

CARACTERIZACIÓN DE SISMOS TIPO “TORNILLO” REGISTRADOS DURANTE LA CRISIS DEL VOLCÁN SABANCAYA (2013).

Ortega M.¹, Taipe E.¹, Antayhua Y.¹ & Londoño J.²

¹Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico INGEMMET, Av. Canadá 1470, Lima, Perú.

²Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Manizales, Av. 12 de Octubre # 15 – 47, Bogotá, Colombia.

INTRODUCCION

El Sabancaya se localiza en la parte Sur - Central de la provincia de Caylloma departamento de Arequipa, a unos 70 km al NW de la ciudad de Arequipa (figura 1). Actualmente, este volcán es considerado activo con un comportamiento relativamente estable, muestra de esto, es el incremento de la actividad sísmica y fumarólica a principios del año 2013, donde se registró sismicidad asociada al fracturamiento de roca y al movimiento de fluidos, de estos últimos existe un tipo particular de sismicidad denominada “TORNILLO” que apareció durante este periodo de estudio.

Los sismos de tipo Tonillo (figura 2) se explican como la resonancia dentro de un conducto o grieta, provocada por una presión transitoria aplicada por el paso de un fluido o gas sobre una pequeña área de la grieta o conducto; es decir, los tornillos resultan ser una excitación impulsiva y una resonancia dentro del volcán, la cual depende de la posición de la presión transitoria y las condiciones del contorno en efecto del perímetro de la grieta (Alpala et al., 2013). Este tipo de sismicidad se ha encontrado en otros volcanes andesíticos y en diferentes etapas del proceso eruptivo (figura 2), ya sea como precursores de erupciones o de emisiones de gas (volcán Galeras, Colombia, 1992-1993; volcán Asama, Japón, 1990), después de erupciones (volcán Tokachi, Japón, 1989), durante enjambres sísmicos (volcán Meakan, Japón, 1982) y durante estados de reposo (volcán Puracé, 1994-2012, volcán Cumbal, 2007-2012, Colombia; volcán Tarumai, Japón, 1970-1971, 1975) (Torres et al., 1996; Seidl et al., 1999).

EL VOLCÁN SABANCAYA

El volcán Sabancaya es un estrato-volcán andesítico de edad Holocénica y forma parte del Complejo Volcánico Ampato – Sabancaya - Hualca Hualca. Según estudios realizados por Delgado (2012); se han establecido 3 grandes unidades de flujos de lava, dichas unidades están compuestas por flujos de lava (FL), depósitos de caída de ceniza (DCC) y lahares (Lah) - (figura 3).

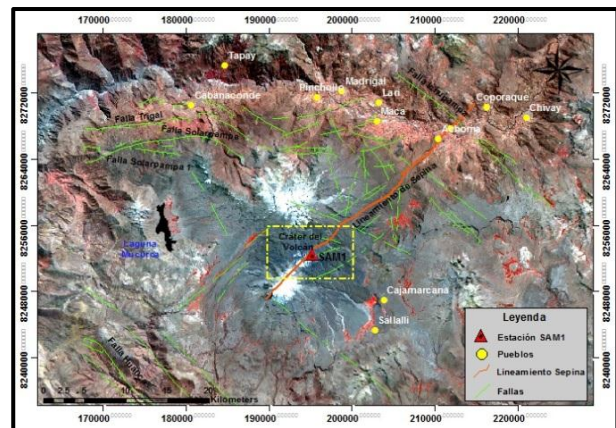


Figura 1: Mapa de ubicación y cartografiado de los sistemas de fallas del Complejo volcánico Ampato – Sabancaya – Hualca Hualca (Arequipa). El recuadro amarillo indica la zona de estudio.

