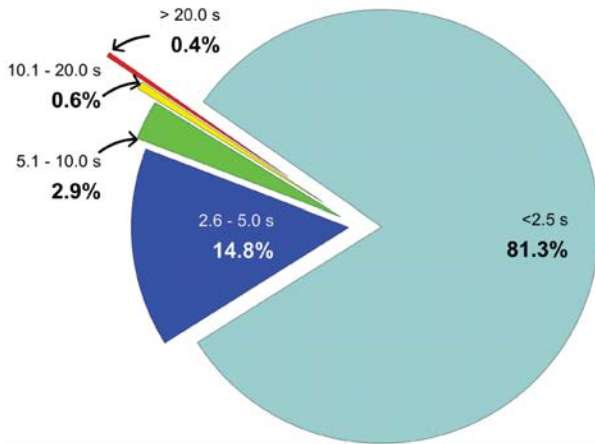


Figura 3.11 Representación porcentual de la sismicidad analizada en la estación SAB4, según escalas de $T_{(S-P)}$. El mayor porcentaje corresponde a sismos de $T_{(S-P)} < 2.5$ s.

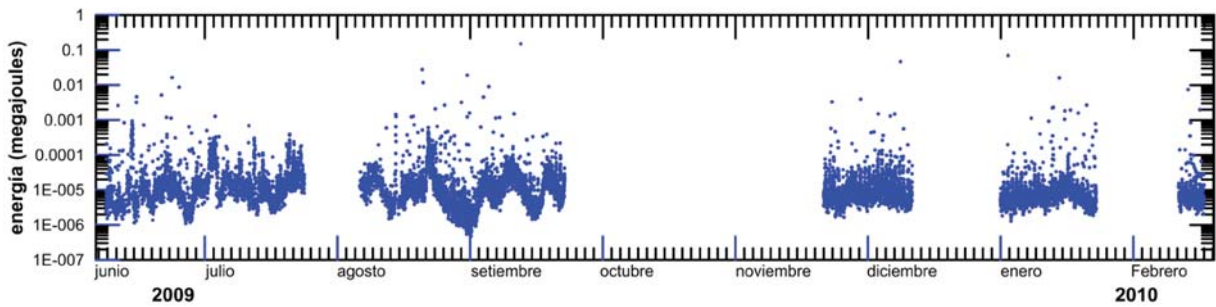


Figura 3.12 Distribución de la energía sísmica por ventanas de 10 s. Se hizo el cálculo a partir de la información sísmica registrada por la estación SAB4 de la RSTS.

LOCALIZACIÓN HIPOCENTRAL DE LOS SISMOS

Durante el período de operatividad de la RSTS, se registraron diversos tipos de sismos entre los que destacan los sismos tectónicos, tal como se observa en el cuadro 3.2 y figura 3.10. Sin embargo, para los fines de localización hipocentral se seleccionaron, únicamente, los sismos locales (L) registrados con diferencia de tiempos de arribo de las ondas $T_{(S-P)} < 5$ s que corresponde a las dos primeras escalas ($T_{(S-P)} < 2,5$ s y $2,6\text{ s} < T_{(S-P)} < 5,0$ s) descritas anteriormente; se tomó como referencia la estación SAB4. Una vez identificados estos sismos en la estación SAB4, se procedió a ubicarlos en las demás estaciones de la RSTS que estuvieron operativas, simultáneamente, durante el periodo mayo a julio de 2009 (figura 3.5).

Construcción de la base de datos

Del total de sismos identificados en la RSTS, se seleccionaron aquellos sismos registrados en 3 a más estaciones sísmicas. Así, se construyó la base de datos SAB1 compuesta por 150 sismos locales, cuya distribución en el tiempo está presentada en la figura 3.13. Tal como se observa en esta figura, el mayor número de eventos se registró el 15 de junio con hasta 19 sismos por día. En

cada uno de estos sismos se realizó la lectura de la duración total del evento sísmico (C) y los tiempos de arribo de la onda (Tp), con una precisión de 0.03 s, y la onda S (Ts), con una precisión de 0.07 s.

En la figura 3.14 se muestra un ejemplo de sismo local registrado el 13 de junio de 2009 a las 10:24 GMT, en 3 estaciones de la RSTS. P y S corresponden a los tiempos de arribo de las ondas y C (coda) es la marca del final del sismo.

Parámetros hipocentrales de los sismos

Para obtener los parámetros hipocentrales de los 150 sismos locales, se utilizó el programa de localización SEISAN versión 8.2.1 (Havskov and Ottemoller, 2009) y el apoyo del programa de localización Hypocenter (Lienert, 1996). Este programa utiliza como datos de entrada el nombre, coordenadas geográficas (latitud, longitud) y elevación de las estaciones sísmicas; la lectura de los tiempos de arribo de las ondas P y S, la duración total del sismo, una relación de velocidad $Vp/Vs=1,65$ (obtenido por Antayhua, 2002), el modelo de velocidad propuesto por Dorbath et al., (1991), mostrado en el cuadro 3.3, y la ecuación propuesta por Klein (1978) para el cálculo de la magnitud de duración (Md)

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

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

Cuadro 3.3

Modelo de velocidad obtenido por Dorbath et al., (1991). 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	5.2
15	6.2
30	6.8
50	8

Resultados numéricos de la localización hipocentral

Los resultados numéricos de la localización hipocentral de los 150 sismos locales (anexo 3.1), muestran que:

- Los errores de localización hipocentral (latitud, longitud y profundidad) son menores a 5 km, debido a que el mayor número de sismos se localiza fuera de la cobertura acimutal de RSTS.

- 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 ocurre a profundidades menores a 9 km, tal como se puede observar en el rectángulo de color amarillo de la figura 3.15. Los sismos que presentan el valor 0.0 refieren a la baja resolución en el cálculo de la profundidad hipocentral del sismo.
- En cuanto a la magnitud, estos sismos presentan magnitudes entre 0.4 y 2.9 Md. Son recurrentes los sismos con magnitudes entre 1.3 y 1.5 Md (figura 3.16).

DISTRIBUCIÓN DE LOS SISMOS EN SUPERFICIE Y EN PROFUNDIDAD

Distribución en superficie

En la figura 3.17A se presenta el mapa de la zona 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 figura, los epicentros se distribuyen principalmente en dirección norte-sur, hacia el volcán Hualca Hualca y el valle del Colca. El mayor número de dichos sismos se localiza sobre fallas normales con buzamiento hacia el sur, y en menor número se observa sobre el volcán Hualca Hualca y los volcanes Ampato y Sabancaya en dirección sureste.

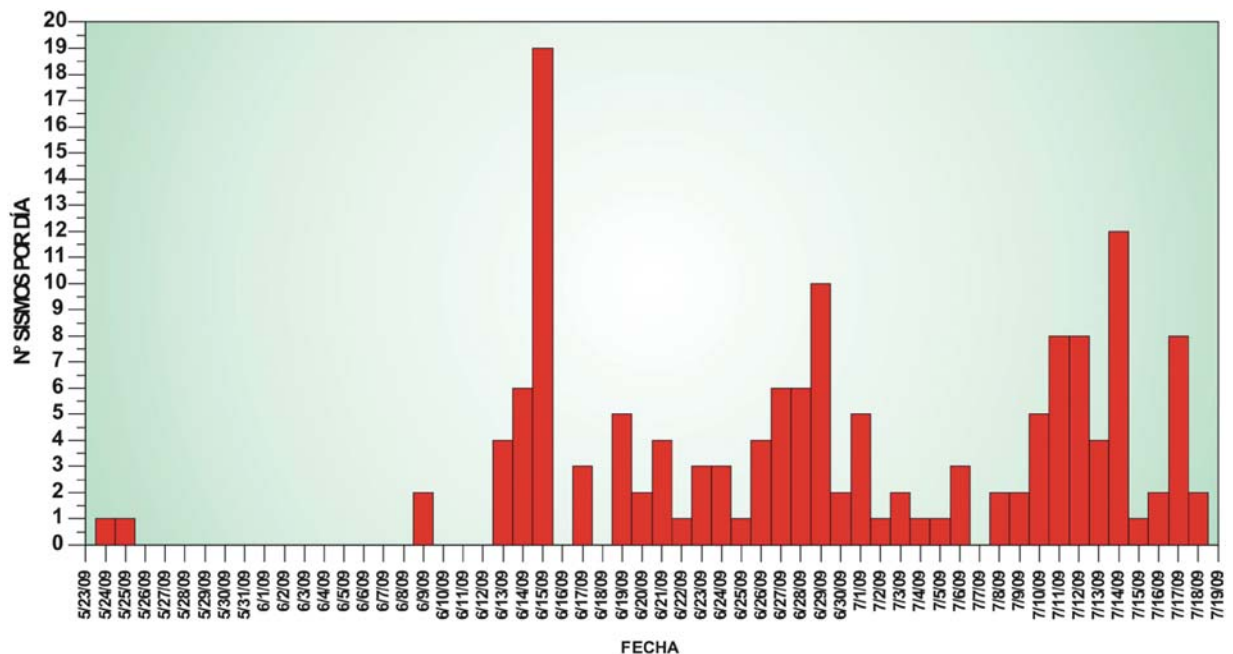


Figura 3.13 Número de sismos por día registrados en la base de datos del volcán Sabancaya (SAB1) durante el periodo mayo-julio de 2009.

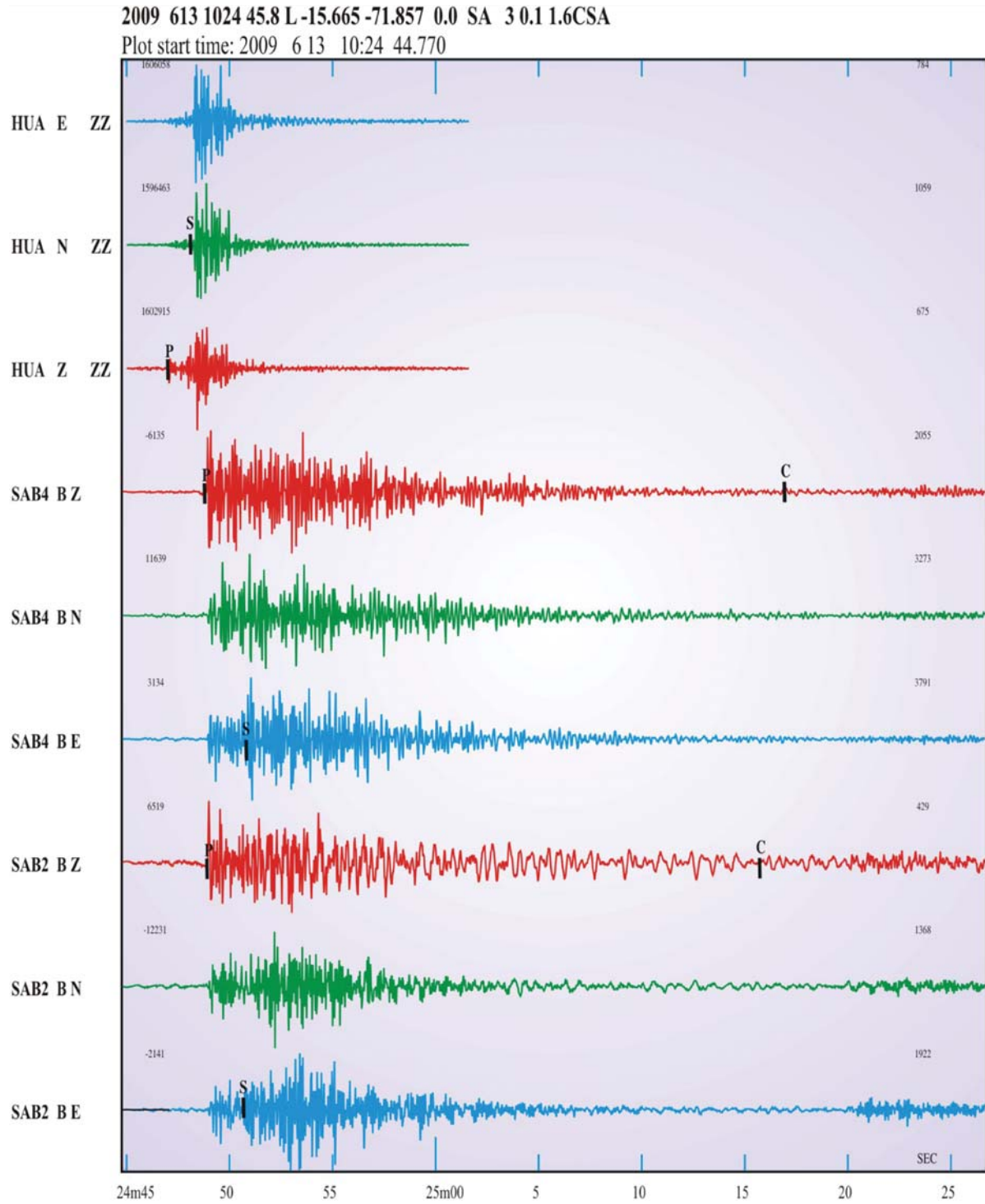


Figura 3.14 Ejemplo de sismo registrado el 13 de junio de 2009, a las 10:24 GMT, en las estaciones sísmicas Hualca Hualca (HUA), Sabancaya 4 (SAB4) y Sabancaya 2 (SAB2). BZ: componente vertical, BN y BE: componentes horizontales norte-sur y este-oeste.

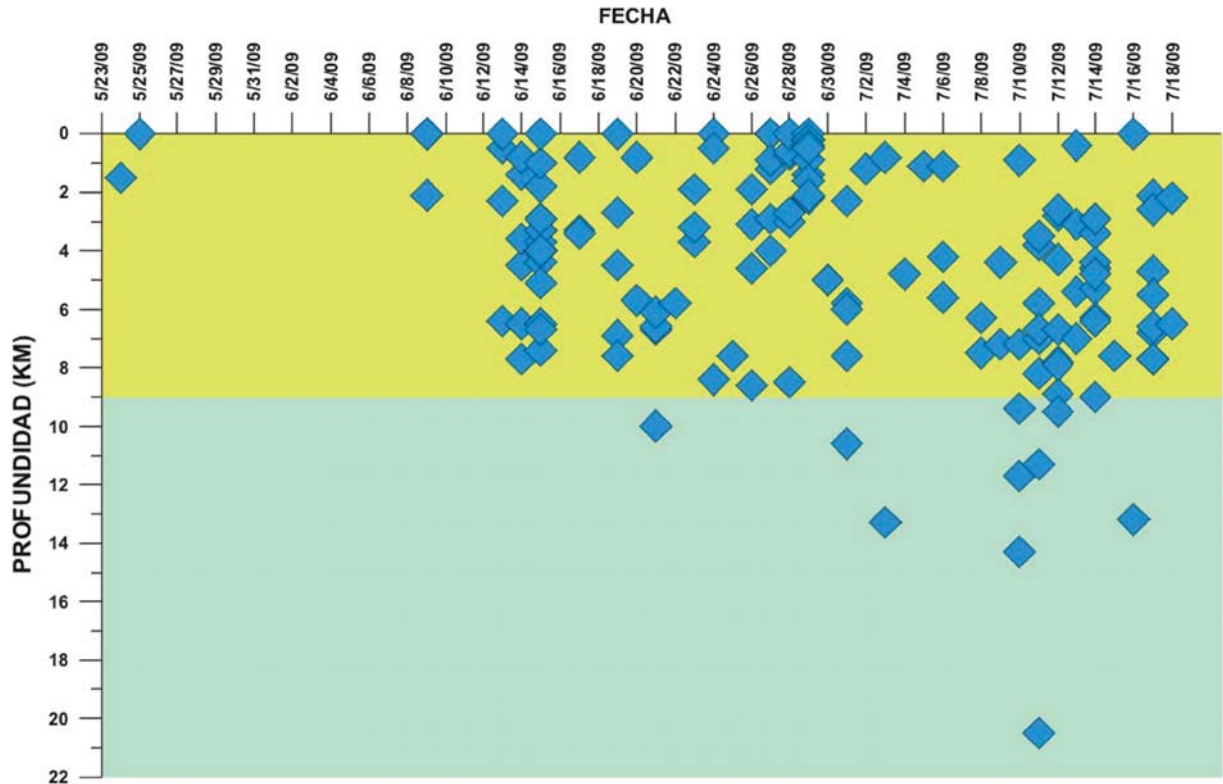
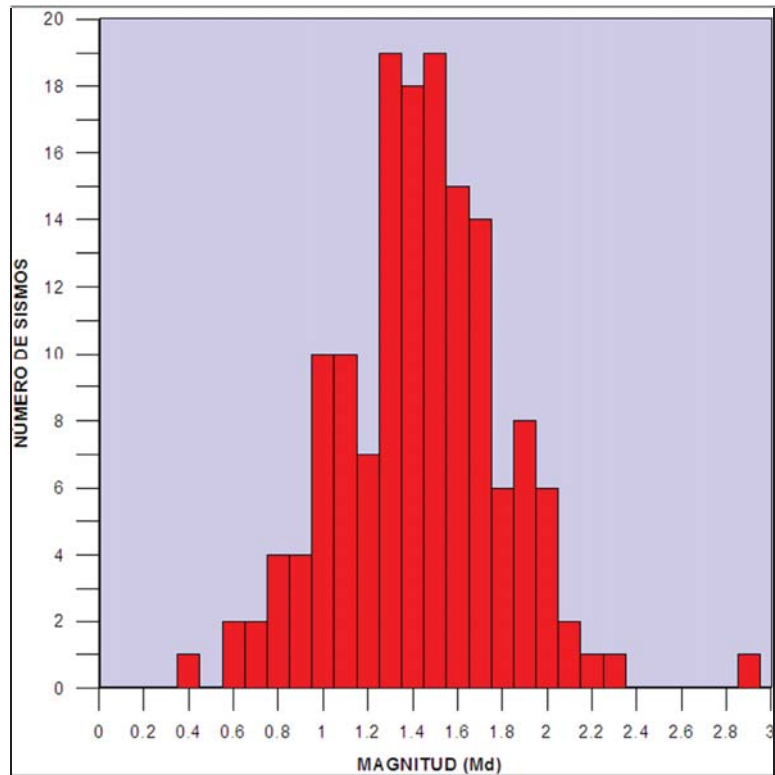


Figura 3.15 Distribución de los 150 sismos en profundidad vs periodo de monitoreo (mayo a julio de 2009). El rectángulo en color amarillo muestra que el mayor número de sismos ocurre a profundidades menores a 9 km.

Figura 3.16 Histograma que muestra la distribución de la magnitud Md de los 150 sismos registrados en la zona del volcán Sabancaya.



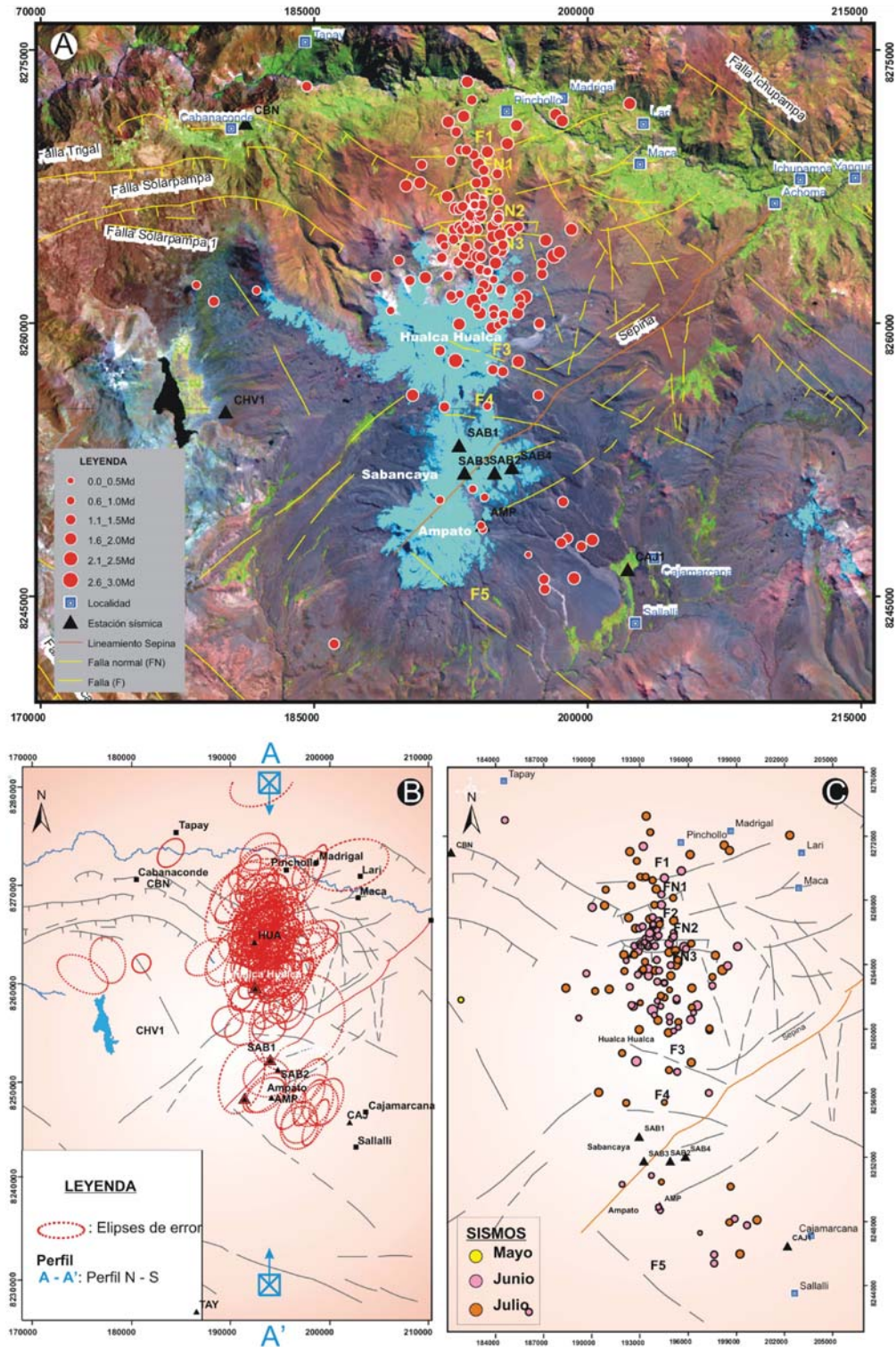


Figura 3.17 Distribución en superficie de los 150 sismos registrados y localizados en la región del volcán Sabancaya. Se consideró: A) Magnitud y B) Distribución durante los 3 meses de registro.

En la figura 3.17B se realiza una ampliación de la zona de mayor acumulación de la sismicidad registrada durante los meses de mayo, junio y julio; en esta figura 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 norte, noroeste y sur del volcán Hualca Hualca.

Distribución en profundidad

En la figura 3.18 se presenta la distribución de los sismos en profundidad. Durante el periodo de monitoreo, la profundidad hipocentral de los sismos varía entre 0 km y 9.0 km (recuadro en color azul) y solamente un sismo con una profundidad de 20.5 km, por debajo de las fallas F1, FN1, F2, FN2, FN3 y entre la falla FN3 y el volcán Hualca Hualca.

LA SISMICIDAD Y SU RELACIÓN CON LA TECTÓNICA LOCAL

Comparando los resultados de la localización hipocentral de la actividad sísmica registrada entre 1990 a 1994 (Lazo et al., 1991; Rodríguez & Huamán, 1992; Gonzáles et al., 1996; Antayhua, 2002) y los obtenidos durante el periodo mayo-julio de 2009 (Ramos & Antayhua, 2010), se observa que estos sismos se concentran principalmente al norte y noreste del volcán Sabancaya y mínimamente en la estructura volcánica del Sabancaya (figura 3.19A). En este contexto, la sismicidad que ocurre en la zona donde se ubica el Complejo Volcánico Ampato-Sabancaya-Hualca Hualca estaría asociada a procesos de deformación tectónica local relacionada a la activación y/o la reactivación de fallas y lineamientos.

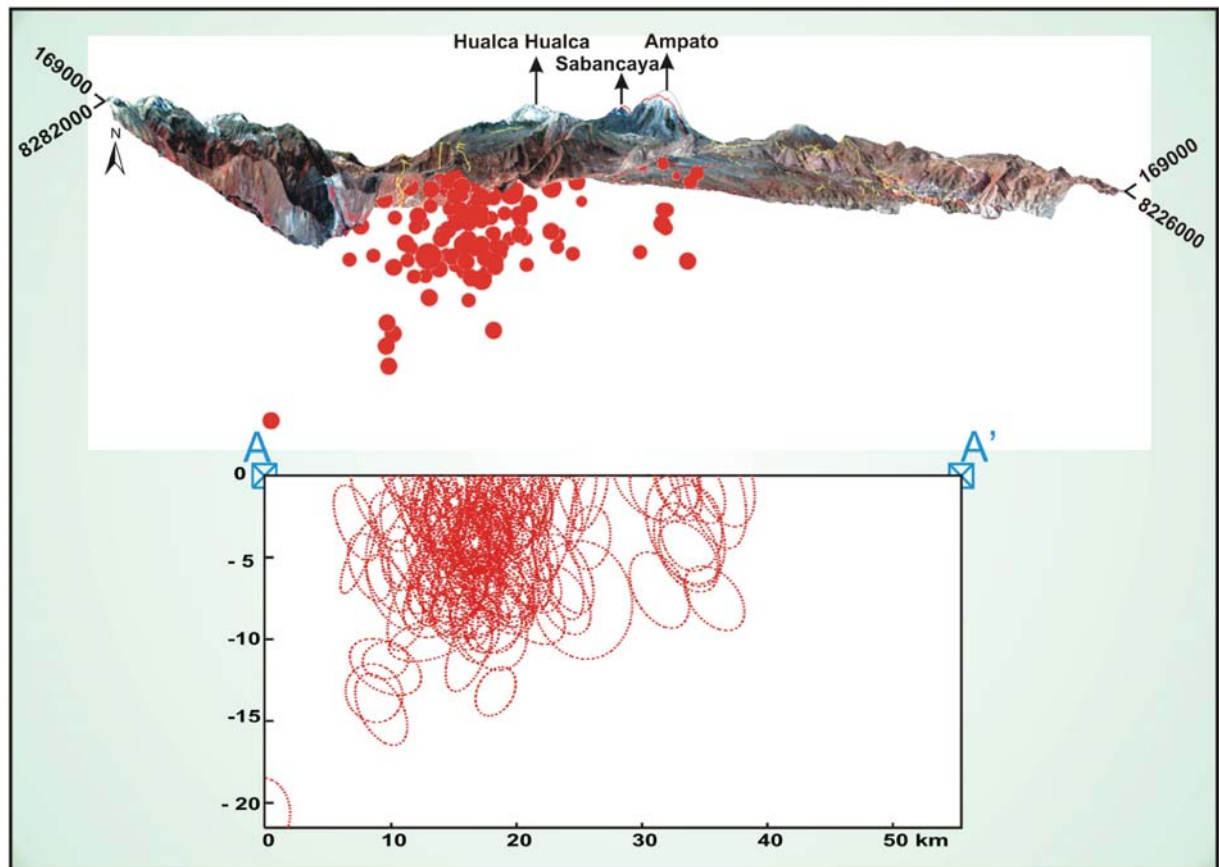


Figura 3.18 Distribución en profundidad de los 150 sismos localizados en la zona del volcán Sabancaya con sus respectivas elipses de error. El mayor número de sismos se localiza a profundidades menores a 9 km.

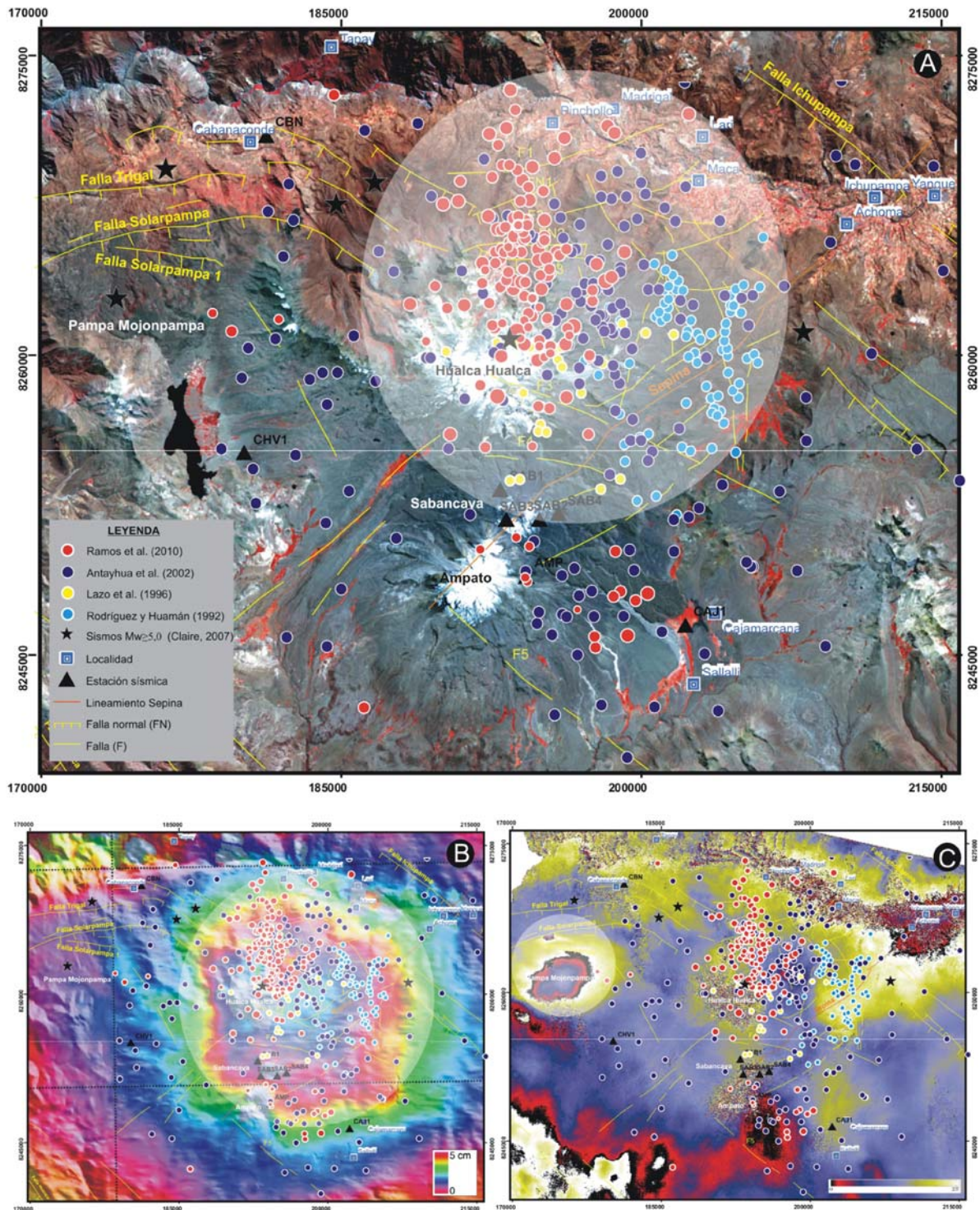


Figura 3.19 A) Distribución de la sismicidad registrada en la zona del volcán Sabancaya durante el periodo 1990-1994 y 2009; B) Interferograma calculado por Pritchard (2003) correspondiente al periodo 1997-1999. La sismicidad se concentra en la anomalía de deformación; C) Interferograma calculado por González et al., (2009). Se observan dos anomalías de deformación fuera de la zona de sismicidad. La anomalía mayor se localiza en la pampa Mojonpampa y otra menor entre las fallas Solarpampa y Solarpampa 1. Los círculos en transparencia muestran las zonas de mayor actividad sísmica y anomalías de deformación.

