

ESTIMACIÓN DEL PARÁMETRO KAPPA PARA ALGUNAS ESTACIONES ACELEROGRÁFICAS DE COSTA RICA

César Aarón Moya Fernández

Resumen

La atenuación de ondas sísmicas en la alta frecuencia fue analizada mediante la determinación del parámetro *Kappa* para estaciones del Laboratorio de Ingeniería Sísmica (LIS) de la Universidad de Costa Rica. Los espectros de aceleración se graficaron en una escala semilogarítmica. Luego se calculó la recta de mejor ajuste usando mínimos cuadrados en el rango de 5 Hz a 20 Hz. Los valores de la pendiente se graficaron en función de la distancia hipocentral y se calculó el valor de la intersección con el eje vertical, conocido como efecto de sitio *Kappa*, κ_0 . Además de esto, se observó que también existe una clara dependencia de *Kappa* en función de la distancia para varias de las estaciones.

Palabras clave: efectos de sitio, parámetro *Kappa*, atenuación sísmica, amplificación sísmica.

Abstract

Attenuation in the high-frequency range was analyzed by determining the attenuation parameter *Kappa* for several stations belonging to the Earthquake Engineering Laboratory (LIS) of the University of Costa Rica. Acceleration spectra were plotted on a semi-log scale from which a straight line fitting in the range from 5 Hz to 20 Hz was calculated. The values obtained were then plotted as a function of hypocentral distance and the intercept with the vertical axis was taken as corresponding to *Kappa* site effect, κ_0 . In addition to that, a strong distance dependence of *Kappa* was also observed at several stations.

Keywords: side effects, *Kappa* parameter, seismic attenuation, seismic amplification.

Recibido: 26 de mayo del 2009 • **Aprobado:** 06 de agosto del 2009.

1. INTRODUCCIÓN

Observaciones de estudios empíricos que se han realizado a través de los años en Japón y en Estados Unidos han llevado a la conclusión de que el movimiento del suelo se ve fuertemente influenciado por los efectos de sitio en el rango de 0,1 Hz a 10 Hz. Aki e Irikura (1991) resumieron una serie de observaciones en las siguientes líneas:

- a. el factor de amplificación del espectro de respuesta se ve afectado por el contenido frecuencial del movimiento del suelo,
- b. los sitios de suelo blando muestran mayor amplificación, del orden de 2 a 3, que los sitios sobre roca, bajo los 5 Hz, mientras que esta

misma relación se invierte para frecuencias por sobre los 5 Hz,

- c. esta dependencia de la frecuencia se ve reflejada en los valores pico del movimiento: aceleración y velocidad máximas. Los valores máximos del desplazamiento y la velocidad muestran mayor amplificación para suelos blandos que para roca, mientras que el valor máximo de la aceleración es aproximadamente independiente del tipo de suelo.

Para distancias epicentrales superiores a los 50 km, los valores máximos de la aceleración se ven fuertemente influenciados por las condiciones locales de la geología superficial siendo bajos en los sitios de roca, intermedios en sitios de aluvión y altos en rellenos artificiales y suelos muy blandos.

Anderson y Hough (1984) propusieron un método diferente de estudiar los efectos de sitio al introducir un nuevo parámetro que llamaron *Kappa*, κ . Ellos sugirieron que la forma del espectro de aceleración, $A(f)$ arriba de una frecuencia dada, f_e , podía ser expresado por un decaimiento exponencial mediante la ecuación (1).

$$A(f) \propto A_0 e^{-\pi \kappa f} \quad \forall f > f_e \quad (1)$$

En donde f_e es el punto a partir del cual la forma asintótica se alcanza y κ es el factor de decaimiento exponencial tal y como se muestra en la Figura 1 κ estaría controlado por dos factores: el efecto de sitio y la distancia hipocentral mediante la ecuación (2).

$$\kappa = \kappa_0 + \kappa_r \quad (2)$$

Donde:

κ_r depende de la distancia hipocentral mientras que κ_0 es debido a la atenuación de

estratos meteorizados cerca de la superficie y por tanto del efecto de sitio.

