

por ciclo debida al amortiguamiento viscoso Q_v en el fluido resonador, expresados mediante (Aki, 1984):

Pese a las dificultades de localización de los tornillos, el patrón de atenuación hace pensar en una fuente poco profunda para estos eventos. Asumiendo una fuente a 100 m de profundidad, se obtiene una fracción en volumen de gas de 0.01 para un módulo de bulk de $2.60 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ a 0.86 para un módulo de bulk de $4.00 \times 10^6 \text{ N/m}^2$. Esto implica que los eventos tornillo en el volcán Galeras pueden generarse en un conducto lleno con magma variablemente vesiculado. Un aumento de la fracción de gas en el fluido magmático podría explicar el fuerte aumento en el contraste de impedancia y el factor Q ; no obstante, varios factores podrían modificar los resultados anteriores. Primeramente, hay un grado de incertidumbre con respecto a la localización de la fuente de los tornillos; aunque la fuente parece ser poco profunda, necesariamente no está a 100 m de profundidad. Segundo, no consideramos otros mecanismos amortiguamiento para las pequeñas pérdidas de energía.

Lo anterior se muestra en la Fig.10 la cual resume el espectro de frecuencia, la duración, la constante de amortiguamiento, el factor de Calidad y la fracción de volumen de gas antes de la erupción del 23 de marzo de 1993 en Galeras. Notablemente, la fracción de volumen de gas calculada en el magma aumenta significativamente de un poco menos que 20% a más de 80% once días antes de la erupción.

6. Conclusiones

De una manera común, los volcanes considerados en este informe son de composición andesítica. Ellos están caracterizados por erupciones de tipo vulcaniano, grandes emisiones de gas, o ninguna manifestación de emisión sobresaliente. Otro aspecto común, es que estos volcanes han registrado tornillos en diferentes lapsos de tiempo, en algunos casos como precursores a corto plazo, después de erupciones, durante enjambres sísmicos y durante relativa quietud. Se considera que los sismos tornillos están relacionados con la actividad de fluidos.

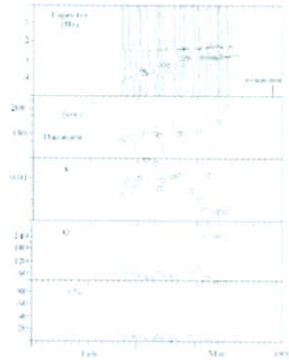


Fig.17. Resumen de características de tornillos antes de la erupción del 23 de marzo de 1993 en Galeras: (a) espectros mostrando las frecuencias dominantes, (b) duraciones de eventos individuales, (c) constantes de amortiguamiento para las ondas de coda, (d) factores de calidad de las ondas de coda, y (e) fracción de volumen de gas en el fluido. La tendencia en la disminución de frecuencia dominante, el aumento en las duraciones señaladas, y la disminución en las constantes de amortiguamiento, pueden ser explicados por un aumento de la fase de gas libre en el fluido justamente durante los días antes de la erupción. La erupción se señala por la flecha vertical.

Los siguientes puntos resumen las características para los eventos tornillos:

- Formas de onda cuasi-sinusoidales con un inicio impulsivo ligado al desarrollo de un trasiente de presión de corto tiempo de subida (short rise time) y un decaimiento exponencial relativamente lento de las amplitudes de la señal que se manifiesta en largas duraciones en comparación con las amplitudes. Estas señales muestran valores bajos de h entre 0.002 y 0.02 que se relacionan con Q grandes de 250-25.
- El contenido espectral de estas señales es cuasi-monocromático cuyo espectrograma muestra básicamente una banda de frecuencia constante en el tiempo. Generalmente el inicio de las señales tiene una banda espectral más ancha y rica en altas frecuencias. Las frecuencias dominantes indican un efecto de la fuente. Las frecuencias pico son, en la mayoría de los casos, muy diferentes entre volcanes.
- Se han podido establecer una serie de parámetros que permiten caracterizar, de alguna manera, los tornillos entre los que pueden mencionarse: acimut, ángulo de incidencia, rectilinalidad, amplitud espectral, frecuencias dominantes, factor de calidad; sin embargo no se tiene un modelo de fuente único que explique satisfactoriamente varias de ellos simultáneamente. Si bien la apariencia de forma de onda de los eventos tipo Tornillo de Galeras luce bastante simple, esta opinión se desvirtúa cuando por una parte, se analizan este tipo de señales en estaciones de banda ancha y de tres componentes y por otro

lado, cuando se quiere aplicar modelos que expliquen su posible génesis. Se ha observado que estas señales presentan su mayor nivel energético no en la componente vertical sino en las componentes horizontales del registro.