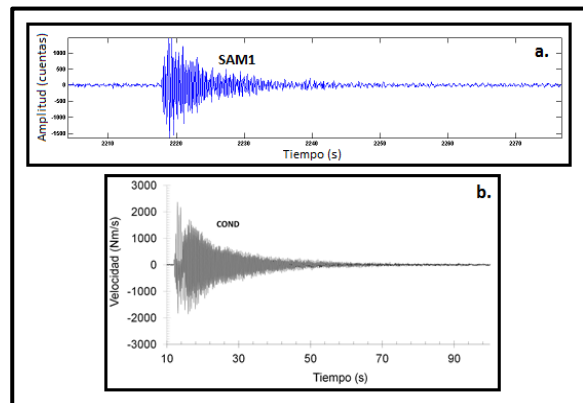


Figura 2: Ejemplos de sismos de tipo Tornillo a) Tornillo registrado en el volcán Sabancaya (Perú) el día 20/04/2013.

b) Tornillo registrado en el volcán Puracé (Colombia) el día 12/09/2010.

El volcán Sabancaya, presenta un control estructural NO-SE en el arco volcánico cuaternario a lo largo de aprox. 300 km, conformado por fallas normales principalmente con buzamientos (Benavente et al., 2010 y 2012). Asimismo, Sébrier et al. (1985) propone las fallas de Trigal y Solarpampa, ubicadas entre las localidades de Huambo y Cabanaconde, estas fallas poseen orientaciones E-O, constituidas por segmentos que se extienden a lo largo de 30 km (figura 4). Por otro lado, en Pampa Sepina (figura 4), se muestra los lineamientos tectónicos obtenidos a partir del análisis de imágenes satelitales y de observaciones de campo in situ por Sébrier et al., (1985), Huamán et al., (1991) y Méring et al., (1996).

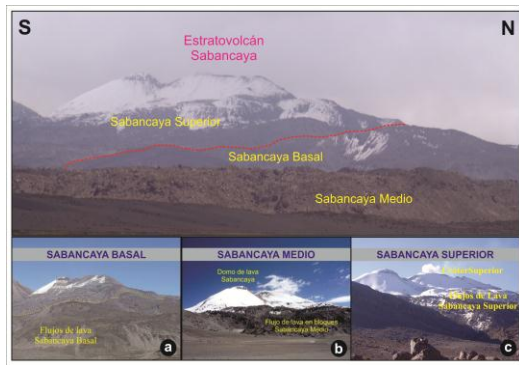


Figura 3: Vista de las unidades volcánicas del volcán Sabancaya. **a)** Unidad volcánica Sabancaya Basal. **b)** Unidad volcánica Sabancaya medio y **c)** Unidad volcánica Sabancaya Superior.

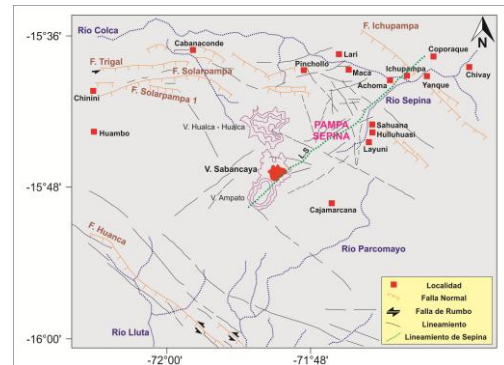


Figura 4: Principales Falla y lineamientos del área de estudio (Mering et al., 1996; Sebrier et al., 1985). LS = Lineamiento de Sepina.

METODOLOGÍA, DATOS Y PROCESAMIENTO

MODELO GEOMÉTRICO

Se plantea un modelo de fuente donde el decaimiento armónico en la forma de onda está relacionado con la respuesta acústica de un sistema resonador excitado por la presión transitoria de algún fluido que llena la cavidad resonante. Como la frecuencia compleja depende de las propiedades acústicas de los fluidos y sólidos y de la geometría del resonador, se puede estimar el estado de los fluidos que se encuentran dentro del resonador.

Según el modelo planteado por Aki et al., 1977; Chouet et al., 1986, 1988, 1996; Kumagai et al., 1999, 2000, 2001, los parámetros que intervienen en este sistema son α/a , b/μ y la rigidez de la fractura $C = (b/\mu)(L/d)$, donde α es la velocidad de la onda compresional en la roca matriz, a es la velocidad del sonido en el fluido, b es el módulo de volumen del fluido, μ es el módulo de rigidez del sólido, L y d son la longitud y abertura de la fractura respectivamente (Figura 5).