En este estudio se utilizan los registros de varias estaciones del Laboratorio de Ingeniería Sísmica (LIS) para calcular el valor de κ_0 y asociarlo con la geología local, teniendo como objetivo final usar estas estimaciones para llevar a cabo simulaciones de escenarios de diferentes terremotos usando métodos estocásticos como los propuestos por Boore (2005) y por Atkinson y Motazedian (2005).

Cuanto mayor es el decaimiento de la pendiente en la alta frecuencia, mayor es la atenuación en el sitio. Los sitios de afloramiento de roca experimentan valores pequeños mientras que los de sedimentos de gran espesor, valores grandes. La determinación de la alta frecuencia mediante un ajuste semilogarítmico además de ser un parámetro del efecto de sitio, también sirve para realizar simulaciones numéricas que tomen en cuenta el grado de atenuación de cada uno de los sitios en estudio.

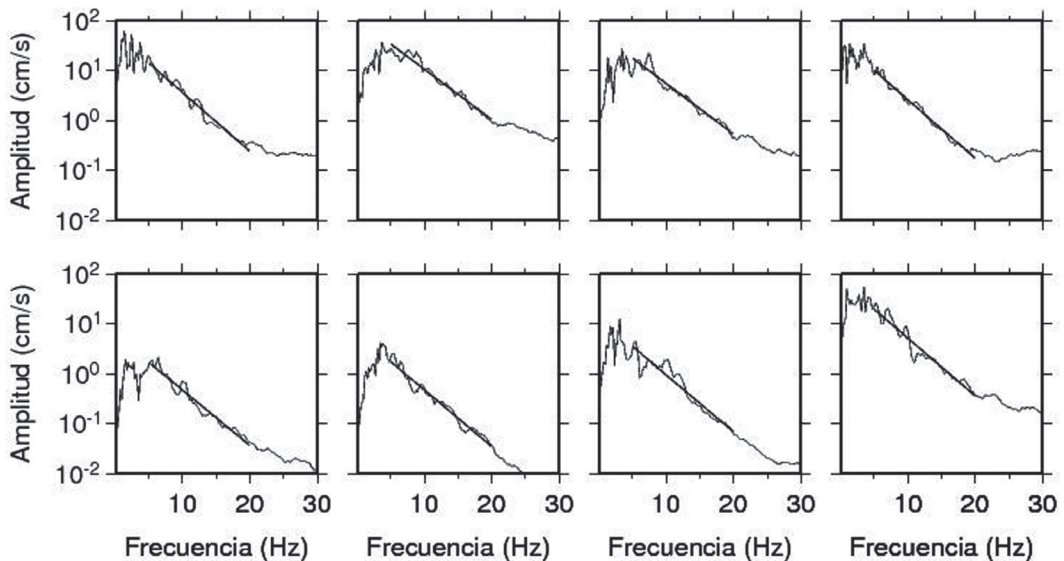


Figura 1. Diagrama explicativo del decaimiento de la alta frecuencia en escala semilogarítmica. La recta de mejor ajuste entre los 5 Hz y 20 Hz es proporcional al factor de la exponencial $-\pi \kappa f$, donde κ es el parámetro *Kappa*.

2. METODOLOGÍA

El Laboratorio de Ingeniería Sísmica (LIS) ha operado una red de acelerógrafos desde hace más de dos décadas. A lo largo de todo este tiempo se ha logrado acumular una cantidad importante de información acelerográfica de terremotos cercanos y lejanos, destructivos y no destructivos. Por ejemplo, muchos de los eventos fuertes ocurridos en la década los noventa fueron registrados en sitios ubicados en el centro de ciudades como es el caso de la estación CCTG en el Parque Central de Cartago. La información recopilada en esos sitios puede ser utilizada para estudiar la alta frecuencia y caracterizar mejor el sitio no solamente con base en la amplitud de la señal sísmica como se ha

hecho en otros estudios (Schmidt et al., 2003; Moya, 2009) sino también con base en el grado de atenuación que estos presentan.

Las estaciones del LIS utilizadas en este estudio se muestran en la Figura 2. En la misma figura se puede ver la distribución de los epicentros de los sismos en función de la magnitud de estos. La mayoría de los eventos tienen $M_w > 4$, pero un número importante de más de treinta y cinco eventos tienen $M_w < 4$. La selección de cuáles estaciones utilizar se basó primero en el número de eventos registrados y luego en la calidad de los registros. Específicamente se tomaron aquellos registros que mostraran claramente el arribo de las ondas cortantes (S). El total de registros utilizados por cada estación se muestra en el Cuadro 1 así como el tipo de geología superficial en cada sitio.

