

Utilización de redes neuronales para la determinación de respuestas de sitio a partir de ondas coda: Aplicación para Armenia, Colombia

CARLOS A. VARGAS-JIMÉNEZ¹, HUGO MONSALVE², MARÍA L. BERMÚDEZ³, JULIO C. CUENCA⁴

RESUMEN

Se han utilizado datos acelerográficos triaxiales relacionados con réplicas del terremoto de Armenia, Colombia (25-01-99, Mw = 6.2), para determinar la función de transferencia Formaciones blandas/Roca dura en dos sitios de la ciudad de Armenia mediante el uso de una red neuronal. Dicha red fue entrenada con datos espectrales de Roca dura como parámetro de entrada y de Formaciones blandas como parámetro de salida para las componentes N-S y Z. El comportamiento de la red neuronal respecto a los datos de entrenamiento fue 0.01% y permitió simular datos espectrales para la componente E-W de los mismos registros con un error medio cuadrático menor que 8%.

Se pudo observar que a pesar de los pocos registros utilizados, las redes neuronales facilitan el proceso de deducción de funciones de transferencia lineales y no lineales orientadas a la evaluación dinámica de suelos.

PALABRAS CLAVE: REDES NEURONALES, FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA, ONDAS CODA, ANÁLISIS DE ESPECTROS, PARÁMETROS DE ROCAS, RESPUESTA DE SITIO

ABSTRACT

Triaxial accelerographic data related to replies of Armenia earthquake in Colombia (25-01-99, Mw=6.2) have been used to determine the transfer function of Soft Formation / Hard Rock in two sites of Armenia city by using a neuronal network. This network was trained with spectral data of HARD ROCK as input parameter and spectral data of Soft Formation as output parameter for N-S and Z components. The error of the neuronal network respect to the training data was of 0,01%. It allowed to simulate spectral data for the E-W component of registries with a quadratic mean error minor to 8%.

It was possible to observe that with these few records used, the neuronal networks facilitate the process of deduction of transference functions linear and not-linear oriented to the dynamic ground evaluation.

KEY WORDS: NEURONAL NETWORKS, TRANSFER FUNCTION, SPECTRAL ANALYSIS, ROCK PARAMETERS

INTRODUCCIÓN

Los métodos de coda normalizada constituyen una herramienta confiable para la determinación de respuestas de sitio, aspecto relevante dentro de la evaluación de la amenaza sísmica y de la microzonificación sísmica de ciudades. En particular, diversas técnicas han sido utilizadas en las pasadas tres décadas para establecer parámetros que confirmen la validez de estos métodos. Tsujiura (1978) fue el primero en demostrar la confiabilidad de la coda normalizada para encontrar amplificaciones de sitio relativas y compararlas con medidas a partir de ondas directas. Tsujiura analizó varios sismogramas filtrados a ciertas bandas de frecuencias para eventos locales registrados en cuatro estaciones en Mt. Dodaira, Japón, con diversa litología. Estableció relaciones espectrales para la S-coda, medidas en los componentes horizontales en pares de estaciones, y comparó con relaciones espectrales para las ondas S directas en el rango de frecuencias 0.75 Hz a 24 Hz. Concluyó que las ondas S-coda estaban compuestas por la dispersión de las ondas S, y que la amplificación relativa entre dos estaciones podría ser determinada por relaciones espectrales de las ondas

S-coda. Tucker & King (1984) compararon los factores de amplificación de sitios a partir del método planteado por Tsujiura (1978) y concluyen que los resultados utilizando ondas coda presentan menos dispersión que cuando se usan ondas S directas.

Phillips & Aki (1986) presentaron un método para invertir las amplitudes relativas en un conjunto de sitios usando una serie de ventanas de tiempo. Ellos asumen que la forma de las curvas de decadencia de la coda es la misma para todos los sitios, para todas las fuentes, y que solamente la amplitud de las curvas difieren dependiendo del sitio y la naturaleza de la fuente. Después de aplicar su método para eventos registrados por 150 estaciones localizadas al norte de California encontraron que las amplificaciones de sitio en la mayoría de las estaciones eran independientes de los eventos y ventanas de tiempo utilizadas; unas pocas dependencias parecen estar sujetas a estructuras geológicas locales.