En la figura 3.19B se muestra el interferograma de deformación obtenido por Pritchard (2003). Los resultados muestran una anomalía de deformación al noreste del volcán Hualca Hualca, posiblemente asociado al flujo de agua en el subsuelo inducido por el sismo de Arequipa (23 de junio de 2001, Mw=8.4) o posiblemente a la actividad sísmica local, la cual podría ser corroborada por Lazo et al., 1996 (sismos localizados al noreste del volcán Hualca Hualca); esta deformación habría sido de aproximadamente 2 cm/año durante los años 1992 y 1997, deformación aparente que no tendría su origen en una fuente profunda después de 1997. Sin embargo, al sobreponer la sismicidad registrada desde el año 1990 hasta el 2009, en el interferograma obtenido por Pritchard (2003), parecería que la deformación involucra a toda la zona volcánica.

Asimismo, en la figura 3.19C se presentan los resultados de deformación mediante InSAR obtenidos por Gonzales et al., (2009).

De acuerdo a lo observado en la figura, se muestran 2 anomalías de deformación por subsidencia: la primera ubicada en un área extensa denominada Mojonpampa; esta limita hacia el norte por una serie de lineamientos, los cuales corresponden a fallas normales conocidas como fallas Solarpampa y Solarpampa-1, que pertenecen al sistema de fallas normales Huambo-Cabaconde de orientación este-oeste y de buzamiento hacia el sur (Sébrier et al., 1985; Huamán, 1995). Una pequeña anomalía se encuentra entre los límites de las fallas Solarpampa al norte y Solarpampa-1 al sur. De acuerdo a los autores, esta subsidencia habría sido producida por sismos de magnitudes $M_b > 4$, ocurridos entre el 13 y 14 de diciembre de 2002, los mismos que se habrían producido por esfuerzos extensivos que actúan en dirección norte-sur. Como se muestra en la figura 3.19C, no se observa que la sismicidad registrada entre 1990 a 2009 se sobrepongan sobre las dos anomalías detectadas por Gonzales et al., (2009).

CAPÍTULO IV

MONITOREO DEL VOLCÁN HUAYNAPUTINA (2010)

ANTECEDENTES

Entre el 19 de febrero y el 6 de marzo de 1600 d.C., el volcán Huaynaputina presentó una de las erupciones más grandes registradas en tiempos históricos en los Andes centrales y tuvo un Índice de Explosividad Volcánica de 6 (IEV 6) (Thouret et al., 1999, 2002; De Silva & Zielinski, 1998). El material expulsado por esta erupción fue de ~11 km³ de magma (Adams et al., 2001). Como consecuencia de esta erupción, se registraron más de 1500 fallecidos, más de 10 poblados sepultados y pérdidas considerables en la agricultura y la ganadería. Los depósitos de esta erupción también afectaron la infraestructura y la economía a nivel regional; Arequipa y Moquegua fueron las ciudades más afectadas. A nivel global, las cenizas y aerosoles suspendidos en la alta atmósfera como consecuencia de esta erupción alcanzaron hasta los países de Bolivia y Chile (De Silva et al., 2000); además, afectaron la temperatura del planeta y ocasionaron en el hemisferio norte uno de los veranos más fríos de los últimos seis siglos (De Silva & Zielinski, 1998; Thamban et al., 2006).

A pesar de los estragos económicos provocados por la erupción del Huaynaputina en el año 1600 d.C. (ampliamente detallados por De Silva et al., 2000), en este volcán no se han realizado estudios de caracterización o instalación de equipos de monitoreo para conocer su estado actual. Es así que la Municipalidad Provincial General Sánchez Cerro – MPGSC, con Oficio N° 095-2010-A/MPGSC-O del 24 de febrero de 2010, solicitó al INGEMMET realizar el monitoreo sísmico temporal, debido a la preocupación generalizada de los habitantes próximos al volcán Huaynaputina, quienes manifestaron haber escuchado ruidos y sentido sismos de regular intensidad que podrían estar relacionados con una posible reactivación del volcán.

Trabajo de campo y logística

El trabajo de campo y logística se desarrolló en coordinación con el secretario técnico de Defensa Civil de la Municipalidad Provincial General Sánchez Cerro - MPGSC, Lic. José Peralta. En este estudio se consideró realizar el monitoreo sísmico temporal del volcán y la caracterización geoquímica de fumarolas y fuentes de agua termales. Con este fin se efectuaron 6 comisiones de campo que consistían entre 6 y 7 días de trabajo:

- Primera comisión (15-25 de abril de 2010): Instalación de la Red Sísmica Temporal del Huaynaputina (RSTH)
- Segunda comisión (14-21 de mayo de 2010): Recuperación de los datos sísmicos, conformación de una base de datos, muestreo de fumarolas y fuentes de agua termales, instalación de la estación de medición de temperatura de las fumarolas.
- Tercera comisión (21-26 de junio de 2010): Recuperación de los datos sísmicos y actualización de la base de datos.
- Cuarta comisión (9-14 de agosto de 2010): Recuperación de los datos sísmicos y actualización de la base de datos.
- Quinta comisión (13-18 de septiembre de 2010): Recuperación de los datos sísmicos y actualización de base de datos.
- Sexta comisión (25-30 de octubre de 2010): Recuperación de los datos sísmicos y actualización de la base de datos. Recuperación de las estaciones que conformaron la RSTH.

MONITOREO SÍSMICO

SISMICIDAD HISTÓRICA Y TECTÓNICA LOCAL

En base a las crónicas y relatos históricos, la erupción del volcán Huaynaputina en el 1600 d.C. estuvo acompañada de numerosos sismos sentidos a nivel local y regional, algunos de los cuales aparecen en el catálogo de CERESIS (1985). Los sismos habrían ocurrido entre el 14 de febrero y los primeros días de marzo de 1600; sin embargo, los sismos más grandes sentidos a nivel regional ocurrieron los días 18, 19, 20 y 28 de febrero de 1600, a profundidades menores de 20 km (cuadro 4.1, figura 4.1A).

La información recopilada por el CERESIS (1985) y analizada por Lavallée et al. (2009) muestra que numerosos sismos superficiales en zonas del Grupo Volcánico Ubinas-Huaynaputina-Ticsani UHTVG, denominado así por Lavallée et al. (2006), han sido recurrentes en el tiempo, pues se han registrado hasta 38 sismos entre 1945 y 2006. Estos sismos estarían relacionados a sistemas de fallas regionales, locales y, en menor número, a la actividad netamente volcánica.

El análisis estructural realizado por Lavallée et al. (2006, 2009), a escala regional y local, mediante imágenes satelitales Landsat, trabajos de campo *in situ* y la información obtenida de los cuadrángulos de Omate e Ichuña (García, 1978; Marocco & Del Pino, 1966) muestran que en el volcán Huaynaputina existen cuatro sistemas de fallas y lineamientos importantes, orientados en dirección (1) norte-sur, (2) noroeste-suroeste, (3) este-oeste y (4) noroeste-sureste (figura 4.1A). Los dos primeros sistemas están asociados al graben del río Tambo, el tercero es minoritario, y el cuarto consiste de una serie de fallas de rumbo, paralelos a la ZVC. La longitud de estas fallas de rumbo varía entre 2-3 km hasta 25 km. Las observaciones realizadas en la caldera del volcán Huaynaputina y sus alrededores muestran la influencia de las fracturas NO-SE y E-O en el emplazamiento de un domo, diques y la localización de los 3 cráteres en el anfiteatro del volcán (figura 4.1B).

LA RED SÍSMICA TEMPORAL DEL HUAYNAPUTINA (RSTH)

La Red Sísmica Temporal del volcán Huaynaputina (RSTH) estuvo compuesta por 6 sismómetros digitales, 2 de banda ancha (marca Guralp) y 4 de periodo corto (marca Sara).

Esta red sísmica se instaló el 15 de abril y estuvo en funcionamiento hasta el 27 de octubre de 2010. La RSTH, compuesta por 6 estaciones sísmicas (HNA1, HNA2, HNA3, HNA4, HNA5, HNA6), estuvo instalada en el anfiteatro y dentro del cráter del volcán.

El cuadro 4.2 muestra las coordenadas de cada una de las estaciones que conformaron la RSTH, así como el tipo de sensor y su respectiva codificación. En la figura 4.2 se muestra la ubicación geográfica de la RSTH.

Cuadro 4.1
Parámetros hipocentrales de los sismos registrados en 1600 d.C. recopilados por CERESIS (1985).
Cuadro modificado por Lavallée et al. (2009). AA/MM/DD: año/mes/día; la hora origen (GMT)
HH:MM: en hora y minuto; Prof.: profundidad en kilómetros

N.º sismo	Fecha	Hora Origen (GMT)	Coordenadas UTM		Prof. aprox.
	AA/MM/DD	HH:MM	N	E	(km)
1	1600/02/14	02:00	8 152 765 443	308 073 423	6
2	1600/02/19	02:00	8 152 765 443	308 073 423	6
3	1600/02/19	10:00	8 145 251 860	335 862 199	20
4	1600/02/19	16:00	8 152 765 443	308 073 423	6
5	1600/02/19	22:00	8 152 765 443	308 073 423	6
6	1600/02/20	02:00	8 152 765 443	308 073 423	---
7	1600/02/28	20	8 163 832 161	307 973 773	20

Cuadro 4.2
Coordenadas del emplazamiento de las estaciones sísmicas de la RSTH

Estación	Coordenadas UTM-WGS84		Altura	Tipo de sismógrafo
	N	E	(msnm)	
HPN1	8161234	303177	4650	Sara
HPN2	8161047	302686	4672	Sara
HPN3	8161452	301461	4652	Sara
HPN4	8162547	301494	4692	Guralp
HPN5	8162207	302644	4235	Guralp
HPN6	8162752	301732	4701	Sara

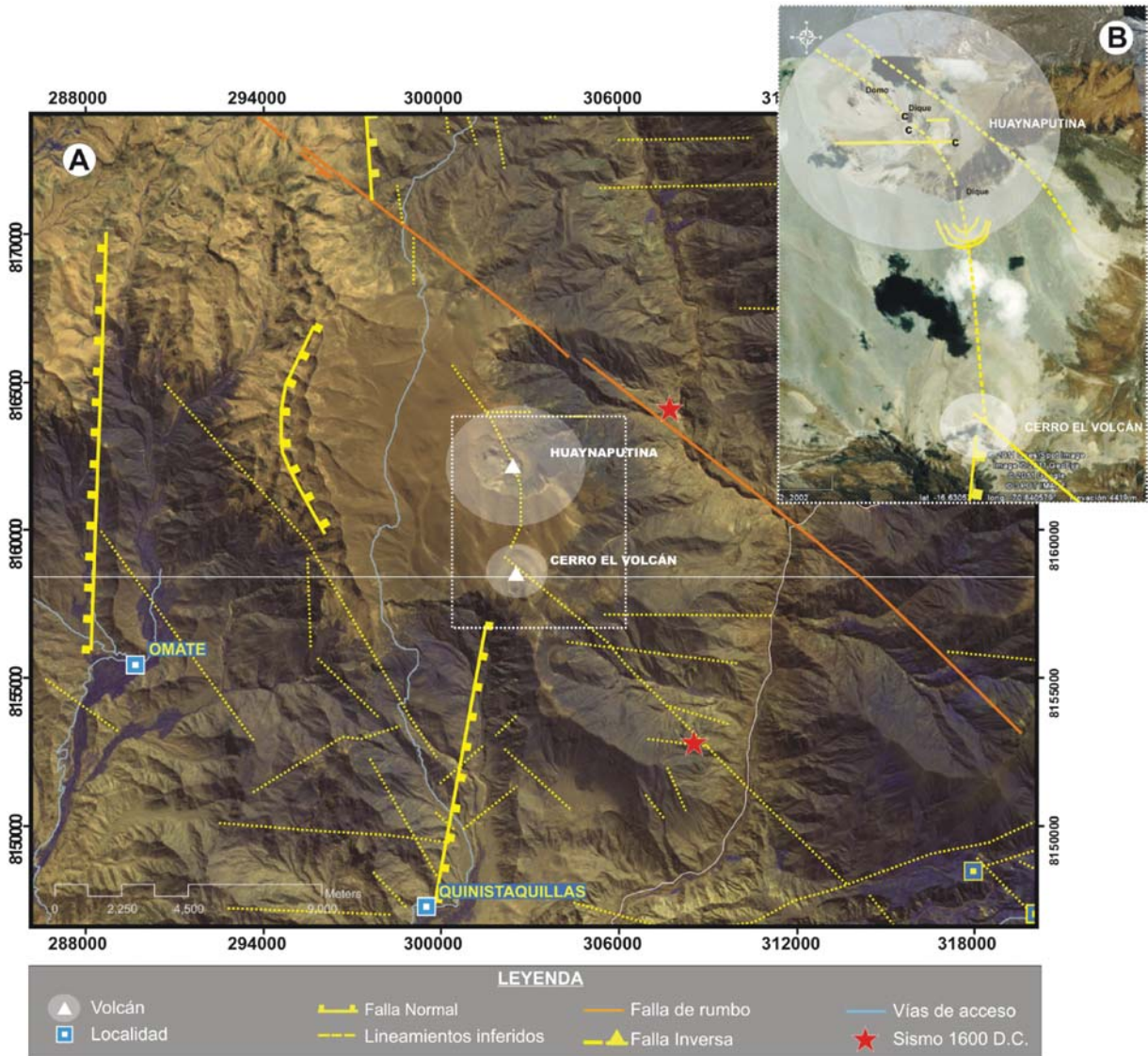


Figura 4.1 A) Distribución de los principales sistemas de fallas y lineamientos identificados en la zona del volcán Huaynaputina; B) Estructuras identificadas en el anfiteatro del volcán Huaynaputina; C: Cráteres (Modificado de Lavallée et al., 2006, 2009).

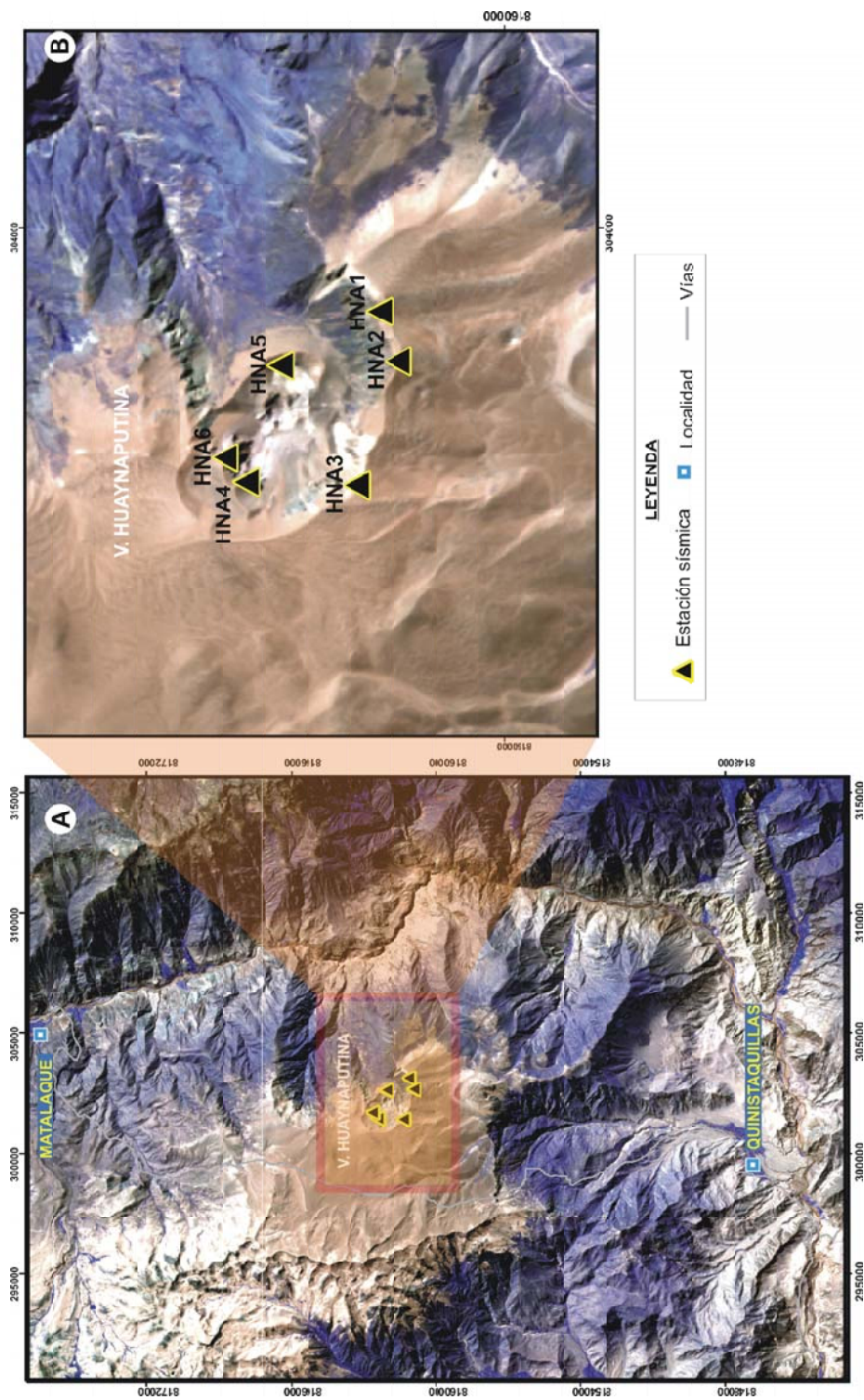


Figura 4.2 Distribución geográfica de las estaciones sísmicas que conforman la Red Sísmica Temporal del volcán Huaynaputina (RSTH). Estas estaciones se emplazaron alrededor y dentro del anfiteatro.

Operatividad de la RSTH

La figura 4.3 muestra el periodo de operatividad de la RSTH. En esta figura se observa que la estación HNA1 estuvo operativa durante todo el periodo de monitoreo, aunque con problemas de sincronización del tiempo hasta los primeros días de septiembre.

Otros problemas de carácter electrónico se presentaron también en las estaciones HNA3, HNA4 y HNA5, los cuales fueron resueltos parcialmente.

PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS

En gabinete, se realizó el procesamiento y análisis de datos sísmicos, así como la elaboración de cuadros estadísticos para conocer la recurrencia de la sismicidad del Huaynaputina.

El análisis se realizó en los dominios del tiempo y de la frecuencia. Para este fin, se empleó una versión modificada del programa VOLCANALYSIS (Lesage, 2009) y se ha revisado un total de 3922 archivos de una hora de duración, correspondiente a las estaciones sísmicas HNA4 y HNA5.

Análisis en el dominio del tiempo

Para analizar las señales sísmicas en el dominio del tiempo, se graficó la amplitud de la onda sísmica vs el tiempo de registro, se identificaron las señales sísmicas, las ondas primarias (fase P), ondas secundarias (fase S) y la coda sísmica (C). La figura. 4.4

muestra un ejemplo de la secuencia de identificación y marcado de fases sísmicas en el dominio del tiempo.

Análisis en el dominio de las frecuencias

Para efectuar este análisis, se transforma la onda sísmica del dominio del tiempo (figura 4.5A) al dominio de las frecuencias, utilizando el algoritmo matemático denominado Transformada Rápida de Fourier (Fast Fourier Transform – FFT). El resultado es graficado en una relación amplitud vs frecuencia. En esta figura, se identifica la Frecuencia inicial (Fi), Frecuencia pico (Fp) y la Frecuencia final (Ff) de cada señal sísmica analizada (figura 4.5B). También se efectúan cálculos de frecuencias para ventanas pequeñas de menos de 1 segundo. Este resultado, al graficarse en función del tiempo, genera espectrogramas (figura 4.5C) que permiten estimar la variación de las frecuencias conforme se produce la señal sísmica.

Estimación de la energía

Con la finalidad de establecer una línea de comparación de la energía sísmica emitida por el volcán Huaynaputina en este periodo de monitoreo sísmico temporal (12 de mayo al 27 de octubre de 2010) con futuras campañas sísmicas, se ha efectuado la estimación de la energía emitida por este volcán. Para tal propósito, se recopiló la información sísmica registrada en la componente vertical (Z) de la estación HNA4. Debido a la inoperatividad de esta estación en algunos periodos de tiempo (figura 4.3), los vacíos fueron cubiertos con datos de la estación HNA5 (figura 4.6).

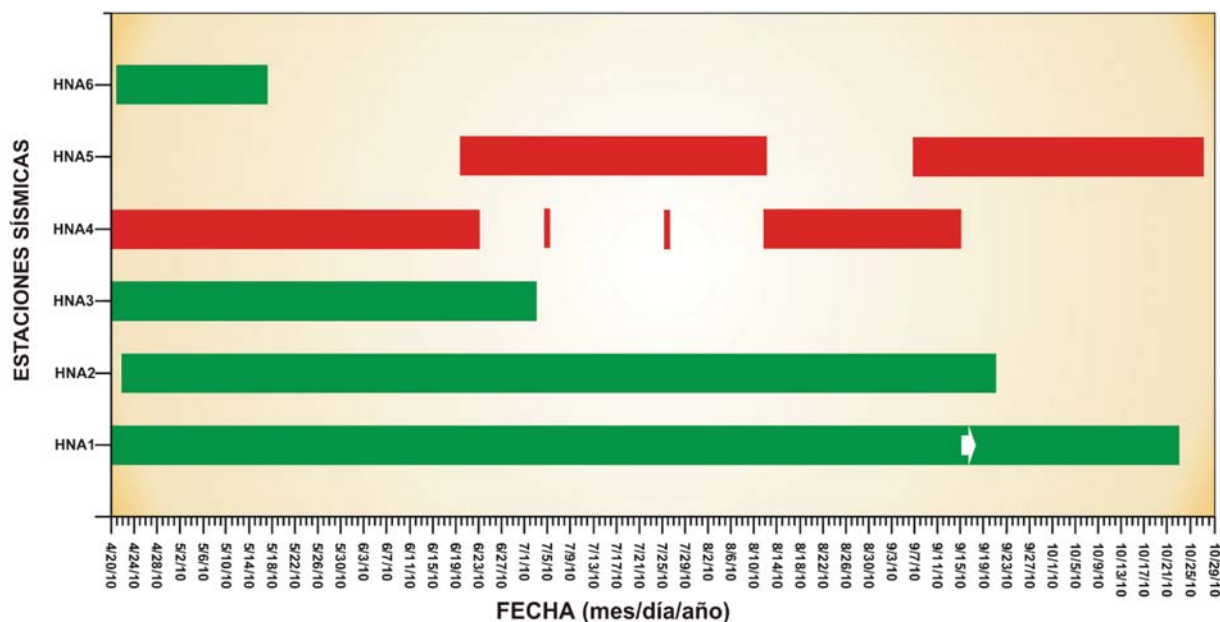


Figura 4.3 Operatividad de las estaciones sísmicas que conformaron la RSTH. Los rectángulos en color rojo representan a las estaciones de banda ancha Guralp y en color verde a las de periodo corto Sara.

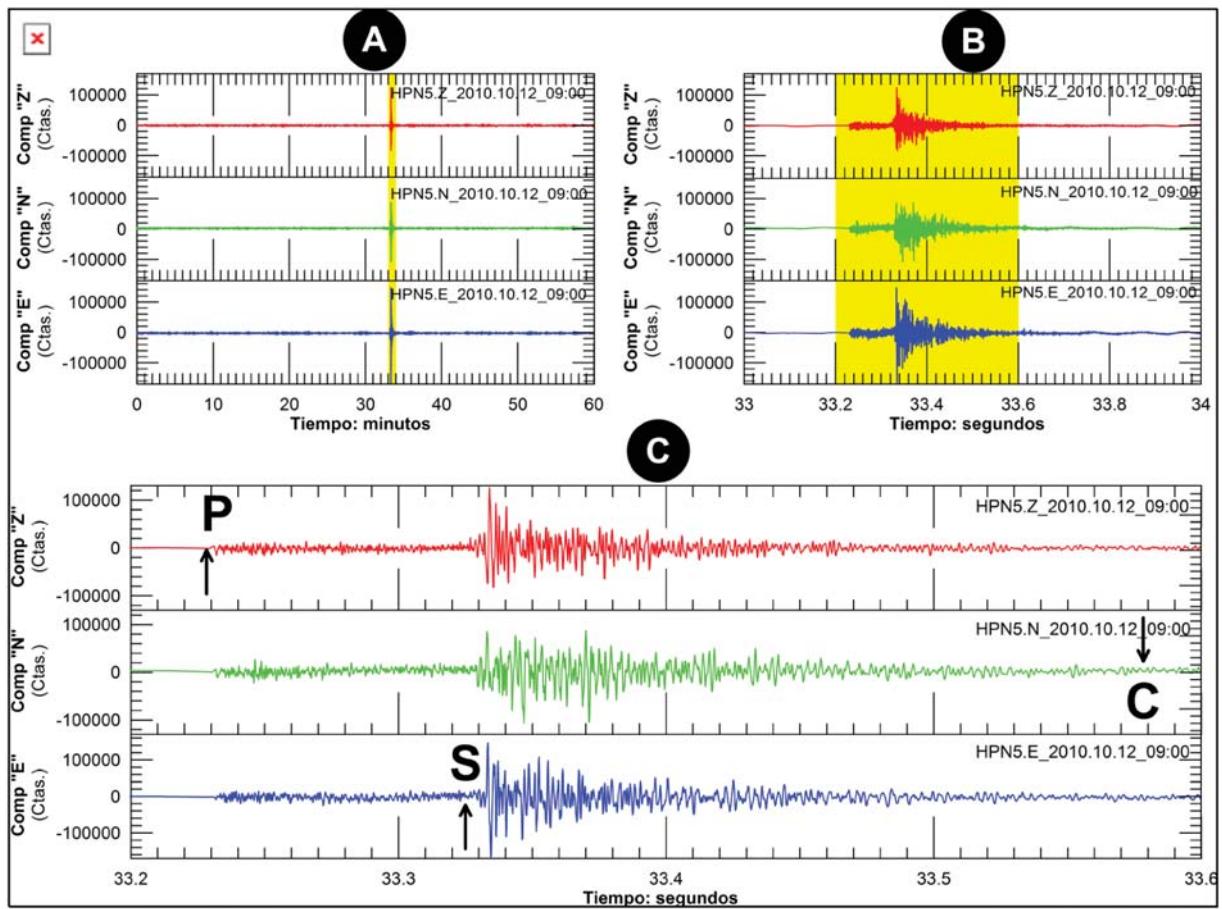


Figura 4.4 Secuencia de identificación y marcado de fases sísmicas: A) sismograma de 60 minutos de duración; B) Zoom e identificación de evento sísmico; C) Identificación y marcado de fases primaria (P), secundaria (S) y coda sísmica (C).

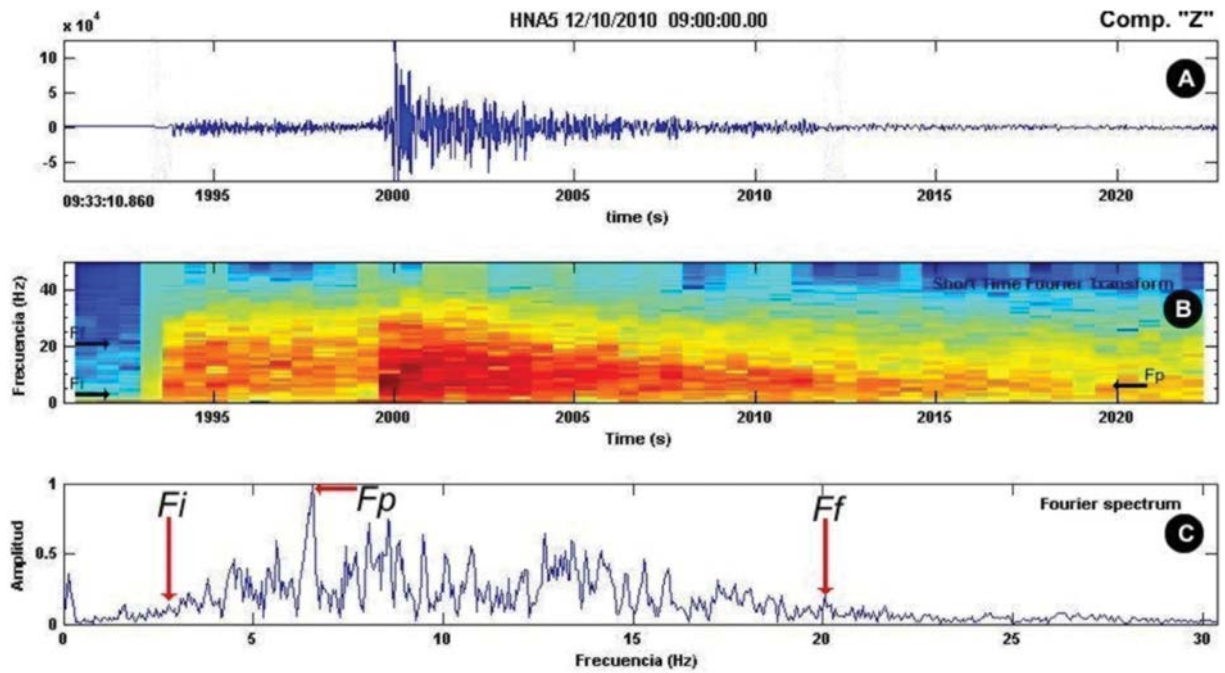


Figura 4.5 Ejemplo de identificación de frecuencias (F_i , F_p y F_f). A) Gráfico de la señal sísmica en el dominio del tiempo; B) Espectrograma de frecuencias; C) Espectro en el dominio de las frecuencias.

