

SISMOS DISTALES DE FRACTURA OBSERVADOS EN LA ZONA DE LOS VOLCANES MISTI Y CHACHANI

Riky Centeno, Rosa Anccasi, Orlando Macedo

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

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 and McCausland, 2013): 1) detección de sismicidad profunda (LF), 2) distal (dVT), 3) proximal (VTs, LPs y Tremor) y 4) un tipo de sismicidad superficial conocida como sismos de tipo "Híbrido". Los sismos volcanotectónicos distales (dVT) de alta frecuencia ($>5\text{Hz}$), 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 va a provocar 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 and 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 y que el estudio y seguimiento de dichas zonas puedan ayudar a pronosticar una eventual reactivación de este volcán.

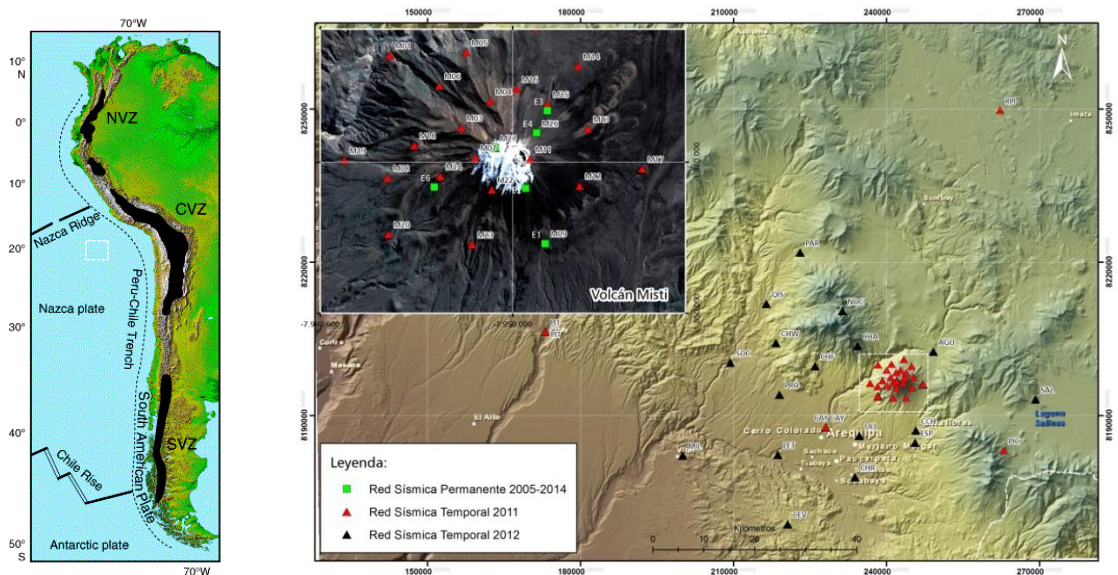


Figura 1.- Mapa de localización de las Estaciones de la campaña sísmica de 2011 y 2012. En el recuadro de la izquierda se observa la ubicación del volcán Misti dentro de la Zona Volcánica Central (CVZ) de América del Sur.

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) y el Instituto de Recherche pour le Développement (IRD):

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

2) la segunda, fue realizada entre octubre a diciembre 2012 y se instalaron en total 22 estaciones sísmicas temporales, de las cuales 11 fueron de banda ancha y 11 de periodo corto, en esta las estaciones fueron distribuidas en su mayor parte al lado Oeste del Volcán en un radio de 50 km del cráter (fig. 1). Todos funcionaron a modo de registro continuo.

De un catálogo de 1435 sismos, 131 fueron seleccionados, entre el 19 de abril al 25 de noviembre 2011, dichos sismos cumplían dos condiciones básicas: la lectura sus fases P y S fueran lo más clara posibles, y la segunda fue que los eventos hayan sido registrado en un mínimo de 4 estaciones.

