

# ESTIMACIÓN DE CODA Qc EN EL VOLCÁN HUAYNAPUTINA (2010)

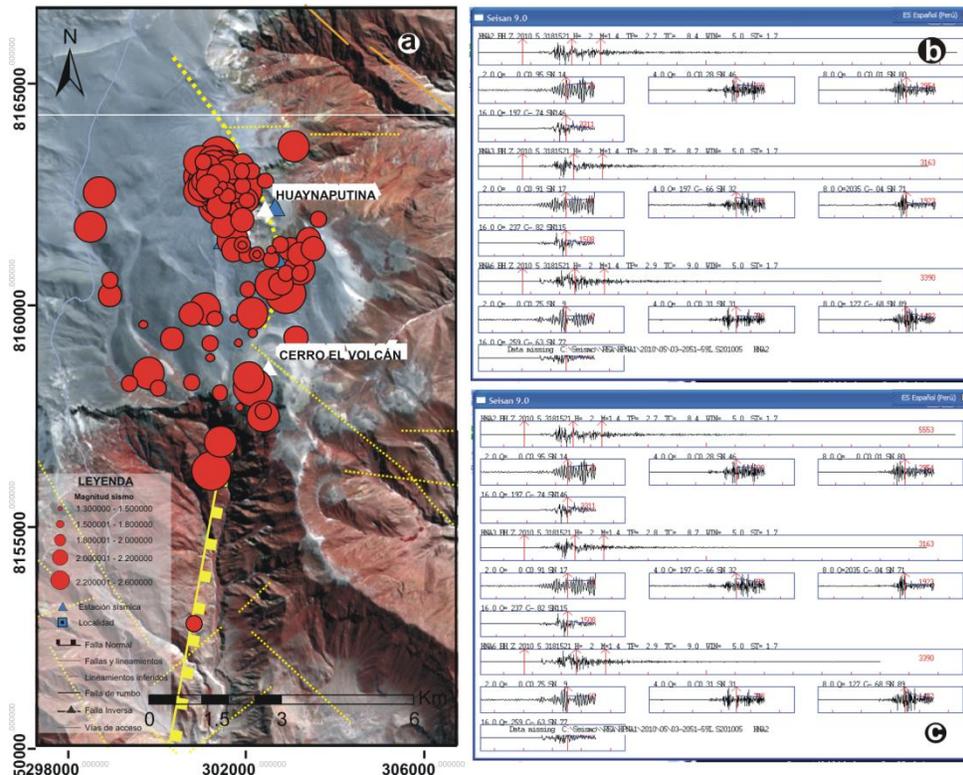
Yanet Antayhua & Domingo Ramos

Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET), Av. Canadá N° 1470, San Borja –Lima, yantayhua@ingemmet.gob.pe

## INTRODUCCIÓN

Aki (1969), a partir del análisis de las réplicas del sismo de Parkfield de 1966 (Estados Unidos), fue el primero en explicar la generación de las ondas de coda (Qc) correspondientes a sismos locales. Estas ondas de coda son ondas dispersadas en las numerosas heterogeneidades que existen en la corteza y manto superior. Estas ondas de coda corresponden a la parte final del sismograma, contienen información de la fuente sísmica, el camino de propagación y la respuesta local de la estructura geológica en la estación de registro. Uno de los métodos para inferir como se propaga la onda a través de los diferentes medios, es estimando el factor de calidad Qc o la atenuación de ondas de coda ( $Qc^{-1}$ ) y la ley de dependencia frecuencias  $Qc=Q_0f^n$  (Aki, 1969; Fehler et al., 1998; O'Doherty et al., 1997; Aki, 1980a). Estudios de Qc aplicados a volcanes activos fueron realizados por Fehler et al. (1988), Londoño (1995) y Londoño et al. (1998). Estos autores han mostrado ciertas correlaciones de Qc con la actividad volcánica. Londoño et al., (1998), observó las variaciones de Qc antes y después de las erupciones del Volcán Nevado El Ruiz (VNR, Colombia) del 13 de noviembre de 1985 y 1 de septiembre de 1989, y han sugerido que si se realiza un monitoreo continuo de las variaciones de estos valores de Qc podrían ser utilizados como premonitores de actividad volcánica.