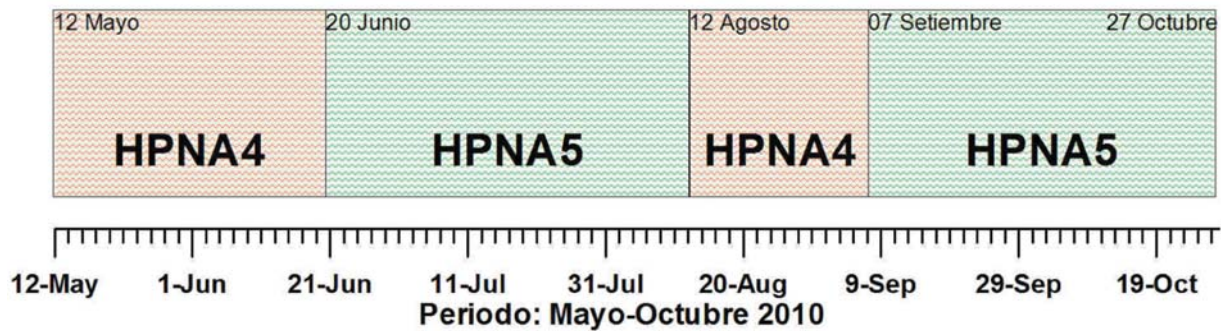


Figura 4.6 Periodo de registro de las estaciones HNA4 y HNA5 que fueron empleadas para el cálculo de energía y energía acumulada.

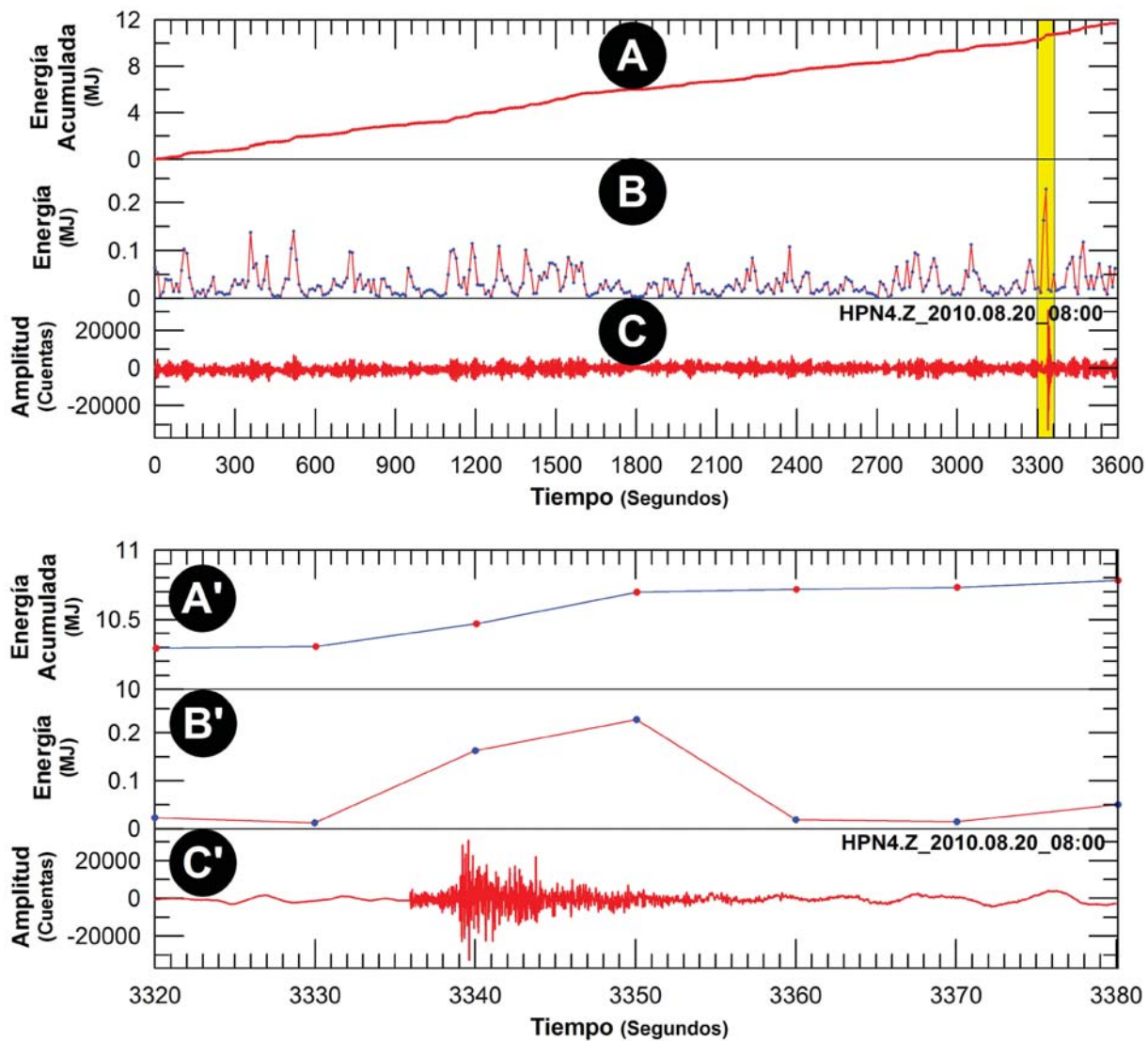


Figura 4.7 Ejemplo de estimación de la energía sísmica de un archivo del 20 de agosto de 2010, registrada en la estación HNA4, a las 08:00 GMT. A) Energía sísmica acumulada; B) Energía sísmica por ventanas de 10 segundos; C) Sismograma de 3600 segundos (1 hora). A') Energía sísmica acumulada del zoom; B') Energía sísmica por ventanas de 10 s; C') Zoom a 60 segundos del sismograma.

Para la estimación de la energía, se empleó la ecuación descrita por Boatwright (1980) y el programa confeccionado y compilado bajo plataforma Fortran 77 por Metaxián y modificado por Ramos & Antayhua (2010). La figura 4.7 muestra un ejemplo de la estimación de la energía y energía acumulada de un registro de 3600 s, de un sismo en particular, registrado en la estación HNA4, el 20 de agosto de 2010 a las 08:00 GMT.

Resultados del cálculo de la energía y la energía acumulada

La figura 4.8A muestra los resultados de la energía acumulada desde el 12 de mayo hasta el 27 de octubre de 2010. El valor final de esta energía acumulada es de 9765 MJ, esto es, a razón de 58 MJ por día. Además, se observa un ligero incremento de la energía en agosto de 2010, esto, debido a un incremento de la sismicidad durante este mes. En la figura 4.8B se presentan los

resultados del cálculo de energía para el mismo periodo. Se observa que la mayor cantidad de energía estimada se encuentra por debajo de 0.1 MJ con algunos pulsos en agosto e inicios de octubre.

Clasificación de señales sísmicas

Las señales sísmicas registradas por la RSTH durante el periodo de monitoreo (mayo-octubre de 2010) se clasificaron en 2 tipos: sismos tectónicos (locales, regionales) y otro tipo de señales.

Sismos tectónicos

Este tipo de sismos fueron los más numerosos. En la figura 4.9 se muestran ejemplos de sismos tectónicos registrados en 24 horas y corresponden a los días 5 de junio (figura 4.9A) y 14 de agosto de 2010 (figura 4.9B). En estos registros se pueden observar sismos regionales (R) y locales (L).

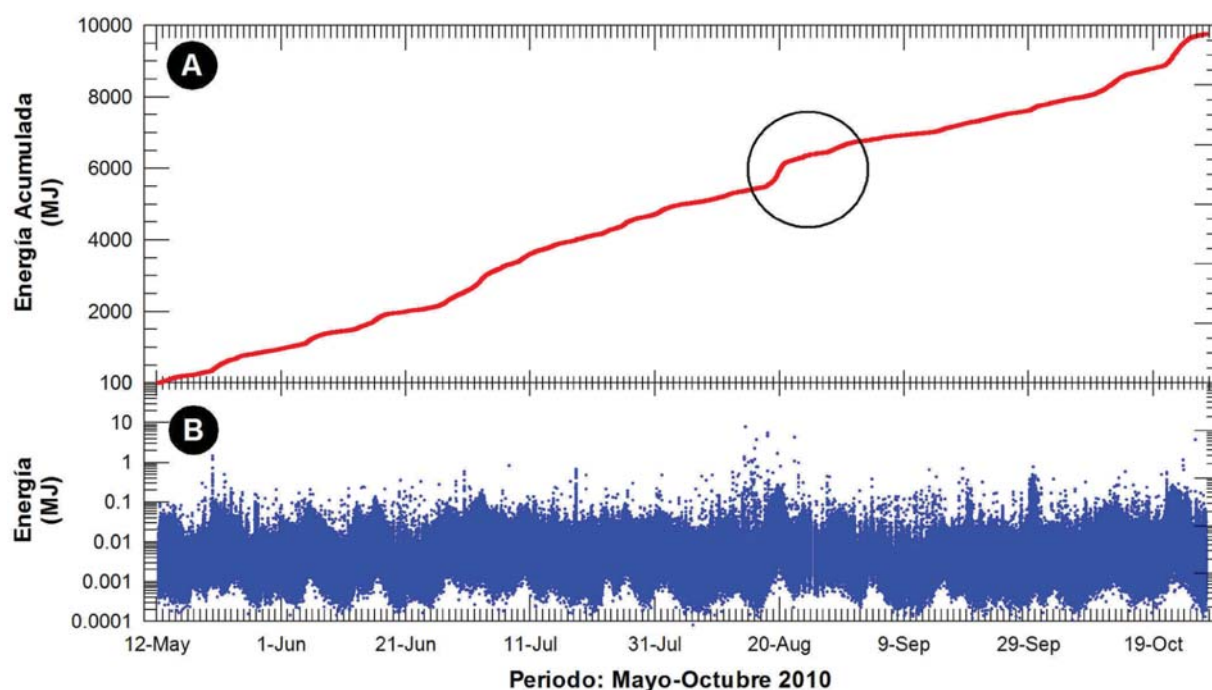


Figura 4.8 Cálculo de la energía en Megajoule (MJ) en los registros de las estaciones HNA4 y HNA5 para el periodo 12 de mayo al 27 de octubre de 2010. A) Energía acumulada y B) Distribución de la energía diaria.

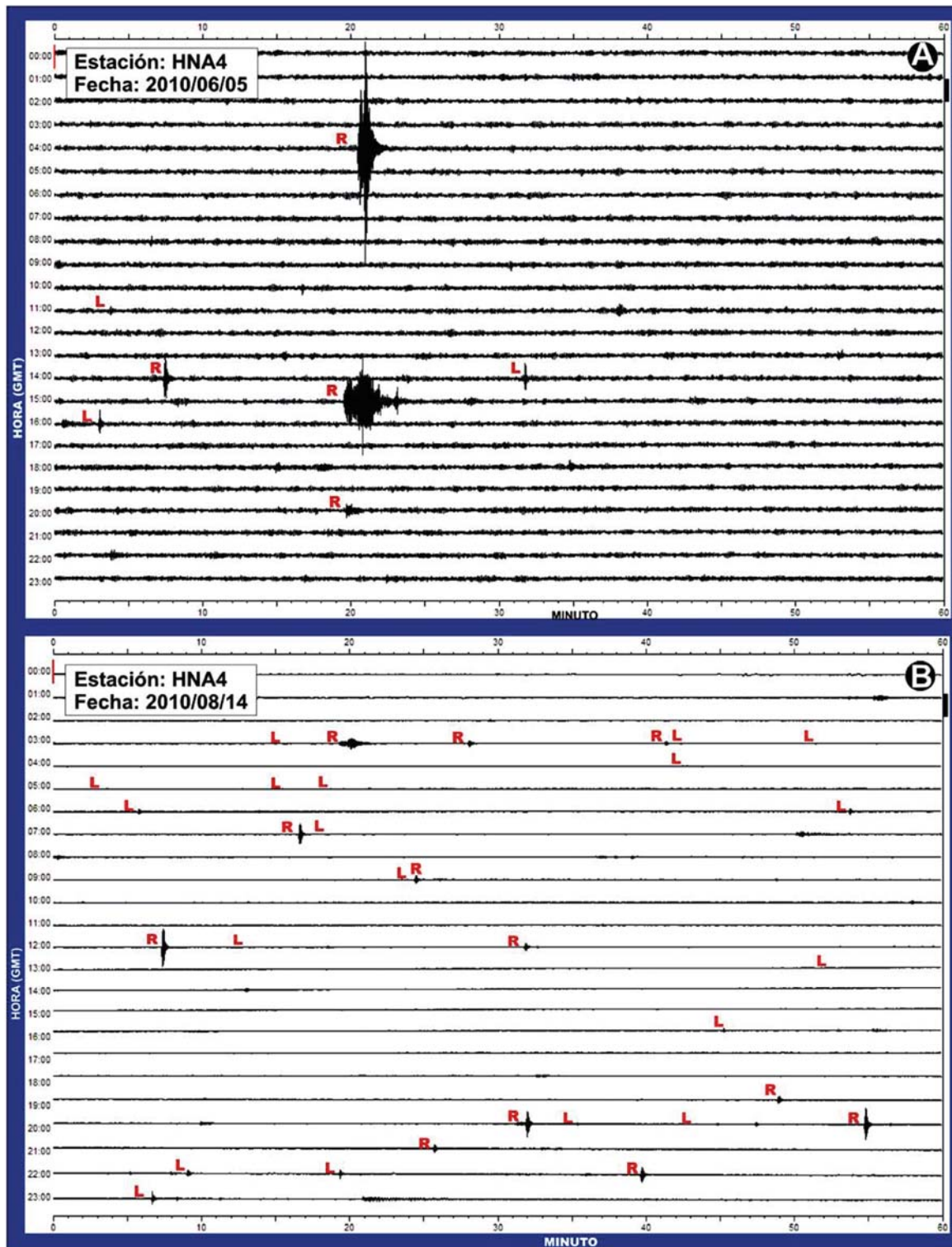


Figura 4.9 Ejemplos de registros sísmicos en 24 horas provenientes de la estación Huaynaputina 4 (HNA4). A) Registro del 5 de junio; B) Registro del 14 de agosto de 2010. R: sismos regionales, L: sismos locales.

Entre mayo y octubre de 2010, se han contabilizado en total 4561 eventos sísmicos, los cuales fueron sub-clasificados en función de la diferencia de tiempos de llegada de las ondas P y S ($T_{(S-P)}$). Para este propósito, se ha considerado 5 rangos: $T_{(S-P)} < 2.5$ s; $T_{(S-P)}: 2.6$ s < 5.0 s; $T_{(S-P)}: 5.1$ s < 10.0 s; $T_{(S-P)}: 10.1$ s < 20.0 s y $T_{(S-P)} > 20.0$ s. El producto de estos 5 rangos con la velocidad de la onda P de 5.2 km/s, tomado del modelo de velocidad propuesto por Dorbath et al. (1991), da como resultado la estimación de 5 radios (13 km, 26 km, 52 km, 104 km y > 104 km) de la estación HNA4 a las fuentes sísmicas.

- **Sismos con $T_{(S-P)} < 2.5$ s.** Este rango cubre un área aproximada de 13 km alrededor de la estación HNA4, lo que abarca la totalidad de la zona del volcán. En total se han contabilizado 570 señales sísmicas en este rango de $T_{(S-P)}$; esto representa el 12.5% de la sismicidad analizada a razón de 2 sismos por día. Sin embargo, del 12 al 18 de agosto se observó un incremento importante de esta sismicidad a razón de 42 sismos por día; se llegó a registrar hasta 66 sismos el 15 de agosto de 2010 (figura 4.10A).
- **Sismos con 2.6 s $< T_{(S-P)} < 5.0$ s.** Lazona cubierta por esta $T_{(S-P)}$ está comprendida entre los 13 km y 26 km de radio en torno a la estación HNA4. En esta distribución se ha inventariado un total de 685 señales sísmicas; esto es, 15% de la sismicidad total (figura 4.10B). La sismicidad comprendida en este rango se presenta a razón de 4 sismos por día; sin embargo, el 31 de julio se registró 110 sismos.
- **Sismos con 5.1 s $< T_{(S-P)} < 10.0$ s.** El área involucrada por esta $T_{(S-P)}$ está comprendida entre 26 km a 52 km alrededor de la estación HNA4. Durante este periodo de estudio (mayo-octubre 2011), se han contabilizado 732 señales sísmicas con esta $T_{(S-P)}$, esto representa el 16% de la sismicidad total registrada por la RSTH (figura 4.10C) y se desarrolla a razón de 4.3 sismos por día.
- **Sismos con 10.1 s $< T_{(S-P)} < 20.0$ s.** Este rango comprende radios entre los 52 km y 104 km alrededor de la estación HNA4. Se han inventariado un total de 1185 señales sísmicas que representa el 26% de la sismicidad total (figura 4.10D). Este tipo de señales se presentan con una recurrencia de 6.9 eventos por día.
- **Sismos con $T_{(S-P)} > 20.1$ s.** Este rango de $T_{(S-P)}$ comprende un área por encima de los 104 km. En esta distribución se han contabilizado un total de 1399 señales sísmicas que representa el 30.5% de la sismicidad total. Este tipo de sismicidad se presenta a razón de 8.1 eventos por día. Asimismo, este rango de $T_{(S-P)}$ involucra la mayor cantidad de sismicidad registrada por la RSTH (figura 4.10E).

Otro tipo de señales sísmicas

Además de las señales sísmicas correspondientes a sismos tectónicos descritos anteriormente, también se han registrado oscilaciones verticales de muy baja frecuencia (figura 4.11) que estarían asociadas a las fluctuaciones de la marea terrestre. Asimismo, se ha registrado una señal sísmica con frecuencia característica de 10 Hz (figura 4.12). Esta señal tiene la particularidad de presentarse entre las 17:00 y 20:00 GMT, razón por la cual se la asocia a algún tipo de actividad antrópica.

LOCALIZACIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE LOS SISMOS

Construcción de la base de datos

Para realizar la localización hipocentral de los sismos, se ha elaborado una base de datos del volcán Huaynaputina; se ha considerado básicamente los registros simultáneos de señales sísmicas en 3 a más estaciones en el periodo mayo a octubre de 2010. Con este fin, se ha tomado las siguientes consideraciones:

- Se recopiló las señales sísmicas registradas en 3 a más estaciones que conformaron la RSTH y se tomó como base la estación de banda ancha HNA4.
- Se seleccionó únicamente sismos locales (L) y con tiempos de arribo de las ondas P y S ($T_{(S-P)} \leq 5.0$ s). En la figura 4.13 se muestra un ejemplo de sismo local registrado en 3 estaciones con sus respectivas lecturas de tiempos de arribo de las ondas P, S y la duración total del sismo (C). Este sismo se registró el 13 de junio a las 10:24 GMT.
- Se hizo lectura de los tiempos de arribo de las ondas P y S y la duración del registro sísmico (C) en todas las estaciones en las que fueron registradas. Asimismo, se realizó algunas correcciones y ajustes en los tiempos de arribo de las fases sísmicas.
- Se confeccionó la base de datos HPNA1 compuesta por 107 sismos locales.

Programa de localización y modelo de velocidad

Para la localización hipocentral de los 107 sismos que conforman la base de datos HPNA1, se utilizó el programa de localización SEISAN (Ottemoller et al., 2010); este programa similar a otros utiliza como datos de entrada el código de identificación y ubicación geográfica (latitud, longitud, altura) de las estaciones sísmicas, lectura de los tiempos de arribo de las ondas P, S y la duración total del registro (C), además de un modelo de velocidad de

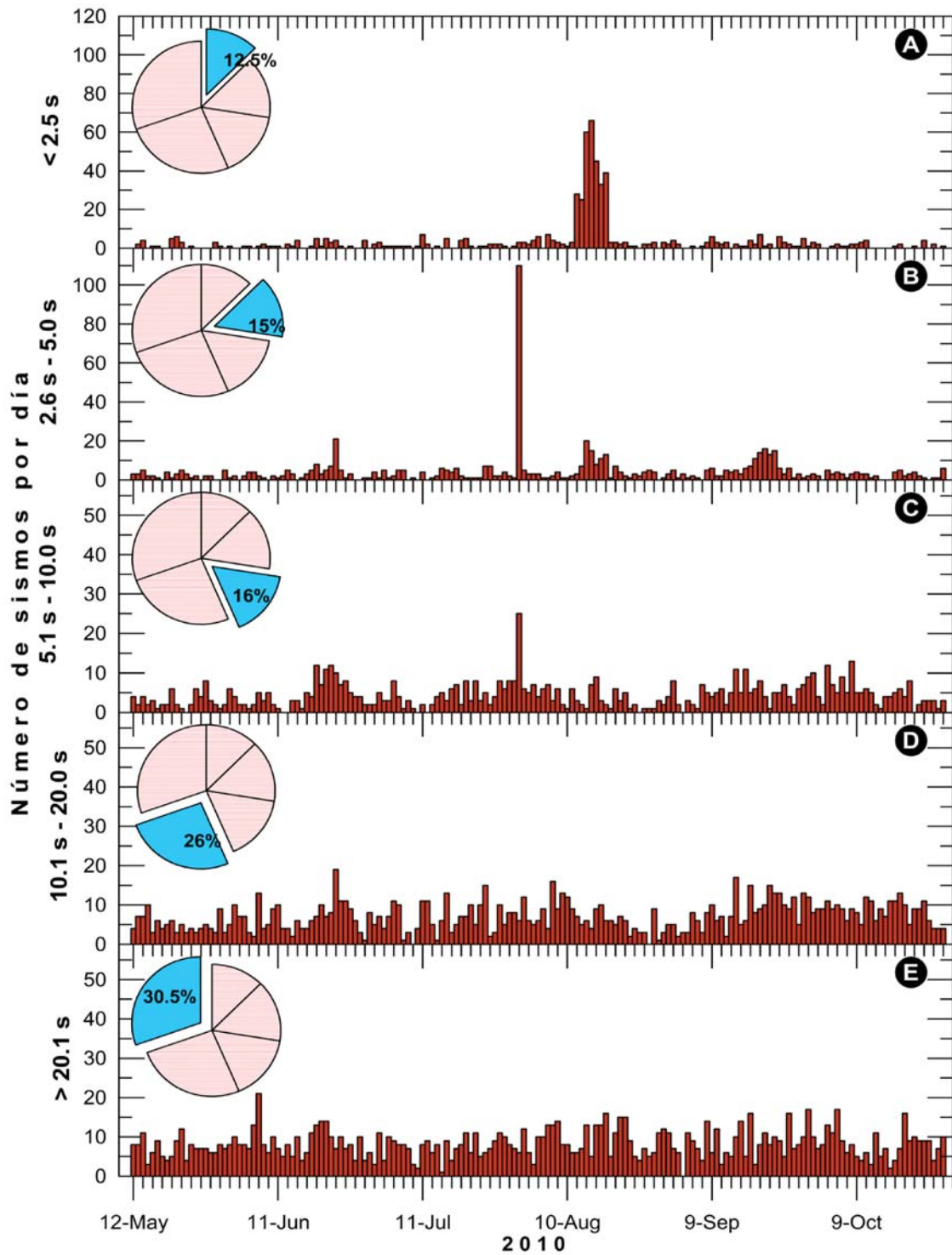


Figura 4.10 Número de sismos por día identificados por rangos de $T_{(S,P)}$ registrado en la estación HNA4A) $T_{(S,P)} < 2.5$ s; B) $T_{(S,P)}$ entre 2.6 y 5.0 s; C) $T_{(S,P)}$ entre 5.1 s y 10.0 s; D) $T_{(S,P)}$ entre 10.1 y 20.0 s; E) $T_{(S,P)} > 20.0$ s.

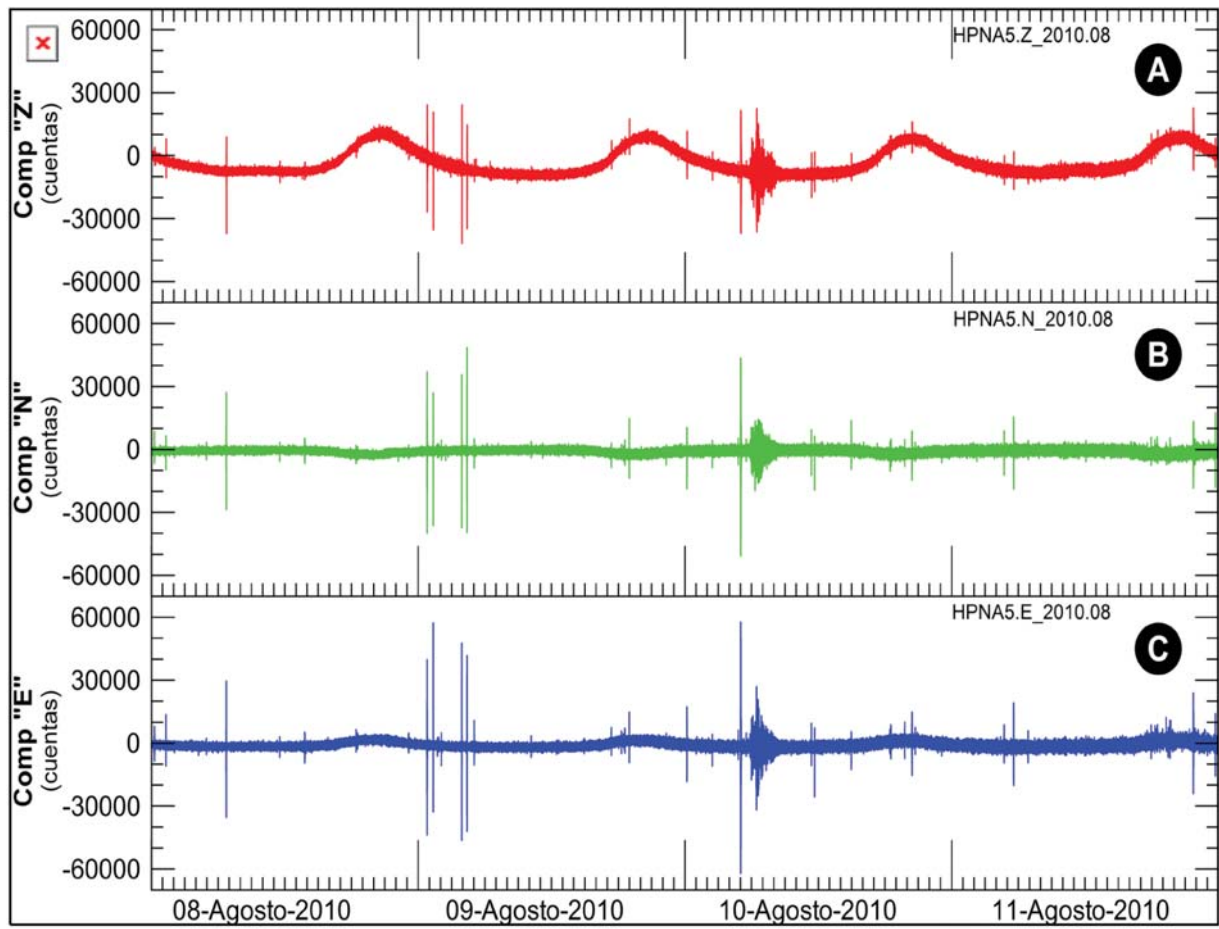


Figura 4.11 Sismograma de los días 8 al 11 de agosto de 2010, registrado por la estación HNA5.

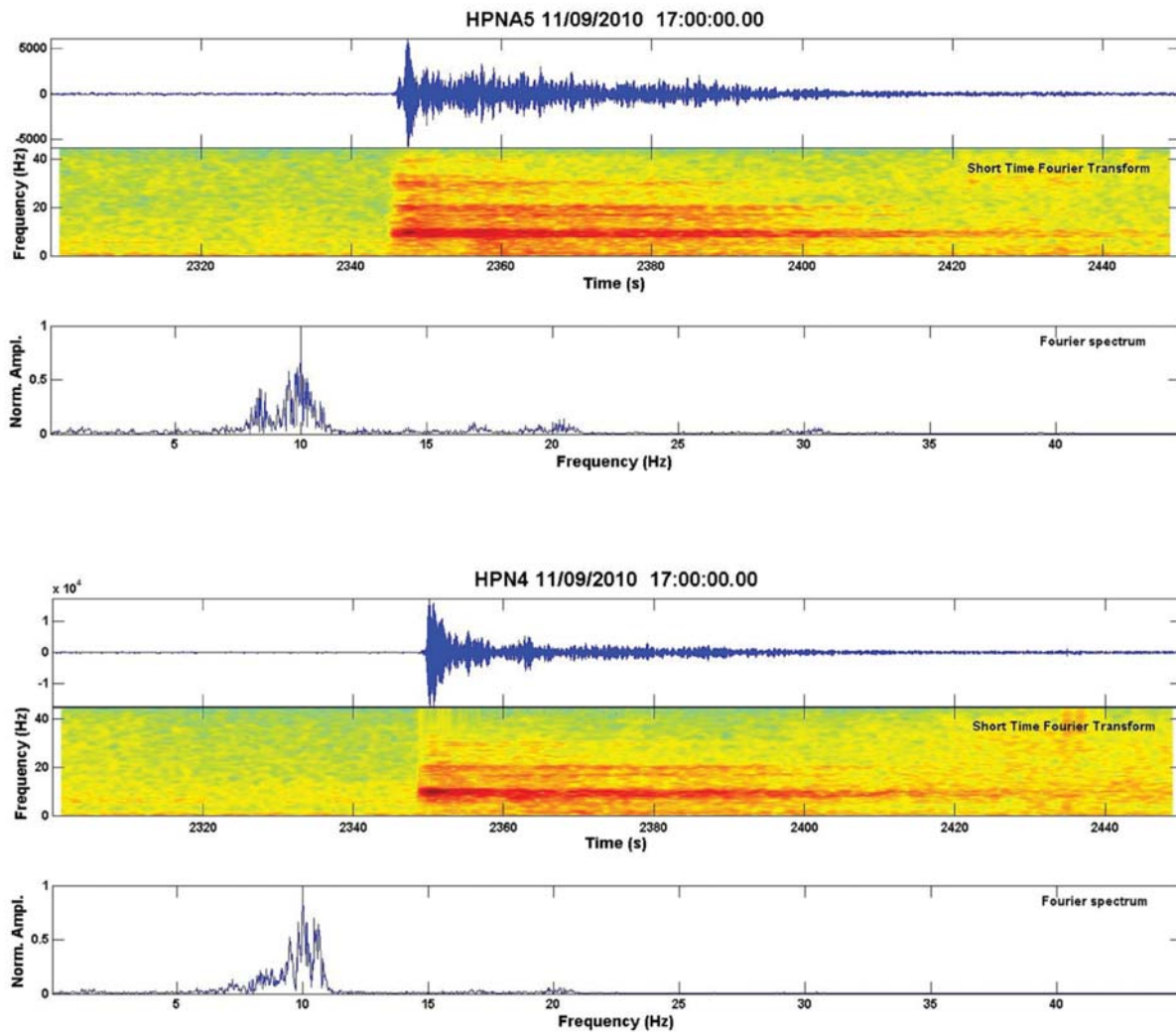


Figura 4.13 Ejemplo de sismo local registrado en 3 estaciones de la RSTH el 14 de agosto de 2010, a las 02:29 hora GMT. P y S: tiempos de arribo de las ondas en segundos, C: coda en segundos.

capas planas, relación de velocidad (Vp/Vs) y una ecuación para el cálculo de la magnitud de los sismos.