PROCESAMIENTO

Una vez obtenida las lecturas de las fases P y S en cada una de las estaciones, se verificó que estas lecturas sean coherentes. Para tal efecto se construyó la curva de “Wadatti” utilizando los tiempos de llegada de las fases P y S. En la figura 2a y 2b donde 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 17° - 355°) y la profundidad (varia de 1.2 a 57 km) respectivamente. Se asumió una recta con pendiente igual a 1.7, este valor es el que se va a utilizar en la relación V_p/V_s .

Para la localización hipocentral de los sismos, se han utilizado dos modelos de velocidad: el primero es uno regional propuesto por Dorbath (1984), para la zona sur del Perú; y el segundo es uno local propuesto por Métaixian (1998), ampliamente utilizado en volcanes como el Misti y Ubinas. El objetivo de usar estos dos modelos de velocidad, es para 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 la onda P, y la profundidad del nivel inferior de la capa.

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 (John C. Lahr., 1999), el cálculo de la magnitud local (ML) de los eventos sísmicos fue realizado utilizando la relación de Richter (1935):

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

Donde A es la Máxima amplitud de la traza en nm (nanómetros), que se mide en las componentes horizontales (Bormann and Dewey, 2012) y D es la distancia hipocentral en kilómetros. Para ello se utilizó la estación Salinas (SAL), se le hizo una corrección de instrumento convirtiendo la amplitud en cuentas a nanómetros por segundo.

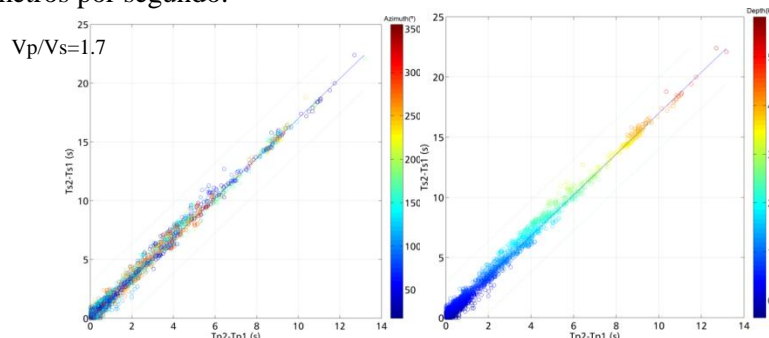


Figura 2.-Curva de Wadatti obtenida para los eventos sísmicos registrados en la campaña sísmica 2011 y 2012, mostrando la relación de velocidades en función A) del azimut y B) la profundidad como color.

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

De los 131 sismos localizados, 115 eventos de magnitudes entre -1.0 y 2.7 ML, fueron ubicados más allá de los 50 km de distancia del volcán, están alineados NW-SE, próximos al batolito de la caldera y están, muy probablemente, asociados a fallas de carácter regional. 9 sismos han sido ubicados en las proximidades del Volcán Chachani y se muestran ligeramente agrupados y los 7 restantes 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 2001-2013. En efecto, en la figura 3a se muestra dos zonas sismogénicas, distal y proximal:

SISMOS DISTALES (ZONA 1)

Con una agrupación de 9 sismos de tipo fractura (entre Misti y Chachani) ubicados a ~22 km del volcán, tenemos entre sus principales características: ocurrieron en forma de enjambre, tuvieron magnitudes entre 0.1 a 1.3 ML, sus duraciones oscilaban entre los 37 a 43 segundos, tuvieron lecturas de S-P de 2.5 segundos en promedio; son sismos de alta frecuencia, en todos los casos mostraban un pico espectral dominante de 7.98Hz en un rango amplio de frecuencias entre 1 - 17 Hz (fig. 3d). Además sus focos están situados a profundidades entre los 2 a 10km por debajo del nivel cero del mar (fig. 3b).

SISMOS PROXIMALES (ZONA 2)

Con más de 400 sismos localizados por debajo del Misti en un radio de ~6 km del cono volcánico, tenemos que entre sus principales características: que son sismos de fractura con magnitudes menores a 1.0ML, sus duraciones oscilan entre los 18 a 27 segundos, tienen lecturas de S-P menores a 2 segundos (entre 0.4 a 1.3 segundos), su contenido espectral es amplio con una banda espectral entre 1 y 25Hz, tiene picos espectrales dominantes que van de los 3.5 a 8.2Hz (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 a 5.5km de altitud; y un segundo conjunto formado por otros eventos VT distribuidos más hacia el W-NW del cono, situados entre las profundidades de 2 a 3.5 km de altitud (fig. 3b).

