

EVALUACIÓN DE LA PELIGROSIDAD SÍSMICA DE LA CIUDAD DE BARCELONA EN TÉRMINOS DE ACELERACIÓN ESPECTRAL

J. Irizarry, X. Goula y T. Susagna

Instituto Cartográfico de Cataluña, Parc de Monjüic, s/n, Barcelona

jirizarry@icc.es

RESUMEN

Se ha realizado una evaluación de la peligrosidad sísmica en la ciudad de Barcelona en términos de valores espectrales de aceleración siguiendo la metodología propuesta por el proyecto europeo RISKUE (2001) con aplicación a 7 ciudades europeas. Métodos probabilistas y deterministas se aplicaron al catálogo sísmico y la zonación sismotectónica existentes para la región de Cataluña. Los parámetros de sismicidad en términos de intensidad obtenidos anteriormente por Secanell (1999) fueron transformados a una escala de magnitud local. La relación de atenuación de Ambraseys et al. (1996) y el programa CRISIS99 (Ordaz et al., 1999) se usaron para evaluar la peligrosidad en términos de valores espectrales de aceleración. Efectos de suelos son considerados por medio de factores de amplificación espectral utilizando funciones de transferencia de Cid et al. (2001). Los resultados obtenidos se resumen en forma de mapas de aceleración espectral para diferentes periodos estructurales y asociados a un periodo de retorno de 475 años.

Palabras Clave: espectros, peligrosidad sísmica, efectos de suelo, aceleración

SUMMARY

A preliminary seismic hazard assessment in terms of spectral values was performed for the city of Barcelona following the methodology proposed by the European project RISKUE (2001) with an application to 7 European cities. Both deterministic and probabilistic approaches were applied based on the existing seismic catalog and seismotectonic zonation of the Catalonia region. The seismicity parameters given to the seismotectonic zonation in terms of intensity developed by Secanell (1999) were transformed to a local magnitude scale. The attenuation relationship from Ambraseys et al. (1996) and the computer software CRISIS99 (Ordaz et al., 1999) were used to evaluate the seismic hazard both in terms of spectral acceleration values. Soil effects are considered by means of spectral amplification factors using the transfer functions from Cid et al (2001). The results obtained are summarized in the form of peak ground acceleration maps and pseudo-acceleration response spectra for selected structural periods and associated to a return period of 475 years.

Keywords: spectra, seismic hazard, soil effects, acceleration

Introducción

La sismicidad en Cataluña es moderada y las deformaciones tectónicas son débiles si se comparan a las propias de otros países de la región del Mediterráneo.



Debido al hecho de que la localización o existencia de fallas sísmicas activas no se conoce con precisión, se han definido zonas sísmicas basadas en la sismicidad y la tectónica de la región. Fleta et al. (1996) y Secanell (1999) usaron este criterio para definir la zonación sismotectónica de Cataluña y para calcular la peligrosidad de la región en términos de intensidad, respectivamente.

En este trabajo, la peligrosidad de la ciudad de Barcelona se calcula en términos de valores espectrales de aceleración. Los parámetros relativos a la actividad sísmica en términos de intensidad asociados a la zonación sismotectónica existente fueron transformados a una escala de magnitud local. El método probabilista se aplicó usando el programa de ordenador CRISIS99 (Ordaz et al., 1999) y la zonación sismotectónica existente. En el método determinista se utilizó una combinación sismos históricos de la región para obtener la peligrosidad sísmica determinista de la ciudad.

En ambos métodos se aplicaron factores de amplificación espectral para las diferentes zonas sísmica según efectos de suelos definidas por Cid et al. (2001). Los resultados se resumen en forma de mapas de aceleración espectral para varios periodos estructurales y espectros de respuesta para cada zona de suelo. Los resultados obtenidos en este trabajo se han comprado con los resultados de algunos estudios previos y hacen parte de los resultados obtenidos en otras 6 ciudades europeas dentro del proyecto RISKUE.

Objetivos

El objetivo de este trabajo es determinar la peligrosidad sísmica de la ciudad de Barcelona en términos de aceleración espectral por medio de métodos probabilistas y deterministas incluyendo efectos de suelos. Del mismo se obtendrán espectros de aceleración y mapas de aceleración espectral para diversos periodos estructurales que permitirán realizar una evaluación del riesgo sísmico de la ciudad.

Transformación de parámetros sísmicos

Los parámetros sísmicos en términos de intensidad obtenidos por Secanell (1999) para cada zona sismotectónica fueron transformados a una escala de magnitud local usando la relación intensidad-magnitud que se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1 - Relación magnitud-intensidad para Cataluña.

| Profundidad (Km) | Relación I_0 - M_L |
|------------------|------------------------|
| 5-10 | $M_L = 0.52I_0 + 1.20$ |
| 10-15 | $M_L = 0.52I_0 + 1.50$ |
| 15-20 | $M_L = 0.52I_0 + 1.80$ |

Para usar estos parámetros en el programa CRISIS99, los mismos fueron

transformados al logaritmo natural de la relación Gutenberg-Richter. La magnitud máxima y mínima requerida por CRISIS99 fue definida basándose en la intensidad máxima histórica de cada zona y una intensidad mínima de grado V fijada para cada zona, respectivamente. El mapa de sismicidad para la región de Cataluña y su zona de influencia se muestra en la Figura 1.