Debido a que la zona del volcán Huaynaputina así como otras zonas volcánicas del Perú no cuentan con un modelo propio que permita conocer la distribución de velocidades del subsuelo, se realizó diversas pruebas con los modelos de Dorbath et al. (1991), Thelen et al. (2008) y Metaxian et al. (1998) y con la relación de velocidades de Vp/Vs de 1.6, 1.65, 1.7, 1.75, 1.79. De todos ellos, se seleccionó al que mejor resolviera los parámetros hipocentrales y, por lo tanto, presentara errores mínimos en su estimación. Así, se eligió el modelo de Metaxian et al., (1998) (cuadro 4.3) y la Vp/Vs=1.6. Asimismo, se utilizó la ecuación de Klein (1978) para el cálculo de la magnitud de duración: $M_d = -1.1 + 2 \log(T) + 0.007 D + 0.0035 (Z)$, donde M_d es la magnitud de coda 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.

Resultados numéricos de la localización hipocentral

A continuación, se presentan los resultados numéricos de la localización hipocentral de los 107 sismos locales (anexo 4.1).

- Errores de localización hipocentral (latitud, longitud y profundidad) menores a 5 km, errores que podrían deberse a que el mayor número de sismos se localiza fuera de la cobertura acimutal de las estaciones sísmicas.

- La profundidad de los hipocentros son menores a 3 km. Los sismos que presentan el valor 0 km refieren a la baja resolución en el cálculo de la profundidad hipocentral del sismo.
- En cuanto a la magnitud de los sismos, estos varían entre 1.3 y 2.6 Md; son recurrentes los sismos con magnitudes entre 1.7 y 2.2 Md.
- Del total de sismos localizados (figura 4.14), el mayor número corresponde al enjambre sísmico registrado en el mes de agosto de 2010 (67 sismos).

Distribución de los sismos en superficie y en profundidad

Distribución en superficie

En la figura 4.15 se presentan los principales sistemas de fallas, lineamientos y fracturas reconocidos por Lavallée et al. (2006, 2009), la distribución de los 107 sismos (figura 4.15A), con sus respectivas elipses de error (figura 4.15B), relocalizados en la zona del volcán Huaynaputina, durante el periodo 15 de mayo al 27 de octubre de 2010.

En general, la sismicidad se distribuye hacia el noroeste, sur y suroeste del anfiteatro del volcán, en un área aproximada de 250 km² (figura 4.15A). El mayor agrupamiento de sismos, localizados al noroeste, parece estar asociado al lineamiento NO-SE que corta el cráter del volcán Huaynaputina y se extiende hasta el cerro El Volcán (figura 4.15C). Este agrupamiento de sismos corresponde,

Cuadro 4.3
Modelo de velocidad seleccionado para la relocalización hipocentral de los sismos registrados en el volcán Huaynaputina (Metaxian et al., 1998). Prof. es la profundidad en kilómetros y Vp es la velocidad de la onda P en kilómetros por segundo

Metaxian et al., 1998		Dorbath et al., 1991		Thelen et al., 2008	
Prof. (km)	Vp (km/s)	Prof. (km)	Vp (km/s)	Prof. (km)	Vp (km/s)
0.0-3.0	2.5	0	5.2	0	2.7
>3.0	4.5	15	6.2	1	3.5
		30	6.8	1.3	4.3
		50	8	1.6	5.1
				3.9	6
				6.5	6.2
				10.5	6.6
				18.5	6.8
				34.5	7.1

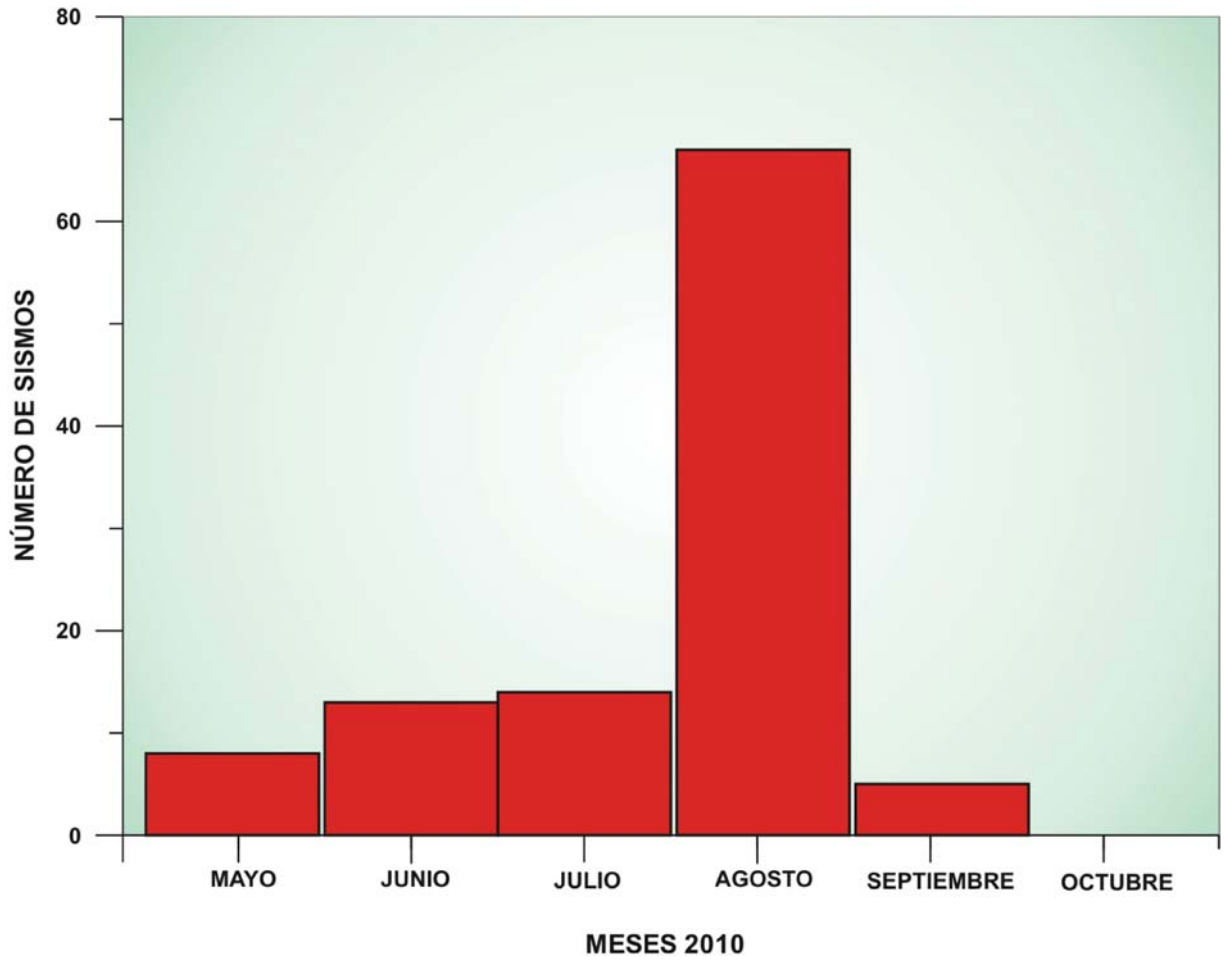


Figura 4.14 Número de sismos registrados en 3 a más estaciones por mes. Obsérvese que el mayor número de registros corresponde al mes de agosto de 2010.

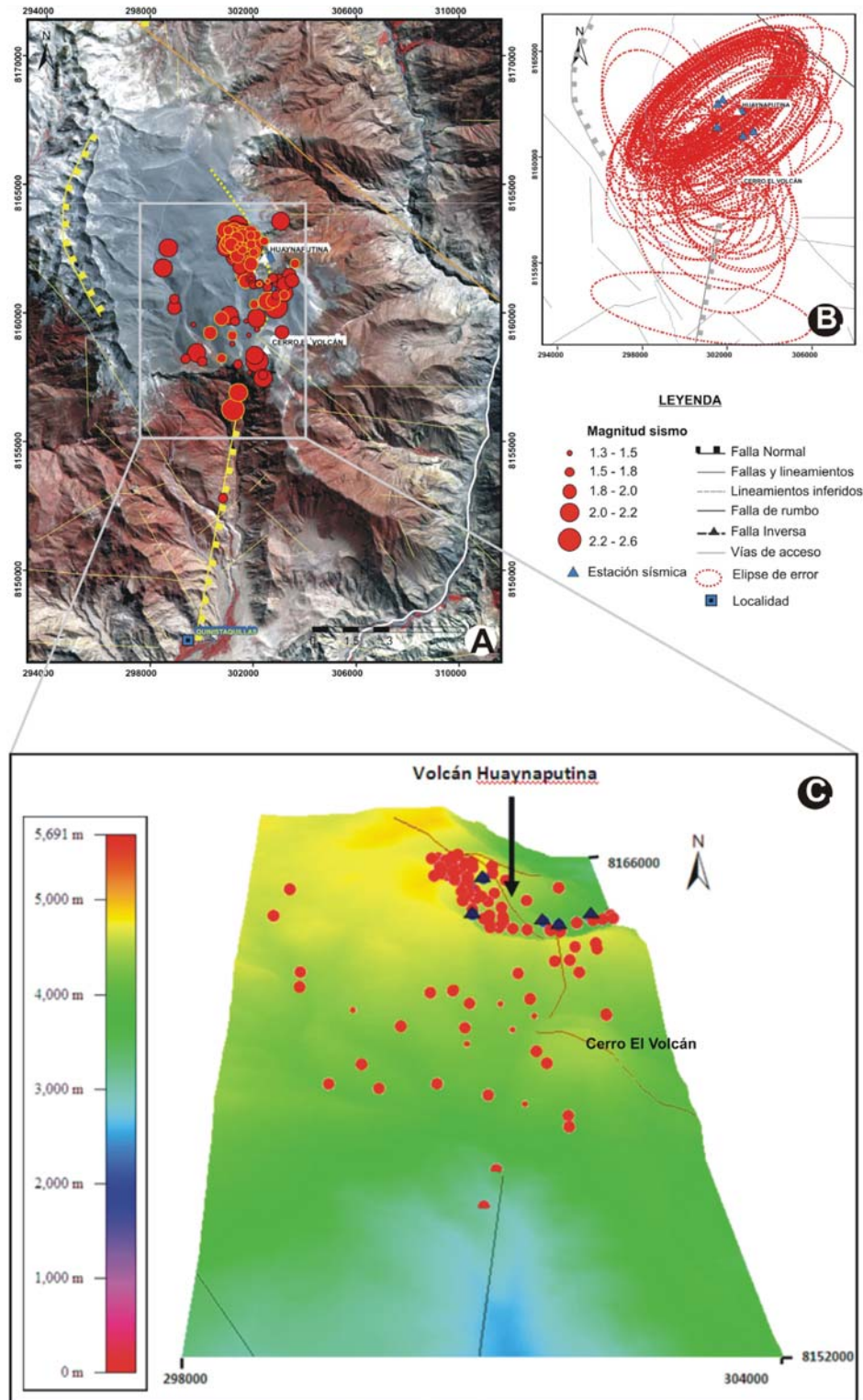


Figura 4.15 A) Distribución en superficie de los 107 sismos registrados y localizados en la zona del volcán Huaynaputina. El borde amarillo de los epicentros resalta los sismos registrados en el mes de agosto de 2010; B) Elipses de error de la localización; C) Ampliación de la zona de sismicidad.

básicamente, a los registrados en el mes de agosto de 2010 (círculos rojos con amarillo). Otro agrupamiento importante, aunque más disperso, se localiza al sur y suroeste del cráter del volcán Huaynaputina, entre fallas y lineamientos orientados en direcciones NO-SE y NE-SO, respectivamente.

Distribución en profundidad

La figura 4.16A muestra la distribución de los sismos en profundidad y la figura 4.16B las elipses de error. Durante el periodo de monitoreo del volcán Huaynaputina, los sismos presentaron profundidades menores a 3 km y se ubicaron por debajo del lineamiento NO-SE.

Enjambre sísmico de agosto 2010

De los 107 hipocentros localizados en este estudio, 67 eventos corresponden a los registrados en el mes de agosto 2010 (círculos rojos con amarillo). De estos, 22 señales tienen una frecuencia principal de 7 Hz, mientras que los demás eventos tienen frecuencias pico entre 5.8 y 10.1 Hz. Estas 22 señales sísmicas

tienen una forma de onda muy similar y un espectro de frecuencias también muy parecido (figura 4.17). Estas características particulares indican que estas señales se generaron bajo circunstancias similares, por lo tanto, procederían de la misma fuente sísmica.

LA SISMICIDAD Y SU RELACIÓN CON LA TECTÓNICA LOCAL

Los registros sobre la historia sísmica del volcán Huaynaputina y alrededores data desde la erupción de 1600 d.C., la misma que aparece en el catálogo sísmico de Askew & Algermissen (1985). Sin embargo, los estudios sísmicos a nivel local son mínimos. Debido a los sismos sentidos por los pobladores de las localidades circundantes al volcán Huaynaputina y a solicitud de sus autoridades, INGEMMET realizó el monitoreo sísmico temporal entre el 15 de mayo y 27 de octubre de 2010.

La RSTH, compuesta por 6 estaciones sísmicas (HNA1, HNA2, HNA3, HNA4, HNA5, HNA6), estuvo instalada en el anfiteatro y

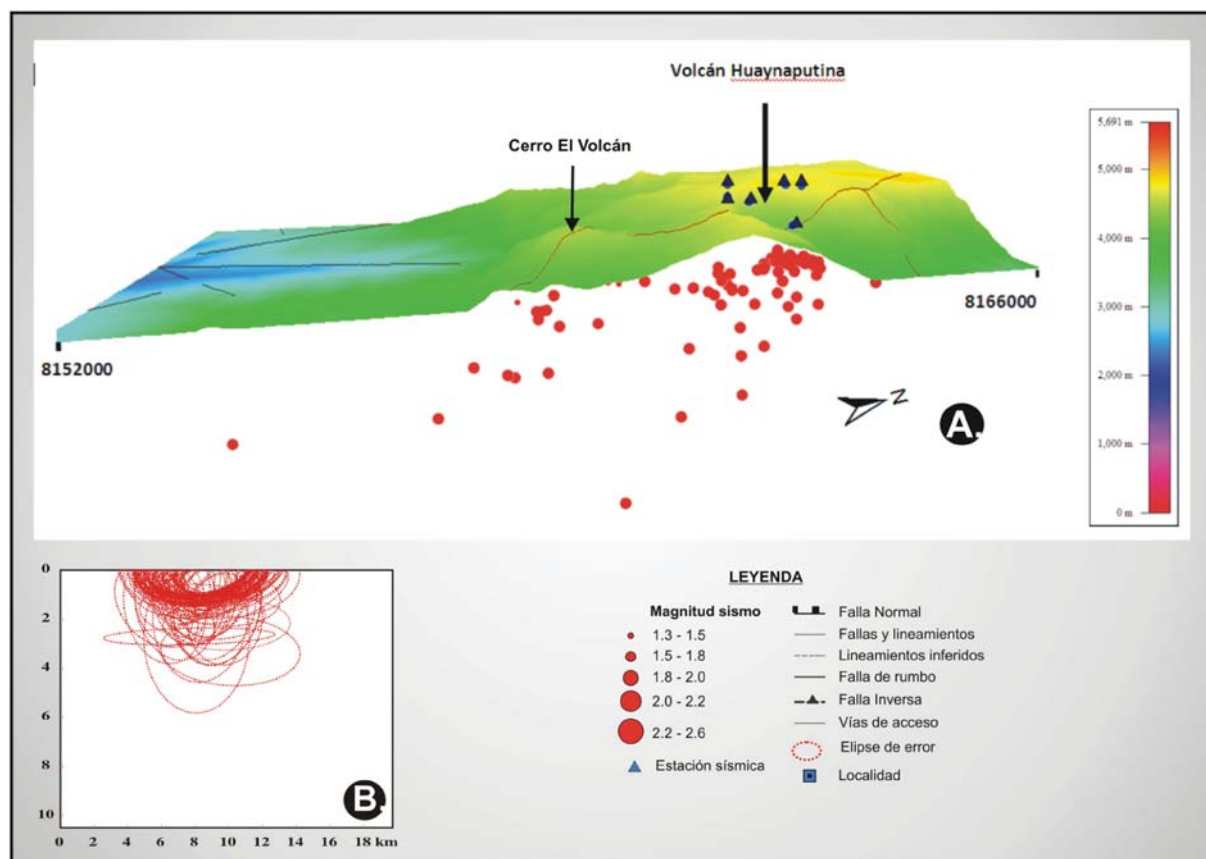


Figura 4.16 A) Distribución en profundidad de los 107 sismos localizados en la zona del volcán Huaynaputina. El mayor número de sismos se localizó a profundidades menores a 3 km; B) Elipses de error.

dentro del cráter del volcán. En este periodo de análisis, no se han reconocido sismos de origen volcánico (LP, tremor, explosión) generados por transporte de fluidos y gases, típicos de volcanes activos en proceso de erupción como lo observado en el volcán Monte Santa Elena (Estados Unidos), entre el 23 de septiembre y 5 de octubre de 2004 (Thelen et al., 2008); sin embargo, sí se registraron sismos tectónicos, locales, regionales y telesísmicos. Asimismo, con la información registrada entre el 15 de mayo y 27 de octubre de 2010, en las estaciones HNA4 y HNA5, se estimó 9765 MJ de energía acumulada en la zona del volcán Huaynaputina, a razón de 58 MJ por día. Asimismo, la energía diaria para el mismo periodo fue estimada en 0.1 MJ, valor por debajo de los niveles de energía liberada por el volcán Ubinas (3137 MJ) entre el 18 y 20 de agosto de 2006 (Macedo et al., 2010).

Si bien durante el tiempo de operación de la RSTH no se ha registrado algún sismo de magnitud moderada en la zona del volcán Huaynaputina, el análisis de la localización hipocentral de los 107 sismos, su distribución en superficie (figura 4.15), la profundidad (figura 4.16), así como sus magnitudes pequeñas (1.3 a 2.7 Md) sugieren que estos sismos podrían estar asociados a la activación y/o reactivación de los sistemas de fallas y lineamientos presentes en toda la zona del volcán Huaynaputina, tal como fue sugerida por Lavallée et al., (2009). El mayor agrupamiento y enjambre de agosto podría estar asociado al alineamiento NO-SE que corta el cráter del volcán Huaynaputina y se extiende hasta el cerro El Volcán. Evidentemente, el análisis de tensor de momento, mecanismos focales y estudios de deformación mediante InSAR habrían permitido definir con mayor detalle la fuente generadora de estos sismos.

ESTIMACIÓN Y ANALISIS DE ONDAS DE CODA Qc EN EL VOLCÁN HUAYNAPUTINA

Aki (1969), a partir del análisis de las réplicas del sismo de Parkfield-USA de 1966, fue el primero en explicar la generación de las ondas de coda (Qc) correspondientes a sismos locales. Estas ondas de coda son ondas dispersadas en las numerosas heterogeneidades que existen en la corteza y manto superior. Estas ondas de coda corresponden a la parte final del sismograma; contienen información de la fuente sísmica, el camino de propagación y la respuesta local de la estructura geológica en la estación de registro. Uno de los métodos para inferir cómo se propaga la onda a través de los diferentes medios es estimando el factor de calidad (Qc), atenuación de ondas de coda Qc^{-1} y la ley de dependencia de frecuencias $Qc=Q_0 f^n$ (Aki, 1969; Fehler et al., 1992; O'Doherty et al., 1997; Aki, 1980a).

Estudios de Qc aplicados a volcanes activos fueron realizados por Fehler et al. (1988), Londoño (1995) y Londoño et al. (1998).

Estos autores han mostrado ciertas correlaciones de Qc con la actividad volcánica. Londoño et al., (1998) observó las variaciones de Qc antes y después de las erupciones del volcán Nevado Del Ruiz (VNR, Colombia) del 13 de noviembre de 1985 y 1 de septiembre de 1989; ellos han sugerido que si se realiza un monitoreo continuo de las variaciones de estos valores de Qc, los datos podrían utilizarse como premonitores de la actividad volcánica.

Estimación del factor de calidad Qc

Para estimar el factor de calidad Qc de la atenuación sísmica en la zona del volcán Huaynaputina, se ha utilizado el modelo de retro-dispersión simple propuesto por Aki & Chouet (1975); este modelo asume que la coda de los sismos locales son retro-dispersadas en las numerosas heterogeneidades del medio por la cual se propagan (corteza, manto superior). Asimismo, el modelo asume que la fuente y el receptor se encuentran en el mismo punto y la radiación de las ondas es esférica, además es válido solamente para ondas que arriban 2 veces al tiempo de viaje de las ondas S.

Los datos analizados corresponden a los 107 sismos registrados y localizados entre el 15 de mayo a 27 de octubre de 2010 por las estaciones de la RSTH (figura 4.18A). El sub programa utilizado es el denominado coda **Q** (figura 4.18B) y forma parte del programa de localización Seisan (Ottmoller et al., 2010). Los datos de entrada son: registro de sismos en la componente vertical de cada una de las estaciones sísmicas, longitud de ventana de 5 s, velocidad de la onda S ($Vs=2.0$ km/s), frecuencias de filtrado de 2, 4, 8 y 16 Hz y coeficiente de correlación mínima de 0.6.

Resultados de la estimación de Qc

En el cuadro 4.4 se muestran los resultados numéricos de Qc para cada una de las estaciones de la RSTH y filtradas con las frecuencias 2, 4, 8 y 16 Hz. Estos valores de Qc varían entre 58.2 ($f=2$ Hz) y 261 ($f=16$ Hz). Los coeficientes de correlación son mayores a 0.6 ($corr>0.6$) y una raíz media cuadrática (rms) que varía entre 0.07 y 0.29. Al graficar estos valores de Qc en función de la frecuencia (Qc versus f), en general, se observa que Qc aumenta cuando la f aumenta (figura.4.19).

Cuadro 4.4
Estimación del factor de calidad Qc
para las estaciones HNA2, HNA3, HNA4 y HNA6

f (Hz)	HNA2	HNA3	HNA4	HNA6	Qcprom
2	58.2	66.7	46.9	24	49
4	77.7	103.2	87	89.3
8	208	162.6	147.5	138	164
16	197.3	232.7	261.1	260	237.8

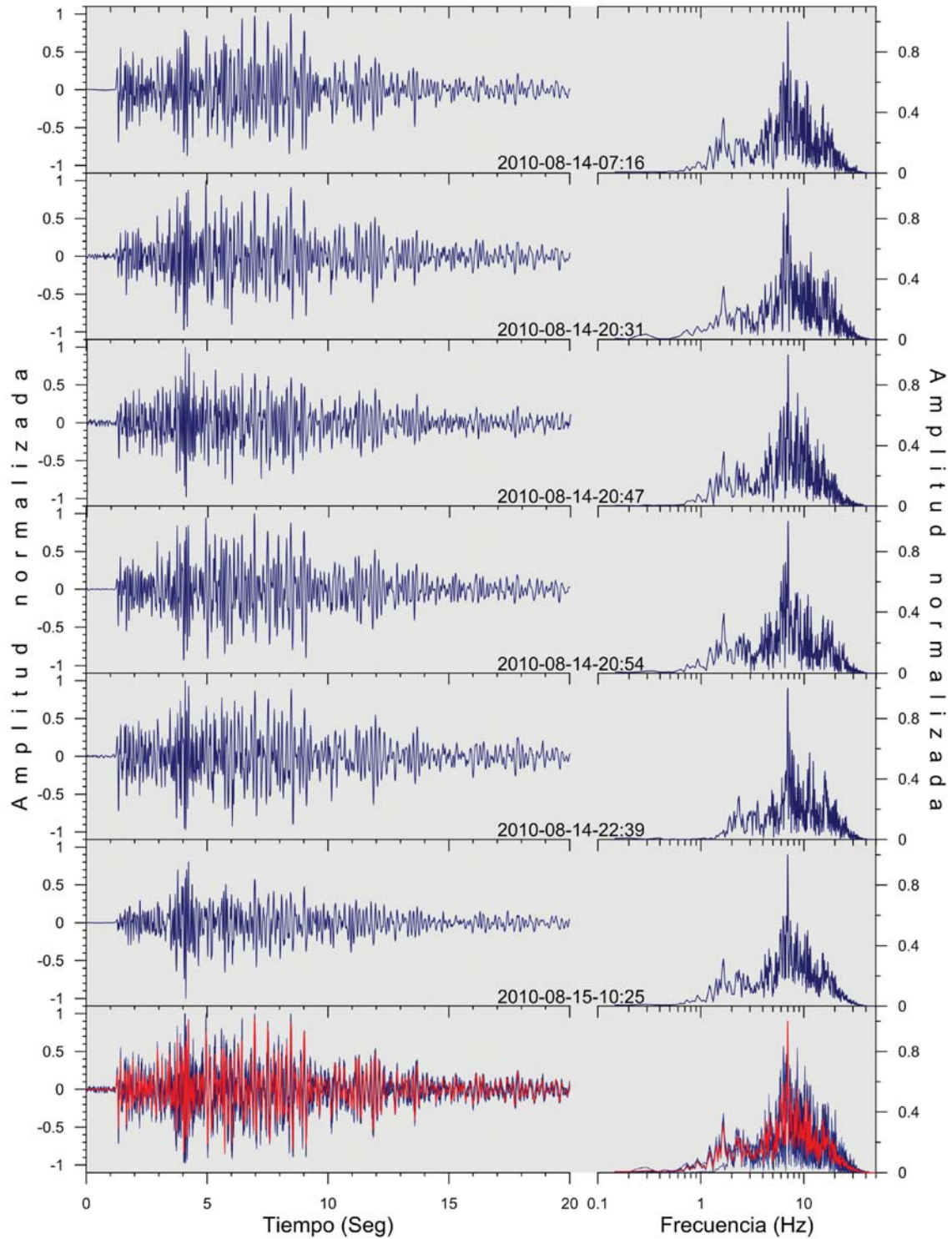


Figura 4.17 Ejemplos de sismos registrados por la estación HPNA4 con sus espectros de frecuencia respectivos. En rojo, apilamiento de las señales y el espectro de frecuencia característico de estos sismos.

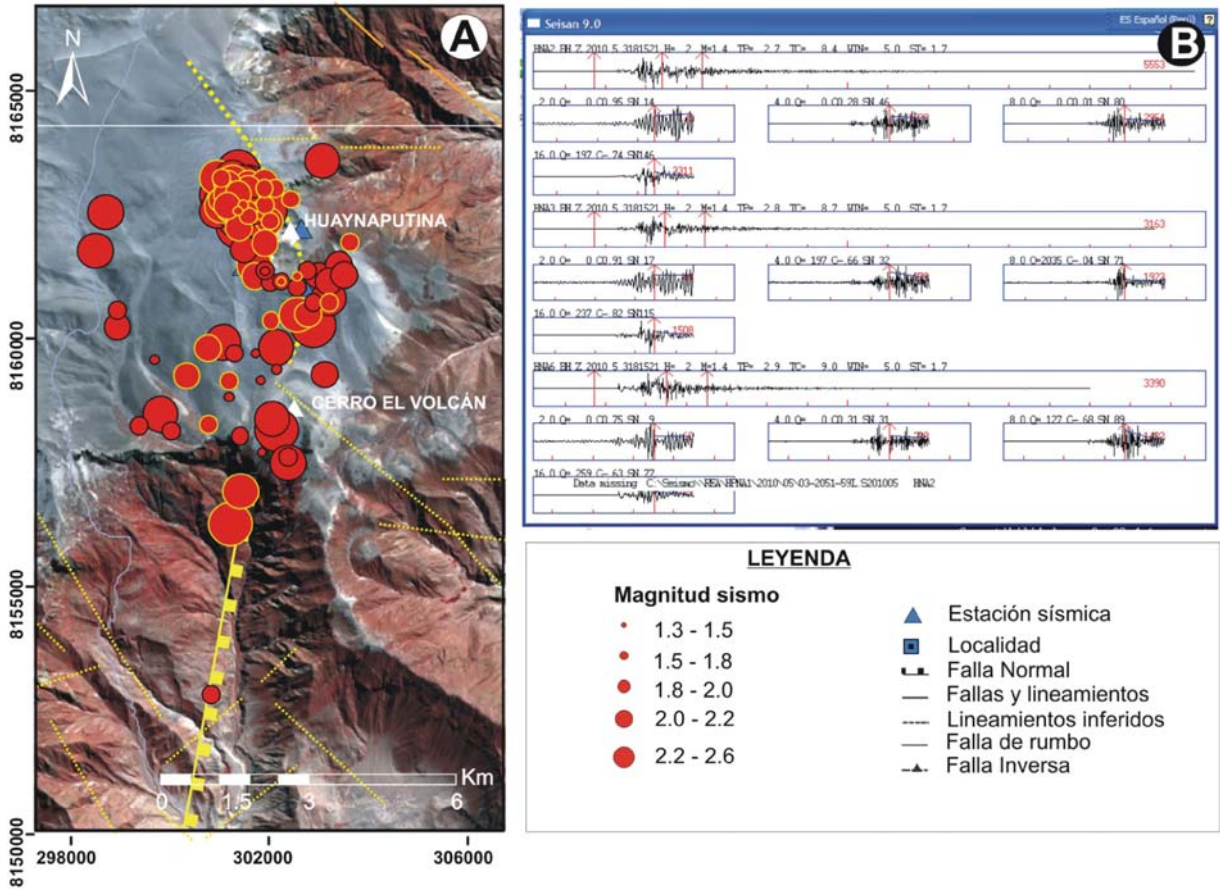
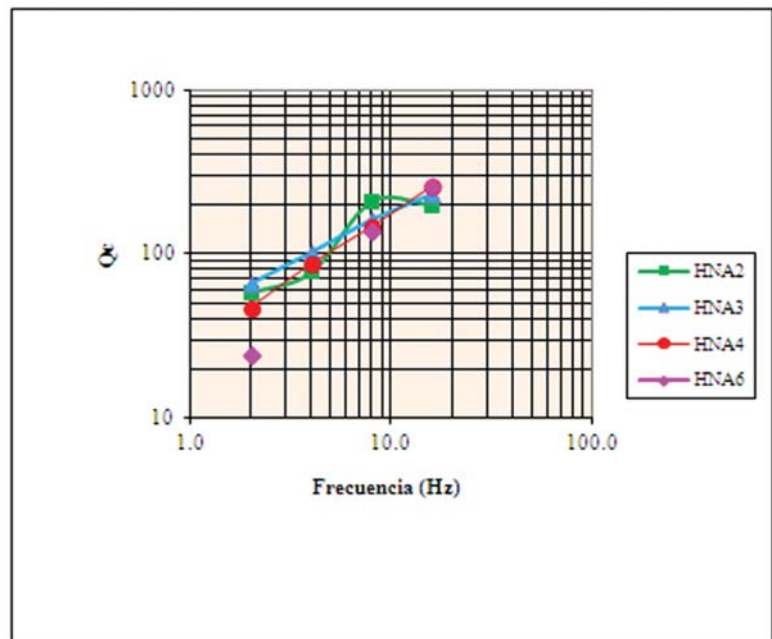


Figura 4.18 A) Distribución de los 107 sismos localizados en la zona del volcán Huaynaputina; B) Ejemplo de sismo registrado en las estaciones HNA2, HNA3, HNA6 y analizado con coda Q.