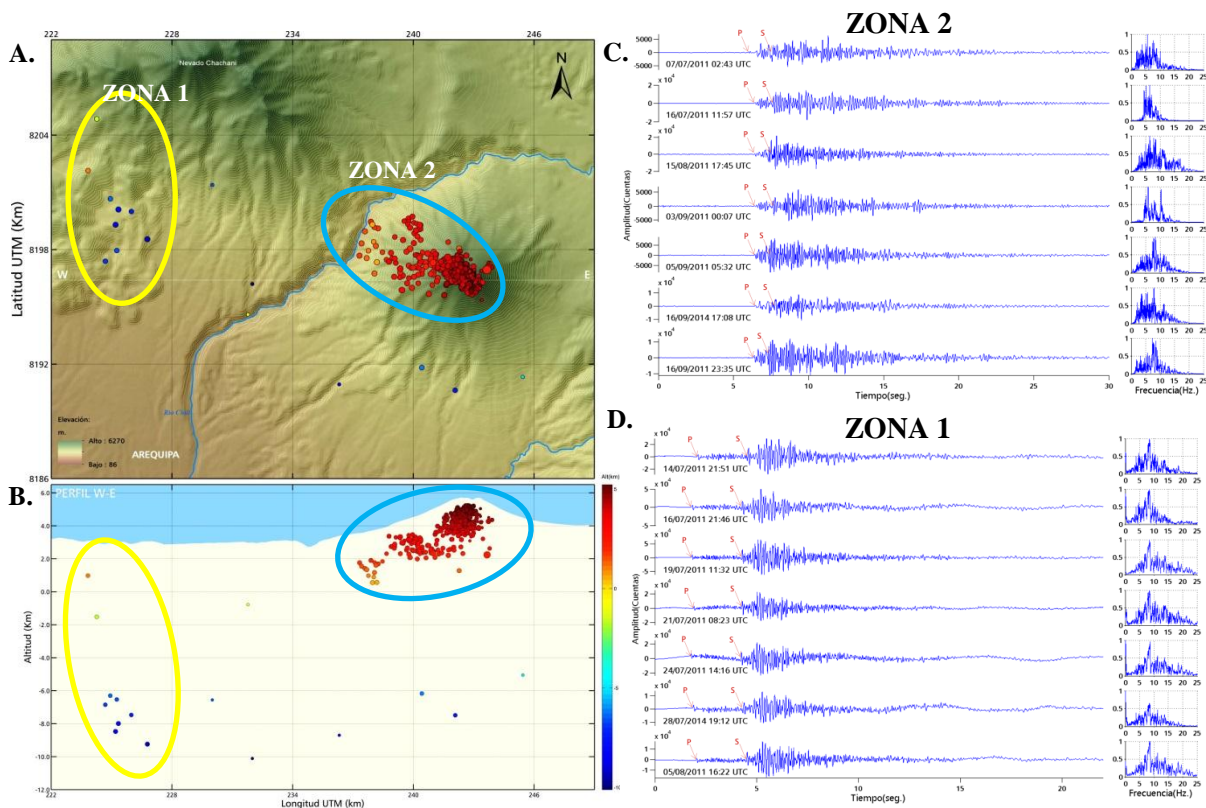


Figura 3.-A) Mapa de distribución epicentral de las dos zonas sismogénicas: Zona 1 y 2, de la región del volcán Misti, **B)** Corte transversal EW de la sismicidad de la zona de estudio, **C)** Sismos representativos de la zona 2 y **D)** Sismos representativos de la zona 1, registrados en la componente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

