



XVIII Congreso Peruano de Geología

CARACTERÍSTICAS DE LA ACTIVIDAD SÍSMICA EN LA REGIÓN DEL VOLCÁN TICSANI (MOQUEGUA) DURANTE EL PERIODO 2014-2016

John Cruz¹, Orlando Macedo¹, Nino Puma¹, José del Carpio¹, Riky Centeno¹ y José Torres¹

¹ Observatorio Vulcanológico del Sur (OVS) - Instituto Geofísico del Perú, Urb. La Marina B-19, Cayma, Arequipa, Perú (join3h@hotmail.com)

1. Resumen

Se ha instalado y operado una red de diez estaciones sísmicas entre mayo 2014 y abril de 2016 en la zona del volcán Ticsani, con el fin de investigar el tipo y características de los sismos, así como la naturaleza de sus fuentes. Se identificaron 38 mil sismos Volcano-Tectónicos (VT) y 53 eventos tipo Híbrido. Los registros de sismos VT muestran la ocurrencia de enjambres de sismos superficiales ($2\text{km} < h < 13\text{ km}$) con magnitudes entre 1.5 y 4.0 ML. La sismicidad se encuentra distribuida en dos agrupaciones principales, la primera bajo el cráter, y la segunda a 6 km al este del volcán. Asimismo se ha estimado un valor para el parámetro "b" de 1.76 ± 0.05 , propio de ambientes influenciados por actividad volcánica. En base al momento sísmico acumulativo, se ha estimado que en este periodo habría ocurrido una intrusión de magma con un volumen estimado en 970,000 m³. Los resultados sugieren ingresos de magma a la posible cámara magmática situada en profundidad, acumulando esfuerzos que luego son transmitidos al sistema hidrotermal generando enjambres de sismos VT que reactivan fallas aledañas, tal como la falla F2 identificada en estudios previos.

2. Introducción

El volcán Ticsani (-16.751°S , -70.604°O 5133 msnm) es un estrato volcán perteneciente a la Zona Volcánica Central de los Andes, dentro del grupo volcánico Ubinas-Huaynaputina-Ticsani (Lavallée et al., 2009), está

constituido por un complejo de domos (D1, D2, D3) de lavas andesíticas a dacíticas y una caldera de destrucción (Fig. 1). La más reciente erupción del volcán Ticsani ocurrió hace menos de 400 años (Siebert et al., 2010), con un IEV entre 2 y 3 de tipo freatomagmática (Mariño y Thouret, 2003). Actualmente existen fumarolas dispersas próximas al cráter y una actividad hidrotermal importante. La zona del volcán Ticsani recientemente ha presentado una actividad sísmica importante asociada a la tectónica local (Aguilar et al., 2001; Tavera, 2006). El Observatorio Vulcanológico del Sur (OVS) monitorea este volcán desde mayo 2014 con diez estaciones portátiles de periodo corto y desde agosto de 2015 con estaciones telemétricas de banda ancha. Los datos analizados en el presente trabajo corresponden al periodo de mayo de 2014 a abril de 2016.

Figura 1.

3. Actividad Sísmica

En región del volcán Ticsani se ha observado principalmente sismos Volcano-Tectónicos (VT), caracterizados por tener fases P y S impulsivas y por su amplia banda espectral (Fig. 2C). Durante este periodo de estudio se identificó el registro de 38 mil sismos VT que ocurrieron con una tasa diaria media de 55VT/día: A partir de setiembre de 2015 se observa un incremento de sismicidad alcanzando un pico máximo de 1251 eventos el día el 30 de marzo de 2016 (Fig. 2A). También se registraron sismos de baja frecuencia o LP, así como eventos tipo Tremor, aunque con tasas muy pequeñas.