Figura 4.19 Valores de coda Qc vs. la frecuencia, estimados para cuatro estaciones sísmicas instaladas en el volcán Huaynaputina.



Ajuste de valores Qc a la ley de dependencia frecuencial ($Q_0 f^\eta$)

Una vez calculados todos los valores de Qc para las 4 estaciones de la RSTH y 4 bandas frecuenciales, se realizó el ajuste de los valores de Qc promedios (Qc prom.) a la ley de dependencia frecuencia $Qc=Q_0 f^\eta$ propuesto por Aki (1980a), donde Q_0 es Qc a la frecuencia de 1Hz y η el coeficiente de anelasticidad. De acuerdo a los estudios de Aki & Chouet (1975), Bollinger (1979), Nuttli (1980), Singhand & Herrmann (1983), Paul et al., (2003), entre otros, los valores de Q_0 están asociados principalmente a las heterogeneidad es del medio (geología) y η a la tectónica del medio. Valores altos de Q_0 representan una menor heterogeneidad del medio, mientras que los valores altos de η representan mayor actividad tectónica reciente (fallas, sismicidad, actividad geotermal, volcanes, etc.).

En la zona del volcán Huaynaputina, se ha estimado un valor de $Qc=34f^{0.72}$ y representa el promedio de la atenuación sísmica en la zona del Huaynaputina. El valor bajo de $Q_0=34$ estaría

correlacionado con la heterogeneidad, y el alto valor del coeficiente $\eta=0.72$, con la intensa actividad sísmica, tectónica y volcánica del Huaynaputina. El buen ajuste de la curva mostrada en el cuadro 4.5 y figura 4.20 evidencian pequeñas diferencias de 8.3 y 13 unidades, las mismas que se reflejan en el valor de rms.

Cuadro 4.5
Valores promedio de Qc obtenidos para la zona del volcán Huaynaputina. Q_0 es el valor de Qc a la frecuencia de 1Hz, η : coeficiente de anelasticidad y rms: raíz media cuadrática

Volcán Huaynaputina						
f (Hz)	Qc	Ajuste	Error	Q_0	η	rms
2	49	56.004	0.003	34	0.72	0.036
4	89.3	92.249	0			
8	164	151.951	0.001			
16	237.8	250.291	0			

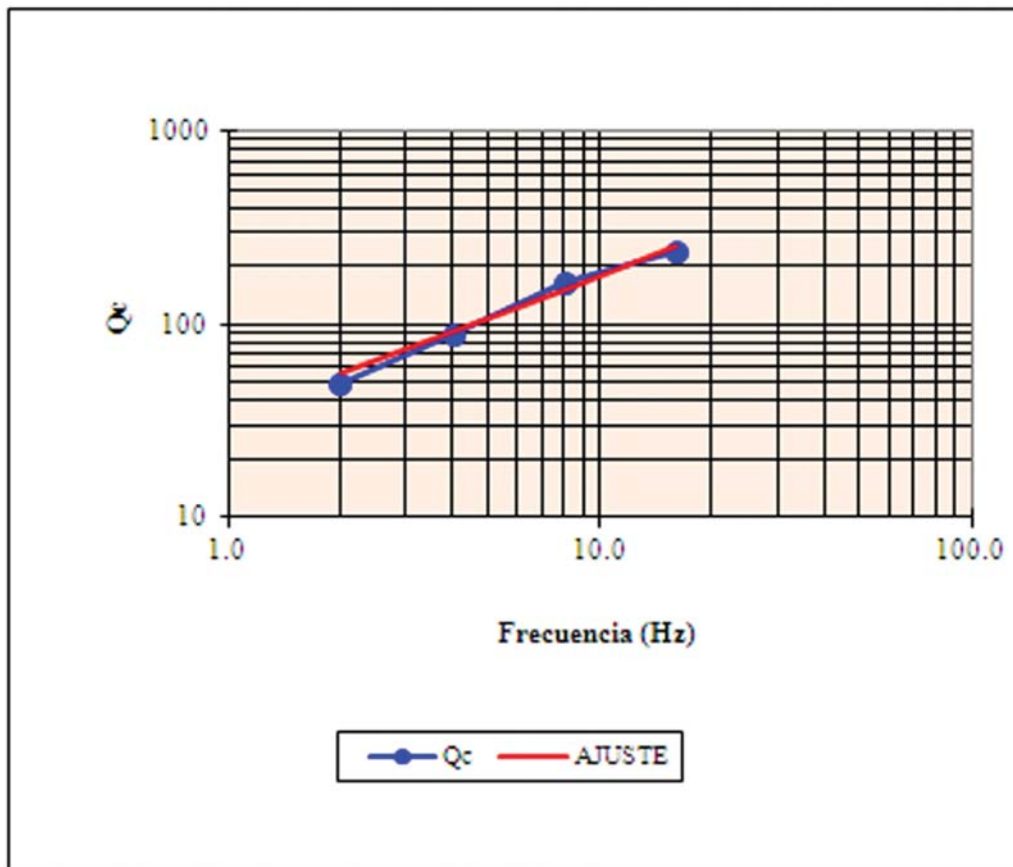


Figura 4.20 Distribución gráfica de los valores promedio de Qc y el ajuste respectivo.

CODA Q_c Y SU RELACIÓN CON LA TECTÓNICA LOCAL

En la zona del volcán Huaynaputina se ha estimado $Q_c=34f^{0.72}$. Estos valores bajos de $Q_0=34$ correlacionado con la heterogeneidad del medio y el alto valor del coeficiente $\eta=0.72$ con la intensa actividad sísmica, tectónica y volcánica del Huaynaputina, son concordantes con los obtenidos en otros volcanes (cuadro 4.6, figura 4.21), como el Monte Santa Elena en Estados Unidos (Havskov et al., 1989), Nevado Del Ruiz en Colombia (Londoño, 1996), las Tres Vírgenes en México (Wong et al., 2001) y la

Isla Decepción en la Antártica (Havskov et al., 2003). Si bien los valores de η son variables entre las zonas volcánicas, estas podrían deberse a que algunos como el volcán Huaynaputina, Nevado Del Ruiz y Las Tres Vírgenes tendrían mayor actividad tectónica local (sismicidad, fallas activas, etc.). Si se compara los valores de Q_0 obtenidos en zonas volcánicas con orógenos relativamente estables como los del Himalaya, se puede observar claramente valores de $Q_0 > 100$, lo que significaría que la geología de estas zonas son menos heterogéneas y con relativa actividad tectónica, probablemente de algunas fallas y poca actividad sísmica (Gupta et al., 1998; Paul et al., 2003; Kumar et al., 2007).

Cuadro 4.6
Valores promedio de Q_0 y ζ obtenidos para zonas volcánicas y zonas relativamente estables. Q_0 es el valor de Q_c a la frecuencia de 1Hz y ζ el coeficiente de anelasticidad

Zonas	Nombres	Q_0	η
Volcánicas	Volcán Monte Santa Elena (EE.UU.)	54	0.39
	Volcán Nevado Del Ruiz (Colombia)	30	1.03
	Volcán Las Tres Vírgenes (México)	50	0.65
	Isla Decepción (Antártida)	58	0.4
	Volcán Huaynaputina	34	0.72
Relativamente estables	Himalaya (India)	126	0.95
	Garwal Himalaya (India)	110	1.02
	Sur de India	535	0.59

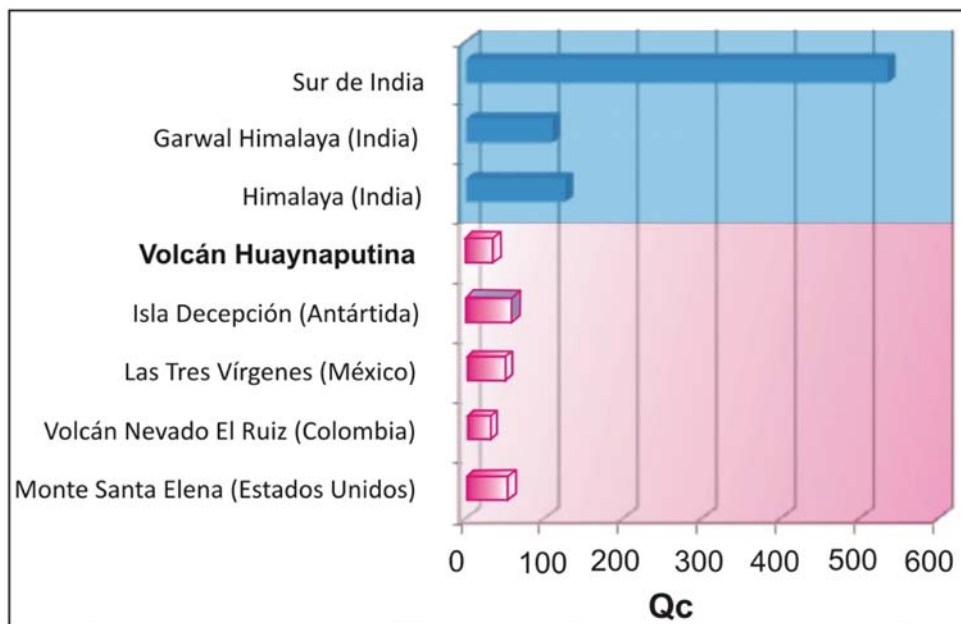


Figura 4.21 Comparación de los valores promedio de Q_c obtenidos en el volcán Huaynaputina con otros valores de zonas volcánicas y zonas relativamente estables, según cuadro 4.6.

CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA DE LAS FUMAROLAS

Adquisición de datos

La adquisición de datos se realizó el 17 de mayo de 2010. Una vez ubicadas las fumarolas en el interior del cráter (figura 4.22) se procedió a medir la temperatura a fin de localizar el punto de emisión más caliente. Para este fin se utilizó un moderno termómetro digital (figura 4.23A), el cual se introdujo en los intersticios del suelo por donde emanaban los gases fumarólicos (figura 4.23B).

Se realizaron diversas mediciones de temperatura en diferentes lugares a lo largo de las fumarolas. Las temperaturas medidas presentan valores entre 51.8°C a 78.7°C. Se localizó el punto de emisión de mayor temperatura (78.7 °C) en las coordenadas UTM 19K, 8161940N; 352324 E; 4351 msnm y se le denominó Huaynaputina-Fumarola1 (HPT-F1).

Muestreo de gases

En el punto HPT-F1 (figura 4.24A) se realizó el muestreo de gases fumarólicos mediante el método directo propuesto por (Fahlquist et

al., 1992). Para ello se empleó una botella de Giggensbach al vacío con doble entrada, una solución de NaOH 4N y una llave de paso (figura 4.24B).

Resultados de la medición de temperatura y análisis químicos de gases de las fumarolas

En el cuadro 4.7 se presentan los resultados de los parámetros fisicoquímicos obtenidos en el muestreo y análisis de gases de las fumarolas en la estación HPT-F1. Estos resultados muestran una concentración de 290 ppm de CO₂.

Cuadro 4.7
Resultados del análisis de gases
muestreados de las fumarolas del
volcán Huaynaputina en la estación HPT-F1

Parámetro	HPT-F1
Fecha	17/05/2010
Temperatura (°C)	78.7
pH (condensado)	5
CO ₂ (ppm)	290



Figura 4.22 A) La flecha indica la ubicación de las fumarolas en el borde sur del cráter del volcán Huaynaputina; B) En la zona de emisión de fumarolas se puede observar la presencia de vegetación. C) Fumarolas de color blanquecino emanando de los intersticios.



Figura 4.23 A) Termómetro utilizado para la medición de la temperatura; B) Proceso de medición de la temperatura en las grietas de la roca por donde emanaban los gases fumarólicos del volcán Huaynaputina.



Figura 4.24 A) Ubicación de la estación de muestreo de gases HPT-F; B) Proceso de muestreo de gases en la estación HPT-F1.

Los resultados obtenidos del análisis de gases de las fumarolas del volcán Huaynaputina son los que se esperarían encontrar en un volcán activo; esto es, con un alto contenido de CO₂ (290 ppm). Los gases poseen un pH=5 a una temperatura de 78.7 °C. Características similares fueron encontradas en las fumarolas del volcán Ticsani que presenta un pH ácido (pH=4) a una temperatura de 82.3 °C (Masías et al., 2010a).

Medición de temperatura en la estación HPT-F1

A 12 m al sur del punto HPT-F1 se instaló una estación de medición continua de la temperatura y, por la proximidad a este punto, también se le denominó HPT-F1. En este lugar, se enterró parcialmente un tubo de PVC de 1.2 m de largo x 2" de diámetro (figura 4.25A). En esta estación se colocó inicialmente un registrador de temperatura HOBO, modelo UTL-1, a 1 m de profundidad (figura 4.25B) que tiene una precisión de ±0,1°C y un paso de registro de 30 minutos. Posteriormente, se cambió por un registrador HOBO, modelo UA002-64, con una precisión de ±0,47 °C y un paso de registro de 15 minutos. Esta estación HPT-F1 está operando desde Mayo del 2010 hasta la actualidad.

Resultados del registro de la temperatura

La figura 4.26 muestra los resultados del registro continuo de temperatura en la estación HPT-F1 durante el periodo mayo a octubre de 2010. En esta figura se observa que el rango de variación de la temperatura es entre 27.5 °C y 33.2 °C; asimismo, se pueden distinguir dos periodos con tendencias de temperatura claramente definidas: el primero presenta una tendencia decreciente de 29.7 °C a 27.5 °C, entre los meses de mayo a julio; el segundo presenta una tendencia creciente de 27.5 °C a 33.7 °C, entre julio y octubre de 2010. Mientras estuvo instalado el registrador UTL-1, especialmente durante la tercera semana de mayo, se registraron aumentos y descensos de temperatura en casi 2 °C. Durante el registro del equipo UA002-64 se observaron algunas pequeñas anomalías; destacan los registrados en la segunda y tercera semana de octubre con un descenso y posterior recuperación de 1 °C.

La temperatura registrada en la estación HPT-F1, entre el 18 de mayo al 27 de octubre de 2010, presentó el efecto de la estacionalidad, similar a lo observado en el volcán Misti (MST-F1; Masías et al., 2010b), donde las temperaturas más bajas fueron registradas entre los meses de julio y agosto (época de invierno), y las más altas entre diciembre y enero (época de verano) del mismo año.

MONITOREO DE FUENTES TERMALES

Ubicación de fuentes termales

Para la ubicación de las fuentes termales asociadas al volcán Huaynaputina, se ha considerado un área de influencia volcánica de 20 km de radio alrededor del anfiteatro de este volcán (figura 4.27). Es importante señalar que en este estudio no se consideraron las fuentes termales MAT y HUA ubicadas a orillas del río Tambo, ya que estas fuentes están asociadas al volcán Ubinas (Comunicado N° 10, 2006; Cruz et al., 2009).

Las fuentes termales muestreadas en este estudio son: Ullucán (ULU), ubicada a 19.7 km al este del Huaynaputina; el río Agua Blanca (AGB), un afluente del río Tambo, se ubica a 11.3 km al ESE del anfiteatro; y la fuente termal Cerro Reventado (CER), ubicada a la orilla del río Tambo, a 13.4 km al SE del anfiteatro del volcán Huaynaputina. El cuadro 4.8 y la figura 4.27 muestran las ubicaciones y nomenclaturas de estas fuentes termales.

Muestreo de fuentes termales y medición de parámetros fisicoquímicos

El muestreo de las fuentes termales se realizó el 20 de mayo y 13 de julio de 2010. Se tomaron 3 muestras de aguas en las fuentes termales CER (figura 4.28A), ULU (figura 4.28B) y el río AGB (figura 4.28C).

Adicionalmente al muestreo de las aguas, también se realizó la medición de parámetros fisicoquímicos como el pH, T° y CE, para ello se utilizaron los equipos descritos en la cuadro 4.9. La medición fue directa en el agua surgente. Se esperó un tiempo prudente para que la lectura sea estable y representativa.

Cuadro 4.8
Ubicación de las fuentes termales muestreadas alrededor del volcán Huaynaputina

Fuente	Código	Coordenadas UTM		Altura (msnm)
		N	E	
Ullucán	ULU	8163127	282617	2808
Cerro Reventado	CER	8151115	310302	1794
Agua Blanca	AGB	8154039	310506	1904



Figura 4.25 A) Instalación de la estación de medición continua de la temperatura HPT-F1 en el volcán Huaynaputina; B) Foto del momento en que se introduce el registrador HOBO UTL-1 en la estación HPT-F1.

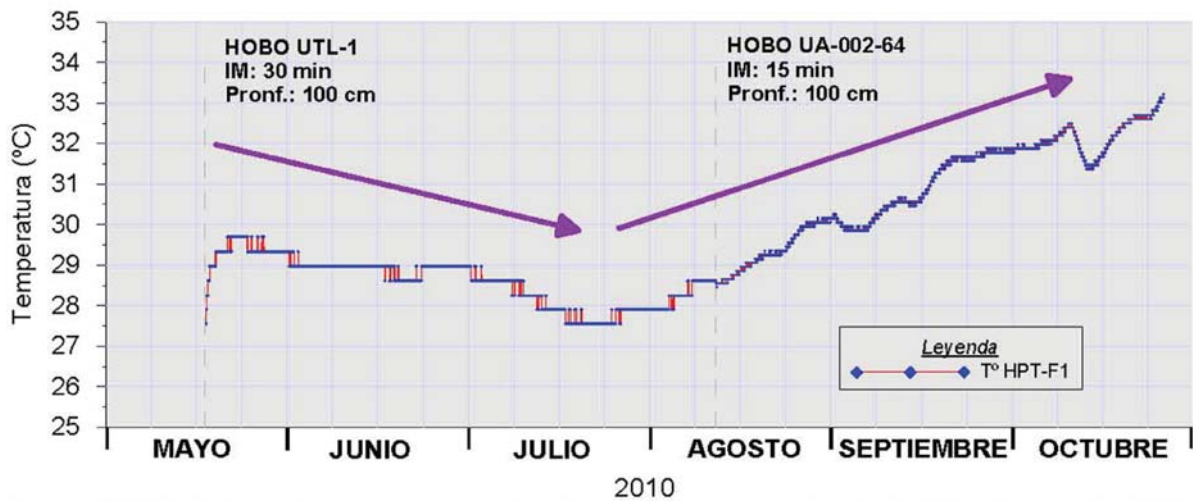


Figura 4.26 Mediciones de temperatura registradas entre mayo y octubre de 2010 en la estación HPT-F1, en el cráter del volcán Huaynaputina.

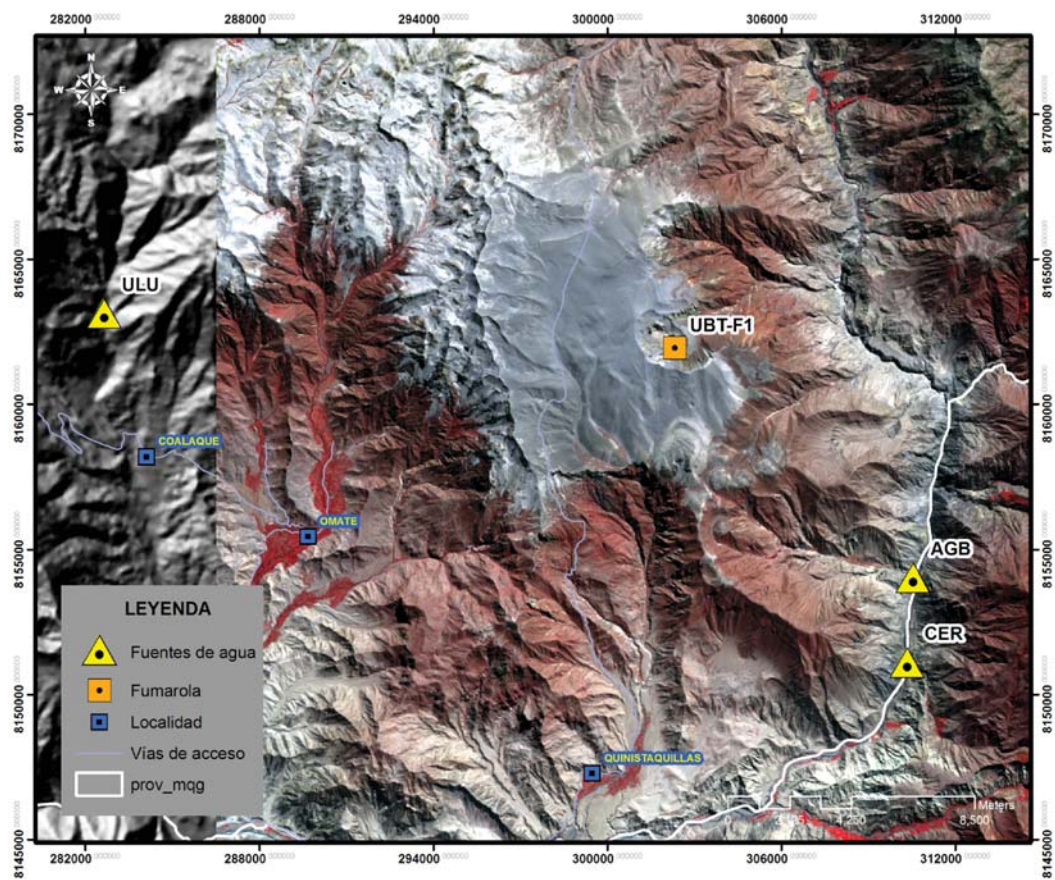


Figura 4.27 Ubicación de las fuentes termales muestreadas alrededor del volcán Huaynaputina (ULU, AGB, CER). Además, se encuentra señalada la ubicación de la estación HPT-F1 en las fumarolas del cráter del Huaynaputina.

Cuadro 4.9
Equipos utilizados para la medición de los parámetros físicoquímicos en las aguas muestreadas

Ensayo	Equipo	Marca/Modelo	Precisión
T°	Termómetro	AA precisión	$\pm 0,1^{\circ} \text{ C}$
pH	pH-metro	CyberSan/Waterproof	$\pm 0,01^{\circ} \text{ C}$
CE	Conductímetro	HACH/SensION5	$\pm 0,51 \%$



Figura 4.28 A) Fuente termal ULU a 19.7 km del volcán; B) Fuente CER a 13.4 km del volcán; C) Foto del riachuelo AGB a 11.3 km del volcán.

Resultados de las características fisicoquímicas y análisis químico de las fuentes termales

Los resultados de los análisis químicos de las 3 fuentes de agua muestreadas se encuentran consignados en el cuadro 4.10 y descritos a continuación:

Cuadro 4.10
Resultados de los análisis químicos de las muestras de aguas termales (DN: no detectado)

Fuente	Fecha	T°	pH	CE	TDS	HCO3-	Cl-	SO4-	SiO2
	dd/mm/aa	°C		µS/cm	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
ULU	13/07/2010	75.4	5.61	14810	7710	669.5	4346.7	302	124.2482
CER	20/05/2010	51.1	6.6	5110	2680	419.5	1302.4	498.6	88.8916
AGB	20/05/2010	22.8	7.83	3660	1893	443.5	680.6	753.6	63.4079
	Ca	Mg	Na	K	Sr	Li	Ba	B	Mn
	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/L	mg/L	mg/L
ULU	303.64	50.82	2314.81	438.44	5.4879	20.396	0.2529	251.101	0.7492
CER	272.65	46.62	929.39	55.29	4.377	3.8318	0.0477	26.5153	0.0206
AGB	330.93	123.2	436.03	22.72	4.6498	1.369	0.0597	14.5571	0.091
	Al	Cu	Zn	Fe	Ni	Cr	As	Hg	Co
	mg/l	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
ULU	0.0087	0.039	0.0055	0.8609	0.0069	0.0269	40.6791	ND	0.0016
CER	0.0022	0.016	0.0047	ND	0.0048	0.0054	1.4665	0.0006	0.0002
AGB	0.0046	0.01	0.0051	0.0567	0.0063	ND	0.0614	0.0004	0.0002

- **Temperatura (T°).** Las fuentes termales muestreadas en inmediaciones del volcán Huaynaputina presentaron temperaturas que varían entre 22.8 °C y 75.4 °C. Estas temperaturas son similares a las registradas en las fuentes termales del volcán Ticsani donde se midieron hasta 95 °C (Masías et al., 2010a); sin embargo, estas temperaturas resultan ser relativamente altas al compararlas con las temperaturas medidas en las fuentes termales asociadas a los volcanes Misti y Ubinas, los mismos que se encuentran por debajo de 40° C (Masías et al., 2008).
- **Potencial de ión Hidrógeno (pH).** El pH de las fuentes termales ULU y CER presentan valores de 5.61 y 6.6; es decir, son aguas ligeramente ácidas; mientras que la del río AGB, con pH de 7.83, es ligeramente básica. Esta diferencia, podría estar asociada a la presencia de gran cantidad de materia orgánica en el agua.
- **Conductividad Eléctrica (CE) y Sólidos Totales Disueltos TDS.** La CE y el TDS, por lo general, se encuentran estrechamente vinculados entre sí; por ello, al compararlos en la figura 4.29 se puede observar que son directamente proporcionales. Las 3 fuentes presentaron una alta CE desde 3660 hasta 14 810, lo que se puede interpretar como una alta cantidad de sales disueltas considerando que las aguas de manantiales y de consumo humano se encuentran entre 1000 y 3000 y su origen podría estar asociado a la interacción agua-roca (Inguaggiato et al., 2005).

CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA DE LAS FUENTES TERMALES

Con la información obtenida del muestreo y medición de parámetros fisicoquímicos de las 3 fuentes ubicadas en los

alrededores del volcán Huaynaputina, se elaboró los diagramas de Piper Hill Langelier, para identificar los tipos de agua según sus iones mayoritarios; el diagrama Ternario $\text{SO}_4 - \text{Cl} - \text{HCO}_3$, para conocer su posible origen; y el geotermómetro Giggenbach (1988), para conocer la temperatura en el reservorio.

Diagrama de Piper Hill Langelier

De acuerdo al diagrama de Piper Hill Langelier, mostrada en la figura 4.30, las fuentes de agua asociadas al volcán Huaynaputina son de 2 tipos:

- SULFATO Y/O CLORURO ALCALINAS TÉRREAS ($\text{SO}_4\text{-Cl} / \text{Ca} - \text{Mg}$). A este tipo de agua pertenece la fuente AGB.
- CLORURO Y/O SULFATO ALCALINAS ($\text{Cl-SO}_4 / \text{Na+K}$). A este tipo pertenecen las fuentes ULU y CER.

Aniones mayoritarios y posible origen del agua

En el diagrama ternario $\text{SO}_4\text{-Cl-HCO}_3$ (figura 4.31), se puede observar que la fuente ULU se ubica en la zona de aguas cloruradas, con un posible origen profundo. Las fuentes CER y AGB se ubican cerca de la zona de mezcla de aguas cloruradas sulfatadas, de posible origen en condensados volcánicos, y ligeramente orientadas hacia las aguas diluidas.

Geotermómetro

Al realizar el diagrama del geotermómetro (figura 4.32), se observa que la fuente ULU se encuentra cerca de la zona de equilibrio parcial, lo que corresponde a una temperatura mayor a los 200 °C. La fuente CER se encuentra cerca de la zona de equilibrio parcial; por tanto, podría presentar una temperatura $T > 100$ °C en el reservorio. Mientras que el agua del río AGB, presentaría una temperatura < 100 °C y, por tanto, una mayor dilución con aguas superficiales.

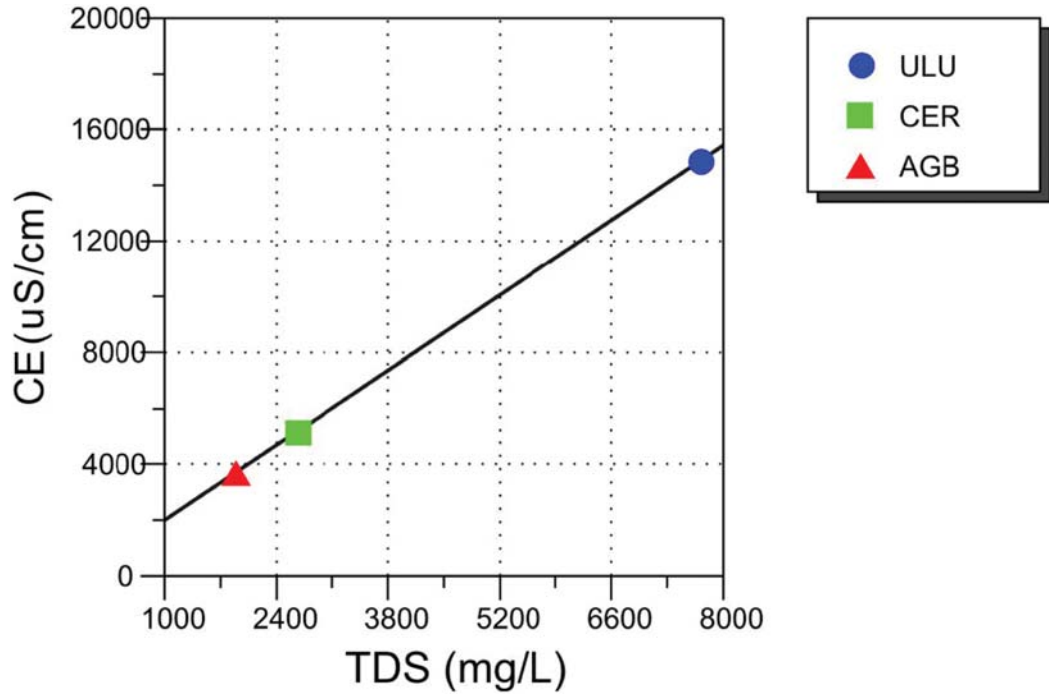


Figura 4.29 Gráfica donde se compara la conductividad eléctrica (CE) con los sólidos totales disueltos (TDS).

