

Estudio de los efectos de suelo en la ciudad de Málaga

Soil effects studies in the city of Málaga

A. Macau⁽¹⁾, S. Figueras⁽¹⁾, D. Clavero⁽²⁾, T. Goded⁽³⁾, A. de Paz⁽¹⁾ y A. Pazos⁽⁴⁾

⁽¹⁾ Institut Cartogràfic de Catalunya (ICC), Parc de Montjuïc, 08038, Barcelona, amacau@icc.es

⁽²⁾ Laboratorio del Instituto de Investigación y de Control de Calidad en la Edificación

⁽³⁾ Universidad Complutense de Madrid

⁽⁴⁾ Real Instituto y Observatorio de la Armada

SUMMARY

Located at the south of Iberian Peninsula, the city of Malaga is affected by one of the higher seismic hazard levels expected in Spain. According to the Spanish Seismic Code (NCSE-02), the seismic hazard for Malaga with a return period of 500 years implies a peak ground acceleration of 0.11g corresponding to an intensity of VII-VIII degrees in the MSK scale. Within the ERSE (Escenarios Realistas de Riesgo Sísmico en España) project framework, between other goals, the study of the soil effects in the city of Malaga is expected. The geology of the city corresponds to Malaguide complex outcrop, quaternary materials and Pliocene materials disposed between the quaternary materials and Malaguide outcrops. The soil effects study is carried out from three different methodologies: the first one consists in the city of Malaga soils classification, from geotechnical drillings, in function of C coefficient defined by the NCSE-02. The second one consists on the soil fundamental frequency empirical calculation with H/V spectral ratio method from seismic noise measurements. Finally, the soil transfer function calculation is performed with a 1D equivalent linear model. From this results it is showed a seismic microzonation of the city of Malaga with the fundamental frequency values and the ground motion amplifications obtained from the computed transfer function. The soil effects study results are being used for the seismic risk study that is carried out in the city of Malaga within the framework of the same project.

1. INTRODUCCIÓN

La ciudad de Málaga, situada en el sur de la costa de España, tiene un alto nivel de peligrosidad sísmica. La peligrosidad sísmica, combinada con la elevada densidad de población actual y la vulnerabilidad sísmica de sus edificios, dan lugar a que la ciudad de Málaga tenga un alto riesgo potencial de sufrir importantes daños si se produce un sismo como los ocurridos en el pasado.

Desde el punto de vista geológico, los diferentes materiales que afloran en la ciudad de Málaga pertenecen al Complejo Maláguide (ocupando la mitad este y el noroeste de la ciudad), materiales Cuaternarios (se extienden a lo largo de la costa, en los márgenes de los ríos y arroyos, principalmente los ríos Guadalmedina y Guadalhorce, y además al pie de ciertas colinas), y materiales Pliocenos (dispuestos entre el Cuaternario y el relieve Maláguide).

En este trabajo se presenta un estudio preliminar de microzonación sísmica realizada en la ciudad de Málaga dentro del proyecto ERSE (Escenarios Realistas de Riesgo Sísmico en España) (REN2003-5178-C03-01), financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia. Para el estudio de efectos de suelo se ha realizado una clasificación geotécnica de suelo en función del coeficiente C definido por la norma NCSE-02, se ha calculado la frecuencia fundamental del suelo a partir de medidas de ruido sísmico efectuadas en diferentes emplazamientos, y finalmente se ha evaluado la función de transferencia del suelo utilizando un modelo 1D lineal equivalente.

2. PELIGROSIDAD SÍSMICA EN LA CIUDAD DE MÁLAGA

La región de Málaga, situada en el sur de la Península Ibérica, presenta una sismicidad compleja con la ocurrencia de sismos superficiales ($h < 40$ km), y de profundidad intermedia ($40 < h < 150$ km) (figura 1). En 1494 y 1581, la ciudad de Málaga sufrió dos terremotos con una intensidad máxima de VIII y VII respectivamente, que causaron importantes daños. El sismo de 1680 ($I_0 =$ VIII-IX) fue especialmente destructivo, causó fuertes daños en la ciudad de Málaga y en sus alrededores. Muñoz y Udías (1988) asignaron una profundidad de 50 km al sismo de 1680, basándose en el mapa de isosistas, y una magnitud de 7. Recientemente, en 2002, dos sismos de magnitud 4.3 con profundidades de 70 y 90 km han sido percibidos en la ciudad de Málaga, y han sido registrados por

los acelerógrafos que el Instituto Geográfico Nacional tiene instalados allí.

