



Sismos distales de fractura observados en la zona de los volcanes Misti y Chachani

Riky Centeno, Rosa Ancasi, y Orlando Macedo

Observatorio Vulcanológico de Arequipa (OVA), Instituto Geofísico del Perú (IGP), Urb. La Marina B-19, Cayma, Arequipa, Perú

1. Introducción

Se presenta un análisis preliminar sobre la sismicidad distal del volcán Misti, utilizando el registro sísmico de hasta 27 estaciones sísmicas de banda ancha y periodo corto operadas durante campañas sísmicas efectuadas por el OVA-IGP en 2011 y 2012 (Fig. 1). Como herramienta en el pronóstico de erupciones, se cuenta actualmente con un modelo de actividad sísmica que comporta cuatro fases (White & McCausland, 2013): (1) detección de sismicidad profunda (LF), (2) distal (dVT), (3) proximal (VTs, LPs, y tremor), y (4) un tipo de sismicidad superficial conocido como sismos de tipo "híbrido".

Los sismos volcánotectónicos distales (dVT) de alta frecuencia (>5Hz), que están asociados a la segunda fase, se localizan frecuentemente sobre fallas tectónicas a 10 o 15 km de distancia de un volcán, y ocurren en forma de enjambre. Esta actividad es generada como consecuencia del arribo o intrusión de magma hacia a la superficie, lo cual provoca el incremento de presiones internas, especialmente de tipo hidrostático, en el entorno de la cámara magmática y bajo el edificio. Los sismos que se generan son de tipo fractura (dVT) y constituyen el primer indicio en una inminente reactivación o erupción de volcanes que han permanecido en estado de reposo por varias décadas (White & McCausland, 2013).

El Misti es un volcán activo de composición andesítica con actividad fumarólica y micro-sísmica permanente. La última gran erupción del Misti fue de carácter explosivo hace ~2050-2300 años antes del presente (Thouret et al., 2001). El objetivo de este trabajo de investigación es evidenciar la existencia de zonas de sismicidad dVT en las inmediaciones del volcán Misti. El estudio y seguimiento

de dichas zonas pueden ayudar a pronosticar una eventual reactivación de este volcán.

2. Selección de datos

Se han empleado datos de dos campañas sísmicas realizadas por el Observatorio Vulcanológico de Arequipa (OVA) del Instituto Geofísico del Perú (IGP) conjuntamente con el Institut de Recherche pour le Développement (IRD):

La primera campaña fue realizada entre marzo y diciembre de 2011. Se operaron en total 27 estaciones sísmicas temporales, de las cuales 14 fueron de banda ancha (Guralp modelo 6TD y DM24; frecuencias: 0.033-100 Hz) y 13 de período corto (Marc Products L4-C; frecuencias: 1-50 Hz), la mayoría sobre el volcán Misti y 4 distribuidas en un radio de 60 km del cráter (Fig. 1).

La segunda campaña fue realizada entre octubre y diciembre de 2012. Se instalaron en total 22 estaciones sísmicas temporales, de las cuales 11 fueron de banda ancha y 11 de período corto. En esta campaña, las estaciones fueron distribuidas en su mayor parte del lado oeste del Volcán en un radio de 50 km del cráter (Fig. 1). Todas funcionaron a modo de registro continuo.

De un catálogo de 1435 sismos, 131 fueron seleccionados, correspondiendo al período entre el 19 de abril y 25 de noviembre de 2011. Dichos sismos cumplían dos condiciones básicas: que la lectura de sus fases P y S fuera lo más clara posible, y que los eventos hayan sido registrados en un mínimo de 4 estaciones.