Por otro lado, se ha registrado sismos de tipo Híbrido (Fig. 2D) desde diciembre de 2015. Estos eventos son raros pero fácilmente identificables ya que contienen altas y muy bajas frecuencias (~ 8.8 Hz y ~ 0.35 Hz, respectivamente). La Figura 2A muestra la aparición e incremento de sismos híbridos desde diciembre 2015, siendo el evento del 10 de febrero 2016 el más notorio y energético (23 Megajoules) ocurrido durante el periodo de este estudio.

Una importante característica de la actividad sísmica en esta región es la ocurrencia de sismos en enjambre (Fig. 2E). Este tipo de sismicidad, que es propio de ambientes volcánicos (McNutt, 1996), ya había sido observada en esta misma zona en 2005 (Holtkamp et al, 2011; Cruz, 2016). Durante el periodo de estudio dichos enjambres se intensificaron en setiembre de 2015, alcanzando mayor energía el 30 de marzo 2016 cuando se presentó un enjambre con sismos que alcanzaron magnitudes de 4ML (Fig. 2B).

Figura 2

4. Distribución Espacial

Los parámetros hipocentrales de 3158 eventos VT con claros registros de sus fases P y S fueron estimados usando el programa Hypoellipse (Lahr, 1999), lográndose resultados de calidad A y B en la precisión del epicentro y de la profundidad focal (A significa un error ≤ 1.34 km; B un error ≤ 2.67 km). El modelo de velocidades utilizado fue el de Villegas (2009) modificado para sismos superficiales y una relación de velocidad $V_p/V_s=1.77$ (Aguilar et al., 2001).

Los sismos presentan magnitudes entre 1.5 y 4ML, y su distribución muestra dos agrupamientos sísmicos. El primero se encuentra muy próximo al domo D3 extendiéndose hacia el NE y hacia los domos D1 y D2. Cruz (2016) ha mostrado que estos sismos siguen un alineamiento cuyo buzamiento es próximo a los 70° al Oeste, y que coincide con la falla F2 descrita por Lavallé et al., (2009). Asimismo, Cruz (2016) ha mostrado también que el cálculo de sus mecanismos focales corresponde a desplazamientos de tipo normal con componente transcurrente, guardando también correspondencia con la falla F2.

El segundo agrupamiento sísmico se encuentra un poco más profundo que el anterior y está situado a 6km al este del volcán (Fig.3). Por otra parte, también, ha sido posible localizar tres sismos tipo Híbrido, los cuales se ubican bajo el domo D3 (Fig. 3). El híbrido más energético fue de 3.2ML y ocurrió a una profundidad de 7.8km.

Figura 3.

5. Cálculo del valor de "b"

El cálculo del valor de "b" determinado para el periodo de mayo 2014 - abril 2016 con 3158 eventos registrados en el volcán Ticsani fue de 1.76 ± 0.05 : Este valor "b" fue calculado con el programa Zmap (Wiemer & Wyss, 2002) mediante el método de Máxima Probabilidad con una Magnitud de Completitud de 2.4 (Fig. 4). En la relación Gutenberg-Richter un alto valor de "b" implica, alta

heterogeneidad, cambios temporales y espaciales en esfuerzos de cizalla y un alto gradiente termal. (Farrel et al., 2009). En general se han observado valores mayores a 1.0 en áreas volcánicas (Mc Nutt, 2005).

Figura 4

6. Volumen de Magma Intruido

Texto A partir de los resultados del presente estudio, se ha estimado el momento sísmico acumulativo de los sismos VT en la zona del volcán Ticsani, habiéndose obtenido un valor de $1.077E+16$ Nm, lo cual equivale a una magnitud acumulada de 4.6ML (Fig. 5).

Recientes investigaciones muestran que los enjambres de sismos VT preceden a las intrusiones magmáticas en volcanes que no presentaron erupciones por décadas y que este tipo de actividad precursora ocurre días hasta años antes de una erupción (White & McCausland, 2016). Asimismo, dichos autores muestran que el volumen de magma intruido puede ser estimado de manera sencilla a partir del momento sísmico acumulativo de los sismos VT mediante la expresión: $V = 0.71 \text{ Log log}_{10} \sum \text{Momento} - 5.32$.