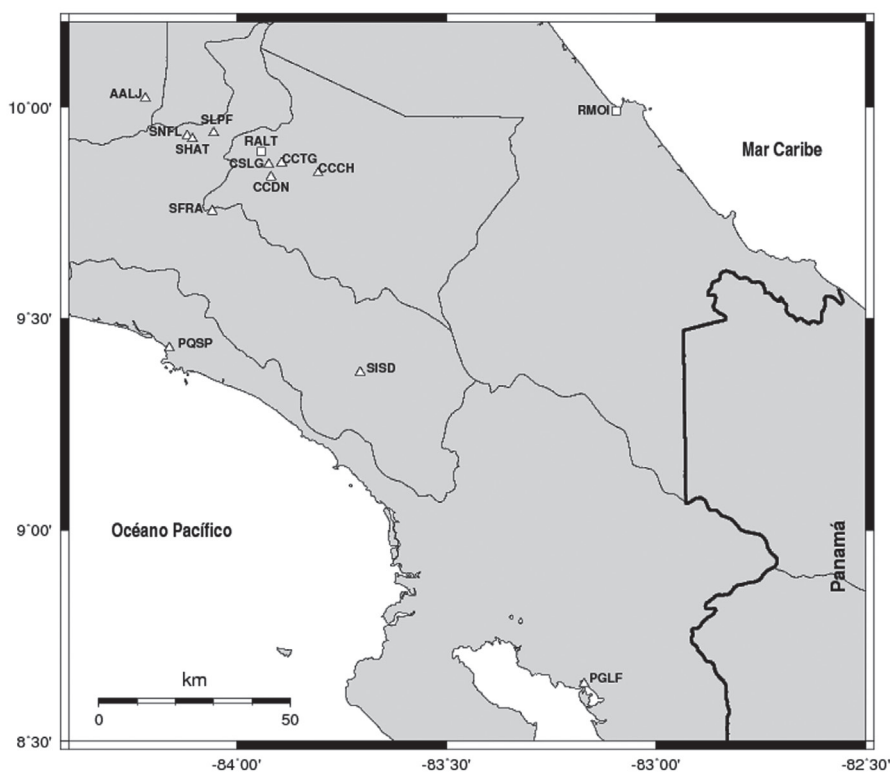


Figura 2. Ubicación de los epicentros de los sismos usados en este estudio (Figura 1) y de las estaciones del Laboratorio de Ingeniería Sísmica (figura inferior). Las trazas en gris corresponden a las principales carreteras nacionales.

Fuente: (El autor).

Cuadro 1. Número de registros utilizados en la determinación del valor de *K_{appa}* por cada estación.

Estación	Número de eventos	Ubicación	Geología superficial
AALJ	8	Antiguo CIPET, contiguo al Parque Central, Alajuela	Lahares (brechas, arenas y arcillas)
CCCH	7	Represa de Cachi, Orosi	Lavas
CCDN	17	Ciudad de los Niños, al sur de la ciudad de Cartago	Rocas calizas, areniscas y lutitas de origen aluvial y coluvial
CCTG	11	Parque Central de la ciudad de Cartago	Lahares (brechas, arenas y arcillas)
CSLG	15	Taller del Colegio San Luis Gonzaga, Cartago.	Lahares (brechas, arenas y arcillas)
PGLF	20	Clínica de Golfito, Puntarenas	Brechas basálticas con sedimentos pelágicos incluidos
PQSP	26	Cuerpo de Bomberos de Quepos, Puntarenas	Basaltos y aglomerados de basaltos
RALT	11	Recope El Alto, en Ochomogo	Andesitas, dacitas y tobas
RMOI	9	Recope Moín, Limón	Areniscas, conglomerados y arrecifes coralinos
SFRA	61	Escuela pública en Frailles, San José	Andesitas y flujos piroclásticos
SHAT	10	Biblioteca Brenes Mesén, Hatillo, San José	No disponible
SISD	6	INS en San Isidro de El General, San José	Lutitas, areniscas y conglomerados
SLPF	20	Campus UCR, San Pedro	Lahares (brechas, arenas y arcillas)
SNFL	21	Compañía Nacional de Fuerza y Luz (CNFL)	Lavas

Fuente: (El autor).