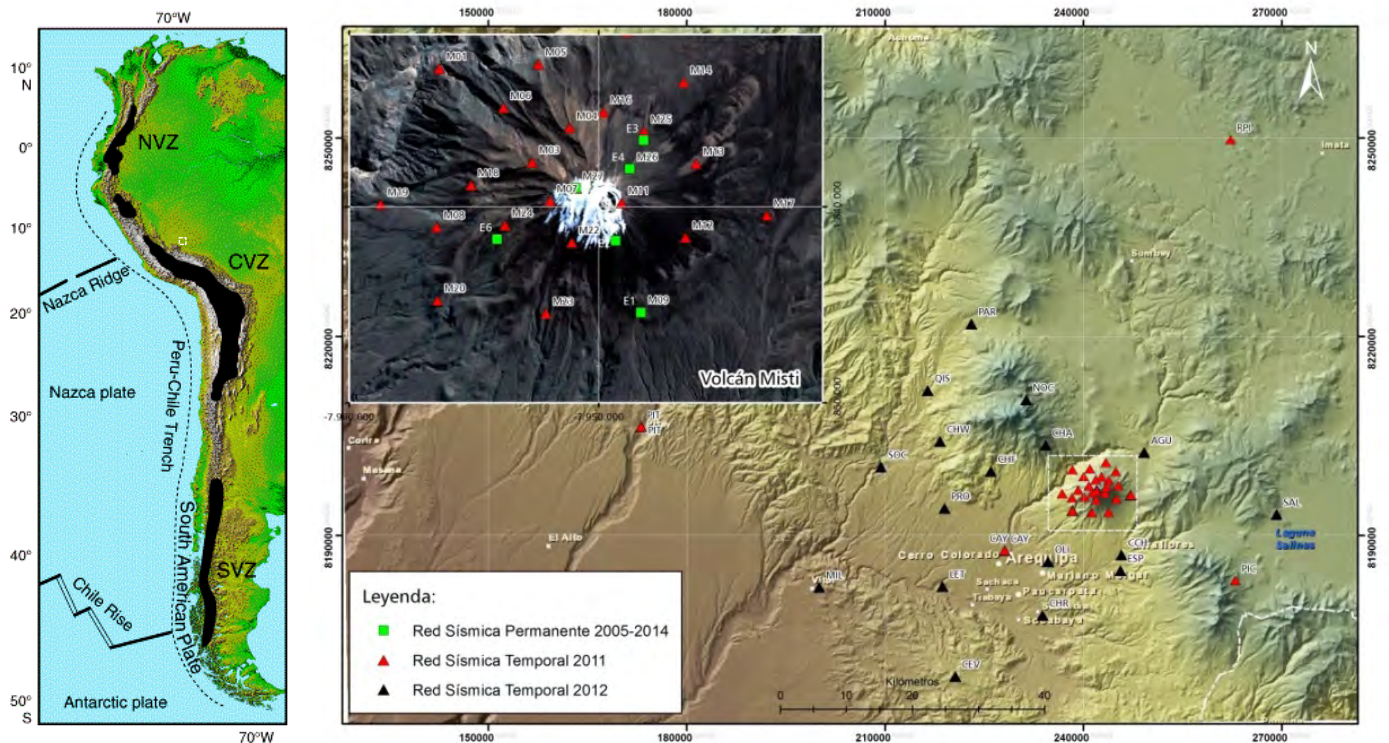


Figura 1. Mapa de localización de las estaciones de la campaña sísmica de 2011 y 2012. El recuadro de la izquierda ubica el volcán Misti dentro de la Zona Volcánica Central (CVZ) de América del Sur.

3. Procesamiento

Una vez obtenida las lecturas de las fases P y S en cada una de las estaciones, se verificó que estas lecturas fuesen coherentes. Para tal efecto se construyó una curva de Wadati utilizando los tiempos de llegada de las fases P y S. En la Figura 2 se observa el ajuste lineal del picado de fases P y S, y la relación de las velocidades en función del azimut (que varía entre 017° y 355°) y profundidad (que varía de 1.2 a 57 km), respectivamente. Se asumió una recta con pendiente igual a 1.7, este valor siendo el usado en la relación V_p/V_s .

Para la localización hipocentral de los sismos, se han utilizado dos modelos de velocidad: el primero es un modelo regional propuesto por Dorbath et al. (1984) para la zona sur del Perú; el segundo es un modelo local propuesto por Métaixian et al. (1998), que es ampliamente utilizado en volcanes como El Misti y Ubinas. El objetivo de usar estos dos modelos de velocidad es seleccionar el que permita obtener errores mínimos en el cálculo de los parámetros hipocentrales de los sismos seleccionados en la región del volcán Misti.

Tabla 1. Modelos de velocidad usados en este estudio. V_p es la velocidad de las ondas P; la profundidad mencionada ("prof.") es la del nivel inferior de la capa correspondiente.

Dorbath et al. (1991)		Métaixian et al. (1998)	
V_p (km/s)	prof. (km)	V_p (km/s)	prof. (km)
5.2	0.0	2.5	0.0
6.2	5.0	4.5	3.5
6.8	30.0		
8.0	50.0		

El programa de localización utilizado fue HYPOELLIPSE (Lahr, 1999). El cálculo de la magnitud local (ML) de los eventos sísmicos fue realizado utilizando la relación de Richter (1935):

$$ML = \log_{10}A + \log_{10}D + (0.00301 \cdot D) + 3.0$$

donde A es la máxima amplitud de la traza en nanómetros (nm), que se mide en las componentes horizontales (Bormann & Dewey, 2014), y D es la distancia hipocentral en kilómetros. Para ello se utilizó la estación Salinas (SAL), haciéndole una corrección de instrumento que convierte la amplitud en cuentas a nm/s.