Mayeda *et al.* (1991) midieron factores de amplificación de sitio dentro y fuera del área de Long Valley Caldera, California, encontrando que las amplificaciones de sitio en las bandas 1.5 Hz a 3.0 Hz estaban de acuerdo con los residuos de magnitud de coda para cada sitio. Fehler *et al.* (1992) desarrollaron un mapa de factores de amplificación de sitio para la región de Tokai, Japón, hallando poca dispersión de los resultados para bandas por debajo de los 8 Hz, y a diferencia de Mayeda, muestra que los factores de amplificación de sitio obtenidos por el método de coda normalizada para la banda centrada en 6Hz están de acuerdo con los resi-

1 Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Geociencias, Santafé de Bogotá, e-mail: cvargas@ciencias.unal.edu.co

2 Universidad del Quindío, Facultad de Ingeniería, Armenia, Quindío.

3 Ingeominas, Santafé de Bogotá.

4 Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ingeniería, México D.F.

duos de magnitud local, obtenidos previamente por Noguchi (1990) a partir de medidas de máxima amplificación para las mismas estaciones.

Kato *et al.* (1995) compararon factores de amplificación obtenidos mediante el uso de ondas directas S y S-coda para el sur de California a partir de registros digitales de alta calidad para réplicas del terremoto de Landers en 1992. Hallaron que las amplificaciones de sitio usando los dos métodos para seis bandas de frecuencias estaban en concordancia y dentro de un factor de 1.5.

ASPECTOS METODOLÓGICOS

En el presente trabajo se ha intentado determinar una función de transferencia no analítica con capacidad de predecir efectos de amplificación sísmica bajo la relación Formaciones blandas/Roca dura, que pueda en un momento dado tener en cuenta aspectos no lineales de dicha relación. Para el efecto se ha elegido el entrenamiento de una red neuronal basado en observaciones espectrales de los componentes N-S y Z para 7 eventos sísmicos; posteriormente se han realizado simulaciones para el componente E-W en busca de establecer la confiabilidad de la red.

De acuerdo con las apreciaciones de Vargas (1999) quien realizó cálculos de Q_i y Q_s mediante la utilización del método discriminante MLTW (Hoshiba *et al* 1993), el principal factor de atenuación de la energía sísmica en esta zona es de carácter dispersivo, por lo que se puede asumir que las ondas de coda pueden ser modeladas a partir de hipótesis de distribución homogénea de dispersores, y puede ser validada esta idea al hallar resultados semejantes de respuesta de sitio mediante el uso de cualquiera de los componentes vectoriales de los registros. De este modo, las simulaciones desde cualquier componente deben mantener tendencias semejantes.

REDES NEURONALES

Las redes neuronales son un paradigma computacional de relativamente nueva aplicación gracias a las bondades tecnológicas recientes; se trata de una serie de elementos simples, los cuales operan en paralelo. Dichos elementos fueron inspirados en los sistemas nerviosos biológicos cuya modelación matemática se inició en la década de 1940. Según las propuestas iniciales, las neuronas deben responder ante estímulos de cierta manera; así, un modelo de respuesta para una neurona i -ésima depende de las entradas e interacciones con otras neuronas según la expresión (Crespo, 1996):

$$y_i = f\left(\sum p_{ij} y_j + c_i\right)$$

donde p_{ij} son parámetros de la conexión entre la neurona i y la j ; c_i son los parámetros de la neurona i . La función f , conocida como función de transferencia interna, puede variar según el diseño entre muchas posibilidades, como por ejemplo la función escalón, la función lineal, la función sigmoide, etc. De este modo, los diseños topológicos plantean que para un trabajo en particular, las conexiones entre las neuronas participantes (p_{ij}) deben constantemente ser reajustados (entrenamiento) para que respondan adecuadamente a una solicitud. Así, en el entrenamiento es donde los sistemas neuronales aprenden. La figura 1 ilustra una topología neuronal genérica.

Para el presente trabajo se optó por diseñar una topología «backpropagation» (Freeman, 1994), la cual establece que para cualquier número de capas neuronales, los parámetros de neurona ci son 1, y las funciones de transferencia internas (f) suelen ser de tipo LogSig, TanSig o Lineal. En particular fue utilizada una red con dos capas intermedias de 90 neuronas, la primera con función Tansig y la segunda con función Logsig.

Una de las ventajas más importantes de esta topología radica en su capacidad para adaptarse a problemas lineales y no lineales. Dentro de su implementación, la convergencia de error se hace a partir del algoritmo de descenso por gradiente, el cual se basa en la variación de cada p_{ij} .