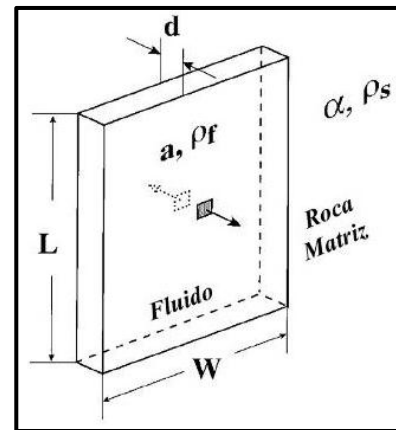


Figura 5: Modelo geométrico de la fractura llenada por el fluido, donde ρ_f es la densidad del fluido y ρ_s es la densidad del sólido.

MÉTODO DE ANÁLISIS ESPECTRAL SOMPI

Se basa en el concepto físico de las propiedades que caracterizan un sistema dinámico lineal, que se describe por una ecuación diferencial lineal. Debido a la equivalencia de una ecuación diferencial lineal y una diferencia de ecuación lineal, este método toma la forma del conocido método de AR (autoregresión) que junto con la optimización del modelo basado en el principio de máxima verosimilitud ha dado lugar a un algoritmo de estimación espectral con más alta resolución y fiabilidad. Kumagai & Chouet (2000), estimaron experimentalmente el factor Q y la frecuencia adimensional $\nu = fL/\alpha$ los cuales se presentan en los gráficos de la figura 6, para calcular estos valores ellos consideraron diferentes fluidos y mezclas de estos con sólidos, mezclas de gases, líquidos y sólidos incluyendo mezclas de gas-gas (H_2O-CO_2), mezclas liquido-gas (Agua - H_2O , Basalto - H_2O)

y mezclas de gases con partículas en suspensión y gases con vapor de agua (ceniza - SO₂, gotas de agua - H₂O). Estos gráficos permiten, en un proceso de análisis inverso, estimar la composición del fluido o gas que permite la resonancia en la cavidad fuente.

DATOS Y PROCESAMIENTO

Los registros sísmicos utilizados corresponden desde marzo hasta mayo. Durante este periodo de análisis se tienen datos de 01 estación sísmica en tiempo real. Se realizó la clasificación de las señales sísmicas de la base de datos en el Observatorio Vulcanológico del INGEMMET, de las cuales se identificaron 26 sismos de tipo Tornillo, a los que se les aplicó el algoritmo de análisis **SOMPI** escrito en la plataforma MATLAB como **Qsomp** (Servicio Geológico Colombiano – Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Manizales). Este análisis permite obtener la serie de tiempo descompuesta en una combinación lineal de sinusoides con amplitudes que decaen con el tiempo (figura 7).

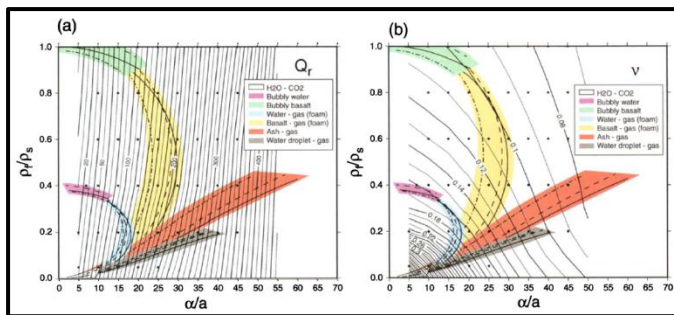


Figura 6: Gráfico de α/a versus ρ/ρ_s , con curvas de diferentes colores para varios tipos de fluidos y contornos de color amarillo para valores de Q y v . Las marcas de color blanco representan los puntos donde se calcularon los valores con eventos sintéticos (Kumagai & Chouet, 2000).