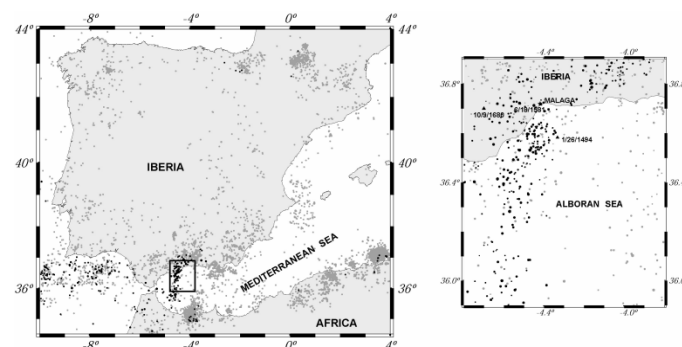


Figura 1 – El mapa de la izquierda muestra la sismicidad de la Península Ibérica para el período de 1980-2004 con magnitudes igual o mayores a 3.0. El mapa de la derecha muestra la sismicidad que afecta a la ciudad de Málaga para el mismo período y mismas magnitudes y la sismicidad histórica de intensidades EMS-98 máximas mayores o iguales de VII que afectó a la zona. El gris claro indica terremotos superficiales ($h < 40$ km), gris oscuro muestra aquellos con una profundidad intermedia ($40 \text{ km} < h < 150 \text{ km}$), y el negro se refiere a los terremotos más profundos ($h \approx 650 \text{ km}$). (The left map shows the Iberian Peninsula seismicity for the 1980-2004 period with magnitudes greater or equal to 3.0. The right map shows the seismicity affecting the city of Malaga for the same period and all magnitudes, and the historical seismicity of EMS-98 maximum intensities equal or greater than VII that affected the region. Light gray indicates superficial earthquakes ($h < 40 \text{ km}$), dark gray shows those with intermediate depth ($40 \text{ km} < h < 150 \text{ km}$), and black refers to deepest earthquakes ($h \approx 650 \text{ km}$))

Según la Norma de Construcción Sismorresistente Española (NCSE-02), la peligrosidad sísmica para la ciudad de Málaga con un período de retorno de 500 años tiene asignada una a_{max} de 0.11g que corresponde a una intensidad de VII-VIII grados en la escala MSK. Debido a este nivel de peligrosidad sísmica, uno de los objetivos del proyecto ERSE es la realización de escenarios de riesgo sísmico para la ciudad de Málaga.

3. MICROZONACIÓN SÍSMICA EN FUNCIÓN DEL COEFICIENTE C DE LA NORMA NCSE-02

Para realizar el estudio de efectos de suelo en la ciudad de Málaga se ha partido de una microzonación sísmica inicial de la ciudad en función de los valores del coeficiente C. Este coeficiente C depende de las características geotécnicas del terreno de cimentación, está propuesto por la Norma de Construcción Sismorresistente Española (NCSE-02) para considerar un coeficiente de amplificación del terreno en la obtención de la aceleración sísmica de cálculo. El coeficiente C se obtiene realizando una media ponderada de los primeros metros de suelo, y varía entre 1 para roca compacta ($V_s > 750$ m/s) y 2 para suelos blandos ($V_s < 200$ m/s).

En la figura 2 se muestran las cuatro zonas obtenidas en la ciudad de Málaga teniendo en cuenta el valor de coeficiente C (Clavero y Ramos, 2005). También se representa la posición de las cuatro columnas de suelo que se han caracterizado para realizar las simulaciones numéricas 1D.

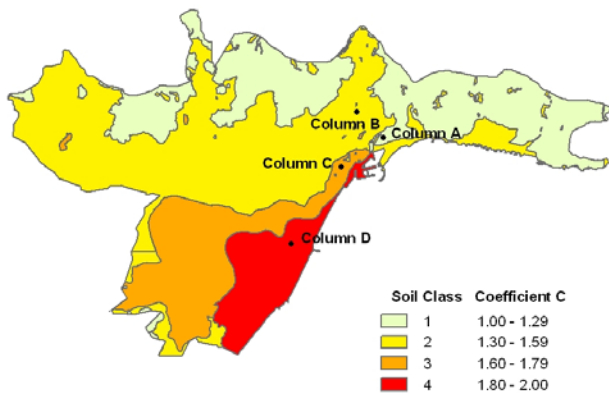


Figura 2 – Mapa de la microzonación sísmica de la ciudad de Málaga, se han definido cuatro clases de suelo en función de los diferentes valores del coeficiente C. También se muestra la situación de las columnas de suelo. (Seismic microzonation map for the city of Malaga; four soil classes are defined for the different values of the C coefficient. The position of soil columns is also shown.)