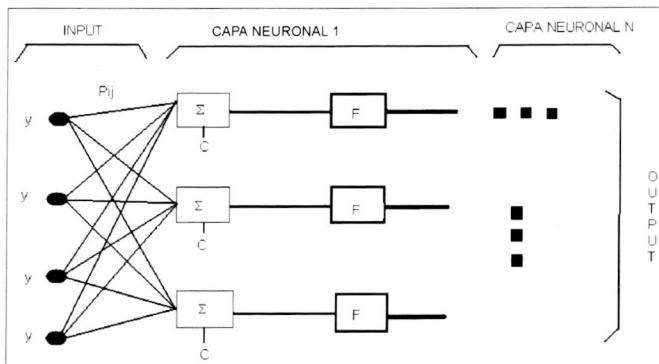


Figura 1. Topología genérica de una red neuronal. Las entradas interactúan con los pesos p_{ij} y llegan sumados a la función de transferencia f para producir salidas deseadas

DATOS

En el presente trabajo fueron utilizados 15 acelerogramas provenientes de siete réplicas asociadas con el terremoto de Armenia, Colombia (25-01-99, Mw = 6.2). Dichos eventos fueron registrados en una estación referencial donde afloran rocas con metamorfismo regional (Calarcá) y en dos estaciones sobre suelos orgánicos con potentes depósitos vulcano-clásticos (Uniquindío y Armeviva).

El sistema de registro consiste en acelerógrafos digitales triaxiales Etna-Kinematics con 24 bits de resolución y respuesta plana para la banda de frecuencias de interés para este trabajo 2 Hz a 25 Hz.

Las localizaciones de los eventos fueron asociadas al sistema de fallas activas que circundan la ciudad de Armenia. La tabla 1 permite detallar los eventos y las estaciones utilizadas.

TABLA 1. LOCALIZACIÓN DE EVENTOS UTILIZADOS EN EL TRABAJO POR LAS ESTACIONES CALARCÁ, UNIQUINDÍO Y ARMEVIVA.

Evento	Localización	Prof.	MI	Estación Calarcá	Estación Uniquindío	Estación Armeviva
990424 21:43	4.49N -75.72W	02.00	2.09	✓		✓
990424 02:53	4.45N -75.70W	10.00	2.23	✓		✓
990505 22:05	4.52N -75.69W	01.57	2.45	✓	✓	✓
990507 22:48	4.46N -75.62W	19.26	2.82	✓		✓
991013 13:10	4.32N -75.68W	06.67	4.10	✓	✓	
991021 15:50	4.47N -75.62W	07.99	3.45	✓	✓	
991109 17:02	4.43N -75.58W	01.02	3.80	✓	✓	

DISCUSIÓN Y RESULTADOS

Chen (1999) ha ilustrado cómo la migración hipocentral puede explicar los cambios temporales en la atenuación de las ondas coda, y por ende influenciar cálculos en el parámetro b . Si se analiza un poco este escenario, queda tácito el cuestionamiento sobre la influencia de este parámetro en la respuesta de sitio, y sobre la validez de la hipótesis de Phillips & Aki (1986) respecto a la independencia de la forma de la coda en una región determinada.

Siguiendo la hipótesis de dispersores homogéneamente distribuidos (Aki & Chouet, 1975), se ha calculado el factor Q_c en las bandas centradas entre 2Hz y 25Hz para las tres componentes, en busca de establecer la veracidad en la premisa de Phillips & Aki (1986). Como se puede apreciar en las figuras 2 a 7, existe una independencia de la atenuación de coda respecto a la distancia, y se observa que la premisa de dispersores homogéneamente distribuidos es válida para las tres componentes.

En la figura 8 se puede apreciar una muestra de los registros acelerográficos utilizados. Tanto en el dominio del tiempo como de la frecuencia, la amplificación sísmica es evidente en la relación litológica Formaciones blandas/Roca dura, así como su independencia respecto a la ley de atenuación de ondas coda verificada en las tres componentes. Bajo esta apreciación el entrenamiento de la red neuronal fue llevado a cabo a partir de las componentes N-S y Z para todos los eventos, buscando que la red neuronal se comporte como la función de transferencia Formaciones blandas/Roca dura. La figura 9 detalla los espectros simulados a partir de la red neuronal y verdaderos, ambos sobre las formaciones blandas. Las dos simulaciones superiores coinciden exactamente con los espectros verdaderos porque fueron tenidos en cuenta durante el entrenamiento de la red neuronal. Los siguientes ocho espectros simulados siguen aproximadamente las tendencias de los espectros verdaderos.