DISCUSIÓN

La distribución de los eventos sísmicos de la campaña del 2011 y 2012 analizadas en este estudio sugiere la existencia de dos fuentes sismogénicas importantes: Una zona proximal (“zona 2”), que 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 R., 2012). La segunda zona, la zona distal (“zona 1”) comporta sismos superficiales, situados a 22 km del cráter, con profundidades menores a 2 km y distribuidos en enjambre y de alta frecuencia (>5Hz). 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 del 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 and McCausland, 2013). 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 2”) sean las primeras en mostrar alta sismicidad dVT

REFERENCIAS

1. Acosta H., Mamani M., Alvan A., Oviedo M., Rodríguez J., 2006, Actividad tectónica del Sistema de fallas Incapuquio durante la formación de la Cuenca Arequipa en el Jurásico. p. 742-745.
2. Bormann P, Dewey J., 2012, The new IASPEI standards for determining magnitudes from digital data and their relation to classical magnitudes. 25p.
3. Centeno, R., 2012, Análisis de la actividad sísmica del volcán Misti entre octubre 2005-diciembre 2008 y su dinámica interna actual. p. 73-74.
4. Dorbath, L., Dorbath, C., Jimenez, E., y Rivera, L., 1991, Seismicity and tectonics deformation in the eastern cordillera and the sub-andean zone of central Peru. p. 4, 13-24.
5. Lahr, J., 1999, Quick-start manual for HYPOELLIPSE Version 1.0., A Computer Program for Determining Local Earthquake Hypocentral Parameters, Magnitude, and First-Motion Pattern. 67p.
6. Thouret, J.C., Finizola, A., Fornary, M., Suni, J., Legeley-Padovani, A. & Frechen, M., 2001, Geology near of elMisti volcano nearby the city of Arequipa, Peru. p. 1593-1610.
7. White R. and McCausland W., 2014, Estimating intrusive volumes and forecasting eruptions using distal volcano-tectonic earthquakes. p. 3-4.
8. White R., 2013, Monitoring Volcanoes and forecasting Eruptions. 165p.



SISMOS DISTALES DE FRACTURA OBSERVADOS EN LA ZONA DE LOS VOLCANES MISTI Y CHACHANI

Riky Centeno, Rosa Ancassi, Orlando Macedo

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

XVII CONGRESO PERUANO DE GEOLOGÍA
"Alberto Barrantes de la Cruz"



INTRODUCCIÓN

El Misti es un volcán joven, activo y de composición andesítica con actividad fumarólica y microsísmica permanente. Forma parte de lo que se conoce como el sistema volcánico de la zona central de los Andes peruanos (CVZ), se considera como el más importante del Perú, debido a la amenaza que representa para la segunda ciudad más importante del país, Arequipa, con una población de más de un millón de habitantes. La última gran erupción del Misti fue de carácter explosivo hace ~2050-2300 años antes del presente (Thouret et al., 2001). La actividad sísmica del V. Misti, viene siendo monitoreada por el Observatorio Vulcanológico de Arequipa (OVA) del Instituto Geofísico del Perú, en tiempo real, con una red de 5 estaciones sísmicas instaladas en las inmediaciones del cono volcánico, operadas desde octubre del año 2005 hasta el día de hoy (Fig. 1). El análisis de sus registros sísmicos muestra la ocurrencia de eventos típicos volcánicos (VT) de largo periodo (LP), hasta ahora esta actividad es débil y se circunscribe en las inmediaciones del cono y está asociada a la movilización de vapor de agua y gases volcánicos en las proximidades de la chimenea y el cráter (Centeno R., 2012).

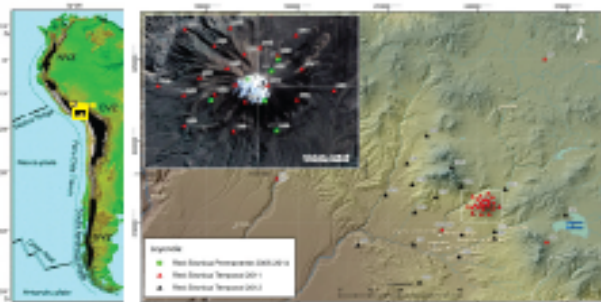


Figura 1.- Mapa de localización de las 5 estaciones sísmicas de la zona volcánica de los volcanes Misti y Chachani en el momento de la configuración de 2005 y 2012. Se ve el estado de las estaciones sísmicas en el momento de la configuración de 2005 y 2012. Se ve el estado de las estaciones sísmicas en el momento de la configuración de 2005 y 2012.

