

# DETERMINACIÓN Y ANÁLISIS DEL FACTOR DE CALIDAD DE LAS ONDAS CODA ( $Q_c$ ) EN EL BORDE SUROCCIDENTAL DEL PERÚ

Lizbeth Velarde y Hernando Tavera

Subdirección de Ciencias de la Tierra Solida (SCTS) - Instituto Geofísico del Perú (IGP)  
[lvelarde@igp.gob.pe](mailto:lvelarde@igp.gob.pe); [hernando.tavera@igp.gob.pe](mailto:hernando.tavera@igp.gob.pe)

## RESUMEN

Se determina el factor de calidad de las ondas coda ( $Q_c$ ) para el borde suroccidental del Perú a partir del modelo propuesto por Aki y Chouet (1975). Se analiza las ondas coda de 64 sismos locales registrados por estaciones de la Red Sísmica Nacional a cargo del Instituto Geofísico del Perú. El análisis se realizó a frecuencias centrales de 1.5 Hz, 3 Hz, 4 Hz, 5 Hz, 6 Hz y 7 Hz.

Los resultados muestran que existe una alta dependencia frecuencial  $Q_c = 238.2f^{(0.68)}$ , asociada a la alta actividad sísmica presente en la región Sur del Perú, la presencia del arco volcánico y la Cordillera Andina, estos últimos se comportan como unidades que atenúan a las ondas sísmicas.

Perfiles realizados en el mapa de isovalores de  $Q_c$  para 4 Hz, indican que la atenuación es mayor entre la fosa y el arco volcánico, sugiriendo estar asociada a la acumulación de magma y a las altas temperaturas que absorben la energía de las ondas sísmicas.

## 1. INTRODUCCIÓN

El análisis del comportamiento de las ondas sísmicas en el medio en el cual se propagan, permite identificar las pérdidas de energía por efecto de la atenuación a lo largo de su trayectoria, desde el epicentro hasta la estación de registro. Esta atenuación está relacionada con los parámetros tectónicos y geodinámicos de una región, y se observa como una disminución en la amplitud de las ondas sísmicas en un registro sísmico.

Una forma de determinar la atenuación es mediante el factor de calidad  $Q$  de las ondas sísmicas, ya que ambas varían de forma inversa. Aki (1969) indica que el factor de calidad  $Q$  puede ser determinado mediante el análisis de las ondas coda, las cuales corresponden a la parte final de un sismograma y resultan del choque de las ondas sísmicas con las heterogeneidades del medio por el cual se desplazan. En este sentido,  $Q_c$  define al factor de calidad de las ondas coda. Así mismo se puede determinar si este fenómeno de atenuación varía o no en función de la frecuencia mediante el análisis de  $Q_0$ , definido como la dependencia frecuencial de  $Q_c$ .

## 2. GEODINÁMICA Y SISMICIDAD

La subducción de la placa de Nazca bajo la Sudamericana, es el principal proceso tectónico que define la geodinámica de Perú, dando lugar a la formación de diversas estructuras que conforman los más importantes rasgos tectónicos del país. En la zona sur del Perú, están presentes, la fosa Perú- Chile, la dorsal de Nazca, la Cordillera Andina con su topografía muy accidentada, la Cadena Volcánica y los principales sistema de Fallas, que se encuentran mayormente en la zona costanera (Figura 1).

Este mismo proceso de subducción, da origen al alto índice de sismicidad observada en el borde occidental del territorio peruano con sismos que se presentan con relativa frecuencia y variada magnitud y a diferentes profundidades. Los eventos superficiales (<65 km) presentan su epicentro entre la fosa y la línea de costa, los intermedios (65 km – 300 km) en el interior del continente y los sismos profundos (> 300 km) en las fronteras de Perú con Brasil y Bolivia (Barazangi y Isacks, 1976; Tavera y Buform, 1998)