Usando la mencionada expresión y el momento sísmico acumulativo de la zona del volcán Ticsani, se obtiene un volumen de magma intruido de $970,000\text{m}^3$ (Fig. 5) entre mayo 2014 y abril 2016 bajo el área que ocupa el volcán Ticsani. Si bien no ha habido ascenso de magma y/o fluidos magmáticos hasta la superficie, esta importante actividad puede ser indicio de una próxima reactivación, por lo cual resta permanecer vigilantes.

Figura 5

7. Modelo propuesto según la sismicidad registrada

Tomando como base el modelo de Fournier (1999) se elabora un esquema para explicar la ocurrencia de sismos híbridos y los enjambres sísmicos. Los sismos tipo híbrido registrados en el volcán Ticsani, en especial sus bajas frecuencias constituyen indicios del ascenso de magma e ingreso a una probable cámara magmática. El magma en ascenso genera incremento de temperatura y de presión en el entorno. White and McCausland (2016) estiman que los fluidos del sistema hidrotermal pueden transmitir la presión hasta decenas de kilómetros favoreciendo la aparición de sismicidad VT distal. Para el Ticsani, se asume que los enjambres de sismos VT y su desaparición ocurrirían debido a la presurización del sistema, y su posterior relajación. Cada pulso de intrusión de magma transmite pulsos de presión a través de acuíferos que intersecan fallas tectónicas preestablecidas.

Es probable que mientras el magma intruye gradualmente, se sobre presurizan los acuíferos y por tanto aumenta el lubricante en la fallas aldañas locales. Una falla afectada es la F2 descrita por Lavallée et al. (2009) y otra posible falla F no reconocida o descrita hasta la actualidad también sería afectada por estas presiones (Fig. 6).

Por tanto, se propone que los enjambres VT en la región del volcán Ticsani serían principalmente consecuencia de intrusiones magmáticas. La evidencia de tales intrusiones

está constituida por el registro de sismos de tipo Híbrido. Asimismo, el valor de "b" está relacionado a la gran cantidad de sismos de fractura en enjambre debido a ingresos de fluidos magmáticos.

Figura 6.

8. CONCLUSIONES

Los sismos VT representan la sismicidad dominante en la región del volcán Ticsani, se presentan principalmente en secuencias de enjambres sísmicos. La sismicidad presenta un incremento a partir de setiembre de 2015 registrándose sismos de hasta 4ML. Se registran también señales tipo Híbrido ubicados bajo el cráter del volcán.

La sismicidad de tipo VT se encuentra distribuida en dos agrupaciones principales, la primera ubicada sobre el volcán Ticsani guardando correspondencia con la falla F2, y la segunda a 6km al este del volcán. La segunda agrupación podría estar relacionada a una falla F no reconocida por estudios anteriores. La distribución de sismos en profundidad se encuentra entre 2 y 13km.

Los cálculos de valor de "b" dan como resultado 1.76 ± 0.05 con una magnitud de completitud de 2.4ML, valor relacionado a los esfuerzos de cizalla registrados en los enjambres de sismos VT y propio de ambientes influenciados por la actividad volcánica.

Los cálculos de volumen intruído de magma basados en el momento sísmico acumulativo de los sismos VT corresponden a 970,000m³, equivalente a una magnitud acumulada de 4.6ML

Este estudio propone que los enjambres de sismos VT ocurren como consecuencia del ingreso de fluidos hidrotermales y/o volcánicos en la zona de la falla F2 y F, a causa de la sobre presurización generada por intrusión de magma.

Agradecimientos

El presente estudio de investigación es el esfuerzo conjunto de todos los que formamos el grupo de trabajo en el OVS, por ello agradezco a nuestro director Orlando Macedo y compañeros de trabajo que colaboraron con su disposición, tiempo, ideas y sugerencias que al final se ven plasmado en este estudio.