Como se ha mencionado con anterioridad, la premisa de dispersores homogéneamente distribuidos en un espacio tridimensional es

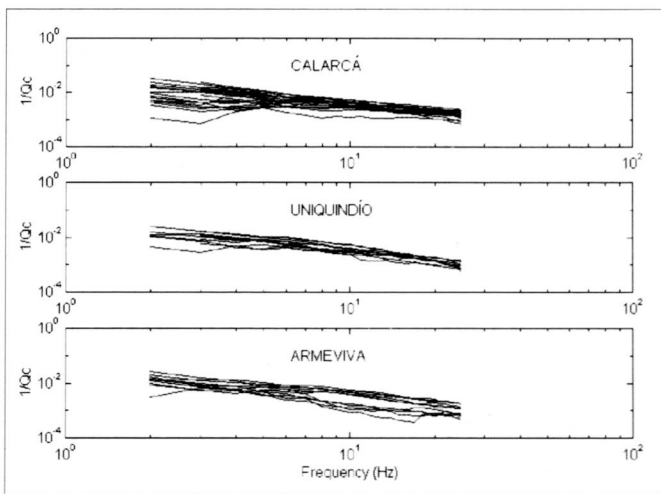


Figura 2. Q_c^{-1} para las estaciones Calarcá, Uniquindío y Armeviva en sus tres componentes en el rango de frecuencias 2 a 25Hz

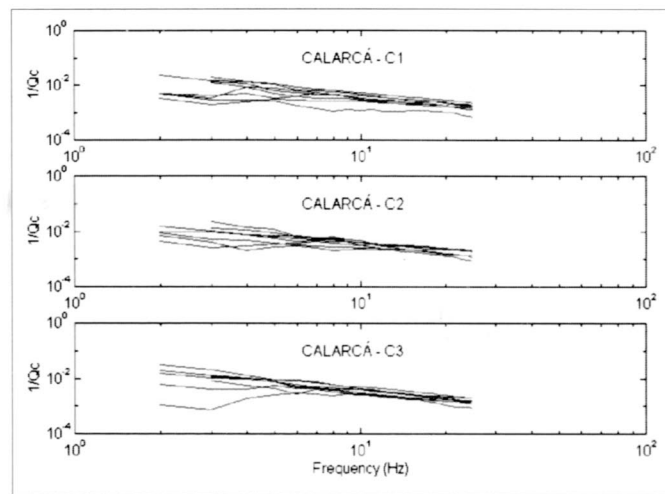


Figura 3. Q_c^{-1} para la estación Calarcá en sus tres componentes en el rango de frecuencias 2 a 25Hz

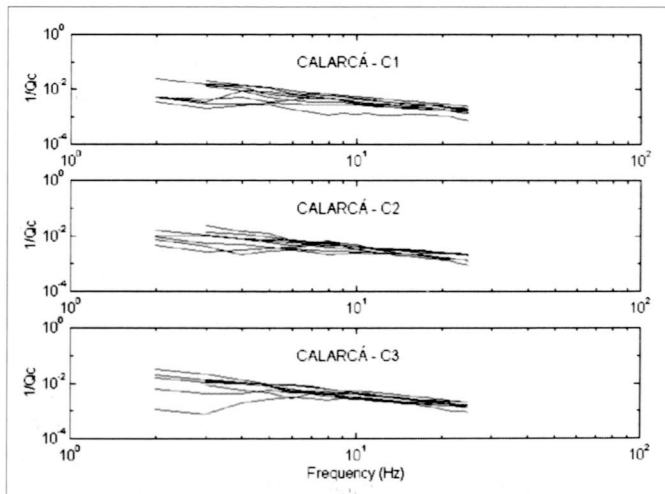


Figura 4. Q_c^{-1} para la estación Uniquindío en sus tres componentes en el rango de frecuencias 2 a 25Hz