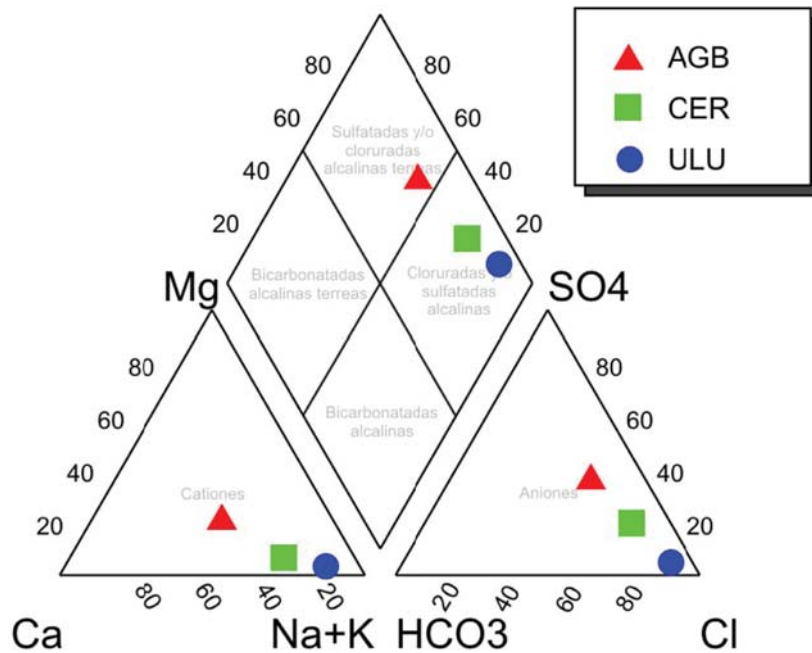


Figura 4.30 Diagrama de Piper-Hill-Langelier, donde se pueden observar que las aguas muestreadas alrededor del volcán Huaynaputina se encuentran graficadas en 2 de los cuadrantes: Clorurada-Sulfatada Alcalina, de las fuentes ULU y CER y Sulfatadas-Cloruradas Alcalina-Térrea, del agua del río AGB.

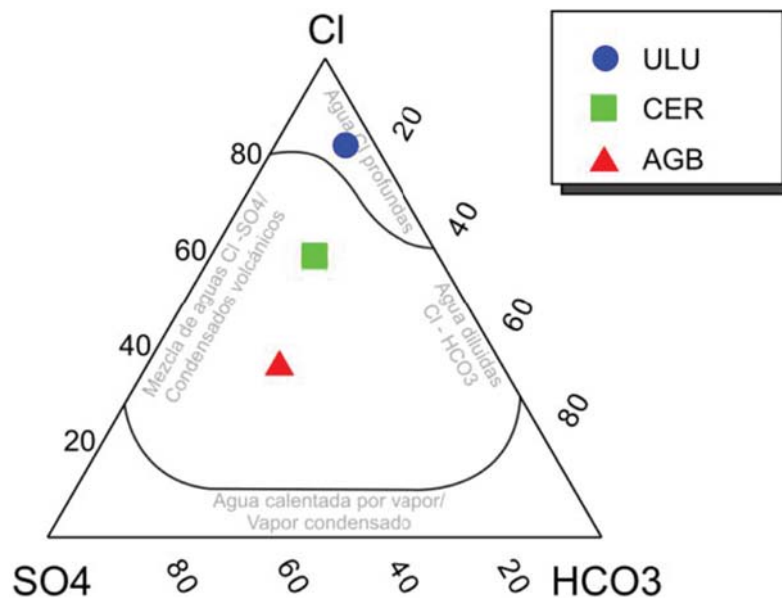


Figura 4.31 Diagrama ternario de aniones mayoritarios Cl-SO₄-HCO₃, donde las aguas muestreadas alrededor del volcán Huaynaputina se encuentran en los cuadrantes de aguas cloruradas profundas (ULU) y aguas cloruradas sulfatadas, con un posible origen en condensados volcánicos, ligeramente orientadas hacia las aguas diluidas (CER y AGB).

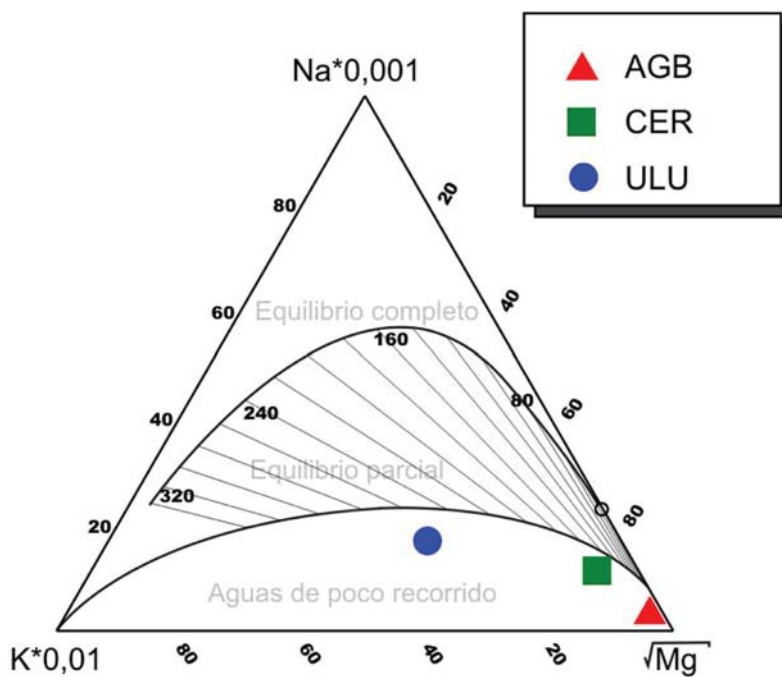


Figura 4.32 Diagrama del geotermómetro (Giggenbach, 1998), donde se encuentran graficadas las fuentes AGB, CER y ULU y la temperatura aproximada en el reservorio.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Es necesario e imprescindible el monitoreo de volcanes activos del sur peruano, ya que estos pueden reactivarse en cualquier momento y desencadenar erupciones que pueden afectar poblados, terrenos de cultivo, obras de infraestructura u otros.

- Debido a que el monitoreo de volcanes es una actividad continua y variable en el tiempo, en este boletín se presentan los primeros resultados de la caracterización sísmica y monitoreo geoquímico de las fuentes de agua y fumarolas de los volcanes Ticsani, Sabancaya y Huaynaputina, durante el periodo 2006 y 2012. Estos datos servirán como línea de base para realizar futuras discriminaciones e interpretaciones de las señales o registros en periodos de crisis volcánicas.
- La caracterización sísmica realizada en los volcanes Ticsani, Sabancaya y Huaynaputina así como el análisis de sus sismogramas, muestran una intensa actividad sísmica, asociada principalmente a la tectónica local (fallas y lineamientos) y mínimamente a la actividad propia de los volcanes. Así, la sismicidad del volcán Ticsani tiene una distribución en dirección NE-SO según el lineamiento reconocido por Lavallée et al (2006, 2009); la sismicidad del volcán Sabancaya se distribuye principalmente en dirección N-S hacia el volcán Hualca Hualca y el valle del Colca; y la sismicidad del volcán Huaynaputina estaría asociada al lineamiento NO-SE que corta el cráter del volcán y se extiende hasta el cerro El Volcán.
- El monitoreo geoquímico de las fuentes termales del volcán Ticsani, muestra ligeros incrementos en la concentración de cloruros durante el 2011, y en las fumarolas, un incremento progresivo de la temperatura registrado desde el año 2006.
- Con el propósito de conocer el comportamiento de los volcanes Ticsani, Sabancaya y Huaynaputina, en el caso de presentarse un nuevo proceso eruptivo, es imprescindible tomar en cuenta las siguientes recomendaciones:
 - Adquirir la instrumentación adecuada e implementar el monitoreo volcánico integral, con transmisión en tiempo real, de los volcanes Ticsani, Sabancaya y Huaynaputina que contemple, como mínimo, los métodos sísmico, geoquímico, geodésico y visual.
 - Realizar paralelamente estudios de investigación, en los cuales se empleen métodos geofísicos de exploración profunda (eléctrico, magnético, gravimétrico, magnetotelúrico), a fin de caracterizar la estructura volcánica, fallas, lineamientos y/o presencia de material fundido.
 - Implementar el Sistema de Alerta Temprana ante una posible erupción de los volcanes Ticsani, Sabancaya y Huaynaputina. Este sistema deberá garantizar una rápida y eficiente transferencia de información a las autoridades y, por intermedio de ellos, a la población, para responder de manera oportuna y eficaz ante una crisis volcánica.

BIBLIOGRAFÍA

- Adams, N.K.; De Silva, S.L.; Self, S.; Salas, G.; Schubring, S., et al. (2001) - The physical volcanology of the 1600 eruption of Huaynaputina, southern Peru. *Bulletin of Volcanology*, 62 (8): 493-518.
- Aguilar, V.; Tavera, H.; Bernal, I.; Palza, H. & Kosaka, A. (2001) - Análisis y evaluación del sismo de Calacoa (Omate-Moquegua) del 6 de mayo de 1999 (MW=4.0). *Boletín Sociedad Geológica del Perú* (91): 69-80.
- Aki, K. (1969) - Analysis of the seismic coda of local earthquakes as scattered waves. *Journal of Geophysical Research*, 74(2): 615-631.
- Aki, K. & Chouet, B. (1975) - Origin of coda waves: source, attenuation, and scattering effects. *Journal of Geophysical Research*, 80(23): 3322-3342.
- Aki, K. (1980) - Attenuation of shear-waves in the lithosphere for frequencies from 0.05 to 25 Hz *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 21(1): 50-60.
- Antayhua, Y. (2002) - *Análisis de la actividad sísmica en la región del volcán Sabancaya y los sismos de Maca (1991) Sepina (1992) y Cabanaconde (1998)*. Tesis Ingeniero. Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa, 146 p.
- Antayhua, Y.; Tavera, H.; Bernal, I.; Palza, H. & 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 (Arequipa). *Boletín Sociedad Geológica del Perú* (93): 63-71.
- Antayhua, Y. & Ramos, D. (2008) - *Análisis de la sismicidad registrada en el volcán Ticsani (Moquegua), periodos abril y agosto-noviembre de 2008*, informe inédito. Lima: Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, 31 p.
- Askew, B.L. & Algermissen, S.T., eds. (1985) - *Catálogo de terremotos para América del Sur. Volumen 1: descripción del catálogo e informes nacionales*. Lima: CERESIS, 191 p.
- Barazangi, M. & Isacks, B.L. (1976) - Spatial distribution of earthquakes and subduction of the Nazca plate beneath South America. *Geology*, 4(11): 686-692.
- Boatwright, J. (1980) - A spectral theory for circular seismic sources: simple estimates of source dimension, dynamic stress drop, and radiated seismic energy. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 70 (1): 1-27.
- Bollinger, G.A. (1979) - Attenuation of the *Lg* phase and the determination of mb in the southeastern United States. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 69(1): 45-63.
- Bulmer, M.; Johnston, A. & Engle, F. (1998) - Analysis of Sabancaya volcano, southern Peru using RADARSAT and Landsat TM data, report unpublished. Center for Earth Planetary Studies. National Air and Space Museum, Smithsonian Institution. 10 p. También disponible en: <<http://airandspace.si.edu/research/ceps/research/bulmer/pdf/ADRORELATEDii.pdf>>
- Chorowicz, J.; Deffontaines, B.; Huamán, D.; Guillaude, R.; Leguern, F & Thouret, J.C. (1992) - SPOT Satellite monitoring of the eruption of Nevado Sabancaya volcano (southern Peru). *Remote Sensing of Environment*, 42(1): 43-49.
- Claire, D. (2007) - *Comportamiento actual del ante-arco y del arco del codo de Arica en la orogénesis de los Andes Centrales*. Tesis doctoral, Universidad de Chile, Facultad de Ciencia Físicas y Matemáticas, Santiago de Chile, 280 p.
- Cruz, J.V. & Franca, Z. (2006) - Hydrogeochemistry of thermal and mineral water springs of the Azores archipelago (Portugal). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 151(4): 382-398.
- Cruz, V. (2006) - Caracterización geoquímica de las fuentes termales alrededor del volcán Ticsani (Moquegua). En: Congreso Peruano de Geología, 13, Lima, 2006, *Resúmenes extendidos*. Lima: Sociedad Geológica del Perú, p. 661-664.
- Cruz, V.; Gonzales, K.; Macedo, O. & Fournier, N. (2009) - Caracterización geoquímica de las fuentes termales y frías asociadas al Volcán Ubinas en el sur del Perú. *Boletín Sociedad Geológica del Perú*, (103): 265-281.

- De Silva, S.L., Francis, P.W. (1991) - *Volcanoes of the Central Andes*. Berlin: Springer-Verlag, 216 p.
- De Silva, S.L. & Zielinski, G.A. (1998) - Global influence of the AD 1600 eruption of Huaynaputina, Peru. *Nature*, 393(6684): 455-458.
- De Silva S.L.; Alzueta, J. & Salas, G. (2000) - The socioeconomic consequences of the A.D. 1600 eruption of Huaynaputina, southern Peru. En: McCoy, F.W. & Heiken, G., eds., *Volcanic hazards and disasters in human antiquity*. Boulder, CO: Geological Society of America, Special Paper 345, p. 15-24.
- Delmelle, P. & Stix, J. (2000) - Volcanic gases. En: Sigurdsson, H., ed., *Encyclopedia of volcanoes*. San Diego, CA: Academic Press, p. 803-815.
- Dorbath, L.; Dorbath, C.; Jiménez, E. & Rivera, L. (1991) - Seismicity and tectonic deformation in the Eastern Cordillera and the sub-Andean zone of central Peru. *Journal of South American Earth Sciences*, 4(1-2): 13-24.
- Fahlquist, L.S. & Janik, C.J. (1992) - *Procedures for collecting and analyzing gas samples from geothermal systems*. Washington: US Geological Survey, Open File Report 92-211, 19 p.
- Fehler, M.; Hoshiba, M.; Sato, H. & Obara, K. (1992) - Separation of scattering and intrinsic attenuation for the Kanto-Tokai region, Japan, using measurements of S-wave energy versus hypocentral distance. *Geophysical Journal International*, 108(3): 787-800.
- Fidel, L.; Morche, W. & Núñez, S. (1997) - Inventario de volcanes del Perú. *INGEMMET, Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica*, 15, 90 p.
- García, W. (1978) - Geología de los cuadrángulos de Puquina, Omate, Huaitiri, Mazo Cruz y Pizacoma. *Instituto de Geología y Minería, Boletín*, 29, 64 p.
- Giggenbach, W.F. & Glover, R.B. (1975) - The use of chemical indicators in the surveillance of volcanic activity affecting the crater lake on Mt. Ruapehu, New Zealand. *Bulletin Volcanologique* 39(1): 70-81, doi: 10.1007/BF02596947
- Gonzales, E.; Kosaka, M. & Minaya, A. (1996) - Sismicidad del volcán Sabancaya y el Hualca-Hualca. Segundo Seminario Latinoamericano: Volcanes, Sismos y Prevención, 2, Lima y Arequipa, 1996.
- Gonzales, K. (2009) - *Informe: Monitoreo InSAR de los volcanes Misti, Ubinas y Ticsani – 2009* (en línea). Lima: Instituto Geológico Minero y Metalúrgico. 8 p. Disponible en: <<http://volcanes.ingemmet.gob.pe:86/ingemmet/docus/publicaciones/ticsani/informes/3/untitled44/files/monitoreo%20insar%20volcanes%20misti%20ubinas%20ticsani%202009.pdf>>
- Gonzales, K.; Froger, J.L.; Audin, L. & Macedo, O. (2009) - Ejemplos de deformación producto de la tectónica extensiva en las zonas de Huambo-Cabanaconde en Arequipa y Calacoa-Huaytire en Moquegua, de los Andes Centrales vistos por Interferometría Radar – InSAR. *Boletín Sociedad Geológica del Perú*, (103): 109-124.
- Gregory-Wodzicki, K.M. (2000) - Uplift history of the Central and Northern Andes: a review. *Geological Society of America Bulletin*, 112(7): 1091-1105.
- Gupta, H.K. (2002) - A review of recent studies of triggered earthquakes by artificial water reservoirs with special emphasis on earthquakes in Koyna, India. *Earth-Science Reviews*, 58(3-4): 279-310.
- Gupta, S.C.; Teotia, S.S.; Rai, S.S. & Gautam, N. (1998) - Coda Q estimates in the Koyna Region India. *Pure Applied Geophysics*, 153(2-4): 713-731.
- Havskov, J.; Malone S.; McClurg, D. & Crosson, R. (1989) - Coda Q for the state of Washington. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 79(4): 1024-1038.
- Havskov, J.; Peña, J.; Ibañez, J.; Ottemöller, L. & Martínez, C. (2003). - Magnitude scales for very local earthquakes. Application for Deception Island volcano (Antarctica). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 128(1-3): 115-133.
- Havskov, J. & Ottemöller, L. (2009) - SEISAN. The earthquake analysis software, versión 8.2.1. Bergen: Institute of Solid Earth Physics, University of Bergen, 250 p.
- Hirabayashi, J.; Ossaka, J. & Ozawa, T. (1982) - Relationship between volcanic activity and chemical composition of volcanic gases: a case study on the Sakurajima Volcano. *Geochemical Journal*, 16(1): 11-21.
- Huamán, D.; Chorowicz, J.; Deffontaines, B.; Guillaude, R. & Rudant, J.P. (1993) - Cadre structural et risques géologiques étudiés à l'aide de l'imagerie spatiale: la région du Colca (Andes du Sud Pérou). *Bulletin Société Géologique de France*, 164(6): 807-818.
- Huamán, D. (1995) - *Métodos y aplicaciones de las imágenes de satélite en la cartografía geológica: el caso del seguimiento y evolución de la amenaza volcánica del Sabancaya (región del Colca, Arequipa, Perú)*. Tesis

- Ingeniero Geólogo, Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa, 138 p.
- Inguaggiato, S.; Martín-Del Pozzo, A.L.; Aguayo, A.; Capasso, G. & Favara, R. (2005) - Isotopic, chemical and dissolved gas constraints on spring water from Popocatepetl volcano (Mexico): evidence of gas-water interaction between magmatic component and shallow fluids. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 141(1-2): 91-108.
- Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (2000a) - Mapa geológico del cuadrángulo de Ichuña (33-u), escala 1:100,000. INGEMMET, Lima, Perú.
- Jordan, T.E.; Isacks, B.L.; Allmendinger, R.W.; Brewer, J.A.; Ramos V. & Ando, C.J. (1983) - Andean tectonics related to geometry of subducted Nazca Plate, *Geological Society of America Bulletin*, 94(3): 341-361.
- Klein, F. (1978) - *Hypocenter location program Hypoinverse*. Washington: US Geological Survey, Open File Report 78-694.
- Kumar, C.H.P.; Sarma, C.S.P.; Shekar, M. & Chadha, R.K. (2007) - Attenuation studies based on local earthquake Coda waves in the southern Indian peninsular shield. *Natural Hazards*, 40(3): 527-536.
- Lavallée, Y.; De Silva, S.L.; Salas, G. & Byrnes, J.M. (2006) - Explosive volcanism (VEI 6) without caldera formation: insight from Huaynaputina volcano, southern Peru. *Bulletin of Volcanology*, 68(4): 333-348.
- Lavallée, Y.; De Silva, S.; Salas, G. & Byrnes, J.M. (2009) - Structural control on volcanism at the Ubina, Huaynaputina, and Ticsani Volcanic Group (UHTVG), southern Peru. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 186(3-4): 253-264
- Lazo, M.; Kosaka, A.; Minaya, A.; Gonzáles, E. & Soto, J. (1991) - Evaluación de la actividad sísmica del volcán Sabancaya. En: Congreso Peruano de Geología, 7, Lima 1991, *Resúmenes extendidos*. Lima: Sociedad Geológica del Perú, t. 1, p. 19-22.
- Lesage, P. (2009) - Interactive Matlab software for the analysis of seismic volcanic signals. *Computers & Geosciences*, 35(10): 2137-2144.
- Lienert, B.R. (1994) - *Hypocenter 3.2: A computer program for locating earthquakes locally, regionally and globally*. Hawaii: Hawaii Institute of Geophysics and Planetology, 70 p.
- Londoño, J. (1996) - Temporal change in coda Q at Nevado Del Ruiz Volcano, Colombia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 73(1-2): 129-139.
- Londoño, J.; Sánchez, J.; Toro, L.; Gil, F. & Bohórquez, O. (1998) - Coda Q before and after the eruptions of 13 November 1985, and 1 September 1989, at Nevado del Ruiz Volcano, Colombia. *Bulletin of Volcanology*, 59(8): 556-561.
- Macedo, O.; Taipe, E. & Ramos, D. (2007) - *Observaciones asociadas al lahar ocurrido el 17 de enero 2007 en el valle de Ubina*, informe de campo inédito. Arequipa: Instituto Geofísico del Perú, 14 p.
- Macedo, O., Metaxian, J.P., Taipe, E., Ramos, D., Inza, A. (2009) - Seismicity associated with the 2006-2008 eruption, Ubina volcano. En: Bean, C.J., Braiden, A.K., Lokmer, I., Martini, F. & O'Brien, G.S., eds. *The VOLUME Project – VOLcanoes: Understanding subsurface mass moveMEnt*. Dublin: VOLUME Consortium/Jaycee Printing, p. 262-270.
- Mariño, J. (2002) - *Estudio geológico vulcanológico y evaluación de peligros del volcán Ticsani (sur de Perú)*. Tesis Ing. Geólogo, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima. 160 p.
- Mariño, J. & Thouret, J.C. (2003) - Geología, historia eruptiva y evaluación de peligros del volcán Ticsani (sur del Perú). *Boletín Sociedad Geológica del Perú*, (95): 7-31.
- Mariño, J.; Rivera, M.; Cruz, V.; Cacya, L. & Thouret, J.C. (2006) - *Informe de trabajos efectuados por el INGEMMET durante la crisis volcánica del volcán Ubina, periodo marzo a julio del 2006*, informe técnico inédito. Arequipa: Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, 77 p.
- Marocco, R. & Del Pino, M. (1966) - Geología del cuadrángulo de Ichuña. *Comisión Carta Geológica Nacional, Boletín* 14, 57 p.
- Martin Del Pozzo, A.L.; Aceves, F.; Espinasa, R.; Aguayo, A.; Inguaggiato, S., et al. (2002) - Influence of volcanic activity on spring water chemistry at Popocatepetl Volcano, Mexico. *Chemical Geology*, 190(1-4): 207-229.
- Masías, P.; Antayhua, Y.; Cruz, V.; Rivera, M. & Mariño, J. (2008) - Vigilancia geoquímica y visual del volcán Ubina período 2005-2008 (CD ROM). En: Congreso Peruano de Geología, 14; Congreso Latinoamericano de Geología, 13, Lima, 2008. *Resúmenes*. Lima: Sociedad Geológica del Perú, 6 p.

- Masías, P.; Antayhua, Y. & Ramos, D. (2010a) - Monitoreo geoquímico de las fumarolas y fuentes termales alrededor del volcán Ticsani 2005-2009 (Moquegua) (CD-ROM). En: Congreso Peruano de Geología, 15, Cusco 2010. *Resúmenes extendidos*. Lima: Sociedad Geológica del Perú, p. 1132-1135.
- Masías, P.; Antayhua, Y. & Ramos, D. (2010b) - Monitoreo de las fuentes termales y fumarolas del volcán Misti (Arequipa) 2005-2010 (CD-ROM). En: Congreso Peruano de Geología, 15, Cusco 2010. *Resúmenes extendidos*. Lima: Sociedad Geológica del Perú, p. 1136-1139.
- Mering, C.; Huamán, D.; Chorowicz, J.; Deffontaines, B. & Guillaude, R. (1996) - New data on the geodynamics of southern Perú from computerized analysis of SPOT and SAR ERS-1 images. *Tectonophysics*, 259(1-3): 153-169
- Metaxian, J.P.; Ramos, D.; Macedo, O.; Finizola, A. & Inza, A. (1998) - *Reporte sísmico preliminar de la misión a los volcanes Ubinas y Misti en el sur del Perú (9 de marzo – 10 de abril de 1998)*, informe inédito. Lima: Instituto Geofísico del Perú, 30 p.
- Nicholson, K. (1993) - *Geothermal fluids: Chemistry and exploration techniques*. Berlin: Springer-Verlag, 278 p.
- Norabuena, E.; Leffler-Griffin, L.; Mao, A.; Dixon, T.; Stein, S., et al. (1998) - Space geodetic observations of Nazca–South America convergence across the Central Andes. *Science*, 279(5349): 358–362.
- Nuttli, O.W. (1980) - The excitation and attenuation of seismic crustal phases in Iran. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 70(2): 469-485.
- O'Doherty, K.B.; Bean, C.J. & McCloskey, J. (1997) - Coda wave imaging of the Long Valley Caldera using a spatial stacking technique. *Geophysical Research Letters*, 24(13): 1547-1550.
- Ottmøller, L.; Voss, P. & Havskov, J. (2010) - *SEISAN. Earthquake Analysis Software for Windows, Solaris, Linux and MacOSx*. Versión 8.3. Bergen: University of Bergen, 348 p.
- Paul, A.; Gupta, S.C. & Pant, C.C. (2003) - Coda Q estimates for Kumaun Himalaya. *Journal of Earth System Science*, 112(4): 569-576.
- Pritchard, M.A. (2003) - *Recent crustal deformation in west-central South America*. PhD Thesis, California Institute of Technology, Pasadena, California. 251 p.
- Ramos, D. & Antayhua, Y. (2008) - *Análisis de las señales sísmicas registradas en el volcán Ubinas, período 22 de abril al 16 de mayo del 2008*, informe inédito. Arequipa: Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, 29 p.
- Ramos, D. & Antayhua, Y. (2010) - *Sismicidad de la región del volcán Sabancaya, período 2009-2010*, informe inédito. Arequipa: Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, 49 p.
- Rivera, M.; Tavera, H.; Aguilar, V.; Medina, J. & Lázares, L., eds. (2006) - *Crisis sísmica de Calacoa (Moquegua) octubre, 2005: informe técnico multi-institucional*. Lima: [s.e.], 96 p.
- Rodríguez, A. & Huamán, D. (2002) - *Teleanálisis geológico y sísmica del sector comprendido entre el volcán Sabancaya y el poblado de Ichupampa: el sistema de fallas Sepina*, Informe interno. Lima: Instituto Geofísico del Perú., 8 p.
- Sébrier, M.; Mercier, J.L.; Mégard, F.; Laubacher, G. & Carey-Gailhardis, E. (1985) - Quaternary normal and reverse faulting and state of stress in the Central Andes of South Perú. *Tectonics*, 4(7): 739-780.
- Sébrier, M. & Soler, P. (1991) - Tectonics and magmatism in the Peruvian Andes from late Oligocene time to the Present. En: Harmon, R.S. & Rapela, C.W., eds. *Andean magmatism and its tectonic setting*. Boulder, CO: Geological Society of America, Special Paper 265, p. 259-278.
- Simkin, T. & Siebert, L. (1994) - *Volcanoes of the world: a regional directory, gazetteer, and chronology of volcanism during the last 10,000 years*. 2a. ed. Tucson, AR: Geoscience Press, 349 p.
- Tavera, H. (2006) - *Características sismotectónicas de la crisis sísmica de octubre del 2005 en la región del volcán Ticsani (Moquegua)*. Lima: Instituto Geofísico del Perú, 77 p.
- Thamban, M.; Chaturvedi, A.; Rajakumar, A.; Naik, S.S.; D'Souza, W., et al. (2006) - Aerosol perturbations related to volcanic eruptions during the past few centuries as recorded in an ice core from the Central Dronning Maud Land, Antarctica. *Current Science*, 91(9): 1200-1207.
- Thelen, W.A.; Crosson, R.S. & Creager, K.C. (2008) - Absolute and relative Locations of earthquakes at Mount St. Helens, Washington, using continuous data: Implications for magmatic processes. En: Sherrod, D.R.; Scott, W.E. & Stauffer, P.H., eds. *A volcano rekindled: The renewed*

- eruption of Mount St. Helens, 2004-2006. *U.S. Geological Survey Professional Paper* 1750, p. 71-95.
- Thouret, J.C.; Dávila, J. & Eissen, J.P. (1999) - Largest explosive eruption in historical times in the Andes at Huaynaputina volcano, A.D. 1600, southern Peru. *Geology*, 27(5): 435-438.
- Thouret, J.C.; Juvigne, E.; Gourgaud, A.; Boivin, P. & Dávila, J. (2002) - Reconstruction of the A.D. 1600 Huaynaputina eruption based on the correlation of geologic evidence with early Spanish chronicles. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 115(3-4): 529-570.
- Williams-Jones, G.; Stix, J. & Nadeau, P.A. (2008) - Using the COSPEC in the field. En: Williams-Jones, G., Stix, J. & Hickson, C., eds. *The COSPEC cookbook: making SO2 gas measurements at active volcanoes*. [s.l.]: IAVCEI Methods in Volcanology, 1, p. 63-119.
- Wong, V.; Rebolgar, C.J. & Munguía, L. (2001) - Attenuation of Coda Waves at the Tres Vírgenes Volcanic area, Baja California Sur, México. *Bulletin of Seismological Society of America*, 91(4): 683-693.

ANEXOS

Anexo 2.1

Parámetros hipocentrales de 44 sismos localizados en la zona del volcán Ticsani.
La fecha está dada por año (AA), mes (MM) y día (DD); la hora origen (GMT: Greenwich Mean Time) en hora (HH), minuto (MM) y segundo (SS); Prof.: la profundidad del hipocentro en kilómetros; y RMS: la raíz media cuadrática en segundos.