4. MEDIDAS DE RUIDO SÍSMICO

Durante el mes de Junio de 2005 se realizó una campaña de medidas de ruido sísmico en 74 emplazamientos diferentes de la ciudad de Málaga. Se ha aplicado el método del cociente espectral H/V, método de Nakamura (Nakamura, 1989), para calcular la frecuencia fundamental del suelo de cada uno de estos emplazamientos. En la figura 3 se muestran los valores de la frecuencia fundamental obtenidos en los diferentes emplazamientos donde se han realizado medidas de ruido sísmico.

Los valores de la frecuencia fundamental obtenidos mediante el método de Nakamura a lo largo de la ciudad de Málaga varían entre 0.4 y 4.0 Hz. Los valores más bajos de la frecuencia fundamental se han obtenido en el extremo sur de la ciudad, cerca de la desembocadura del río Guadalhorce, mientras que los valores más altos de la frecuencia fundamental del suelo se han obtenido cerca de las colinas que rodean la ciudad. También se realizaron medidas de ruido sísmico en emplazamientos situados sobre roca. En estos casos las curvas del cociente espectral H/V no presentan ningún pico de amplificación significativo.

Partiendo de los valores de la frecuencia fundamental del suelo representados en la figura 3 se han caracterizado las cuatro zonas que aparecen en la figura 2 con un valor medio de la frecuencia fundamental del suelo para cada una de ellas. En la tabla 1 se muestran los valores medios de la frecuencia fundamental para cada una de las zonas definidas en función del coeficiente C.

Tabla 1- Valores medios de la frecuencia fundamental del suelo para cada una de las clases de suelo definidas en función del coeficiente C. (Mean values of the soil fundamental frequency for the different soil classes based on C coefficient.)

Clase de suelo	Frecuencia fundamental
1	Roca
2	1 Hz
3	1 Hz
4	0.4 Hz

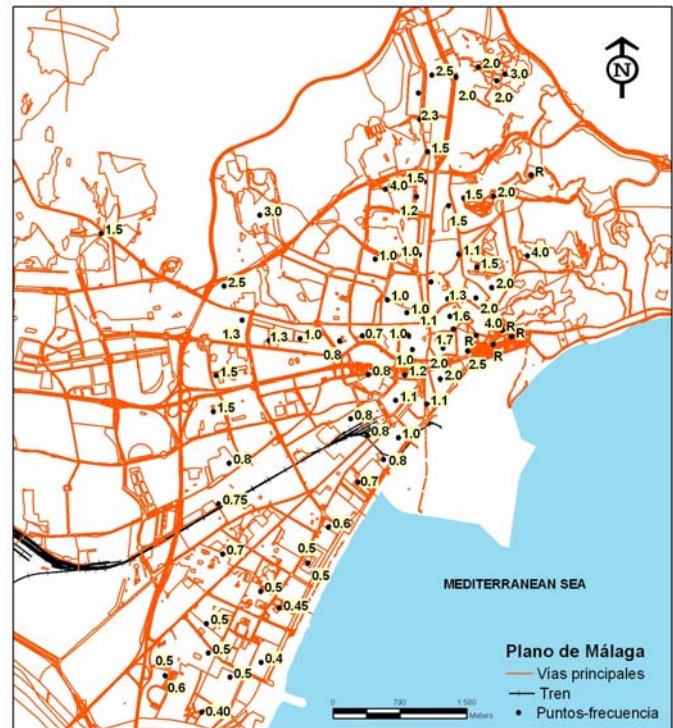


Figura 3 – Mapa de la ciudad de Málaga con los valores de la frecuencia fundamental del suelo calculada en los diferentes emplazamientos donde se han realizado medidas de ruido sísmico. (Malaga map with the soil fundamental frequency values obtained in the locations where the microtremors measurements were carried out.)

El valor medio de la frecuencia fundamental del suelo asignado a cada una de las zonas definidas en función del coeficiente C presenta variaciones respecto a las frecuencias fundamentales obtenidas en los distintos emplazamientos donde se han realizado medidas de ruido sísmico. Este comportamiento nos permitirá considerar subzonas más pequeñas en un estudio más detallado en curso de realización.