Estudios recientes en más de 80 crisis eruptivas en 60 volcanes en el mundo, describen un modelo o patrón de actividad sísmica precursora de erupciones volcánicas, dicho modelo comporta cuatro fases (White and McCausland, 2013): 1) detección de sismicidad profunda (LP); 2) distal (dVT); 3) proximal (VTs, LP y Tremor) y 4) un tipo de sismicidad superficial conocida como sismos de tipo "hilo rido" (Fig. 2). En la primera fase, la sismicidad tipo LP es muy débil de detectar.

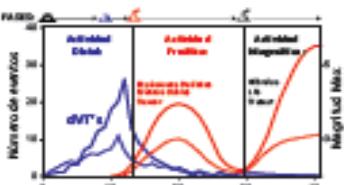
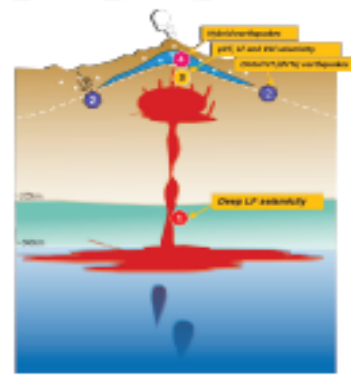


Figura 2.- Modelo y evolución de la actividad sísmica precursora de erupciones volcánicas. Se ve el estado de las estaciones sísmicas en el momento de la configuración de 2005 y 2012. Se ve el estado de las estaciones sísmicas en el momento de la configuración de 2005 y 2012.



Lo que sí sísmos volcánicos tectónicos o distales (dVT) de alta frecuencia (>5 Hz), que están asociados a la segunda fase, se lo callan frecuentemente sobre fallas tectónicas a 10 o 15 km de distancia de un volcán, y ocurren en forma de enjambres. Esta actividad es generada como consecuencia del avance o intrusión de magma hacia a la superficie lo cual va a provocar el incremento o descenso intermitente, especialmente de tipo hidrotérmico, en el entorno de la chimenea magnitudinal y bajo el edificio. Los sísmos que se generan son de tipo fractura (dVT) y coexisten al primer indicio en una inminente reacción o erupción de un volcán que han permanecido en estado de reposo por varias décadas (White and McCausland, 2013).

El objetivo de este trabajo es evidenciar la existencia de zonas de sismicidad dVT en las inmediaciones del volcán Misti y que en el estudio y seguimiento de dichas zonas se puedan ayudar a pronosticar una eventual reacción de este volcán. Para tal fin se ha utilizado el registro sísmico de hasta 27 eventos recientes de magnitud de hasta 2.7 y periodo de corto operados durante campañas sísmicas efectuadas por el OVA-IGP en 2011 y 2012 (Fig. 1).

SELECCIÓN DE LOS DATOS

De un catálogo de 1435 sismos, 131 fueron seleccionados, entre el 19 de abril al 25 de noviembre 2011, dichos sismos cumplieron dos condiciones básicas: la lectura sus fases P y S, fueron lo más clara posible, y la segunda fue que el convección haya sido registrado en un mínimo de 4 estaciones. De los 131 sismos localizados, 115 eventos de magnitud entre -1.0 y 2.7 ML, fueron ubicados más allá de los 50 km de distancia del volcán, están al nudo NW-SE, próximos al batolito de la caldera y están, muy probablemente, asociados a zonas fallas de carácter regional (Fig. 3).