Referencias

- Aguilar, V., Tavera, H., Bernal, I., Palza, H., & Kosaka, R. (2001). Análisis y evaluación del sismo de Calacoa (Omate - Moquegua) del 6 de Mayo de 1999 (MW=4.0). Boletín de la Sociedad Geológica del Perú v. 91 (2001) p.69-80.
- Cruz, J. (2016). Actividad sísmica en la región del volcán Ticsani (Moquegua) para el periodo mayo setiembre del 2014. Tesis de ingeniero, Universidad Nacional de San Agustín, 159 p.
- Farrell, J., Husen, S., & Smith, R. (2009). Earthquake swarm and b-value characterization of the Yellowstone` volcano-tectonic system. Journal of Volcanology and Geothermal Research 188 (2009) 260-276.
- Fournier, R., (1999). Hydrothermal processes related to movement of fluid from plastic into Brittle rock in the Magmatic-Epithermal environment. Bulletin Society of Economic Geologists, p. 1205-1208.
- Holtkamp, S., Pritchard, M., y Lohman, R. (2011). Earthquake swarms in South America. Geophys. J. Int. 187,128-146.
- Lahr, J. (1999). Hypoellipse user guide. U.S. Geological Survey Open-File Report 99-23, On-Line Edition.
- Lavallée, Y., De Silva, S., Salas, G., y Byrnes, J. (2009). Structural control on volcanism at the Ubinas, Huaynaputina, and Ticsani Volcanic Group (UHTVG), southern Peru. Journal of Volcanology and Geothermal Research 186 (2009) 253-264.
- Mariño, J., y Thouret, J. (2003). Geología, historia eruptiva y evaluación de peligros del volcán Ticsani (sur del Perú). Boletín de la Sociedad Geológica del Perú, Lima.
- McNutt, S. (1996). Seismic monitoring and eruption forecasting of volcanoes: A review of the state-of-the-art and case histories. Monitoring and Mitigation of Volcano Hazards, Eds. R. Scarpa and R. Tilling. Springer-Verlag, Berlin New York, Pp. 99-146.
- McNutt, S. (2005). Volcanic seismology. Annual Review Earth and Planetary Science. 33, 461-491.
- Siebert, L., Simkin, T., y Kimberly, P. (2010). "Volcanoes of the world". Third edition. Smithsonian Institution, University of California Press.
- Tavera, H. (2006). Características sismotectónicas de la crisis sísmica de octubre del 2005 en la región del volcán Ticsani (Moquegua). CNDG - Instituto Geofísico del Perú, Lima.
- Villegas, J. C. (2009). Modelos de velocidad unidimensionales para las regiones del Norte, Centro y sur del Peru, a partir de la inversión de los tiempos de arribo de las ondas P y S de sismos locales. Tesis de ingeniero, 97.
- White R., & McCausland W. (2016). Volcano-tectonic earthquakes: A new tool for estimating intrusive volumes and forecasting eruptions. Journal of Volcanology and Geothermal Research 309 (2016) 139-155. Published by Elsevier B.V.
- Wiemer, S., & Wyss, M. (2002). Mapping spatial variability of the frequency - magnitude distribution of earthquakes. Advanced in Geophysics. 45, 259-302.

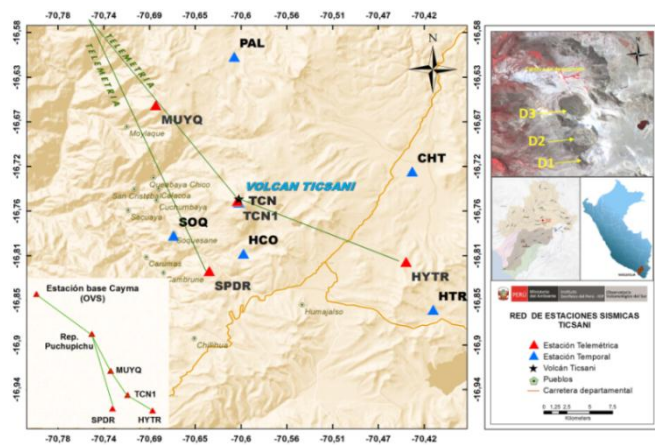


Figura 1. Distribución de estaciones sísmicas en la región de estudio. Se observan los domos D1, D2 y D3 (recuadro de la esquina superior derecha). El recuadro de la esquina inferior izquierda muestra el enlace de telemetría hasta el OVS.