4. Análisis de los resultados

De los 131 sismos localizados, 115 eventos de magnitudes comprendidas entre -1.0 y 2.7 ML fueron ubicados más allá de los 50 km de distancia del volcán: Estos eventos están alineados NW-SE, próximos al batolito de La Caldera, y están muy probablemente asociados a fallas de carácter regional. Nueve sismos han sido ubicados en las proximidades del volcán Chachani y se muestran ligeramente agrupados. Los 7 sismos restantes están más dispersos entre los volcanes Misti y Chachani

(Fig. 3a y b). A todos estos sismos se les ha agregado 437 sismos localizados en el mismo volcán Misti entre los años 2001 y 2013. En efecto, en la Figura 3a se observa dos zonas sismogénicas, una distal y otra proximal.

4.1. Sismos distales (zona 1)

Las principales características de los 9 sismos de tipo fractura (entre Misti y Chachani) ubicados a ~22 km del volcán son las siguientes:

- ocurrieron en forma de enjambre;
- tuvieron magnitudes entre 0.1 a 1.3 ML;
- sus duraciones oscilaron entre los 37 a 43 s;
- tuvieron lecturas de S-P de 2.5 s en promedio;
- fueron sismos de alta frecuencia;
- en todos los casos mostraron un pico espectral dominante de 7.98 Hz, en un rango amplio de frecuencias comprendidas entre 1 y 17 Hz (Fig. 3d);
- sus focos se ubican a profundidades entre los 2 y 10 km por debajo del nivel del mar (Fig. 3b).

4.2. Sismos proximales (zona 2)

Los >400 sismos localizados por debajo del Misti en un radio de ~6 km del cono volcánico presentan las características principales siguientes:

- fueron sismos de fractura con magnitudes < 1.0 ML;
- sus duraciones oscilaron entre los 18 a 27 s;
- tuvieron lecturas de S-P < 2 s (entre 0.4 y 1.3 s);
- su contenido espectral es amplio, con una banda espectral entre 1 y 25 Hz, y picos espectrales dominantes que van de los 3.5 a 8.2 Hz (Fig. 3c);
- la mayor parte de sus focos están centrados en el cráter mayor del Misti y descendiendo de manera ligeramente inclinada hacia el oeste, entre los 3.5 y 5.5 km de altitud; existe un segundo conjunto formado por otros eventos VT distribuidos más hacia el WNW del cono, situados entre las profundidades de 2 a 3.5 km de altitud (Fig. 3b).