5. SIMULACIÓN NUMÉRICA 1-D. APLICACIÓN DEL MÉTODO LINEAL EQUIVALENTE

En la ciudad de Málaga se ha aplicado el método lineal equivalente ProShake para obtener las funciones de transferencia y el movimiento del suelo en cada una de las clases de suelo definidas en la figura 2. Previamente a la aplicación del método es necesario caracterizar adecuadamente las columnas de suelo y seleccionar un sismo de referencia en roca.

5.1 Recogida de datos y definición de las columnas de suelo

Para caracterizar las columnas de los distintos tipos de suelo definidos en función del coeficiente C se ha utilizado la información de la base de datos geotécnicos de Málaga que ha realizado LIDYCCE (Laboratorio del Instituto de Investigación y de Control de Calidad de la Edificación) recopilando la información de los informes geotécnicos de unos 400 sondeos pertenecientes a 100 estudios geotécnicos de la ciudad de Málaga.

5.2 Selección del sismo de entrada en roca

Para los cálculos de la función de transferencia y del movimiento del suelo en cada una de las columnas de suelo con el programa ProShake es necesario disponer de un registro de entrada en roca que tenga un espectro de respuesta similar al espectro de respuesta propuesto por la Norma de Construcción Sismorresistente Española (NCSE-02) en la ciudad de Málaga para un período de retorno de 500 años.

Para ello se ha realizado una selección de registros en la base de datos de movimientos sísmicos europeos (European Strong-Motion Database, 2000). En la selección de los registros se ha procurado que sus espectros estén en una banda de confianza del $\pm 20\%$ del espectro propuesto por la Norma de Construcción Sismorresistente Española (NCSE-02). Una vez se ha obtenido el registro, se ha escalado a $0.11 g$, valor de la aceleración máxima esperada en la ciudad de Málaga según la norma NCSE-02 para un período de retorno de 500 años.

5.3 Resultados obtenidos con el programa ProShake

Una vez se ha definido el sismo de entrada y se han caracterizado las columnas de suelo con sus propiedades físico-mecánicas se ha aplicado el programa ProShake 1D para calcular las funciones de transferencia y el movimiento del suelo de cada una de las columnas de suelo.

En la figura 4 se muestran las funciones de transferencia calculadas en dos columnas de suelo definidas en la ciudad de Málaga. En la figura también se ha añadido el valor de la frecuencia fundamental del suelo obtenida aplicando el método de Nakamura (Nakamura, 1989) a los registros de ruido sísmico en los emplazamientos cercanos a estas columnas. Vemos que este valor coincide bastante bien con la frecuencia fundamental de la función de transferencia.

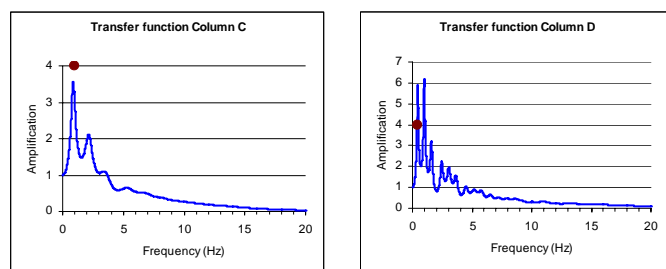


Figura 4– Funciones de transferencia calculadas en las columnas C (clase de suelo 3) y D (clase de suelo 4) junto con los valores de la frecuencia fundamental (punto) obtenidos mediante el método de Nakamura en emplazamientos cercanos a las columnas. (Transfer functions for columns C (soil class 3) and D (soil class 4) together with fundamental frequencies (big dot) obtained by Nakamura's method in sites located near the drillings.)

Se han calculado los valores de la aceleración máxima (PGA) y de la Intensidad de Arias (AI) para cada uno de los acelerogramas obtenidos en las diferentes columnas de suelo. Estos valores se muestran en la tabla 2. Los suelos de clase 2 y 3, caracterizados por suelos blandos poco profundos, muestran una amplificación similar respecto a los suelos de clase 1 (roca), para la aceleración máxima y la Intensidad de Arias. Se observa que el suelo de clase 4 tiene una mayor amplificación para la AI que para el PGA.

Este comportamiento puede ser debido a la presencia de un basamento profundo (frecuencia fundamental de 0.4 Hz) que produce un alargamiento del acelerograma y en consecuencia una mayor Intensidad de Arias. Por lo tanto, la Intensidad de Arias parece más representativa para la respuesta de un suelo profundo que la aceleración máxima.