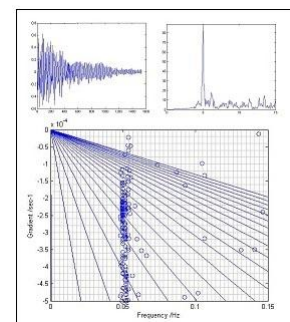


Figura 7: Tornillo registrado el día 17 de Abril del 2013 a las 21:23 horas UTC.

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La figura 8 muestra la variación temporal de Q y f , para el período Marzo – Mayo del 2013, durante la crisis sísmica del volcán Sabancaya. Se observa que el valor de Q sufre variaciones durante este periodo de análisis. Para lo cual se ha diferenciado 3 episodios de ocurrencia de sismos de tipo tornillo:

- **I Episodio**, correspondiente al mes de Marzo, se ha identificado 6 sismos de este tipo y según la Figura 8, los valores de Q oscilan entre 40 y 160, mientras que la frecuencia está alrededor de los 5 Hz, por lo tanto, según la figura 6, estos valores corresponderían a fluidos compuestos por agua y gases.
- **II Episodio**, que comprende al mes de Abril, se han identificado 17 sismos de tipo Tornillo. En la Figura 8, se observa mayor ocurrencia de este tipo de sismos, los cuales presentan dos frecuencias dominantes, la primera mantiene la misma fuente del episodio anterior, es decir, presenta una frecuencia alrededor de los 5 Hz, mientras que la segunda frecuencia dominante está alrededor de los 2 Hz, por lo tanto, se presume que podría tratarse de una nueva fuente que apareció en este episodio. En cuanto a los valores de Q , estos varían entre 30 y 130 que según los gráficos de la Figura 6, indicaría un incremento de vapor de agua y gas en la fuente resonante.

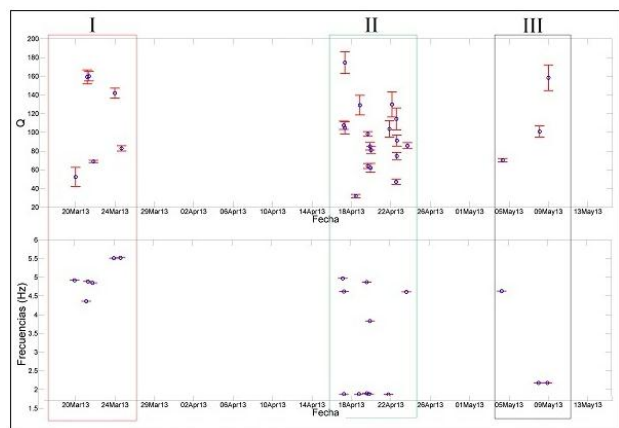


Figura 8: Análisis de la variación temporal de Q (adimensional) y F (Hz) para los sismos de tipo TORNILLO registrados entre marzo y mayo del 2014.

- **III Episodio**, que corresponde al mes de Mayo, en donde se han identificado 3 sismos de tipo Tornillo. Según la figura 8, la frecuencia dominante esta alrededor de los 2 Hz, mientras que el factor de calidad Q del resonador varía entre los 70 y 160. Cabe resaltar que, el número de eventos ha disminuido drásticamente con respecto al episodio anterior.

De acuerdo a lo descrito anteriormente. Podemos deducir que este periodo de ocurrencia de sismos de tipo tornillo corresponde a una actividad volcánica de tipo freática con presencia de gases de origen magmáticos.