N.º sismo	Fecha: AA/MM/DD	Hora Origen (GMT) HH:MM:SS	Coordenadas UTM		Prof. (km)	Md (grados)	RMS
			N	E			
1	13/09/2008	35:37.1	8142619,08	338867,35	4.2	0.2	0.02
2	13/09/2008	55:16.7	8149037,06	338818,49	0	0.1	0.03
3	13/09/2008	55:31.3	8143182,88	340248,83	0.5	-0.1	0.04
4	13/09/2008	18:12.5	8148198,46	330614,63	0	1	0.02
5	13/09/2008	48:38.8	8154033,37	341020,27	12.7	0.5	0.02
6	14/09/2008	03:11.9	8155045,07	343145,85	19.5	0.8	0.01
7	14/09/2008	21:05.9	8148965,38	329648,81	0	0.4	0.01
8	15/09/2008	57:56.5	8136722,98	334862,82	19	0.2	0.11
9	15/09/2008	24:33.8	8148709,95	339460,73	8.3	0.1	0.03
10	18/09/2008	45:06.2	8153410,19	346570,62	4.6	0.1	0.06
11	18/09/2008	45:26.2	8145232,75	348122,24	5.3	0.5	0.03
12	20/09/2008	08:20.5	8150262,33	339875,52	13.1	0.5	0.02
13	21/09/2008	42:44.8	8133546,18	325191,26	10.1	0.4	0.02
14	23/09/2008	48:46.8	8150704,95	339872,18	0.9	0.4	0.01
15	25/09/2008	43:03.1	8144797,6	334373,2	9.4	0.2	0.29
16	25/09/2008	53:03.1	8159816,37	344924,28	0	0.9	0.2
17	26/09/2008	34:41.1	8143144,42	335238,95	2.6	0.4	0.03
18	28/09/2008	25:59.5	8125194,63	346882,28	0	0.9	0.27
19	30/09/2008	41:55.2	8123315,85	347215,52	0	0.9	0.09
20	03/10/2008	44:47.0	8129590,97	358354,7	15	1	0.06
21	05/10/2008	13:08.8	8136671,1	342536	12.6	0.6	0.05
22	05/10/2008	06:40.7	8145788,5	333725,75	7.1	0.6	0.05
23	07/10/2008	54:49.2	8142266,63	336205,16	7.4	0.3	0.04
24	09/10/2008	09:01.1	8144585,44	335547,55	0.3	0.3	0.04
25	11/10/2008	22:50.3	8133962,39	335630,37	6.9	-0.2	0.03
26	11/10/2008	42:44.0	8141356,33	333014,46	0	0.6	0.02
27	11/10/2008	17:07.2	8145697,79	336285,19	21.9	1.4	0.09
28	13/10/2008	52:54.9	8131914,56	342784,7	5.7	0.5	0.09
29	14/10/2008	11:51.5	8126333,7	336542,25	24.6	1.5	0.02
30	16/10/2008	52:14.3	8127841,53	331310,81	9.5	1.1	0.06
31	05/12/2008	39:22.6	8150189,68	344994,43	20.2	0.9	0.02

Anexo 2.1 (continuación)

Parámetros hipocentrales de 44 sismos localizados en la zona del volcán Ticsani.
La fecha está dada por año (AA), mes (MM) y día (DD); la hora origen (GMT: Greenwich Mean Time)
en hora (HH), minuto (MM) y segundo (SS); Prof.: la profundidad del hipocentro en kilómetros;
y RMS: la raíz media cuadrática en segundos.

N.º sismo	Fecha: AA/MM/DD	Hora Origen (GMT) HH:MM:SS	Coordenadas UTM		Prof. (km)	Md (grados)	RMS
			N	E			
32	06/12/2008	53:22.1	8135853,16	323147,26	3.2	0.7	0.11
33	10/12/2008	44:37.7	8152302,91	346471,98	11	0.3	0.02
34	15/01/2009	49:19.3	8146907,56	335316,26	3	0.1	0.04
35	16/01/2009	04:10.6	8146579,73	335851,9	4	-0.2	0.03
36	16/01/2009	04:10.6	8146579,73	335851,9	4	-0.2	0.03
37	16/01/2009	41:04.9	8146909,22	335529,49	3.2	0.1	0.05
38	17/01/2009	56:36.6	8146582,21	336171,74	5.7	0.1	0.06
39	19/01/2009	51:26.6	8144493,7	338000,21	0.1	-0.3	0.01
40	23/01/2009	10:39.5	8148458,4	335517,47	16.5	0.6	0.02
41	27/01/2009	25:02.0	8151625,82	344664,02	6.6	0.2	0.05
42	27/01/2009	00:49.5	8149946,36	342010,54	1.9	0.1	0.03
43	27/01/2009	08:24.4	8149736,9	343611,55	3.7	0.2	0.01
44	01/02/2009	17:37.0	8151175,39	343600,95	5.8	0.4	0.02

Fuente	Fecha	T°	pH	CE	TDS	Ca	Mg	Na	K	Al	Sr	Li	Ba	CO3=	HCO3-	Cl-	SO4=	NO3-	Cu	Pb	Zn	Fe	Cd	Cr	As	Hg				
Pu2	11/11/2007	91.6	8.19	7780	1598																									
Pu2	25/08/2008	89.9		3240	1654																									
Pu2	13/11/2009	81.1	8.21	3270	1683	64.28	5.22	574.52	54.25	0.014	1.46	3.01	0.0724	1.5	147.2	727.6	391.3		0.0006	ND	0.0127	ND	ND	0.0061	3.753	0.0015				
Pu2	22/03/2010	80.8	8.16	3200	1642	42.91	4.77	635.36	50.34	0.022	1.52	3.26	0.0925		704.1	417.3		ND	ND	0.0118	ND	ND	ND	ND	3.568	ND				
RFT	30/03/2006	31.9	6.18			30	18.00	85.00	13.00	ND	0.27	0.15	ND	N.D.	122.4	15.2	121.4	ND	ND	0.0090	0.028	ND	ND	ND	0.012	ND				
RFT	28/06/2006	32.0				25.8	17.60	89.40	14.00	0.011	0.19	0.16	ND	8.2	116.4	509.2	118.9	ND	ND	0.0150	ND	ND	ND	ND	ND	ND				
RFT	05/10/2006	32.2	6.5			29	18.50	87.00	16.00	0.010	0.19	0.19	0.01	ND	110.5	15.5	119.8	0.10	ND	0.1510	0.02	ND	ND	ND	0.010	ND				
RFT	21/06/2007	31.6	6.06	774	331	28.40	17.26	79.34	14.46	ND	0.18	0.14	0.01	ND	203	17	126	ND	ND	0.0080	0.02	ND	ND	ND	0.020	ND				
RFT	01/10/2007	31.7	6.3	773	331																									
RFT	11/11/2007	32.5	6.21	765	325																									
RFT	19/04/2008	32.2	6.08	692	336	31.15	18.47	87.82	15.46	0.030	0.21		0.01	ND	198.0	17	124.0	0.30	ND	0.0130	0.02		ND	0.030						
RFT	25/06/2008	32.3	6.06	688	337	31.26	18.25	88.32	15.57	ND	0.21		0.013	ND	198.0	17	124.0	0.20	ND	ND	0.020		ND	ND	ND					
RFT	26/08/2008	31.5	6.05	681	331										180.4	143.2														
RFT	22/10/2008	31.8	6.16	773	377																									
RFT	21/03/2009	32.3	6.06	688	337																									
RFT	11/11/2009	31.9	6.26	670	326	31.29	16.00	72.35	16.24	ND	0.19	0.15	0.0085	3.1	256.3	16.2	124.2		0.0002	ND	0.0106	ND	ND	0.0126	0.032	ND	ND			
RFT	21/03/2010	32.0	6.1	676	338	27.9	18.61	87.81	14.61	0.011	0.21	0.15	0.0125		16.7	136.5		0.0139	0.0012	0.0078	0.0086	ND	ND	0.027	0.027	ND	ND			
RFT	18/03/2011	33.3	6.63	656	319	29.4	17.9	82.3	14.4	≤ 0.02	0.198	0.141	0.010	N.D.	207.3	14.3	107.8	≤ 1	≤ 0.003	≤ 0.01	0.005	≤ 0.01	≤ 0.02	≤ 0.01						
RFT	16/08/2011	32.2	6.26	682	331	33.5	20.3	92.9	17.2	0.03	0.24	0.159	0.013	N.D.	203.6	10.2	71.6	≤ 1	≤ 0.003	≤ 0.1	≤ 0.003	0.04	≤ 0.02	≤ 0.01						
SEC	06/10/2006	72.5	7			120.00	6.33	350.00	39.00	0.017		2.19	0.11	ND	142.60	776.20	147.30	0.24	ND	ND	0.0271		ND	ND	1.660	ND	ND			
SEC	21/06/2007	70	6.75	4760	1177	102	5.48	336.42	38.10	0.460	1.17	2.07	0.08	ND	255	511	155	ND	ND	0.0070	1.57	ND	ND	2.480						
SEC	29/09/2007	75.5	7.18	4910	1162																									
SEC	12/11/2007	76	7.19	4770	1149																									
SEC	20/04/2008	74.2	7.86	2330	1174																									
SEC	26/06/2008	74.7	6.97	2300	1160																									
SEC	27/08/2008	73.4	7.35	2280	1145																									
SEC	22/03/2009	73.8	7.05	2140	1080																									
SEC	12/11/2009	68	7.61	2060	1037	110.86	5.39	287.68	33.21	ND	1.00	1.73	0.0691	4.0	241.4	416.5	129.7	0.0013	ND	0.0104	ND	ND	0.0162	1.756	0.0008	ND	ND			
SEC	22/03/2010	74.8	8.16	2340	1182	88.24	5.25	359.52	41.63	0.010	1.21	2.09	0.0896		528.1	173		ND	ND	0.0034	0.1727	ND	0.0005	2.171	ND					
SEC	17/03/2011	73.4	8.24	2220	1121	97.6	5.2	294.5	34.9	≤ 0.02	1.15	1.79	0.071	N.D.		733.8	127.3	≤ 1	≤ 0.003	≤ 0.01	0.006	0.11	≤ 0.001	≤ 0.02	1.77					
SEC	22/08/2011	75.2	6.76	2490	1265	114.9	6.0	372.6	43.7	≤ 0.02	1.40	2.26	0.085	N.D.	247.8	855.3	138.6	≤ 1	≤ 0.003	≤ 0.1	0.009	≤ 0.01	≤ 0.001	≤ 0.02	2.31					
SEC	28/04/2012	70.9	7.41	2240	1130	103.8	5.6	329.7	37.6	≤ 0.02	1.26	1.98	0.076	16.9	345.8	475.9	147.6	≤ 1	≤ 0.003	≤ 0.1	0.025	0.16	≤ 0.001	≤ 0.02	1.89					
TX1	10/03/2006	24.8	8.01			36.1	22.00	76.00	13.00	0.034	0.17	0.12	0.023	N.D.	79.6	23.2	201	0.11	ND	ND	0.0130	0.027	ND	ND	0.008	ND	ND	ND		
TX1	28/06/2006	25.0	6.00			34.8	22.50	78.10	14.00	0.010	0.19	0.16	ND	5.8	78.4	22.1	198.4	0.12	ND	0.0150	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND		
TX1	05/10/2006	24.7	7.00			38	23.80	78.00	14.00	0.010	0.15	0.15	0.010	ND	72.5	16.6	196.8	0.12	0.002	0.0920	0.02	ND	ND	0.005	ND	ND	ND	ND		
TX1	20/06/2007	24.2	8.02	714	353	36.46	22.12	70.79	12.96	ND	0.20	0.12	ND	ND	136	ND	219	0.10	ND	0.0080	0.02	ND	ND	0.020						
TX1	30/09/2007	24.8	8.23	719	325																									
TX1	12/11/2007	24.9	8.29	708	515																									
TX1	18/04/2008	24.8	8.23	736	359																									
TX1	26/06/2008	23.9	8.30	731	356	40.29	23.25	78.39	14.20	ND	0.23		0.008	ND	133	21	201	0.10	ND	ND	0.02		ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	
TX1	27/08/2008	23.7	8.01	713	347																									
TX1	22/10/2008	24.5	8.34	714	347																									
TX1	22/03/2009	24.5	7.68	666	324																									
TX1	17/03/2011	25.9	8.58	716	348	38.1	22.8	70.9	12.7	≤ 0.02	0.215	0.119	0.007	N.D.	138.3	19.3	193.6	≤ 1	≤ 0.003	≤ 0.01	≤ 0.003	≤ 0.01	≤ 0.02	≤ 0.01						
TX1	25/08/2011	24.7	7.00			44.8	26.8	83.3	15.3	≤ 0.02	0.27	0.137	0.006	N.D.	137.9	19.1	84.4	≤ 1	≤ 0.003	≤ 0.1	≤ 0.003	0.05	≤ 0.001	≤ 0.02	≤ 0.01					
TX1	29/04/2012	26.3	7.97	747	359	40.7	25.2	80.4	13.8	≤ 0.02	0.24	0.130	≤ 0.003	18	162.0	20.1	211.8	≤ 1	≤ 0.003	≤ 0.01	0.017	0.07	≤ 0.001	≤ 0.02	≤ 0.01					
TX1	22/03/2010	24.3	8.39	712	346	30.05	22.79	77.34	12.70	0.004	0.23	0.11	0.0058		20.4	223.7		ND	ND	0.0041	ND	ND	ND	0.012	ND	ND	ND	ND	ND	ND

Anexo 3.1

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

N.º sismo	Fecha	Hora origen (GMT)	Coordenadas UTM		Prof. (km)	Md (grados)	RMS
	AA/MM/DD	HH:MM:SS	N	E			
1	24/05/2009	58:35.3	8261208,847	179508,173	1.5	1.1	0.03
2	25/05/2009	18:18.1	8261795,790	181860,356	0	0.7	0.04
3	09/06/2009	55:21.4	8260673,313	189196,775	0	1	0.12
4	09/06/2009	39:22.2	8242361,510	186100,914	0	1.4	1.38
5	09/06/2009	19:14.9	8262081,108	178530,163	2.1	0.9	0.03
6	13/06/2009	06:25.4	8248676,498	194268,814	0.5	1	0.03
7	13/06/2009	30:40.3	8265156,404	192650,958	6.4	1.3	0.02
8	13/06/2009	24:45.8	8266056,727	193711,808	0	1.6	0.11
9	13/06/2009	24:14.6	8265964,750	195107,961	2.3	1.5	0.04
10	14/06/2009	22:22.0	8264289,395	194057,516	1.4	1.5	0.01
11	14/06/2009	54:21.6	8262855,697	194505,988	4.5	1.4	0.01
12	14/06/2009	06:39.5	8261443,593	196563,308	0.8	2.1	0.06
13	14/06/2009	54:33.9	8268390,697	194324,254	3.6	1.1	0.01
14	14/06/2009	19:10.5	8263285,594	193534,600	7.7	1.8	0
15	14/06/2009	40:16.3	8265087,553	195763,507	6.5	2.3	0.01
16	15/06/2009	17:28.6	8261184,628	193777,550	3.3	2.9	0.02
17	15/06/2009	31:49.3	8263905,329	198461,567	6.5	1.8	0.07
18	15/06/2009	46:21.1	8263728,513	193528,619	4	1.7	0.01
19	15/06/2009	11:30.6	8263454,575	189669,809	6.5	1.4	0.02
20	15/06/2009	11:50.2	8263968,757	194920,169	2.9	1.5	0.03
21	15/06/2009	52:13.6	8265609,470	193395,935	4	2	0.03
22	15/06/2009	20:08.0	8265723,093	193609,003	1.8	1.6	0.01
23	15/06/2009	25:11.1	8263611,985	193101,028	4.4	1.4	0.02
24	15/06/2009	29:43.3	8264827,115	192870,008	7.4	1.9	0.01
25	15/06/2009	37:53.1	8265386,562	193291,643	6.7	1	0.04
26	15/06/2009	22:19.8	8266728,323	194239,285	5.1	1.5	0.01
27	15/06/2009	34:41.1	8266268,055	192957,835	1	1.4	0.01
28	15/06/2009	27:19.0	8265728,875	194038,127	4	1.4	0.02
29	15/06/2009	35:10.1	8265296,059	194795,041	3.7	1.7	0.02
30	15/06/2009	34:25.7	8245399,586	197636,669	0	1.5	0.06
31	15/06/2009	47:09.6	8257958,921	192748,532	3.3	2.1	0.03
32	15/06/2009	44:37.7	8265631,125	195005,138	4	1.5	0.05
33	15/06/2009	58:40.7	8260756,180	194856,107	2.9	1.5	0.06
34	17/06/2009	43:50.5	8245953,226	197629,213	0.8	1.4	0.05
35	17/06/2009	52:51.6	8248185,046	198885,741	3.3	1.1	0.11

Anexo 3.1 (continuación)

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

N.º sismo	Fecha	Hora origen (GMT)	Coordenadas UTM		Prof. (km)	Md (grados)	RMS
	AA/MM/DD	HH:MM:SS	N	E			
36	17/06/2009	06:19.7	8265841,048	194143,918	3.4	1.3	0.01
37	19/06/2009	38:04.1	8266726,880	194131,999	6.9	1.3	0.01
38	19/06/2009	06:52.0	8266944,007	193807,160	0	1.3	0.02
39	19/06/2009	43:22.2	8265743,293	195110,932	7.6	1.5	0.02
40	19/06/2009	30:14.2	8261758,511	195271,734	4.5	1.3	0.02
41	19/06/2009	11:34.2	8266171,791	194032,165	2.7	1.4	0
42	20/06/2009	19:06.8	8267726,324	194333,178	0.8	1.6	0.03
43	20/06/2009	31:05.5	8262855,697	194505,988	5.7	1	0.02
44	21/06/2009	19:32.6	8265944,552	193606,017	6.7	1.6	0.02
45	21/06/2009	18:01.9	8266390,361	193814,616	6.6	1.3	0.01
46	21/06/2009	24:21.1	8267557,531	190043,020	10	1.6	0.06
47	21/06/2009	23:53.0	8265173,784	193938,304	6.1	1.3	0.02
48	22/06/2009	39:43.6	8262674,490	197512,383	5.8	1.3	0.04
49	23/06/2009	14:16.0	8265271,485	192971,300	1.9	1.1	0.03
50	23/06/2009	56:01.1	8263626,465	194173,740	3.7	1.4	0.01
51	23/06/2009	41:01.3	8247752,177	199642,012	3.2	1.2	0.02
52	24/06/2009	49:00.1	8261390,116	192594,686	0	1.9	0.1
53	24/06/2009	18:59.3	8264978,262	195872,266	8.4	1.4	0.01
54	24/06/2009	06:33.8	8269390,134	194525,471	0.5	1.6	0.02
55	25/06/2009	38:45.7	8256026,565	197279,448	7.6	1.3	0.02
56	26/06/2009	24:27.0	8265131,848	199089,039	8.6	1.7	0.07
57	26/06/2009	54:16.0	8260552,022	196146,151	4.6	1.9	0.01
58	26/06/2009	24:25.3	8261742,621	194091,857	1.9	1	0.01
59	26/06/2009	47:21.0	8265162,205	193080,075	3.1	1.2	0.02
60	27/06/2009	09:04.4	8264263,295	192126,570	4	0.9	0.04
61	27/06/2009	22:58.1	8250883,818	193702,677	0	0.7	0.03
62	27/06/2009	28:44.5	8250305,298	191887,659	0	0.9	0.03
63	27/06/2009	13:34.5	8271365,957	193211,062	1.2	1.6	0.01
64	27/06/2009	41:56.1	8262960,644	194075,427	2.9	1.3	0.06
65	27/06/2009	54:25.7	8266381,682	193170,909	0.9	1.5	0.05
66	28/06/2009	42:44.4	8266501,090	193813,125	0.7	1	0.05
67	28/06/2009	03:50.6	8262605,243	192363,637	3	1.4	0.04
68	28/06/2009	14:58.6	8263387,623	192889,482	2.7	1.5	0.03
69	28/06/2009	12:50.6	8247270,406	196753,802	0.6	0.4	0.04
70	28/06/2009	22:24.5	8265167,999	193509,190	0	1.2	0.05
71	28/06/2009	42:04.3	8259903,454	197334,826	8.5	1.2	0.01
72	29/06/2009	09:48.8	8260423,993	194860,581	1.4	1	0.01
73	29/06/2009	10:10.2	8261499,392	192485,922	2.2	1.1	0.02

Anexo 3.1 (continuación)

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

N.º sismo	Fecha	Hora origen (GMT)	Coordenadas UTM		Prof. (km)	Md (grados)	RMS
	AA/MM/DD	HH:MM:SS	N	E			
74	29/06/2009	10:51.2	8259873,238	195082,545	0.2	0.8	0.01
75	29/06/2009	12:05.6	8260853,888	193889,297	0.9	0.8	0
76	29/06/2009	36:27.0	8248896,501	194158,603	0	0.6	0.04
77	29/06/2009	51:28.8	8261413,327	194310,860	1.6	0.8	0.01
78	29/06/2009	49:07.7	8260997,809	196354,725	0.2	0.8	0.03
79	29/06/2009	17:53.0	8260099,026	195401,323	0.4	1	0.04
80	29/06/2009	09:11.4	8261869,240	195270,245	2.1	1.1	0.02
81	29/06/2009	30:48.0	8257329,365	195331,343	0.5	1.3	0.05
82	30/06/2009	25:51.6	8273020,616	184601,658	5	1.1	0.06
83	30/06/2009	44:50.0	8269847,410	195592,525	5	1.9	0.03
84	01/07/2009	58:39.5	8265314,751	196189,651	2.3	1.4	0.01
85	01/07/2009	54:02.8	8257894,550	196181,822	5.8	1.9	0.03
86	01/07/2009	55:51.8	8257237,380	196726,942	6	1.4	0.01
87	01/07/2009	15:50.8	8264602,752	192658,450	10.6	1.5	0.02
88	01/07/2009	46:33.7	8266923,734	192305,137	7.6	1.7	0.02
89	02/07/2009	05:58.4	8265167,999	193509,190	1.2	2	0.08
90	03/07/2009	32:13.6	8250449,637	194351,952	0.8	1	0.03
91	03/07/2009	58:56.9	8272040,454	202324,739	13.3	2	0.02
92	04/07/2009	36:35.0	8247959,283	198567,129	4.8	1.3	0.01
93	05/07/2009	28:57.8	8255403,350	192139,753	1.1	1.4	0.04
94	06/07/2009	27:07.9	8272257,560	193628,395	5.6	1.3	0.01
95	06/07/2009	32:10.8	8266506,865	194242,263	1.1	1.3	0,04
96	06/07/2009	35:04.9	8268676,523	190886,320	4.2	1.2	0.01
97	08/07/2009	48:05.1	8245974,817	199236,965	7.5	1.8	0.04
98	08/07/2009	24:55.8	8260014,181	197333,346	6.3	1.5	0.02
99	09/07/2009	39:42.3	8248092,938	200280,728	4.4	1.8	0.03
100	09/07/2009	44:46.2	8261969,864	194517,920	7.2	1.5	0.03
101	10/07/2009	33:34.6	8271433,252	198254,455	14.3	1.7	0.04
102	10/07/2009	46:31.0	8262546,561	196226,697	7.2	1.6	0.01
103	10/07/2009	31:33.9	8271105,334	198580,759	11.7	1.7	0.04
104	10/07/2009	26:51.0	8264559,700	197701,839	9.4	2	0.05
105	10/07/2009	40:58.6	8258500,907	191883,028	0.9	1.1	0.03
106	11/07/2009	51:34.8	8262354,580	190221,297	8.2	1.3	0.03
107	11/07/2009	18:46.1	8250175,258	198644,659	7	1.5	0.02
108	11/07/2009	00:47.3	8264742,416	194802,479	5.8	1.6	0.03
109	11/07/2009	09:15.9	8255435,386	194498,870	3.8	0.9	0.03
110	11/07/2009	00:45.1	8261328,555	196243,015	6.7	1.4	0.02

Anexo 3.1 (continuación)

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

N.º sismo	Fecha	Hora origen (GMT)	Coordenadas UTM		Prof. (km)	Md (grados)	RMS
	AA/MM/DD	HH:MM:SS	N	E			
111	11/07/2009	49:43.1	8280230,024	193521,579	20.5	1.7	0.03
112	11/07/2009	09:31.1	8271022,201	192357,076	11.3	2	0.03
113	11/07/2009	47:05.2	8263724,166	193206,803	3.5	1.2	0.04
114	12/07/2009	25:09.9	8268919,779	192492,780	7.8	1.5	0.01
115	12/07/2009	02:53.8	8263228,123	197505,001	8.9	1.5	0.02
116	12/07/2009	48:05.1	8263679,599	198142,706	9.5	2.2	0.02
117	12/07/2009	08:46.0	8269480,666	193021,802	6.7	1.3	0.01
118	12/07/2009	00:37.1	8270474,341	192793,766	2.8	1.2	0.04
119	12/07/2009	54:40.1	8268179,314	195078,272	7.9	1.3	0
120	12/07/2009	53:02.2	8259954,983	192935,981	2.6	1.9	0.02
121	12/07/2009	08:12.5	8259758,174	194762,280	4.3	1.7	0.02
122	13/07/2009	20:30.3	8261617,392	193020,732	0.4	1	0.05
123	13/07/2009	57:07.0	8263968,757	194920,169	3.1	1.5	0.03
124	13/07/2009	36:01.8	8269269,319	193775,873	5.4	1.3	0.02
125	13/07/2009	29:11.1	8260524,597	194108,298	7	1.8	0.01
126	14/07/2009	31:57.2	8264306,704	195344,798	3.4	1.1	0.05
127	14/07/2009	23:26.1	8264085,248	195347,770	4.6	1.7	0.03
128	14/07/2009	40:11.8	8266739,848	195097,566	4.6	1.6	0.01
129	14/07/2009	25:53.6	8264168,535	193308,091	6.4	1.4	0.02
130	14/07/2009	26:49.0	8266830,387	193594,079	5.3	1.7	0.01
131	14/07/2009	38:49.2	8262477,017	191077,930	9	1.6	0.03
132	14/07/2009	42:52.1	8264858,906	195230,095	6.3	1.9	0.02
133	14/07/2009	46:55.1	8263623,574	193959,199	6.4	2	0.05
134	14/07/2009	30:46.2	8263973,080	195241,985	4.4	1.9	0.04
135	14/07/2009	20:01.3	8264594,032	192014,789	4.8	1.7	0.06
136	14/07/2009	08:21.3	8268718,559	193997,909	2.9	1.7	0.04
137	14/07/2009	10:06.7	8273251,238	193400,383	2.9	1.6	0.01
138	15/07/2009	24:31.0	8257432,863	194793,647	7.6	1.4	0.05
139	16/07/2009	23:53.9	8269485,002	193343,700	0	1.4	0.1
140	16/07/2009	41:42.1	8262551,066	188394,686	13.2	1.7	0.03
141	17/07/2009	07:49.6	8256044,293	190414,901	2.1	1.6	0.02
142	17/07/2009	25:31.3	8263304,385	194929,100	7.7	1.6	0.06
143	17/07/2009	56:48.6	8263597,455	192028,308	2.6	1.5	0.02
144	17/07/2009	23:23.4	8266265,156	192743,267	4.7	1.7	0.01
145	17/07/2009	51:16.6	8260431,211	195396,855	5.5	1.3	0.01
146	17/07/2009	57:03.8	8262417,113	194833,747	6.8	0.6	0.02
147	17/07/2009	40:32.4	8262077,702	194301,902	7.7	1.1	0.02
148	17/07/2009	20:43.4	8270851,117	196115,731	6.6	1.8	0.01
149	18/07/2009	42:54.9	8267720,555	193904,017	2.2	1.5	0.02
150	18/07/2009	45:15.3	8267678,483	190792,562	6.5	1.6	0

Anexo 4.1

Parámetros hipocentrales de los 107 sismos localizados en el volcán Huaynaputina.
 La fecha está dada por año (AA), mes (MM) y día (DD); la hora origen (GMT: Greenwich Mean Time)
 en hora (HH), minuto (MM) y segundo (SS); Prof.: la profundidad del hipocentro en kilómetros;
 y RMS: la raíz media cuadrática en segundos

N.º sismo	Fecha AA/MM/DD	Hora Origen (GMT) HH:MM:SS	Coordenadas UTM		Prof. (Km)	Md (grados)	RMS
			N	E			
1	03/05/2010	15:28.6	8160244,1408	302884,2711	2.2	2.3	0.02
2	2010/0510	21:55.8	8161466,4217	303406,5397	0.9	1.9	0.03
3	2010/0510	22:35.2	8163566,1876	303067,0611	0	2.1	0.02
4	2010/0513	42:57.6	8161780,6678	301482,8219	1.7	1.9	0.02
5	2010/0514	02:58.2	8159250,0855	303106,8528	3.3	2	0.02
6	2010/0520	59:23.4	8161123,5773	302235,8963	0	1.7	0.04
7	2010/0520	21:44.1	8161121,6000	302022,4957	0	1.8	0.11
8	2010/0521	40:36.9	8161341,9503	301913,7424	0	1.4	0.2
9	05/06/2010	16:37.1	8161132,4487	303196,1963	0.6	1.9	0.03
10	05/06/2010	03:43.1	8161015,8696	302557,0200	0	1.8	0.05
11	05/06/2010	02:57.3	8161241,1504	302981,7757	0	2	0.03
12	05/06/2010	23:21.7	8161246,0653	303515,2772	0	1.9	0.04
13	09/06/2010	24:39.2	8160686,8186	302880,1835	0	1.8	0.1
14	13/06/2010	42:21.2	8162558,3289	301795,7478	0.9	1.8	0.07
15	13/06/2010	03:11.2	8160689,7716	303200,2764	0	1.8	0.02
16	18/06/2010	41:51.4	8162114,6595	301693,1481	0	2.1	0.04
17	19/06/2010	07:22.6	8161341,9503	301913,7424	0	1.6	0.09
18	23/06/2010	57:10.7	8162529,4071	298701,2050	1.4	2.1	0.04
19	23/06/2010	18:56.9	8161752,6955	298495,0924	0	2.1	0.07
20	24/06/2010	27:48.5	8158444,6039	299806,6976	0.9	2.2	0.02
21	29/06/2010	09:58.4	8159794,5508	302141,5055	0	2.2	0.11
22	01/07/2010	10:05.4	8161349,8501	302767,3527	2	1.7	0.02
23	02/07/2010	42:47.5	8159679,9193	301715,7590	0	1.5	0.05
24	03/07/2010	09:04.6	8157472,4607	302376,4318	1.4	2.2	0.01
25	05/07/2010	41:03.8	8158016,8873	301411,1370	0.7	1.6	0.01
26	06/07/2010	03:16.4	8158354,8512	302048,1641	0.7	2.2	0.03
27	07/07/2010	21:00.7	8158134,5013	302156,9046	1.5	2.6	0.01
28	08/07/2010	32:21.5	8159895,3017	301073,5349	0	2.1	0.08
29	12/07/2010	26:49.6	8159127,5601	301827,5923	0	1.4	0.02
30	12/07/2010	09:21 53.6	8158789,5919	301190,5434	0	1.3	0.03
31	12/07/2010	08:30.1	8158219,2501	299382,0275	1.4	1.8	0.02
32	13/07/2010	50:40.9	8158114,5929	300023,1879	1.3	1.8	0.03
33	18/07/2010	17:47.0	8157583,1306	302375,4056	1.5	1.7	0.01
34	19/07/2010	07:40.2	8157688,8479	301840,9637	0.5	1.3	0
35	25/07/2010	18:20.0	8152809,3795	300819,7053	2.7	1.8	0.01
36	27/07/2010	49:08.5	8159351,8712	302145,6106	0	1.3	0.05
37	04/08/2010	07:43.1	8156910,1827	301421,4500	1.8	2.1	0.02
38	04/08/2010	22:33.0	8159121,6033	301187,4486	1	1.8	0.04