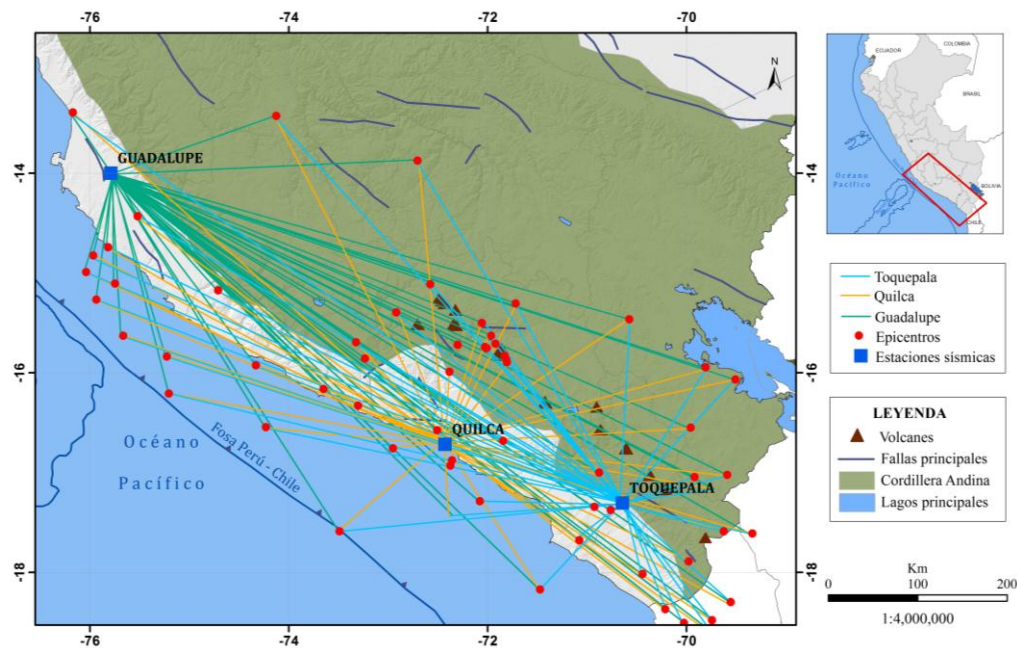


Figura 1. Principales rasgos tectónicos en el Sur del Perú. Los triángulos indican la cadena volcánica y las líneas azules, los principales sistemas de fallas (Sebrier et al, 1985). También se muestra las estaciones sísmicas y la distribución de los sismos usados en este estudio (Las líneas de colores indican el análisis que se hizo para cada estación sísmica).

### 3. METODOLOGÍA

El factor  $Q_c$  es un parámetro adimensional, positivo y dependiente de la frecuencia, y se puede estimar usando el modelo de dispersión simple propuesto por Aki y Chouet (1975). Este método se basa en el análisis del sismograma del sismo a diferentes bandas de frecuencia.  $Q_c$  es un parámetro inverso de la atenuación ( $Q_c^{-1}$ , factor de atenuación), y resulta de la suma de las contribuciones de la absorción anelástica ( $Q_i^{-1}$ ) y la atenuación dispersiva ( $Q_s^{-1}$ ) (Dainty, 1981):

$$\frac{1}{Q_c} = \frac{1}{Q_i} + \frac{1}{Q_s} \quad (1)$$

$Q_c$  tiene una característica muy importante que es su dependencia con la frecuencia o Ley de dependencia frecuencial:

$$Q_c = Q_0 f^n \quad (2)$$

Donde  $Q_0$  es el valor del factor  $Q_c$  evaluado a la frecuencia de  $f = 1\text{Hz}$ , y  $n$  es el exponente que define la dependencia con  $f$ . Esta expresión es válida para  $f > 1\text{ Hz}$ , ya que para frecuencias menores se ha encontrado valores del factor  $Q_c$  casi constantes (Sato y Fehler, 1998).  $Q_0$  varía de forma inversa con  $n$ , y depende fuertemente del régimen tectónico de cada área. Para regiones de baja actividad sísmica, corteza gruesa y estable se tiene valores de  $Q_0$  altos y  $n$  bajos que sugieren baja atenuación. Inversamente para regiones de alta actividad sísmica los valores de  $Q_0$  son bajos y  $n$  se hace alta, indicando una mayor atenuación.

### 4. DATOS Y PROCESAMIENTO

Para el estudio se utilizó información adquirida de la base de datos de la Red Sísmica Nacional, a cargo de la Subdirección de Ciencias de la Tierra Sólida del Instituto Geofísico del Perú. La información corresponde a 64 eventos seleccionados de 300 registrados durante el año 2013 en la

región sur del Perú, por las estaciones: Guadalupe (GUA), Quilca (QUI) y Toquepala (TOQ) (Figura 1).