CONCLUSIONES

Se ha identificado 3 episodios de ocurrencia de sismos de tipo tornillo, a los cuales se le aplicó un filtro auto-regresivo con el algoritmo **Sompi**, para determinar los valores del factor de calidad **Q** del sistema resonante y la frecuencia fundamental (**f**). Los resultados de este análisis nos indican que los fluidos que estarían generando este tipo de sismos (Tornillo) están compuestos por gas, vapor de agua y agua, por consiguiente, este periodo de análisis se caracterizó por presentar una actividad volcánica de tipo freática con presencia de gases magmáticos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALPALA, R., MAKARIO, J., TORRES, R. & CADENA, O. (2013) - Análisis de posibles fuentes generadoras de eventos sísmicos tipo “Tornillo” en el volcán Puracé, Colombia. Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Popayán, Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Manizales, Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Pasto. 22 p.
- TORRES, R.A., GOMEZ, D.M. & GOMEZ, M.L. (1996) - Unusual seismic signals associated with the activity at Galeras Volcano, Colombia, from July 1992 to September 1994. *Annali di Geofisica*, vol. 39, N. 2, March 1996, 299-310 p.
- SEIDL, D., HELLWEG, M., RADEMACHER, H., GOMEZ, D. & TORRES, R. (1999) - The anatomy of a tornillo: puzzles from three-component measurements at Galeras volcano (Colombia). *Annali di Geofisica*, vol. 42, N. 3, June 1999, 355-364 p.
- DELGADO, R. (2012) – Estudio Geológico, Petrográfico y Geoquímico del Complejo volcánico Ampato – Sabancaya. Tesis de Ingeniero. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Perú, 146 p.
- MERING, C., HUAMAN, R., CHOROWICZ, B. & GUILLANDE, R. (1996) - New data on the geodynamics of southern Perú from computerized analysis of SPOT and SAR ERS-1 images: *Tecthon*. 259, 153-169 p.
- BENAVENTE C., CARLOTTO, V. & CASTILLO, B. (2010) - Extensión en el Arco Volcánico actual del sur del Perú. Congreso Peruano de Geología, 15, Resúmenes. Lima: Sociedad Geológica del Perú, 5 p.
- BENAVENTE C., DELGADO, V. & AUDIN, L. (2012) - Estratigrafía de las cuencas lacustres Colca y Omate: Ejemplos de paleosismicidad y tectónica activa del arco volcánico cuaternario y actual de los andes centrales del sur del Perú, 16, Resúmenes. Lima: Sociedad Geológica del Perú, 5 p.
- SEBRIER M., MERCIER J., MEGARD F., LAUBACHER G. & CAREY-GAILHARDIS E. (1985) – Quaternary normal and reverse faulting and the state of stress in the Central Andes of Perú. *Tectonics*. 7, 895-928 p.
- HUAMAN, D., GUILLANDE, R., RODRIGUEZ, A., RIVERA, R. & ANTALLACA, A. (1991) - Teleanálisis geológico y sismicidad del sector comprendido entre el volcán Sabancaya y el poblado de Ichupampa: El Sistema de fallas Sepina. *Inf. Int. IGP.*, 8 p.
- AKI K., FEHLER M. & DAS S. (1977) - Source mechanism of volcanic tremor: fluid-driven crack models and their application to the 1963 Kilauea eruption. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2:259-287 p.
- CHOUET B.A. (1986) - Dynamics of a fluid-driven crack in three dimensions by the finite difference method, *J. Geophys. Res.*, 91, 13967-13992 p.
- CHOUET B.A. (1988) - Resonance of a fluid-driven crack: Radiation properties and implications for the source of long-period events and harmonic tremor, *J. Geophys. Res.*, 93, 4375-4400.
- CHOUET B.A. (1996) - Long-Period Volcano Seismicity: Its Source and Use in Eruption Forecasting. *Nature* 380, 309–316 p.
- KUMAGAI H. & CHOUET B. (1999) - The complex frequencies of long-period seismic events as probes of fluid composition beneath volcanoes, *Geophys. J. Int.*, 138, F7-F12
- KUMAGAI, H. & B. CHOUET (2000) - Acoustic properties of a crack containing magmatic or hydrothermal fluids, *J. Geophys. Res.* 105(B11), 25,493– 25,512 p.
- KUMAGAI, H. & B. CHOUET (2001) - The dependence of acoustic properties of a crack on the resonance mode and geometry, *Geophys. Res. Lett.* 28(17), 3325–3328 p.