- La frecuencia dominante, la polarización y el factor de amortiguamiento son sumamente estables (Tabla VI). Estos resultados junto con el separación propuesta de un tornillo en dos partes distintas tal como una excitación inicial seguida por resonancia ligeramente amortiguada conduce a las siguientes conclusiones:
 - Los tornillos son generados por un proceso de excitación cuasi-impulsivo.
 - La frecuencia de este proceso es igual como la un resonador
 - La fuente y el resonador son muy estacionarios y se confinan a un volumen pequeño.
 - La polarización y los parámetros espectrales del resonador no cambian mensurablemente durante un tornillo.
- Varios modelos de resonadores de vibraciones libres de una cavidad llena de fluido han sido sugeridos para explicar la fuente de los tornillos: esferas, cilindros, tuberías y grietas. El campo de onda elástico por el que se maneja el fluido en la cavidad es función de la geometría de la misma, las propiedades físicas del fluido y el sólido, y las características espacio-temporales del mecanismo de disparo que excita la cavidad.
- El modelo Resonador de Helmholtz, permite explicar algunas de las características observadas como son principalmente las posibles dimensiones del resonador (en términos de dimensiones aceptables) y las frecuencias dominantes asociadas al resonador, pero es difícil explicar más parámetros con este modelo.
- En la investigación de tornillos, los registros digitales de los sismómetros de banda ancha de tres componentes tienen varias ventajas respecto de los registros de instrumentos verticales de corto periodo. Un ejemplo es que la polarización de las ondas sísmicas asociada con un tornillo puede ser medida precisamente como una función de tiempo. Además, registros digitales con alto rango dinámico y alta resolución permiten un análisis detallado de sus parámetros espectrales y amplitud.
- La correlación íntima observada entre los tornillos y las erupciones invitan el uso de este tipo de eventos sismovolcánicos como un parámetro para caracterizar el nivel de actividad volcánica. Es por consiguiente sumamente importante desarrollar métodos para parametrizar y clasificar tornillos. Un análisis detallado de la dependencia del tiempo de las variables de la ecuación $x(t) = A(t) \text{sen}[w(t)t + \varphi(t)]_n(t)$, produce por una parte, herramientas para tal esfuerzo y también pone los cimientos para el desarrollo de modelos físicos de procesos en el volcán que genera las señales tornillo.

Referencias

- Aki, K., 1984. Evidence for magma intrusion during the Mammoth Lakes earthquakes of May 1980 and implications of the absence of volcanic (harmonic) tremor. *Journal of Geophysical Research*, 89: 7689-7696.
- Aki, K., Fehler, M., and 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.
- Aki, K., Chouet, B., Fehler, M., Zandt, G., Koyanagi, R., Colt, J., and Hay, R.G., 1978. Seismic properties of a shallow magma reservoir in Kilauea Iki by active and passive experiments. *Journal of Geophysical Research*, 83: 2273-2282.
- Bullen, K.E., and Bolt, B., 1985. *An introduction to the theory of seismology*. Cambridge University Press, Great Britain, Fourth edition, pp. 206-207.
- Chouet, B., 1988. Resonance of a fluid-driven crack: radiation properties and implications for the source of long-period events and harmonic tremor. *Journal of Geophysical Research*, 93: 4375-4400.
- Chouet, B., 1992. A seismic model for the source of long-period events and harmonic tremor. In: P. Gasparini, R. Scarpa and K. Aki (Editors), *Volcanic Seismology*. Springer-Verlag, Berlin, pp. 133-156.
- Chouet, B., 1996. Long-period volcano seismicity: its source and use in eruption forecasting. *Nature*, 380: 309-316.
- Ferrick, M.G., Qamar, A., and Lawrence, W.F., 1982. Source mechanism of volcanic tremor. *Journal of Geophysical Research*, 87: 8675-8683.