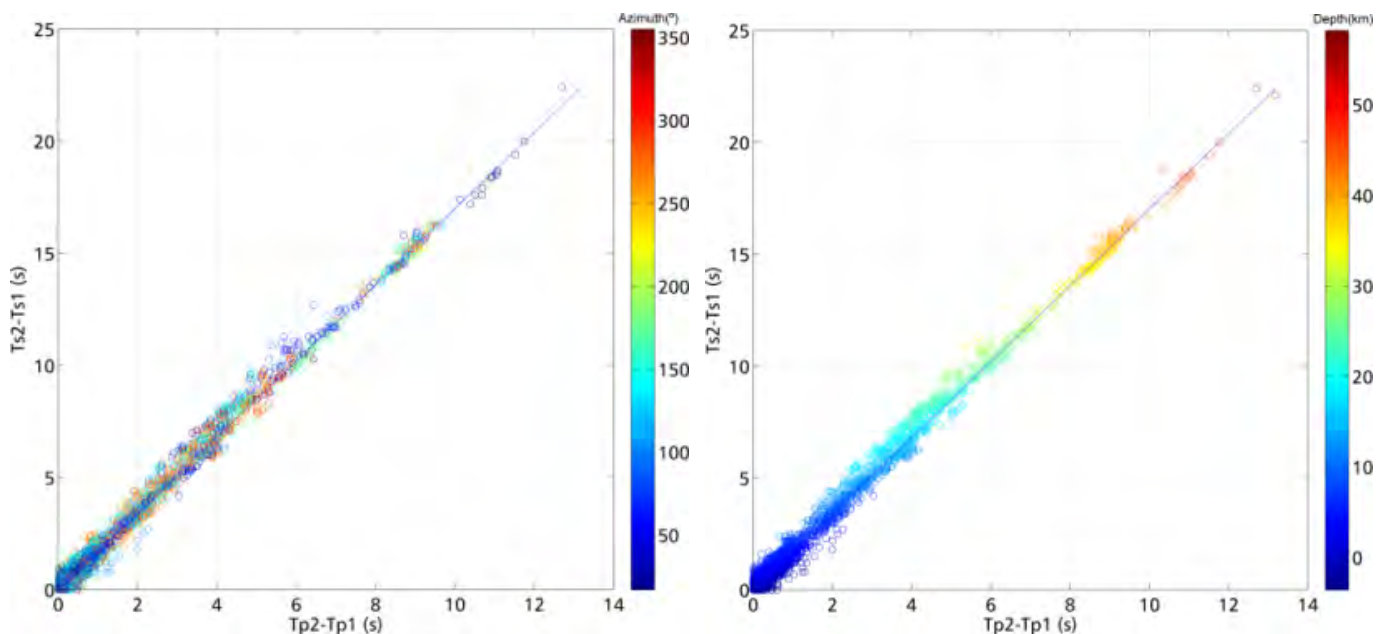


Figura 2. Curva de Wadati obtenida para los eventos sísmicos registrados en las campañas sísmicas de 2011 y 2012, mostrando la relación de velocidades en función (A) del azimut. y (B) la profundidad. $V_p/V_s = 1.7$.

5. Discusión

La distribución de los eventos sísmicos de las campañas del 2011 y 2012, analizados en este estudio, sugiere la existencia de dos fuentes sismogénicas importantes:

- Una zona proximal está asociada a la actividad hidrotermal del volcán Misti, donde se produce la circulación de fluidos tales como el vapor de agua de origen meteórico, y de gases volcánicos posiblemente desprendidos de la cámara magmática (Centeno, 2012).
- La segunda zona, la zona distal, comporta sismos superficiales de alta frecuencia (>5 Hz), situados a 22 km del cráter con profundidades menores a 2 km y distribuidos en enjambre.

Se observa una concentración de sismos al SW del volcán Chachani, que son superficiales y de bajos valores de magnitud. Estos sismos se encuentran próximos a

volcanes activos como son el Misti y el Chachani.

Observaciones en más de 80 crisis eruptivas en 60 volcanes en el mundo dan cuenta de la ocurrencia de eventos de tipo VT o fractura que no ocurren debajo el volcán, distribuidos a distancias de aproximadamente 10 a 20 km sobre fallas tectónicas y con profundidades típicas próximas a los 15 km, y que han significado un primer precursor a una erupción volcánica inminente (White & McCausland, 2015).

La sismicidad superficial, de fractura, encontrada en inmediaciones del volcán Chachani y que se repiten o son recurrentes en el tiempo podría ser indicio del resultado de fuerzas tectónicas, pero existe también posibilidad que se deba a presiones hidrostáticas que provengan de focos termales importantes (Chachani o Misti) y lejanos. La zona

identificada debe ser, por tanto, objeto de vigilancia, pues en la eventualidad de una reactivación de alguno de los volcanes mencionados, es plausible que las zonas de

mayor debilidad actual (como lo es probablemente la zona proximal) sean las primeras en mostrar alta sismicidad dVT.