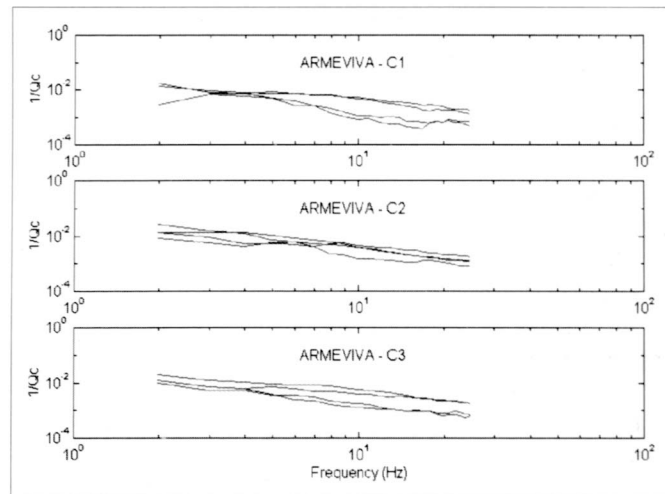


Figura 5. Q_c^{-1} para la estación Armeviva en sus tres componentes en el rango de frecuencias 2 a 25Hz

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

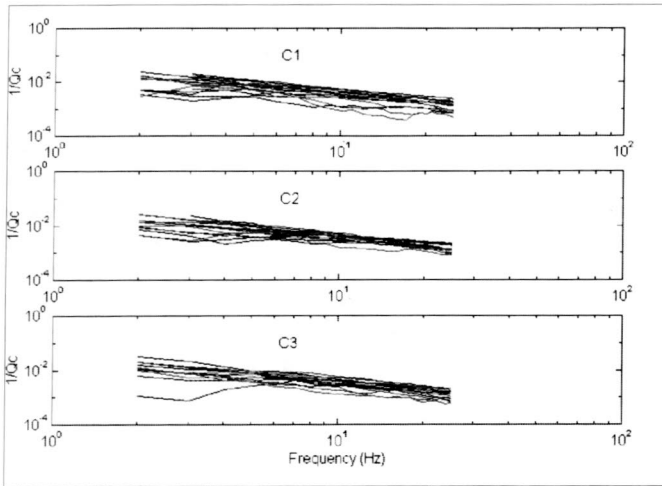


Figura 6. Q_c^{-1} para las estaciones Calarcá, Uniquindío y Armeviva en sus tres componentes en el rango de frecuencias 2 a 25 Hz. En azul Calarcá, verde Uniquindío y rojo Armeviva.

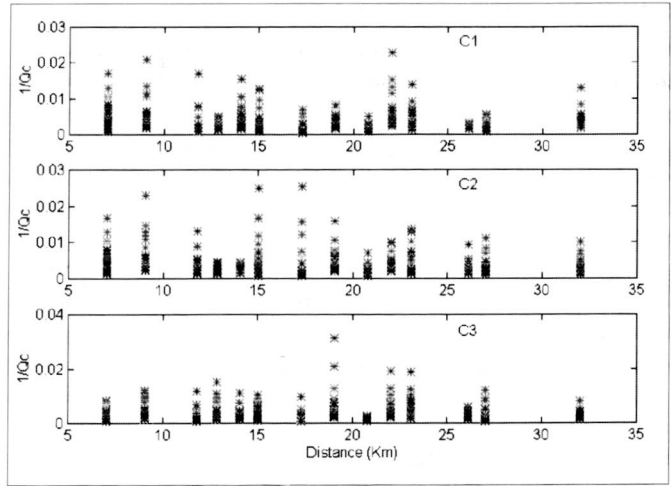


Figura 7. Q_c^{-1} respecto a la distancia hipocentral para las estaciones Calarcá, Uniquindío y Armeviva en sus tres componentes. Los diferentes colores están relacionados con las frecuencias centrales entre 2 Hz y 25 Hz, donde se infiere independencia de la coda respecto a la distancia en las bandas de frecuencia analizadas