Considerando que  $Q_c$  varía en función de su frecuencia, las señales fueron analizadas a frecuencias centrales de 1.5 Hz a 7 Hz para cada estación sísmica, encontrando los valores más bajos de  $Q_c$  a 1.5 Hz y los más altos a 7 Hz lo cual determina que  $Q_c$  varía de forma directa con la frecuencia. Los valores altos de  $Q_c$ , reflejan pequeñas pérdidas de energía que pueden traducirse como una baja atenuación de las ondas en el medio. Por otro lado a medida que  $Q_c$  se hace menor se produce una pérdida importante de energía; es decir, alta atenuación. El análisis de la dependencia frecuencial  $Q_c = (238.28)f^{(0.68)}$  sugiere una alta dependencia de  $Q_c$  con la frecuencia.

En otras regiones del mundo donde se tiene la presencia de volcanes (Complejo Volcánico del Ruiz, Monte Vesubio, Monte Merapi y Monte Etna), el análisis de las ondas coda a una frecuencia central de 4 Hz permitió caracterizar las propiedades físicas de estas unidades volcánicas. En este estudio se toma en cuenta este parámetro y se realiza un mapa de isovalores de  $Q_c$  a la misma frecuencia.

## 5. RESULTADOS

El mapa de isovalores a 4 Hz (Figura 2), muestra una franja de alta atenuación entre la fosa y el arco volcánico y que puede deberse a la fragilidad cortical que presenta esta zona debido a la deformación de la cordillera Andina y a la presencia del arco volcánico. Los perfiles realizados (Figura 3), muestran la variación existente entre la zona volcánica y no volcánica. Los perfiles B, C y D trazados sobre la zona volcánica presentan la misma forma y valores bajos de  $Q_c$  (menores de 600); es decir, la alta atenuación está presente a lo largo de la costa y hacia el interior del continente paralelo a la zona volcánica. Este comportamiento puede deberse a la presencia de fluidos como el magma, agua y gases, que sumados a la alta heterogeneidad y fracturación de la corteza, afectan a la energía de las ondas sísmicas llegando a modificar notoriamente la señal sísmica. En su trayectoria, la amplitud de las ondas es atenuada por la absorción del medio y por la dispersión en las heterogeneidades encontradas. El perfil A corresponde a la zona sin presencia de volcanes, los valores de  $Q_c$  son mayores a 600, y definen zonas de menor atenuación.

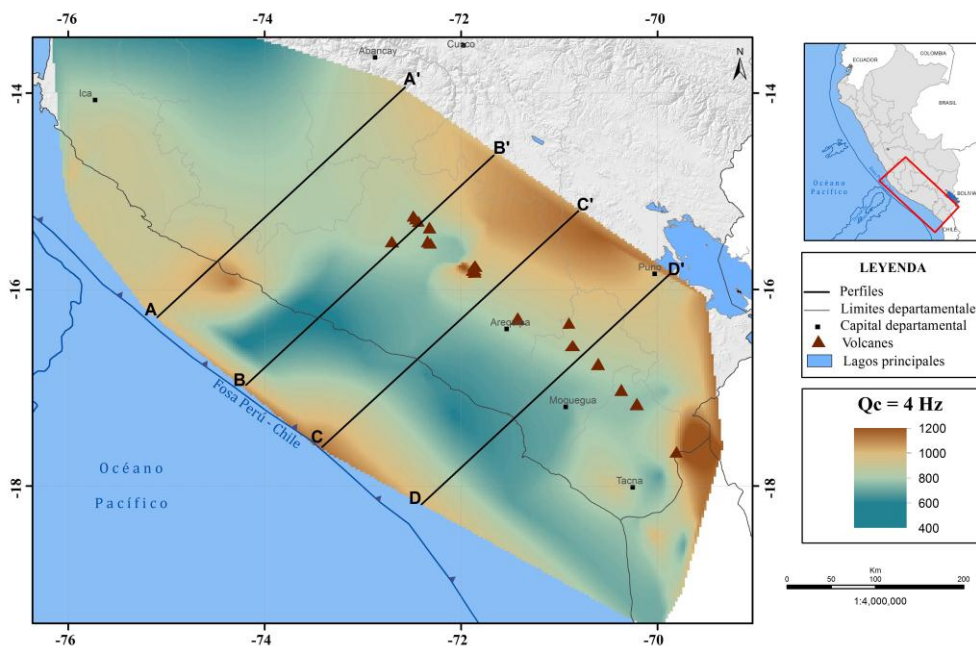


Figura 2. Mapa de isovalores de  $Q_c$  para la frecuencia central de 4 Hz, las líneas negras indican los perfiles.