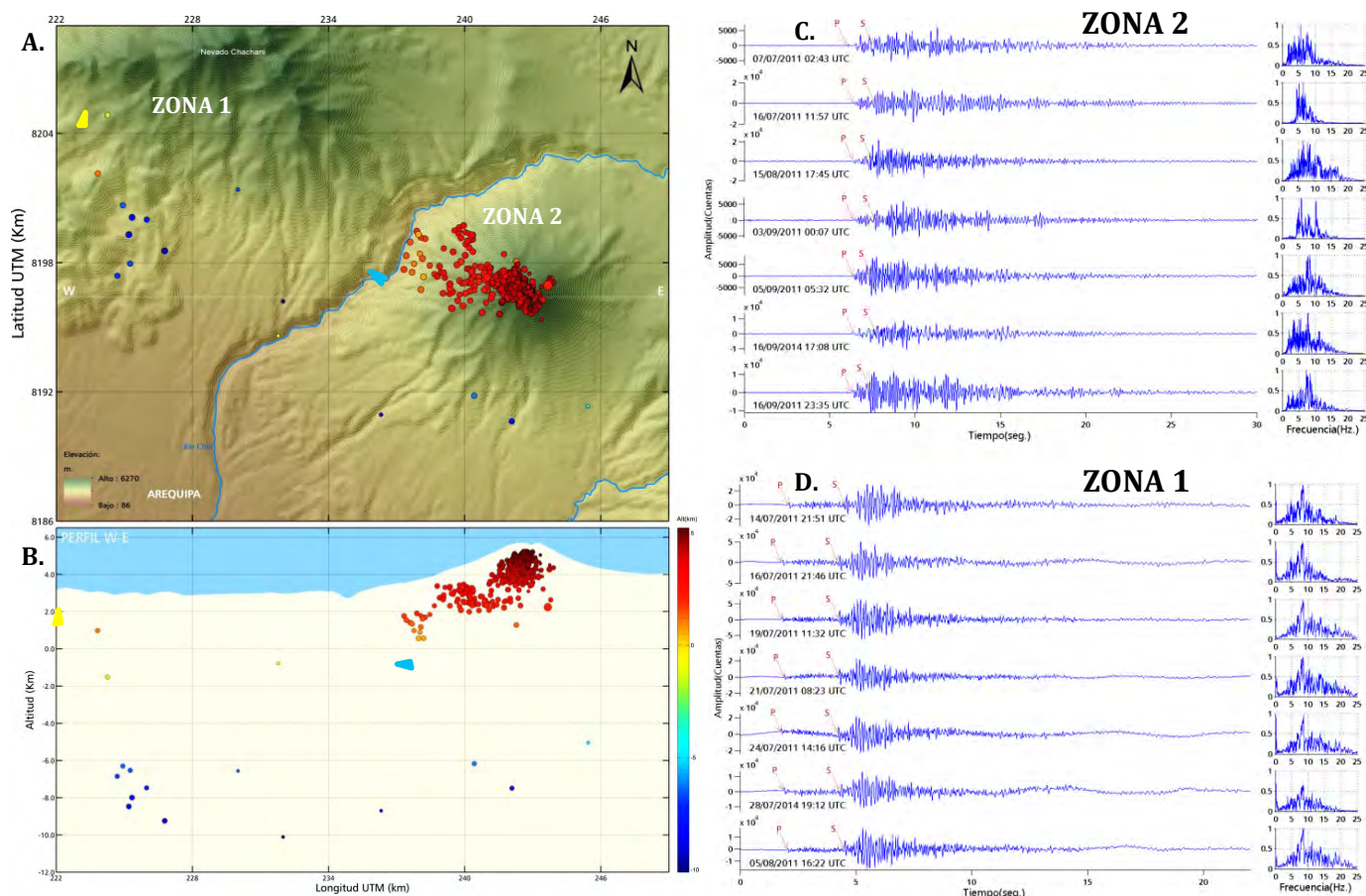


Figura 3. A) Mapa de distribución epicentral de las dos zonas sísmogénicas, Zona 1 y Zona 2, de la región del volcán Misti. **B)** Corte transversal E-W de la sísmicidad de la zona de estudio. **C)** Sísmos representativos de la Zona 2. **D)** Sísmos representativos de la Zona 1, registrados en la componente vertical de la estación M23, cada uno con su respectivo espectro de frecuencias.

Referencias

- Acosta, H., Mamani, M., Alván, A., Oviedo, M., Rodríguez, J. 2006. Actividad tectónica del sistema de fallas Incapuquio durante la formación de la cuenca Arequipa en el Jurásico. Resúmenes extendidos, XV Congreso Peruano de Geología, Cusco, p. 742-745.
- Bormann, P., Dewey, J.W. 2014. The new IASPEI standards for determining magnitudes from digital data and their relation to classical magnitudes. In: Bormann, P. (ed.), *New Manual of Seismological Observatory Practice 2 (NMSOP-2)*, Potsdam, Deutsches GeoForschungsZentrum (GFZ), p. 1-44.
- Centeno, R. 2012. Análisis de la actividad sísmica del volcán Misti entre octubre de 2005 y diciembre de 2008, y su dinámica interna actual. p. 73-74.
- Dorbath, L., Dorbath, C., Jiménez, E., Rivera, L. 1991. Seismicity and tectonics deformation in the Eastern Cordillera and the sub-Andean zone of central Peru. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 4, p. 13-24.
- Lahr, J.C. 1999, revised 2012. HYPOELLIPSE: a computer program for determining local earthquake hypocentral parameters, magnitude, and first-motion pattern. U.S. Geological Survey Open-File Report 99-23, version 1.1, 119 p.
- Thouret, J.-C., Finizola, A., Fornari, M., Suni, J., Legeley-Padovani, A., Frechen, M. 2001. Geology of El Misti volcano near the city of Arequipa, Peru. *Geological Society of America Bulletin*, v. 113, p. 1593-1610.
- White, R. 2013. Monitoring volcanoes and forecasting eruptions. 165p.
- White, R., McCausland, W. 2015. Estimating intrusive volumes and forecasting eruptions using distal volcano-tectonic earthquakes. *Journal of Volcanological and Geothermal Research*, in press.