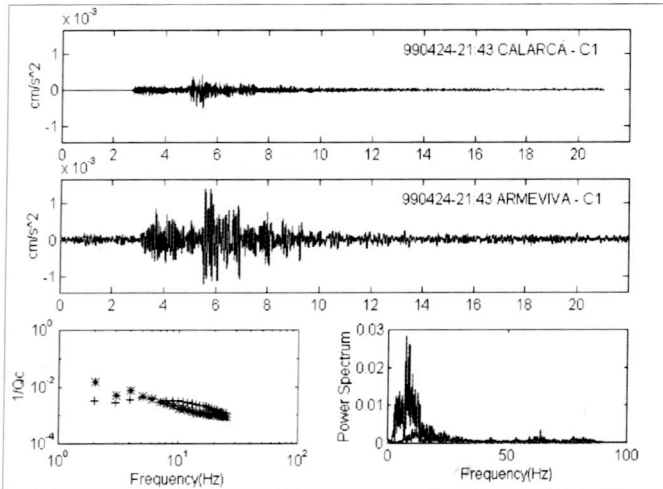


Figura 8. Registros acelerográficos en roca (Calarcá) y formaciones blandas (Armeviva) donde se puede apreciar la amplificación sísmica en el dominio del tiempo y la frecuencia, así como su independencia respecto a la ley de atenuación de ondas coda

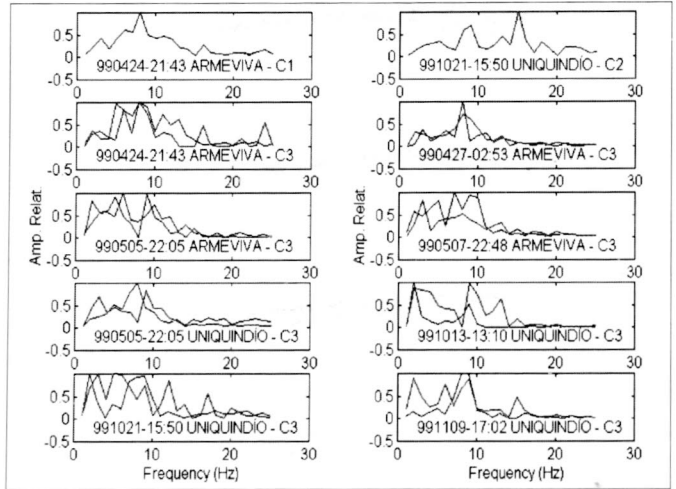


Figura 9. Espectros simulados (azul) y verdaderos (negro) basados en los espectros de la estación sobre roca (Calarcá). Las dos simulaciones superiores coinciden exactamente con los espectros verdaderos porque fueron tenidos en el entrenamiento de la red neuronal. Los siguientes ocho espectros simulados siguen aproximadamente las tendencias de los espectros verdaderos

verificada para la región circundante a la ciudad de Armenia en virtud de la similitud de las relaciones espectrales en cualquiera de las componentes utilizados (figura 10); el error medio cuadrático estimado de la red para los datos analizados es menor al 8%.

En la figura 11 se aprecian los resultados hallados con la red neuronal, donde se puede deducir que dicha red efectivamente puede ser utilizada como función de transferencia (pues asimila bastante bien las relaciones espectrales o factores de amplificación sísmica en el dominio de la frecuencia) para deducir comportamientos dinámicos de las formaciones blandas a partir de espectros de los registros obtenidos en formaciones rocosas como es el caso de la estación Calarcá.

CONCLUSIONES

Han sido utilizados registros acelerográficos triaxiales para determinar la función de transferencia Formaciones blandas/Roca dura en las estaciones Armeviva y Calarcá de la ciudad de Armenia, Colombia, mediante el uso de una red neuronal. Asumiendo un medio con heterogeneidades homogéneamente distribuidas y Q frecuencia-dependiente entre la zona epicentral y las estaciones de registro, se han podido establecer condiciones semejantes de amplificación sísmica en las componentes N-S, Z y E-W; esta situación fue aprovechada para entrenar la red neuronal con datos espectrales de Roca dura como parámetro de entrada y de Formaciones blandas como parámetro de salida para las componentes N-S y Z. La red

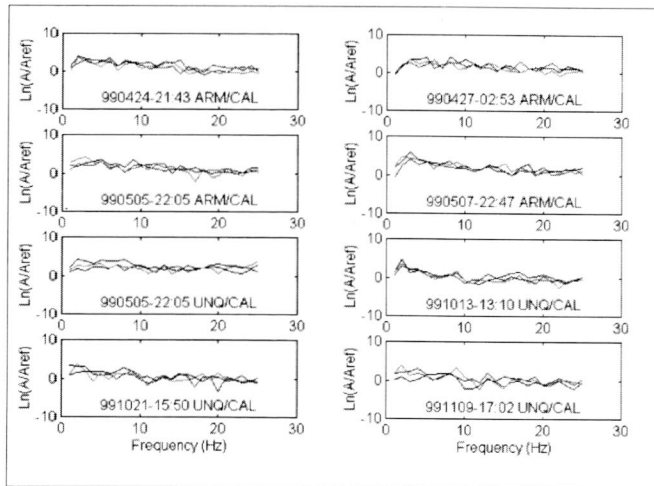


Figura 10. Relaciones espectrales para los tres componentes (C1 - azul; C2 - negro; C3 - púrpura) para los registros verdaderos