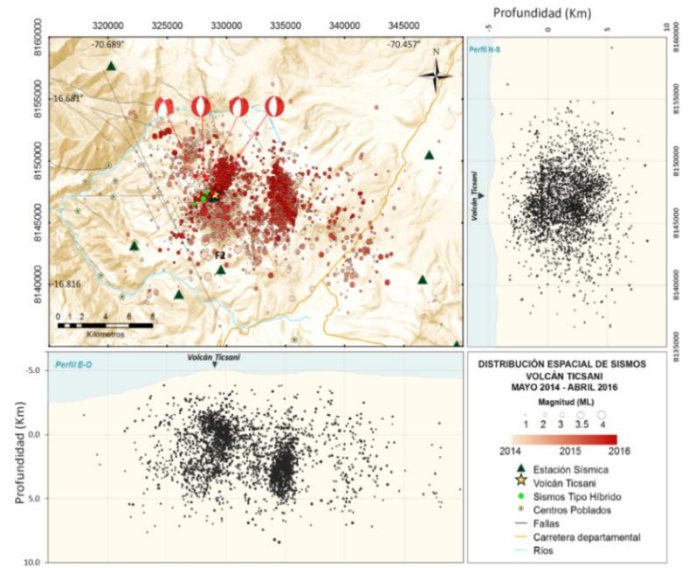


Figura 3. Distribución de la sismicidad entre mayo 2014 y abril 2016. En los perfiles W-E y N-S se observa un agrupamiento de sismos por debajo del volcán.