Cada registro fue graficado para seleccionar el tiempo de arribo de la onda S. A partir de ese instante, se tomó una ventana de tiempo de 4 s, se aplicó un *taper* de coseno y se calculó el espectro de amplitud de Fourier de las componentes horizontales (NS y EW). Se aplicó un suavizado logarítmico de un 20 %. Finalmente, se tomó la suma vectorial de ambas componentes, $O(f)$, dada por la ecuación (3).

$$O(f) = \sqrt{NS(f)^2 + EW(f)^2} \tag{3}$$

El espectro de aceleración de cada evento se graficó en escala logarítmica en el eje vertical (la amplitud) mientras que en lineal en el eje

horizontal (la frecuencia). Luego se obtuvo una recta de mejor ajuste, usando mínimos cuadrados, entre las frecuencias 5 Hz a 20 Hz, en los casos en que se podía observar un decaimiento relativamente suave, es decir, sin interferencias fuertes de efectos de sitio. La Figura 3 muestra un ejemplo de los ajustes realizados en ocho de los espectros de la estación AALJ.

Kappa posee un componente que no solamente depende del efecto de sitio sino también del medio de propagación. Esto se representa mediante la ecuación (2). La forma de obtener el término κ_0 es graficando cada valor individual de κ obtenido para cada sismo en función de la distancia. El valor de la intercepción con el eje vertical corresponde al valor de κ debido al efecto de sitio o κ_0 .

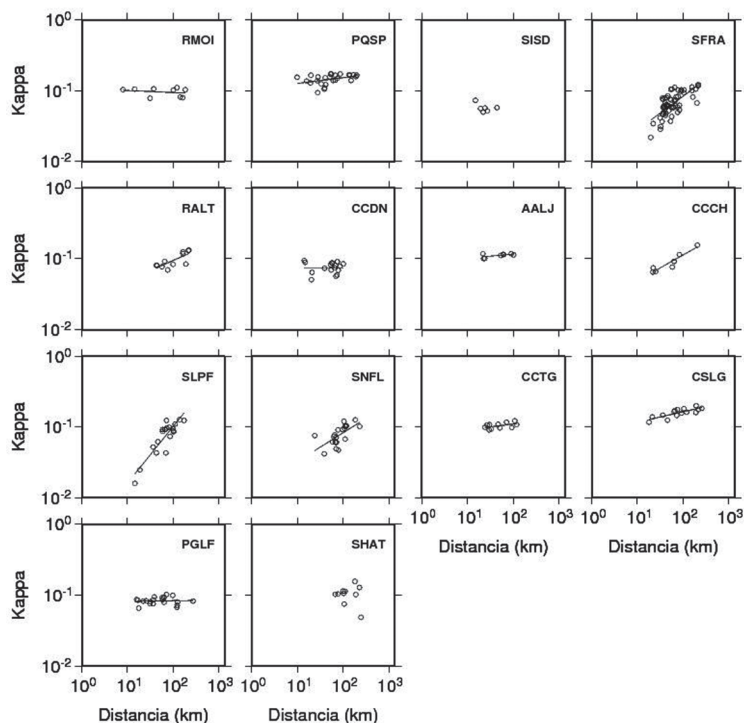


Figura 3. Ejemplo del cálculo de una línea de mejor ajuste a los espectros de aceleración en escala semilogarítmica en la estación AALJ.

Fuente: (El autor).

Cuadro 2. Cálculo del factor κ_0 obtenido del ajuste de la Figura 3.

Estación	Pendiente	κ_0 (s)
AALJ	$1,2 \cdot 10^{-4}$	0,100
CCCH	$4,9 \cdot 10^{-4}$	0,058
CCDN	$1,2 \cdot 10^{-5}$	0,075
CCTG	$1,4 \cdot 10^{-4}$	0,096
CSLG	$2,1 \cdot 10^{-4}$	0,13
PGLF	$2,6 \cdot 10^{-4}$	0,074
PQSP	$1,6 \cdot 10^{-4}$	0,130
RALT	$2,8 \cdot 10^{-4}$	0,064
RMOI*	--	--
SFRA	$3,4 \cdot 10^{-4}$	0,046
SHAT*	--	--
SISD*	--	--
SLPF	$6,6 \cdot 10^{-4}$	0,032
SNFL	$3,5 \cdot 10^{-4}$	0,048

*No se pudo calcular.