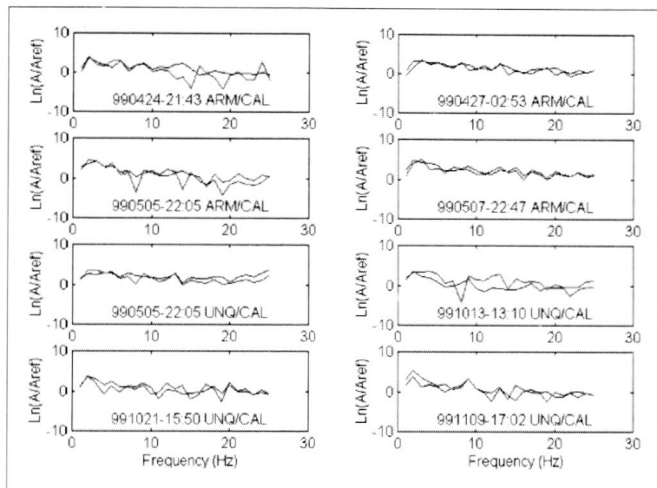


Figura 11. Relaciones espectrales verdaderas (azul) y simuladas (negro). Los resultados simulados fueron a partir de registros no tenidos en cuenta durante el entrenamiento de la red neuronal

neuronal final tuvo un error respecto a los datos de entrenamiento del 0.01%, y permitió simular datos espectrales para la componente E-W con un error medio cuadrático menor al 8%.

De este modo, se puede concluir que, a pesar de los pocos registros utilizados, una topología neuronal bien seleccionada puede facilitar el proceso de deducción de funciones de transferencia lineales y no lineales orientadas a la evaluación dinámica de suelos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CHEN, X. Q. 1999: On the characteristics of coda scatterers for shallow earthquakes, Ph.D. thesis, Sch. of Geophys. Sci., Ga. Inst. of Technol., Atlanta.
- CRESPO, J.L. 1996: Redes neuronales artificiales para ingenieros. Universidad de Cantabria.
- FEHLER, M., HOSHIBA, M., SATO, H. & OBARA, K. 1992: Separation of scattering and intrinsic attenuation for the Kanto-Tokai region, Japan, using measurements of S-wave energy versus hypocentral distance, *Geophys. J. Int.* 108, 782-800.
- FREEMAN, J. 1993: Redes neuronales. Addison Wesley, Iberoamericana.
- HOSHIBA, M. 1993: Separation of scattering attenuation and intrinsic absorption in Japan using the multiple lapse time window analysis of full seismogram envelope, *J. Geophys. Res.* 98, 15809-15824.
- KATO, K., AKI, K. & TAKEMURA, M. 1995: Site amplification from coda waves: Validation and application to S-wave site response, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 85, 467-477.
- MAYEDA, K., KOYANAGI, S. & AKI, K. 1991: Site amplification from S wave coda in Long Valley Caldera region, California, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 81, 2194-2213.
- NOGUCHI, S. 1990: Regional difference in maximum velocity amplitude decay with distance and earthquake magnitude, *Res. Notes Nat. res. Ctr. Disast. Prev.* 86, 1-40.
- PHILLIPS, W.S. & AKI, K. 1986: Site amplification of coda waves from local earthquakes in Central California, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 76, 627-648.
- TSUJUIRA, M. 1978: Spectral análisis of the coda waves from local earthquakes, *Bull. Earthq. Inst. Univ. Tokyo* 53, 1-48.
- TUCKER, B. & KING, J. 1984: Dependence of sediment-filled valley response on input amplitude and valley properties, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 74, 153-165.
- VARGAS, C.A. 1999: Atenuación de ondas coda en la región central de los Andes de Colombia (eje cafetero). Tesis de Master, Ingeniería sísmica y dinámica estructural, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.