En este trabajo, se hace las primeras estimaciones el factor de calidad Qc, de los 107 sismos localizados en la zona del volcán Huaynaputina entre el periodo 15 de mayo y 27 de octubre 2010 (Fig.1a) y correlacionarlos con la actividad volcánica y tectónica local.



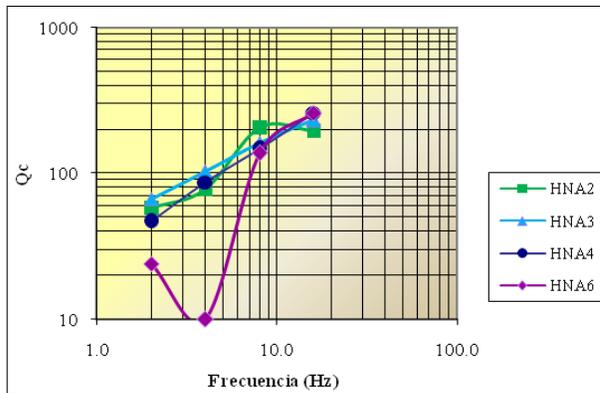
**Fig. 1.-** a) Distribución de los 107 sismos localizados en la zona del volcán Huaynaputina. b) y c) Ejemplos de sismos analizados con coda Q.

## DATOS

Los datos corresponden a los 107 sismos registrados y localizados entre el 15 de mayo y 27 de octubre de 2010 (Fig. 1a), por las estaciones temporales instaladas en la campaña sísmica del Huaynaputina. El programa utilizado es el denominado coda **Q** y forma parte del programa de localización Seisan (Ottmoller et al., 2010). Los datos de entrada son: registro de sismos en la componente vertical de cada una de las estaciones sísmicas, longitud de ventana de 5 s, velocidad de la onda S ( $V_s$ ) de 2.0 km/s, frecuencias de filtrado de 2, 4, 8 y 16 Hz y coeficiente de correlación mínima de 0.6 (Fig. 1b y c), además del modelo de modelo de retrodispersión simple propuesto por Aki y Chouet (1975), este modelo asume que la coda de los sismos locales son retrodispersadas en las numerosas heterogeneidades del medio y que la fuente-receptor se encuentran en el mismo punto y la radiación de las ondas es esférica.

## ESTIMACIÓN DE $Q_c$

Los resultados numéricos de  $Q_c$  promedio para cada una de las estaciones de la RSTH, filtradas a 4 frecuencias (2, 4, 8, 16 Hz) muestran que estos valores de  $Q_c$  varían entre 58.2 ( $f=2$  Hz) y 261 ( $f=16$  Hz). Los coeficientes de correlación son mayores a 0.6 ( $\text{corr} > 0.6$ ) y una raíz media cuadrática (rms) que varía entre 0.07 y 0.29. Al graficar estos valores de  $Q_c$  en función de la frecuencia ( $Q_c$  vs  $f$ ), en general, se observa que  $Q_c$  es directamente proporcional a  $f$  en las cuatro estaciones sísmicas analizadas (Fig. 2).



**Fig. 2.-** Distribución de los valores de  $Q_c$  estimados para cuatro estaciones sísmicas instaladas en el volcán Huaynaputina

## DEPENDENCIA FRECUENCIAL Y SU RELACIÓN CON LA GEOLOGÍA Y TECTÓNICA LOCAL

A partir del promedio de estos valores de  $Q_c$ , también se ha estimado la ley de dependencia frecuencia  $Q_c=Q_0f^\eta$  (Aki, 1980a), donde los valores de  $Q_0$  y  $\eta$  están relacionados a la geología y tectónica de la zona en estudio.