Fuente: (El autor).

3. RESULTADOS

La Figura 3 muestra la dependencia de *Kappa* con la distancia y los valores de κ_0 se muestran en el Cuadro 2. A pesar de que se tiene un número grande de registros en SHAT y RMOI, no se puede observar una clara relación de *Kappa* en función de la distancia. En estos tres sitios el valor de κ_0 se puede considerar que está en el rango de 0,08 s a 0,1 s asumiendo que el valor de la pendiente sea de cero (Cuadro 2).

Estaciones como SISD y AALJ hacen difícil la determinación de κ_0 debido principalmente a los pocos registros que se pudieron utilizar. Probablemente haya otros factores que afecten el valor de la atenuación en esos sitios relacionados con fuertes efectos de sitio, como por ejemplo los niveles de amplificación importantes encontrados por Moya (2009) en la ciudad de Alajuela.

Los valores de κ_0 en las estaciones SFRA y SLPF son 0,046 s y 0,032 s respectivamente. Esto quiere decir que existe mayor nivel de atenuación local en SFRA que en SLPF. Los valores de estas dos estaciones son solamente comparables con los catalogados como roca por Boore y Joyner (1997) ya que también son los más bajos de todo el resto de estaciones. Por otro lado, SFRA se ubica al sur de San José en una zona muy montañosa que probablemente puede tener algún tipo de influencia de carácter topográfico mientras

que SLPF se encuentra en el centro del campus universitario Rodrigo Facio, al oeste de San José, donde la geología predominante es de tipo *lahar*.

El caso de CCCH es muy interesante porque se trata de un sitio ubicado sobre lavas (Cuadro 1) cerca del embalse de la represa hidroeléctrica de Cachí. Este sitio da un valor de 0,058 s comparado con el de SNFL que es de 0,048 s. SNFL se ubica cerca del cañón del río Virilla al suroeste de San José (Schmidt et al, 2003) y se puede considerar que ambos sitios comparten en común la ubicación cerca de un cañón. A primera vista pareciera que SNFL atenuaría menos que CCCH, sin embargo, en SNFL hay sismos a distancias cortas que hacen que el valor de la pendiente (y por tanto de la intersección, κ_0) sean ligeramente inferiores. Quizás con mayor cantidad de observaciones en ese sitio sería posible obtener una línea de mejor ajuste mucho más representativa que la actual.

El sitio de CCDN se ubica al sur de Cartago y de acuerdo con el Cuadro 1 se trataría de un sitio relativamente firme, lo que generaría valores de κ_0 bajos. Sin embargo, la cantidad limitada de datos a distancias largas (como en el caso de SISD) no permite obtener una línea de tendencia lo suficientemente clara.

Las estaciones de RALT, CSLG y, en menor medida, CCTG muestran una dependencia bastante clara. Los últimos dos sitios están separados uno del otro aproximadamente 500 m,

por lo que se podría suponer que las características de amplificación en uno y otro sitio pudieran ser similares. En un trabajo llevado a cabo por Laporte (1994) acerca de la amplificación sísmica de Cartago (específicamente de la estación CCTG) se utilizó un perfil de suelos típico a partir de la descripción de pozos. En ese estudio se simuló la respuesta de la estación CCTG que había registrado los sismos de Piedras Negras en 1990 y Limón en 1991. Se encontraron diferencias en la respuesta para cada sismo ya que tanto la distancia, como la magnitud y el contenido frecuencial son diferentes, pero parece haber un pico característico a los 2 Hz.

RALT está mucho más lejos de esas otras estaciones y posee un valor ligeramente menor, sin embargo, al igual que SFRA, esta estación también está sobre una colina lo cual podría inducirle algún tipo de contaminación por efecto de la topografía.