- Gómez, M., D.M., 1994. Waveform analysis on a special kind of seismic signals: "Screw"-type events observed at Galeras Volcano, Colombia. Report of the individual studies of the group training course in volcanology and volcanic SABO engineering, JICA, Japan, March-September, 1994, 26 p.
- Gómez, M., D.M., and Torres, C., R.A., 1997. Unusual low-frequency volcanic seismic events with slowly decaying coda waves observed at Galeras and other volcanoes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol. 77, N. 1-4, May 1997, pp. 173-193
- Gómez, M., D.M., and Torres, C., R.A., Seidl, D., Hellweg, M., and Rademacher H., 1999. Tornillo seismic events at Galeras volcano, Colombia: a summary and new information from broadband three-component measurements. *Annali di Geofisica*, vol. 42, N. 3, June 1999, pp. 365-378.
- Hamada, N., Jingu, H., and Ikumoto, K., 1976. On the volcanic earthquakes with slowly decaying coda wave (in Japanese with summary, tables and captions in English). *Bulletin of the Volcanological Society of Japan*, 21: 167-183.
- Hellweg, M., 1999. Listening carefully: unique observations of harmonic tremor at Lascar volcano, Chile. *Annali di Geofisica*, vol. 42, N. 3, June 1999, pp. 451-464.
- Howe, M.S., 1975. On the Helmholtz resonator. *Journal of Sound Vibration*. Vol.45, N 3, 1976, pp 427-440.
- Kanasewich, E. R., 1981. *Time sequency analysis in Geophysics* (University of Alberta Press), pp. 328-360.
- Katsui, Y., Kawachi, S., Kondo, Y., Ikeda, Y., Nakagawa, M., Gotoh, Y., Yamagishi, H., Yamazaki, T., and Sumita, M., 1990. The 1988-1989 explosive eruptions of Tokachi-dake, central Hokkaido, its sequence and mode. *Bulletin of the Volcanological Society of Japan*, 35: 111-129.
- Latter, J. H., 1979. *Volcanological observations at Tongariro National Park, 2. Types and classification of volcanic earthquakes, 1976-1978.* Department of Scientific and Industrial Research, Geophysics Division, Wellington, New Zealand, 150, 60 p.
- Lawrence, W., and Qamar, A., 1979. Hydraulic transients: A seismic source in volcanoes and glaciers. *Science*, 203: 654-656.
- Leighton, T.G., *The acoustic bubble* (Academic Press, London) 172-173.
- Lesage, Ph., and Surono, 1995. Seismic precursors of the February 10, 1990 eruption of Kelut volcano, Java. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 65: 135-146.
- Minakami, T., 1974. *Seismology of volcanoes in Japan.* In: L. Civetta, P. Gasparini, G. Luongo and A. Rapolla (Editors), *Physical Volcanology*, Elsevier Scientific Publishing Company. The Netherlands, pp. 1-27.
- Nishimura, Y., and Yamashita, H., 1982. Earthquake swarm at Meakan volcano in March, 1982 (in Japanese with English abstract and captions). *Geophysical Bulletin of Hokkaido University*, Sapporo, Japan, 41: 65-76.
- Nishimura, Y., and Okada, H., 1994. Characteristics of earthquakes with slowly decaying coda wave observed at Tokachi volcano, Hokkaido, Japan. Abstract for the Western Pacific Geophysics Meeting, Hong Kong, American Geophysical Union, pp. 55.
- Sekiya, H., 1967. *Volcano observation (History of Asama and volcanoes in Japan)* (in Japanese). So-go Tosho Publication: 180 p.
- Seidl, D., Hellweg, M., Rademacher, H., Gómez, M., D.M., and Torres, C., R.A., 1999. The anatomy of a tornillo: puzzles from three-component measurements at Galeras volcano (Colombia). *Annali di Geofisica*, vol. 42, N. 3, June 1999, pp. 355-364.
- Torres, C., R.A., Gómez, M., D.M., and Narváez, M., 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, pp. 299-310.
- Usu Volcano Observatory, 1989. *Observational report on the volcanic activities in Hokkaido (May, 1988 - September, 1989)* (in Japanese with English captions). Report of coordination commission prediction volcanic eruptions, 45, 45 p.