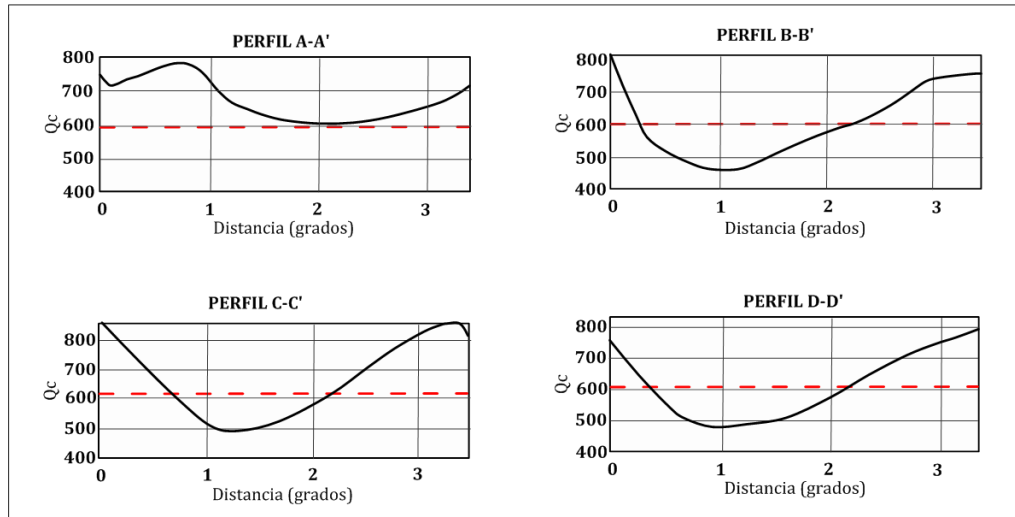


Figura 3. Perfiles de  $Q_c$  para frecuencia central de 4Hz.

## CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en este estudio permiten concluir que la determinación del factor  $Q_c$  es eficiente para conocer de manera cuantitativa la atenuación que sufren las ondas sísmicas en su trayectoria desde la fuente hasta una estación de registro. Para la zona Suroccidental del Perú existe una alta dependencia de  $Q_c$  con la frecuencia, lo que indica un alto grado de heterogeneidad debido a la presencia de fallas geológicas, zonas de fracturación, agrietamientos y zonas de alta temperatura en profundidad. El mapa de isovalores de  $Q_c$  junto a sus perfiles, permiten determinar que la atenuación se hace más intensa entre la línea de costa y el arco volcánico. La presencia de zonas de alta temperatura y fluidos magmáticos atenúan la ondas sísmicas en su recorrido. La variación del factor  $Q_c$  permitió distinguir que la zona suroccidental del Perú, presenta alta atenuación sísmica, condicionada por sus características sismotectónicas.

## REFERENCIAS

- Aki, K. (1969). Analysis of the seismic coda of local earthquakes as scattered waves. *J. Geophys. Res.*, 74, 615-631.
- Aki, K. y Chouet, B. (1975). Origin of Coda Waves: Source, attenuation and scattering effects. *J. Geophys. Res.*, 80, 3322-3342.
- Barazangi, M. y Isacks, B. (1979). Subduction of the Nazca plate beneath Perú: evidence from the spatial distribution of earthquakes: *Geoph. Jour. Roy. Astr. Soc.*, v. 57, 537- 555.
- Dainty, A. M., (1981). A scattering model to explain seismic Q observations in the lithosphere between 1 and 30 Hz. *Geophys. Res. Lett.*, 8, 1126-1128.
- Novelo – Casanova y A. Martínez-Bringas (2005). A seismic attenuation zone below Popocatepetl volcano
- Sebrier, M., Mercier, F. Megard, G. Laubacher, and E. Garey Gailhardies (1985). Quaternary normal and reverse faulting and the state of stress in the central Andes of south Peru, *Tectonics*, 4,87-105.
- Sato, H y Fehler, M. (1998). *Seismic Wave Propagation in the Heterogeneous Earth*. Springer.
- Tavera, H. y Buforn, E. (1998). Sismicidad y sismotectónica de Perú. *Física de la Tierra*, 187-219.