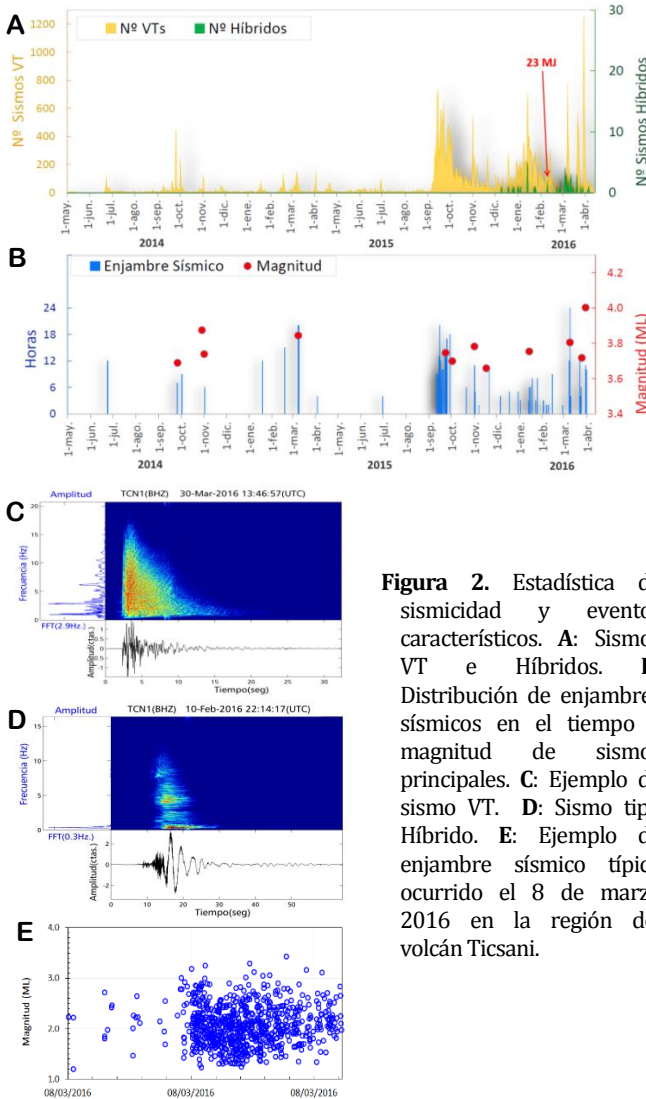


Figura 2. Estadística de sismicidad y eventos característicos. **A:** Sismos VT e Híbridos. **B:** Distribución de enjambres sísmicos en el tiempo y magnitud de sismos principales. **C:** Ejemplo de sismo VT. **D:** Sismo tipo Híbrido. **E:** Ejemplo de enjambre sísmico típico ocurrido el 8 de marzo 2016 en la región del volcán Ticsani.

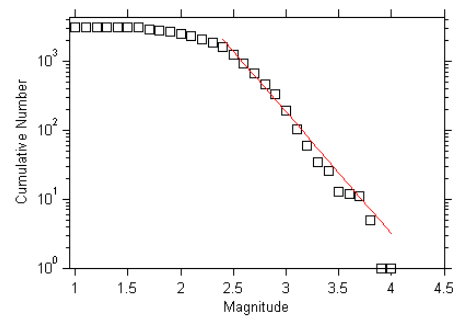


Figura 4. Relación G-R para los sismos de fractura del volcán Ticsani, $b=1.76$.

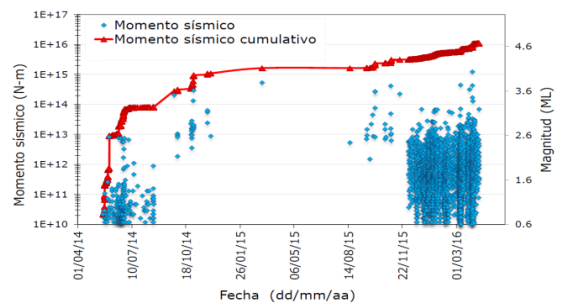


Figura 5. Momento sísmico acumulativo versus el tiempo.

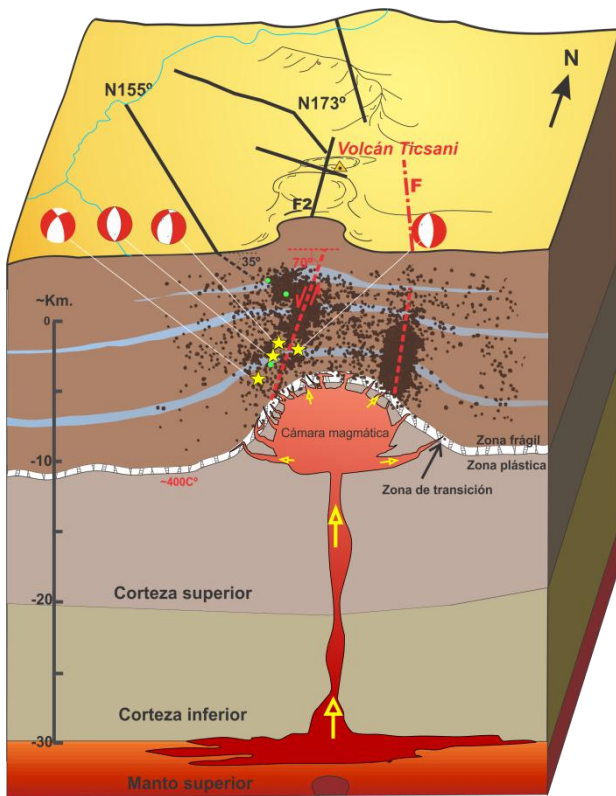


Figura 6. Esquema a partir de Fournier (1999) el cual explica la generación de los sismos de fractura debido a intrusiones de magma y a la presión de fluidos volcánicos. Los círculos en verde representan sismos Híbridos.