Tabla 2- Valores de la aceleración máxima (PGA) y de la Intensidad de Arias (AI) calculados para cada clase de suelo. (Peak Ground Acceleration (PGA) and Arias Intensity (AI) computed for each soil class.)

Clase de suelo	PGA (g)	AI (cm/s)
1	0.11	19.4
2	0.14	36.7
3	0.14	38.9
4	0.14	63.7

6. CÁLCULO DE LA INTENSIDAD MACROSÍSMICA

La Intensidad de Arias (AI) y la intensidad macrosísmica se pueden relacionar a partir de observaciones empíricas, como por ejemplo la correlación propuesta por Cabañas et al. (1997), ecuación 1, para el área Mediterránea.

$$\ln(AI) = 1,50 \cdot I_L - 6,42 \quad (1)$$

Donde AI es la Intensidad de Arias en cm/s y I_L es la intensidad local MSK.

Calculando la diferencia entre la Intensidad de Arias del acelerograma disponible en la base y el calculado en la superficie de la columna de suelo, se han obtenido, para cada una de las columnas, el valor del incremento de la intensidad (ΔI) debido al efecto amplificador del suelo. En la tabla 3 se muestra el incremento de la intensidad macrosísmica calculada para cada clase de suelo aplicando la correlación empírica (1).

Tabla 3- Valores del incremento de la intensidad macrosísmica (ΔI MSK) calculados para cada clase de suelo. (Macroseismic intensity increment computed for each soil class.)

Clase de suelo	ΔI MSK
1	+0.0
2	+0.5
3	+0.5
4	+1.0

Los valores del incremento de intensidad macrosísmica debidos al efecto del suelo se usarán para aplicar un incremento al valor de intensidad para un suelo de referencia propuesto por la Norma de Construcción Sismorresistente Española (NCSE-02) para la ciudad de Málaga.

7. CONCLUSIONES

Se ha calculado la frecuencia fundamental del suelo mediante el método del cociente espectral H/V de medidas de ruido sísmico realizadas en la ciudad de Málaga. Los valores de la frecuencia fundamental varían de 0.4 Hz cerca de la desembocadura del Guadalhorce hasta 4.0 Hz en los alrededores de las colinas que rodean la ciudad. Se ha asignado un valor de la frecuencia fundamental para cada clase de suelo.

Se ha aplicado el método 1D lineal equivalente ProShake en cuatro columnas de suelo diferentes, una para cada clase de suelo y se ha obtenido la función de transferencia y el movimiento del suelo en cada una de las columnas. También se ha calculado la Intensidad de Arias de los acelerogramas obtenidos en la superficie de cada una de estas columnas, y mediante una correlación empírica se ha obtenido en incremento de la intensidad que se producirá en cada una de las columnas por efecto amplificador del suelo.

Los valores de la frecuencia fundamental calculados mediante simulación numérica en las columnas definidas se aproximan a los valores obtenidos de la aplicación del método de Nakamura a las medidas de ruido sísmico realizadas en los puntos cercanos a estas columnas.

Así pues los resultados del trabajo que aquí se presenta han permitido caracterizar las diferentes clases de suelo propuestas en la microzonación inicial en función del coeficiente *C*. Para cada columna de suelo se ha obtenido la frecuencia fundamental, la función de transferencia y el incremento de la intensidad macrosísmica asociado a las características locales del emplazamiento.

Los resultados obtenidos en el estudio de los efectos de suelo en Málaga, junto con las evaluaciones de vulnerabilidad de los edificios, se tendrán en cuenta para la estimación del riesgo sísmico en la ciudad de Málaga.

6. REFERENCIAS

- Cabañas, L., B. Benito y M. Herraiz (1997). "An approach to the measurement of the potential structural damage of earthquake ground motion". *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 26, pp: 79-92.
- Clavero, D. y L. Ramos (2005). "Riesgos Geológicos y Geotécnicos en el Término Municipal de Málaga". LIDYCCE, 42pp.
- Muñoz, D. y A. Udías (1988). "Evaluation of damage and source parameters of the Malaga earthquake of 9 October 1680". *Seismograms and Earthquakes of the World*, pp: 208-221.
- Nakamura, Y. (1989). "A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremors on the ground surface". *Quarterly Report of Railway Technical Research Institute*, 30-1, pp: 25-33

7. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el proyecto ERSE (Escenarios Realistas de Riesgo Sísmico en España) (REN2003-5178-C03-01), del Ministerio de Ciencia y Tecnología (en la actualidad Ministerio de Educación y Ciencia).