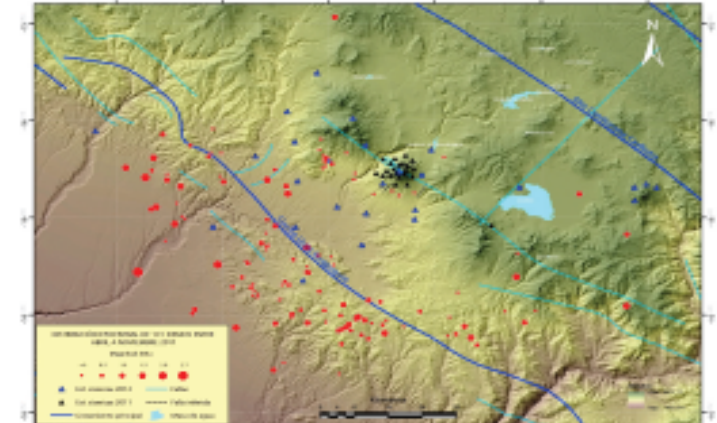


Figura 3.- Mapa de la zona de fractura y distribución de los 131 sismos seleccionados de las campañas sísmicas de 2011 y 2012, solo se ve los sismos que cumplen con las condiciones de selección de los datos.

PROCESAMIENTO

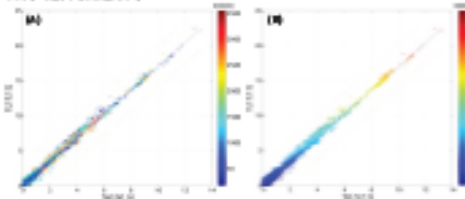


Figura 4.- Curvas de velocidad de ondas P y S para los sismos de la zona volcánica de los volcanes Misti y Chachani, se ve el estado de las estaciones sísmicas en el momento de la configuración de 2005 y 2012.

Se verificó la lectura de las P y S sean coherentes, para tal efecto se construyó la curva de "Wadati" utilizando los tiempos de llegada de las fases P y S. En la figura 4a y 4b donde se observa el ajuste lineal del periodo de las P y S, y la relación de las velocidades en función del azimut (que varía entre 17° - 355°) y la profundidad (varía de 1.2 a 57 km) respectivamente. Se asumió una relación con pendiente igual a 1.7, este valor es el que se va a utilizar en la relación V_p/V_s .

Para la localización hipocentral de los sismos, se han utilizado el programa hypo11pse (John C. Lahr, 1999) y dos modelos de velocidad: el primero es uno regional propuesto por Dornath (1994), para la zona sur del Perú; y el segundo es uno local propuesto por Metaxian (1998), ampliamente utilizado en volcanes como el Misti y Ultras (ver Tabla 1).

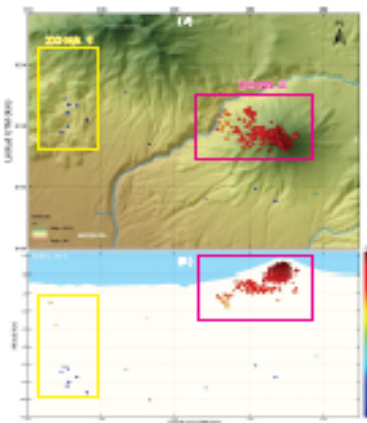
Modelo	Vp (km/s)	Vs (km/s)	Vp/Vs
Dornath et al. (1994)	3.5	2.3	1.5
Metaxian et al. (1998)	4.2	2.5	1.7
Local	4.8	2.8	1.7

Para el cálculo de la magnitud local (ML) de los eventos sísmicos se realizó usando la relación de Richter (1935):

$$ML = \log_{10}(A) + \log_{10}(D) + 0.0030 \cdot (D) + 3.0$$

Donde: A es la máxima amplitud de la traza en mm (h en diámetro), que se mide en las componentes horizontal (Bormann and Dewey, 2012) y D es la distancia hipocentral en kilómetros. Para ello se utilizó la estación Sallas (SAL) se le hizo una corrección de instrumento considerando la amplitud en centímetros por segundo.