4. CONCLUSIONES

1. Las estaciones de Cartago, CSLG y CCTG tienen valores similares de atenuación lo que es totalmente concordante con el hecho de que se encuentran relativamente cerca. La separación entre ellas es de aproximadamente 500 m y las dos están en el centro de la ciudad de Cartago que, en 1910, fue destruida por un fuerte terremoto ocurrido probablemente al sur de esta (Montero & Miyamura, 1985). Gran parte de la destrucción por el terremoto ha sido atribuida al tipo de suelo existente bajo la ciudad. Estudios posteriores llevados a cabo por Ramírez et al. (1996) apuntan en esa dirección.
2. Las estaciones CCCH y SNFL están ubicadas en afloramientos de rocas. El bajo valor de κ_0 concuerda con la observación de que los sitios en roca tendrían valores más bajos (Boore & Joyner, 1997) comparados con sitios en sedimentos más blandos como CCTG y CSLG, por ejemplo.
3. Las estaciones SLPF y SFRA son los dos sitios que poseen el valor absoluto más bajo de todas las estaciones. Siguiendo las observaciones de Anderson y Hough (1984)

y de Boore y Joyner (1997), ambos sitios deberían ser clasificados como roca. Esto es interesante ya que de acuerdo con la geología superficial, los sitios no pertenecerían a esa categoría (Cuadro 1). En el estudio de Moya (2009), los efectos de sitio en SFRA y SLPF son bastante similares y no presentan amplificación importante como sí lo hacen otros sitios como CSLG y AALJ. Muy probablemente el resultado de estas dos estaciones también esté sesgado por la cantidad de sismos de baja magnitud ($M_w < 4$) que se han registrado en estos años.

4. Con la mayor adquisición de equipo digital sería posible registrar una mayor cantidad de sismos lejanos que podrían hacer variar los resultados que se presentan en esta investigación. El valor promedio de *Kappa* es de 0,08 s.

AGRADECIMIENTOS

Colaboraron con esta investigación los asistentes de investigación Fernando Fallas, Andrés Chinchilla y Juan José Leitón del Laboratorio de Ingeniería Sísmica, mediante apoyo de la Vicerrectoría de Investigación N° 731-A2-905.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aki, K. & Irikura, K. (1991). Characterization and mapping of earthquake shaking for seismic zonation, in *Proceedings of the 4th International Conference on Seismic Zonation*. Stanford, CA. I, 61-110.
- Anderson, J. & Hough, S. (1984). A model for the shape of the Fourier amplitude spectrum of acceleration at high frequencies, *Bulleting of the Seismological Society of America* 74(5), 1969-1994.
- Boore, D. (2005). *SMSIM---Fortran Programs for simulating ground motions from earthquakes: Version 2.3--A Revision of OFR 96-80-A*. U.S. Geological Survey Open-File Report.

Boore, D. & Joyner, W. (1997). Site amplifications for generic rock sites, *Bulleting of the Seismological Society of America*, 87(2), 327-341.

Motazedian, D. & Atkinson, G. (2005). Stochastic finite-fault modeling based on a dynamic corner frequency. *Bulleting of the Seismological Society of America*, 95(3), 995-1010.

Montero, W. & Miyamura, S. (1981). Distribución de intensidades y estimación de los parámetros focales de los terremotos de Cartago de 1910, Costa Rica, América Central. *Revista del Instituto Geográfico Nacional*, 2, 9-34.

Moya, A. (2009). Inversión de efectos de sitio y factor Q utilizando cocientes espectrales. *Estudios Geológicos*, 65(1), en imprenta.

Ramírez, R.; Santana, G. & Chacón, O. (1996). Mapa de amplificación sísmica del Valle

Central, Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, 19, 37-55.

Schmidt, V., Moya, A., Climent, C., Rojas, W., Boschini, I., Lindholm, C., Nadim, F., Bungun, H. & Atakan, K. (2005). *Microzonificación Sísmica de San José, Costa Rica*. CD-ROM, Editorial Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.

SOBRE EL AUTOR

César Aarón Moya Fernández

Investigador del Laboratorio de Ingeniería Sísmica (LIS)

Geólogo de la Universidad de Wisconsin - Eau Claire
Ph. D. en Sismología de la Universidad de Kioto, Japón.

Instituto de Investigaciones en Ingeniería (INII)

Universidad de Costa Rica

Teléfono: (506) 2253-7331

Facsímil: (506) 2224-2619

Apartado postal: 36-2060

Correo electrónico: aaronm@inii.ucr.ac.cr