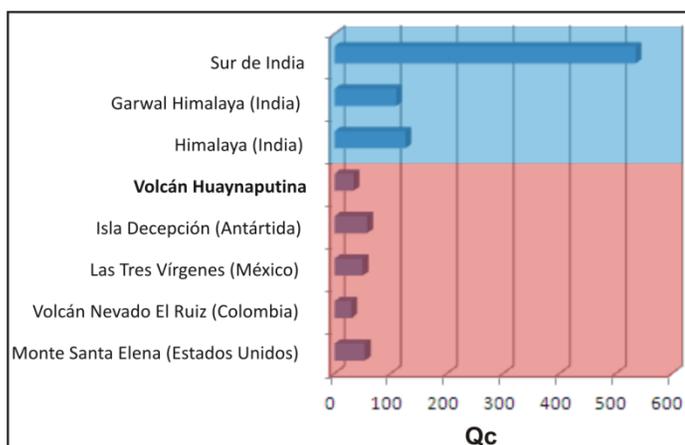
Así, en la zona del volcán Huaynaputina se ha estimado  $Q_c=34f^{0.72}$ . Estos valores bajos de  $Q_0=34$ , estaría correlacionado con la heterogeneidad y el alto valor del coeficiente  $\eta=0.72$  con la intensa actividad sísmica, tectónica y volcánica del Huaynaputina; asimismo, son concordantes con los obtenidos en otras zonas volcánicas (Tabla 1, Fig. 3), como el Monte Santa Elena en Estados Unidos (Havskov et al., 1989), El Ruiz en Colombia (Londoño, 1996), las Tres Vírgenes en México (Wong et al., 2001) y la Isla Decepción en la Antártica (Havskov et al., 2002). Si bien, los valores de  $\eta$  son variables entre las zonas volcánicas, éstas podrían deberse a que algunos como el volcán Huaynaputina, El Ruiz y Las Tres Vírgenes tendrían mayor actividad tectónica local (sismicidad, fallas activas, etc.). Si se compara los valores de  $Q_0$  obtenidos en zonas volcánicas con orógenos relativamente estables como los del Himalaya (Gupta et al., 1995; Paul et al., 2003; Kumar et al., 2007), se puede observar claramente altos valores de

$Q_0$  (>100), lo que significaría que la geología de estas zonas son menos heterogéneas y con relativa actividad tectónica (probablemente de algunas fallas y poca actividad sísmica).

**Tabla 1.-** Valores promedio de  $Q_0$  y  $\eta$  obtenidos para zonas volcánicas y zonas relativamente estables.  $Q_0$  es el valor de  $Q_c$  a la frecuencia de 1 Hz y  $\eta$  el coeficiente de anelasticidad.

		<b>Q0</b>	<b><math>\eta</math></b>	<b>Referencias</b>
<b>Zonas volcánicas</b>	Monte Santa Elena (Estados Unidos)	54	0.39	Havskov et al., 1989
	Volcán Nevado El Ruiz (Colombia)	30	1.03	Londoño, 1996
	Las Tres Vírgenes (México)	50	0.65	Wong et al., 2001
	Isla Decepción (Antártida)	58	0.4	Havskov et al., 2002
	Volcán Huaynaputina	34	0.72	Este estudio
<b>Zonas relativamente estables</b>	Himalaya (India)	126	0.95	Gupta et al., 1995
	Garwal Himalaya (India)	110	1.02	Paul et al., 2003
	Sur de India	535	0.59	Kumar et al., 2007

**Fig. 2.-** Comparación de los valores promedio de  $Q_c$  obtenidos en el volcán Huaynaputina, con otros valores obtenidos en zonas volcánicas y zonas relativamente estables (según Tabla 2).



## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los valores estimados de los factores de calidad  $Q_c$  promedios entre 49 y 237.8 para frecuencias de 2 y 16 Hz, muestran que el aumento de  $Q_c$  es directamente proporcional al aumento de  $f$ . La ley de dependencia frecuencial de la forma  $Q_c=34f^{0.72}$ , estimada en la zona del volcán Huaynaputina muestra un valor bajo para  $Q_0$  y alto para el coeficiente  $\eta$ , este valor bajo de  $Q_0=34$ , estaría correlacionado con la heterogeneidad del medio y el alto valor  $\eta=0.72$  con la intensa actividad sísmica, tectónica y volcánica del Huaynaputina. Similares resultados fueron estimados en otras zonas volcánicas activas. Para identificar cambios en los valores de  $Q_c$  es necesario contar con estaciones sísmicas en el volcán Huaynaputina.

## REFERENCIAS

Aki, K. (1969).- Analysis of the seismic coda of local earthquakes as scatter waves. Geophysics Research Letters. Vol. 74. pp. 615-631.

- Aki, K., and Chouet, B. (1975).- Origin of coda waves: source, attenuation and scattering effects. *Journal Geophysics Research*. Vol. 80. pp. 3322-3342.
- Aki, K. (1980a).- Attenuation of shear in the lithosphere for frequency from 0.05 a 25 Hz *Physics Earth Planet Interior*. Vol. 21. pp. 50-60.
- Bollinger, A. (1979).- Attenuation of the Lg phase and the determination of mb in the Southern United States. *Bulletin of the Seismological Society of America*. Vol. 69. pp. 45-63.
- Chouet, B. (1976).- Source scattering and attenuation effects on high frequency seismic waves. Ph. D. thesis. Mass. Inst. of Technology, Cambridge.
- Fehler, M., Hoshiya, M., Sato, H., and Obara, K. (1992).- Separation of scattering and intrinsic attenuation for the Kanto-Tokai region, Japan using measurements of S-wave energy versus hypocentral distance. *Geophysics J. Int.* Vol. 108. pp. 787-800.
- Gupta, K. (2002).- A review of recent studies of triggered earthquakes by artificial water reservoirs with special emphasis on earthquakes in Koyna, India. *ELSEVIER. Earth-Science Reviews*. Vol. 58. pp.279-310.
- Havskov, J., Malone S., McClurg, D., and Crosson, R. (1989).- Coda Q for the state of Washington, *Bulletin of the Seismological Society of America*. Vol. 79. pp. 1024-1038.
- Havskov, J., Peña, J., Ibañez, J., Ottemoller, M., Martínez-Arévalo, L. (2003).- Magnitude scales for very local earthquakes: Application for Deception Island volcano (Antarctica). *J. Volcanol. Geotherm. Res.* (this issue). doi:10.1016/S0377-0273(03)00250-6
- Londoño, M. (1996).- Temporal change in coda Q at Nevado El Ruiz Volcano, Colombia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 73 ( 1996) I 29- I 39.
- Londoño, M., Sanchez, J., Toro, E., Gil-Cruz, F., Bohorquez, O. (1998). Coda Q before and after the eruptions of 13 November 1985, and 1 September 1989, at Nevado del Ruiz Volcano, Colombia. *Bull Volcanol* (1998) 59 :556–561
- O’Doherty, K.B., and Bean, C.J. (1997).- Coda wave imaging of the Long Valley caldera using a spatial stacking technique. *Geophysics Research Letters*., Vol. 13. pp 1547-1550.
- Ottemoller, L., Voss, P. and Havskov, J. (2010).- SEISAN. Earthquake Analysis Software for Windows, Solaris, Linux and MacOSx. Versión 8.3. Departamento Earth Science. University of Bergen, Bergen, Norway. 348 p.
- Paul, A., Gupta S., and Pant C. (2003).- Coda Q estimates for Kamaun Himalaya. *Earth Planet*. Vol. 112, N° 4, pp. 569-576.
- Wong, V., Rebollar, C.J., and Munguía, L. (2001).- Attenuation of Coda Waves at the Tres Vírgenes Volcanic Area, Baja California Sur, México. *Bulletin of the Seismological Society of America*. Vol. 91. N° 4. pp. 683-693