Anexo 4.1 (continuación)

Parámetros hipocentrales de los 107 sismos localizados en el volcán Huaynaputina.
 La fecha está dada por año (AA), mes (MM) y día (DD); la hora origen (GMT: Greenwich Mean Time)
 en hora (HH), minuto (MM) y segundo (SS); Prof.: la profundidad del hipocentro en kilómetros;
 y RMS: la raíz media cuadrática en segundos

N.º sismo	Fecha AA/MM/DD	Hora Origen (GMT) HH:MM:SS	Coordenadas UTM		Prof. (Km)	Md (grados)	RMS
			N	E			
39	04/08/2010	24:21.9	8158232,2559	300768,9568	0.9	1.6	0.01
40	06/08/2010	48:23.3	8159781,6450	300754,4839	0.1	1.9	0.06
41	08/08/2010	10:29.9	8156244,1689	301214,2881	2.7	2.5	0.02
42	12/08/2010	19:32.3	8159224,3017	300332,8849	0.3	1.9	0.04
43	12/08/2010	33:08.4	8163329,0563	301361,7187	0	2.3	0.03
44	13/08/2010	31:16.4	8163003,9738	302111,7723	0.7	1.8	0.01
45	13/08/2010	42:34.8	8162772,7292	301046,7329	0	2.2	0.04
46	13/08/2010	16:59.7	8162338,9676	302011,2135	0	1.7	0.02
47	2010/0813	16:14.2	8162883,3994	301045,7028	0	2.4	0.02
48	13/08/2010	08:27.7	8162669,9880	301901,4297	0.6	1.8	0.01
49	14/08/2010	29:23.6	8163112,6669	301897,3274	0	1.9	0.03
50	14/08/2010	15:30.6	8162999,0283	301578,2232	0	1.9	0.03
51	14/08/2010	42:08.0	8160346,9109	302029,6791	0.2	1.7	0.02
52	14/08/2010	51:20.1	8162555,3578	301475,6247	0.1	2	0.11
53	14/08/2010	43:51.5	8162557,3391	301689,0401	0	1.9	0.11
54	14/08/2010	16:33.0	8162222,3563	301372,0027	0.1	2.4	0.11
55	14/08/2010	18:22.1	8161229,3000	301701,3668	0	1.9	0.04
56	14/08/2010	24:23.3	8163214,4166	300935,9018	0	2.2	0.04
57	14/08/2010	57:51.7	8162666,0278	301474,5967	0	2.3	0.2
58	14/08/2010	13:10.2	8161895,2995	301908,6110	0	1.9	0.03
59	14/08/2010	52:56.9	8163215,4098	301042,6131	0	1.7	0.05
60	14/08/2010	35:17.8	8162444,6878	301476,6527	0	2	0.11
61	14/08/2010	36:54.5	8161450,6399	301699,3118	0	2.1	0.05
62	14/08/2010	44:44.7	8162774,7146	301260,1510	0	2	0.03
63	14/08/2010	09:00.0	8162222,3563	301372,0027	0	1.9	0.03
64	14/08/2010	06:35.1	8162336,9893	301797,8005	0.4	2.1	0.04
65	15/08/2010	25:04.5	8162550,3953	300942,0851	0	2.2	0.05
66	15/08/2010	01:29.4	8162666,0278	301474,5967	0	2.1	0.06
67	15/08/2010	27:18.0	8162554,3664	301368,9169	0	1.9	0.09
68	15/08/2010	49:16.2	8163001,9972	301898,3528	0	1.6	0.06
69	15/08/2010	12:01.0	8162443,6963	301369,9454	0	2	0.11
70	15/08/2010	46:28.8	8163105,7325	301150,3537	0	1.9	0.04
71	15/08/2010	47:30.1	8163109,6982	301577,1961	0	2.2	0.04
72	16/08/2010	19:29.5	8162553,3744	301262,2090	0	2.2	0.11
73	16/08/2010	16:44.8	8163106,7247	301257,0644	0.1	2.1	0.08

Anexo 4.1 (continuación)

Parámetros hipocentrales de los 107 sismos localizados en el volcán Huaynaputina.
La fecha está dada por año (AA), mes (MM) y día (DD); la hora origen (GMT: Greenwich Mean Time) en hora (HH), minuto (MM) y segundo (SS); Prof.: la profundidad del hipocentro en kilómetros; y RMS: la raíz media cuadrática en segundos

N.º sismo	Fecha AA/MM/DD	Hora Origen (GMT) HH:MM:SS	Coordenadas UTM		Prof. (Km)	Md (grados)	RMS
			N	E			
74	16/08/2010	49:14.0	8162772,7292	301046,7329	0	2	0,08
75	16/08/2010	49:48.9	8162556,3487	301582,3324	0	1.7	0.07
76	16/08/2010	03:40.5	8162785,5957	302433,9468	0	1.8	0.04
77	16/08/2010	08:16.7	8162443,6963	301369,9454	0	2.3	0.06
78	16/08/2010	15:28.9	8163217,3947	301256,0356	0	2.2	0.05
79	17/08/2010	00:06.9	8162560,3070	302009,1630	0.1	2.2	0.07
80	17/08/2010	05:23.4	8163108,7076	301470,4856	0	2.2	0.02
81	17/08/2010	39:09.3	8162885,3846	301259,1220	0	2.1	0.09
82	17/08/2010	55:55.0	8162662,0591	301047,7630	0	2.2	0.05
83	17/08/2010	56:37.8	8162338,9676	302011,2135	0	2	0.04
84	17/08/2010	23:56.1	8162774,7146	301260,1510	0.1	2.3	0.11
85	18/08/2010	58:10.2	8162886,3764	301365,8316	0	2	0.08
86	18/08/2010	28:01.5	8162664,0445	301261,1799	0	2.1	0.05
87	18/08/2010	0246 49.4	8162336,9893	301797,8005	0	2.2	0.11
88	18/08/2010	51:08.1	8162884,3923	301152,4125	0	1.9	0.1
89	18/08/2010	44:11.3	8163109,6982	301577,1961	0	2	0.05
90	18/08/2010	45:16.3	8162222,3563	301372,0027	0.1	1.9	0.11
91	18/08/2010	20:40.5	8162666,0278	301474,5967	0	1.5	0.12
92	18/08/2010	51:22.1	8162554,3664	301368,9169	0	1.5	0.11
93	18/08/2010	01:31.5	8162885,3846	301259,1220	0	2	0.06
94	18/08/2010	14:23.0	8162886,3764	301365,8316	0	1.9	0.02
95	18/08/2010	29:29.1	8162663,0520	301154,4715	0	1.9	0.09
96	20/08/2010	14:27.0	8162445,6788	301583,3599	0	1.7	0.02
97	21/08/2010	10:52.2	8160464,4942	302775,5305	0	2	0.04
98	22/08/2010	19:38.7	8161123,5773	302235,8963	0	1.5	0.13
99	23/08/2010	53:49.0	8160462,5216	302562,1371	1.1	2.2	0.03
100	25/08/2010	01:48.2	8161911,0608	303615,8727	0.4	1.7	0.01
101	26/08/2010	08:39.5	8161237,2088	302554,9736	0	1.5	0.02
102	26/08/2010	00:36.0	8160800,4409	303199,2563	0.2	2.1	0.01
103	27/08/2010	04:13.4	8162666,0278	301474,5967	0	2	0.01
104	31/08/2010	24:05.7	8162774,7146	301260,1510	0.1	2.3	0.1
105	08/09/2010	57:45.5	8159675,9491	301288,9854	0	1.8	0.12
106	09/09/2010	04:20.4	8160207,3178	298936,5028	0.5	2	0.01
107	09/09/2010	46:59.1	8159550,3138	299689,6163	0.8	1.5	0.03

RELACIÓN DE ILUSTRACIONES Y CUADROS

Figuras

- Figura 1. 1.** Segmentación tectónica de los Andes
- Figura 1. 2.** Ubicación de los volcanes Sabancaya, Huaynaputina y Ticsani en la ZVC.
- Figura 2.1.** Ubicación de las estaciones sísmicas instaladas en abril (triángulos blancos) y agosto de 2008 (triángulos amarillos), alrededor del volcán Ticsani.
- Figura 2.2.** Análisis frecuencial y cálculo de energía del sismo registrado en la estación TCS2, el 21 de abril de 2008, a las 06:39 hora GMT.
- Figura 2.3.** Análisis frecuencial de los sismos registrados en la estación Domo (6718). Registro del 16 de octubre del 2008, a las 05:40 hora GMT.
- Figura 2.4.** Ejemplo de sismo registrado 31 de agosto de 2008, a las 04:35 hora GMT en la estación Sísmica instalada en las estaciones Chilota (CHI1), Pallatea (PAL1) y Humalso (HUM1).
- Figura 2.5.** Distribución en superficie de los sismos localizados con el programa 3Componentes. Los círculos en color negro corresponden a los registrados en los periodos abril y agosto-diciembre de 2008.
- Figura 2.6.** Distribución de los 44 sismos en Profundidad vs fecha de registro (agosto 2008-febrero 2009). El mayor número de sismos ocurren a profundidades menores a 15 km.
- Figura. 2.7.** Magnitud de duración (Md) vs fecha de registro de los 44 sismos localizados en agosto 2008 y febrero 2009. El mayor número de sismos presentaron magnitudes entre 0,1 y 1,0 Md.
- Figura 2.8.** A) Distribución en superficie de los sismos localizados con el programa SEISAN. Los círculos rojos y anaranjados corresponden a los periodos agosto-diciembre 2008 y enero-febrero de 2009 respectivamente. Las estrellas representan a los epicentros de los sismos de magnitud moderada de 1999 y 2005. B) Elipses de error de la localización de ambos periodos.
- Figura 2.9.** Distribución en profundidad de los 44 sismos localizados en la zona del volcán Ticsani. Las estrellas blancas representan a los sismos de magnitud moderada ocurridos en 1999 y 2005.
- Figura 2.10.** Epicentros de sismos y réplicas principales ocurridos en la zona del volcán Ticsani (Moquegua). A) Epicentro del 6 de mayo de 1999 y B) Epicentro del sismo del 1 de octubre de 2005. Modificado de Aguilar et al. (2001) y Tavera (2006).
- Figura 2.11.** Epicentros de sismos registrados en abril y agosto 2008- febrero de 2009. El mayor número de sismos se distribuyen a lo largo de los lineamientos orientados en dirección NE-SO (rectángulo amarillo). Un menor número de sismos se localizan sobre las anomalías de deformación identificadas mediante InSAR. 127
- Figura 2.12.** Ubicación de las 13 fuentes muestreadas para la caracterización del volcán Ticsani
- Figura 2.13.** Diagrama de Piper Hill Langgeliier, donde se identificaron los 4 tipos de agua a las cuales pertenecen las fuentes circunscritas al volcán Ticsani.
- Figura 2.14.** Diagrama ternario SO₄-Cl-HCO₃ (Nicholson, 1990).
- Figura 2.15.** Diagrama del Geotermómetro Na-K-Mg de Giggenbach (1988).
- Figura 2.16.** Mapa de ubicación de las fuentes termales donde se realiza el monitoreo del volcán Ticsani.

- Figura 2.17.** Adquisición de datos en las 8 fuentes termales donde se realiza el monitoreo del volcán Ticsani, entre marzo 2006 y abril 2012.
- Figura 2.18.** Fotos de muestreo de agua realizada en las fuentes: A) HIB, B) PA1, C) PA2, D) PU2, E) RFT, F) SEC y G) TX1.
- Figura 2.19.** Resultados expresados en SO₄/Cl, para las 8 fuentes de monitoreo del volcán Ticsani, entre marzo de 2006 y abril 2012.
- Figura 2.20.** Resultados de los sulfatos, calcio, cloruros, sodio, bicarbonatos, magnesio, estroncio y potasio de las fuentes HIB, PA1, PA2, PU1, PU2, RFT, SEC y TX1 entre el 2006 y 2012.
- Figura 2.21.** Resultados del monitoreo en las fuentes HIB, PA1, PA2, PU1, PU2, RFT, SEC y TX1 entre el 2006 y 2012, graficados en el diagrama Ternario SO₄-Cl-HCO₃ (Giggenbach, 1988).
- Figura 2.22.** Gráfica donde se compara la temperatura con el TDS obtenidos de los resultados del monitoreo en las fuentes HIB, PA1, PA2, PU2, RFT, SEC y TX1 entre el 2007 y 2010.
- Figura 2.23.** Gráfica del pH versus la fecha. Resultados del monitoreo en las fuentes HIB, PA1, PA2, PU1, PU2, RFT, SEC y TX1 entre el 2006 y 2012.
- Figura 2.24.** Gráfica de la temperatura en la fuente HIB entre octubre 2006 a julio 2009.
- Figura 2.25.** Ubicación de las zonas de emisión de fumarolas en la cumbre del volcán Ticsani.
- Figura 2.26.** Fumarolas del volcán Ticsani, zona D.
- Figura 2.27.** Gráfica de la temperatura registrada en la estación TCS-F1, mediciones en las fumarolas y en el ambiente, entre octubre 2006 y abril 2012.
- Figura 2.28.** Gráfica de la temperatura registrada en la estación TCS-F2, entre marzo del 2008 y abril del 2012. 128
- Figura 3.1.** Principales sistemas de fallas y lineamientos identificados por Huamán (1995), Sébrier et al. (1995) en la zona del volcán Sabancaya. Las estrellas en color negro representan a los epicentros de sismos con $M_w \geq 5.0$ y sus mecanismos de ruptura (tomado de Claire, 2007).
- Figura 3.2.** A) Sismicidad registrada en la zona del volcán Sabancaya y su relación con la tectónica local (modificado de Antayhua, 2002). B) Interferograma obtenido por Pritchard (2003) entre 1997 y 1999. C) Interferograma obtenido por Gonzáles et al. (2009) entre 2002 y 2003.
- Figura 3.3.** Estación sísmica TITAN. A) Registrador y discos de almacenamiento. B) Sensor sísmico y accesorios.
- Figura 3.4.** Localización de las estaciones sísmicas que conforman la RSTS instalada alrededor del complejo volcánico Ampato-Sabancaya-Hualca Hualca.
- Figura 3.5.** Periodos de operatividad de las estaciones sísmicas que conformaron la RSTS
- Figura 3.6.** A) 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 SAB4. B) Espectro de frecuencias de la señal compuesta de los días 13 y 14 de setiembre de 2009.
- Figura 3.7.** A) Ejemplo de ondas armónicas registradas en la estación SAB4 el 10 de junio de 2009 a las 17:12 GMT.
- Figura 3.8.** A) Ejemplo de señal sísmica de alta frecuencia registrada el 09 de julio de 2009 a las 07:15 GMT en la estación SAB4. B) Espectrograma. C) Espectro de frecuencias.
- Figura 3.9.** A) Ejemplo de una señal sísmica asociada a un lahar registrada en la estación SAB4 el 10 de agosto de 2009 a las 20:03 GMT. B) Espectro de frecuencias del lahar. C) Ejemplo de señal sísmica asociada al lahar del 18 de enero de 2007 (Macedo et al., 2007) y su respectivo espectro de frecuencias (D).

- Figura 3.10.** Distribución diaria de la sismicidad según escalas de T(S-P) para el periodo junio-agosto de 2009 registrado por la estación SAB4.
A) $T_{(s-p)} < 2.5_s$; B) $T_{(s-p)}$ entre 2.6 y 5.0_s; C) $T_{(s-p)}$ entre 5.1 y 10.0_s; D) $T_{(s-p)}$ entre 10.1 y 20.0_s; E) $T_{(s-p)} > 20.0_s$
- Figura 3.11.** Representación porcentual de la sismicidad analizada en la estación SAB4 según escalas de T (S-P). El mayor porcentaje, corresponde a sismos de $T(S-P) < 2.5$ s.
- Figura 3.12.** Distribución de la energía sísmica por ventanas de 10 s calculados a partir de la información sísmica registrada por la estación SAB4 de la RSTS.
- Figura 3.13.** Número de sismos por día registrados en la base de datos del volcán Sabancaya (SAB1) durante el periodo mayo-julio de 2009.
- Figura 3.14.** Ejemplo de sismo registrado 13 de junio de 2009, a las 10:24 hora GMT en las estaciones sísmicas Hualca Hualca (HUA), Sabancaya 4 (SAB4) y Sabancaya 2 (SAB2). BZ=componente vertical, BN y BE= componentes horizontales Norte-Sur y Este-Oeste. 129
- Figura 3.15.** Distribución los 150 sismos en profundidad vs periodo de monitoreo (mayo a julio de 2009). El rectángulo en color amarillo muestra que el mayor número de sismos ocurren a profundidades menores a 9 km.
- Figura 3.16.** Histograma que muestra la distribución de la magnitud M_d de los 150 sismos registrados en la zona del volcán Sabancaya.
- Figura 3.17.** Distribución en superficie de los 150 sismos registrados y localizados en la región del volcán Sabancaya, considerando: A) su magnitud y B) su distribución durante los 3 meses de registro.
- Figura 3.18.** Distribución en profundidad de los 150 sismos localizados en la zona del volcán Sabancaya con sus respectivas elipses de error. El mayor número de sismos se localizan a profundidades menores a 9 km.
- Figura 3.19.** A) Distribución de la sismicidad registrada en la zona del volcán Sabancaya durante el periodo 1990-1994 y 2009. B) Interferograma calculado por Pritchard (2003) y corresponde al periodo 1997 a 1999). La sismicidad se concentra en la anomalía de deformación. C) Interferograma calculado por Gonzáles et al. (2009) Se observan dos anomalías de deformación fuera de la zona de sismicidad. La anomalía mayor localizada en la pampa Mojonpampa y otra menor entre las fallas Solarpampa y Solarpampa 1. Los círculos en transparencia, muestran las zonas de mayor actividad sísmica y anomalías de deformación.
- Figura 4.1.** A) Distribución de los principales sistemas de fallas y lineamientos identificados en la zona del volcán Huaynaputina. B) Estructuras identificadas en el anfiteatro del volcán Huaynaputina; c=cráteres (Modificado de Lavallée et al., 2006; 2009).
- Figura 4.2.** Distribución geográfica de las estaciones sísmicas que conforman la Red Sísmica Temporal del volcán Huaynaputina (RSTH). Estas estaciones fueron emplazadas alrededor y dentro del anfiteatro.
- Figura 4.3.** Operatividad de las estaciones sísmicas que conformaron la RSTH. Los rectángulos en color rojo representan a las estaciones de banda ancha Guralp y en color verde a las de periodo corto Sara.
- Figura 4.4.** Secuencia de identificación y marcado de fases sísmicas: A) sismograma de 60 minutos de duración. B) Zoom e identificación de evento sísmico. C) Identificación y marcado de fases primaria (P), secundaria (S), y coda sísmica (C).
- Figura 4.5.** Ejemplo de identificación de frecuencias (F_i , F_p y F_f). A) Gráfico de la señal sísmica en el dominio del tiempo. B) Espectrograma de frecuencias. C) Espectro en el dominio de las frecuencias.
- Figura 4.6.** Periodo de registro de las estaciones HNA4 y HNA5 que fueron empleadas para el cálculo de energía y energía acumulada. 130.
- Figura 4.7.** Ejemplo de la estimación de la energía sísmica para un archivo del 20 de agosto de 2010, registrado en la estación HNA4 a las 08:00 GMT. A) Energía sísmica acumulada. B) Energía sísmica por ventanas de 10 segundos. C) Sismograma de

3600 segundos (1 hora). A') Energía sísmica acumulada del zoom. C') Zoom a 60 segundos del sismograma. B') Energía sísmica por ventanas de 10 s.

- Figura 4.8.** Cálculo de la energía en Megajoule (MJ) en los registros de las estaciones HNA4 y HNA5, para el periodo 12 de mayo a 27 de octubre de 2010. A) Energía acumulada y B) Distribución de la energía diaria.
- Figura 4.9.** Ejemplos de registros sísmicos de 24 horas provenientes de la estación Huaynaputina 4 (HNA4). A). Registro del 5 de junio. B) Registro del 14 de agosto de 2010. R=sismos regionales, L=sismos locales.
- Figura 4.10.** Número de sismos por día identificado por rangos de $T_{(S-P)}$ registrado en la estación HNA4
A) $T_{(S-P)} < 2.5_s$; B) $T_{(S-P)}$ entre 2.6 y 5.0_s; C) $T_{(S-P)}$ entre 5.1 y 10.0_s; D) $T_{(S-P)}$ entre 10.1 y 20.0_s; E) $T_{(S-P)} > 20.0_s$
- Figura 4.11.** Sismograma de los días 8 al 11 de agosto de 2010, registrado por la estación HNA5.
- Figura 4.12.** Ejemplo de sismo asociado a actividad antrópica.
- Figura 4.13.** Ejemplo de sismo local registrado en 3 estaciones de la RSTH, el 14 de agosto de 2010, a las 02:29 hora GMT. P y S=tiempos de arribo de las ondas en segundos, C=coda en segundos.
- Figura 4.14.** Número de sismos registrados en 3 a más estaciones por mes. Obsérvese que el mayor número de registros corresponde al mes de agosto de 2010.
- Figura 4.15.** A) Distribución en superficie de los 107 sismos registrados y relocalizados en la zona del volcán Huaynaputina. El borde amarillo de los epicentros resalta los sismos registrados en el mes de agosto de 2010. B). Elipses de error de la localización. C) Ampliación de la zona de sismicidad, según la Fig. 4.15A.
- Figura 4.16.** A) Distribución en profundidad de los 107 sismos localizados en la zona del volcán Huaynaputina. El mayor número de sismos se localizan a profundidades menores a 3 km. B) Elipses de error.
- Figura 4.17.** Ejemplos de sismos registrados por la estación HPNA4 con sus espectros de frecuencia respectivos. En rojo, apilamiento de las señales y el espectro de frecuencia característico de estos sismos
- Figura 4.18.** A) Distribución de los 107 sismos localizados en la zona del volcán Huaynaputina. B) Ejemplo de sismo registrado en las estaciones HNA2, HNA3, HNA6 y analizado con coda Q. 131
- Figura 4.19.** Valores de coda Q_c vs la frecuencia estimados para cuatro estaciones sísmicas instaladas en el volcán Huaynaputina.
- Figura 4.20.** Distribución gráfica de los valores promedio de Q_c y el ajuste respectivo.
- Figura 4.21.** Comparación de los valores promedio de Q_c obtenidos en el volcán Huaynaputina, con otros valores obtenidos en zonas volcánicas y zonas relativamente estables según Cuadro 4.6.
- Figura 4.22.** A). La flecha indica la ubicación de las fumarolas en el borde sur del cráter del volcán Huaynaputina. B) En la zona de emisión de fumarolas se puede observar la presencia de vegetación. C) Fumarolas de color blanquecino, emanando de los intersticios.
- Figura 4.23.** A) Termómetro utilizado para la medición de la temperatura. B) Proceso de medición de la temperatura en las grietas de la roca por donde emanaban los gases fumarólicos del volcán Huaynaputina.
- Figura 4.24.** A). Ubicación de la estación de muestreo de gases HPT-F1. B). Proceso de muestreo de gases en la estación HPT-F1.
- Figura 4.25.** A) Instalación de la estación de medición continua de la temperatura HPT-F1 en el volcán Huaynaputina. B) Foto del momento en que se introduce el registrador HOBO UTL-1 en la estación HPT-F1.
- Figura 4.26.** Mediciones de temperatura registradas entre mayo y octubre del 2010 en la estación HPT-F1, ubicada en el cráter del volcán Huaynaputina.
- Figura 4.27.** Ubicación de las fuentes termales muestreadas alrededor del volcán Huaynaputina (UIU, AGB, CER) además se encuentra señalada la ubicación de la estación HPT-F1 en las fumarolas del cráter del volcán Huaynaputina.

- Figura 4.28.** A) Fuente termal ULU ubicada a 19,7 km del volcán. B) Fuente CER a 13,4 km del volcán. C) Foto del riachuelo AGB a 11,3 km del volcán.
- Figura 4.29.** Gráfica donde se compara la conductividad eléctrica (CE) con los sólidos totales disueltos (TDS).
- Figura 4.30.** Diagrama de Piper-Hill-Langelier, donde se pueden observar que las aguas muestreadas alrededor del volcán Huaynaputina se encuentran graficadas en 2 de los cuadrantes: Clorurada-Sulfatada Alcalina, las fuentes ULU y CER; Sulfatadas-Cloruradas Alcalina-Terrea, el agua del río AGB.
- Figura 4.31.** Diagrama ternario de aniones mayoritarios Cl-SO₄-HCO₃ donde las aguas muestreadas alrededor del volcán Huaynaputina se encuentran en los cuadrantes de aguas cloruradas profundas (ULU) y aguas cloruradas sulfatadas con un posible origen en condensados volcánicos, ligeramente orientadas hacia las aguas diluidas (CER y AGB). 132
- Figura 4.32.** Diagrama del geotermómetro (Giggenbach, 1988), donde se encuentran graficadas las fuentes AGB, CER y ULU y la temperatura aproximada en el reservorio 133.

Cuadros

- Cuadro 2.1.** Principales características de las estaciones sísmicas instaladas durante los periodos abril y agosto del 2008.
- Cuadro 2.2.** Modelo de velocidad obtenido por Dorbath et al. (1991). Prof. es la profundidad en kilómetros y Vp la velocidad de la onda P en kilómetros por segundo.
- Cuadro 2.3.** Ubicación de las fuentes termales muestreadas para la caracterización del volcán Ticsani.
- Cuadro 2.4.** Ubicación de las estaciones de monitoreo de las fumarolas, Ticsani Fumarola 1 (TCS -F1), Ticsani Fumarola 2 (TCS-F2) y Ticsani Fumarola 3 (TCS -F3).
- Cuadro 2.5.** Periodo de registro en la estación TCS-F1, equipos utilizados, ubicación y el intervalo de registro.
- Cuadro 2.6.** Datos del registro de la temperatura de la estación TCS-F2.
- Cuadro 3.1.** Principales características de las estaciones sísmicas.
- Cuadro 3.2.** Escalas y porcentajes de sismos tectónicos, considerando 5 escalas de diferencias de tiempos de arribo de las ondas P y S, T(S-P).
- Cuadro 3.3.** Modelo de velocidad obtenido por Dorbath et al. (1991). Prof. es la profundidad en kilómetros y Vp la velocidad de la onda P en kilómetros por segundo.
- Cuadro 4.1.** Parámetros hipocentrales de los sismos registrados en 1600 D.C., recopilados por Ceresis (1985). Cuadro modificado de Lavallée et al. (2009). AA/MM/DD=año/mes/día; la hora origen (GMT) HH:MM= en hora y minuto; Prof.=profundidad en kilómetros.
- Cuadro 4.2.** Coordenadas del emplazamiento de las estaciones sísmicas de la RSTH.
- Cuadro 4.3.** Modelo de velocidad seleccionado para la relocalización hipocentral de los sismos registrados en el volcán Huaynaputina (Metaxián et al., 1998). Prof. es la profundidad en kilómetros y Vp la velocidad de la onda P en kilómetros por segundo.
- Cuadro 4.4.** Estimación del factor de calidad Qc para las estaciones HNA2, HNA3, HNA3 y HNA4
- Cuadro 4.5.** Valores promedio de Qc obtenidos para la zona del volcán Huaynaputina. Q0 es el valor de Qc a la frecuencia de 1 Hz, γ = coeficiente de anelasticidad y rms=raíz media cuadrática.
- Cuadro 4.6.** Valores promedio de Q0 y γ obtenidos para zonas volcánicas y zonas relativamente estables. Q0 es el valor de Qc a la frecuencia de 1 Hz y γ el coeficiente de anelasticidad. 134
- Cuadro 4.5.** Ubicación de las fuentes termales muestreadas alrededor del volcán Huaynaputina

Cuadro 4.6. Equipos utilizados para la medición de los parámetros fisicoquímicos en las aguas muestreadas.

Cuadro 4.7. Resultados de los análisis químicos de las muestras de aguas termales. DN: no detectado 135.

Fotografías

Foto 1.1. Vista del flanco sur del volcán Ticsani. Foto tomada desde la carretera binacional Perú-Bolivia

Foto 1.2. Vista hacia el noroeste. Se aprecia el pico más alto del volcán Ticsani

Foto 1.3. Vista del flanco Norte del pico más alto del volcán Ticsani. Foto tomada desde el Domo 3.

Foto 1.4. Vista hacia el Norte en la cima del cráter del volcán Sabancaya.

Foto 1.5. Vista hacia el Noroeste. Se puede apreciar el complejo Ampato-Sabancaya-Hualca Hualca.

Foto 1.6. Vista desde el Noroeste, se puede apreciar los dos domos del volcán Sabancaya

Foto 1.7. Vista hacia el noreste. Se observa la caldera del volcán Huaynaputina.

Foto 1.8. Vista hacia el noreste. Se aprecia el actual cráter interno del volcán Huaynaputina

Foto 1.9. Vista hacia el noreste. Científicos antes del descenso al cráter del volcán Huaynaputina para la instalación de equipos de monitoreo volcánico. 136

Anexos

Anexo 2.1. Parámetros hipocentrales de 44 sismos localizados en la zona del volcán Ticsani. La fecha está dada por año (AA), mes (MM) y día (DD); la hora origen (GMT=Greenwich Mean Time) en hora (HH), minuto (MM) y segundo (SS); Prof., la profundidad del hipocentro en kilómetros y RMS la raíz media cuadrática en segundos.

Anexo 2.2. Resultados del monitoreo de fuentes termales en el volcán Ticsani: T° (°C), pH en unidades de pH, CE (uS/cm), TDS y concentraciones (ppm); ND: no detectado.

Anexo 3.1. Parámetros hipocentrales de los 150 sismos localizados en el volcán Sabancaya, La fecha está dada por año (AA), mes (MM) y día (DD); la hora origen (GMT) en hora (HH), minuto (MM) y segundo (SS); Prof., la profundidad del hipocentro en kilómetros y RMS, la raíz media cuadrática en segundos.

Anexo 4.1. Parámetros hipocentrales de los 107 sismos localizados en el volcán Huaynaputina, La fecha está dada por año (AA), mes (MM) y día (DD); la hora origen (GMT=Greenwich Mean Time) en hora (HH), minuto (MM) y segundo (SS); Prof., la profundidad del hipocentro en kilómetros y RMS la raíz media cuadrática en segundos.