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS



Al final tenemos 9 sismos en forma de enjambre ocurridos entre julio y agosto 2011, ubicados en las proximidades del Volcán Chachani (Fig. 5a). A este grupo de sismos se le denominó Zona 1 (sismicidad distal). Sus focos están a profundidades entre los 2 a 10 km o debajo del nivel del mar (Fig. 5b). Estos sismos ocurrieron en forma de enjambre, tuvieron magnitudes entre 0.1 a 1.3 ML, sus duraciones oscilaban entre los 37 a 43 segundos, tuvieron lecturas de S-P de 2.5 segundos en promedio; son sismos de alta frecuencia, en todos los casos mostraban un pico espectral dominante de 7.98 Hz en un rango amplio de frecuencia entre 1 - 17 Hz (Fig. 6a).

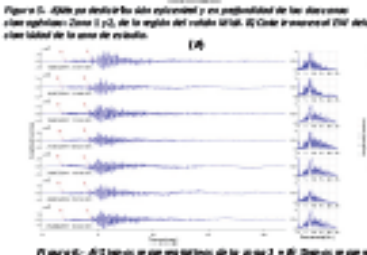


Figura 6.- (a) Análisis espectral de los 9 sismos y (b) Comparación de los espectros de los sismos con el modelo teórico de la zona de actividad.

A todos estos sismos se les ha agregado 437 sismos localizados en el mismo Volcán (2001-2012). Se le denominó Zona 2 (sismicidad proximal). La mayor parte están centrados en el cráter y la otra está casi inclinada hacia el oeste (Fig. 5a), en un rango de 0.3 a 5.5 km de profundidad (Fig. 5b). Son sismos de fractura con magnitudes menores a 1.0 ML, sus duraciones oscilaban entre los 18 a 27 segundos, tienen lecturas de S-P menores a 2 segundos (entre 0.4 a 1.3 segundos), su convección espectral es amplia con una banda espectral entre 1 y 25 Hz; tienen picos espectrales de diferentes que van de los 3.5 a 8.2 Hz (Fig. 6b).

DISCUSIÓN

La sismicidad superficial, de fractura, en contraste con las inmediaciones del volcán Chachani (9 sismos dVTs de la zona 1) y que se repiten o son recurrentes en el tiempo o por algún indicio del resultado de fuerzas tectónicas (Fig. 7), pero este también es posible que se deba a presiones hidrotermales que provengan de focos termales importantes (Chachani, Misti o mas Lajas). 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 2") sean las primeras en mostrar alta sismicidad dVT.

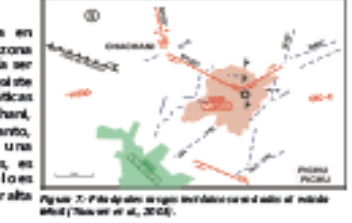


Figura 7.- Distribución de los 437 sismos seleccionados de las campañas sísmicas de 2001-2012.

CONCLUSIONES

- Fue posible identificar una zona 1, de sismicidad distal que comporta sismos superficiales, situados a 22 km del cráter, con profundidades menores a 2 km y actividad de alta frecuencia (>5 Hz).
- El origen de esta sismicidad podría ser del resultado de fuerzas tectónicas, pero esta también es posible que se deba a presiones hidrotermales que provengan de focos termales.
- La zona 1 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 2") sean las primeras en mostrar alta sismicidad dVT.
- El patrón de sismicidad propuesto, podrá fundamentar para el volcán Misti.

Referencias Bibliográficas

Ancassi R., Centeno R., 2012, Actividad sísmica del sistema volcánico de los volcanes Misti y Chachani en el momento de la configuración de 2005 y 2012. Tesis de grado, Universidad de Arequipa, 100 p.

Centeno R., 2012, Actividad sísmica del sistema volcánico de los volcanes Misti y Chachani en el momento de la configuración de 2005 y 2012. Tesis de grado, Universidad de Arequipa, 100 p.

Dornath J., 1994, Sísmica de la zona sur del Perú. Tesis de grado, Universidad de Arequipa, 100 p.

Metaxian J.C., 1998, Sísmica de la zona sur del Perú. Tesis de grado, Universidad de Arequipa, 100 p.

White R., McCausland J., 2013, The seismicity of volcanoes: a review of the seismicity of volcanoes. Tesis de grado, Universidad de Arequipa, 100 p.