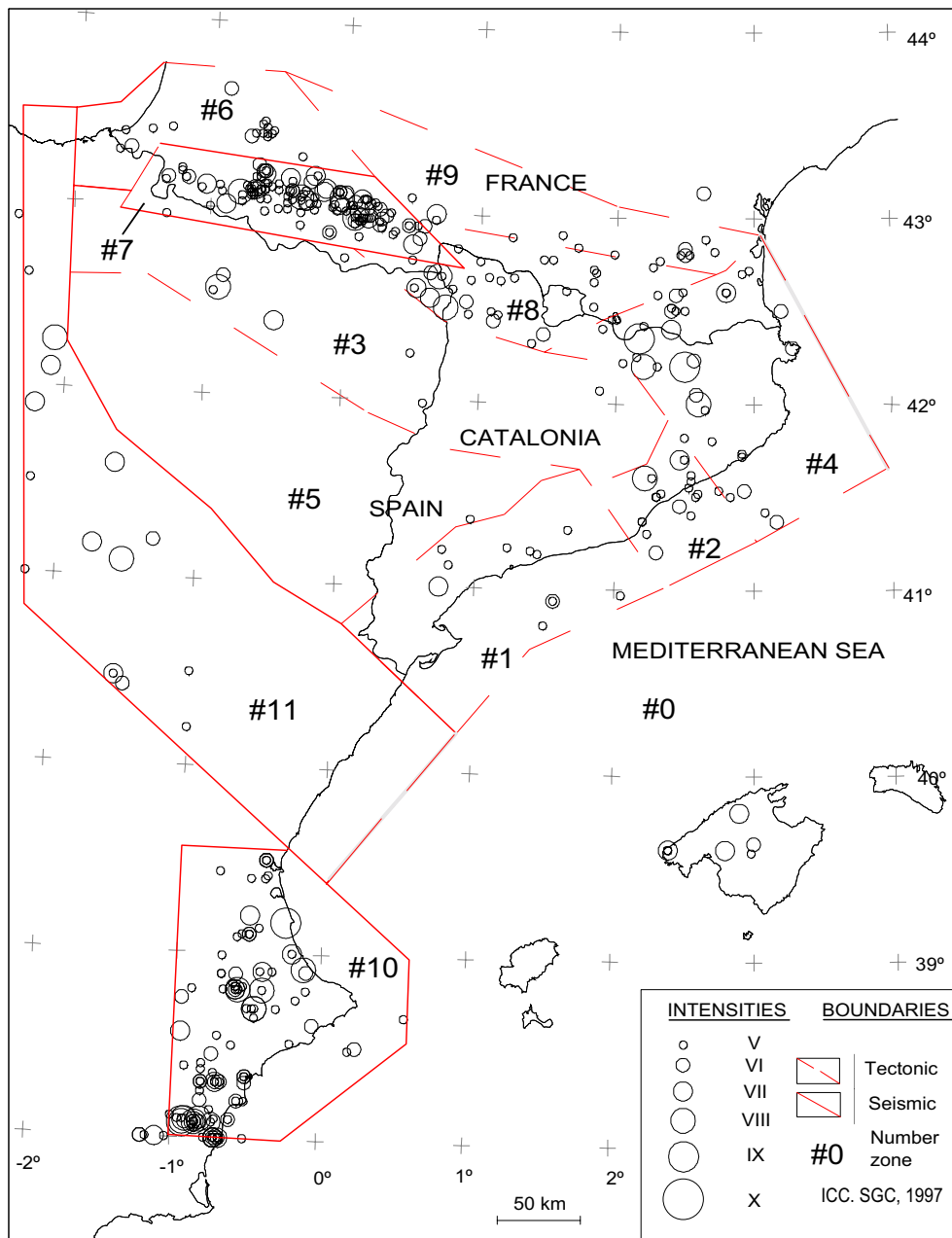


Figura 1 – Mapa de sismicidad para la región de Cataluña y su zona de influencia con los epicentros macrosísmicos de los pasados 750 años sin incluir réplicas.

Este mapa contiene los epicentros macrosísmicos de los pasados 750 años sin incluir réplicas. En la Tabla 2 podemos observar los parámetros sísmicos de cada zona transformados a la escala de magnitud local. Estos parámetros corresponden a la relación Richter-Gutenberg truncada que se muestra a continuación.

$$F(i) = \frac{e^{4\eta(i-4i_{min})} - 4e^{4\eta(i_{max}-4i_{min})}}{14e^{4\eta(i_{max}-4i_{min})}} \quad (1)$$

Tabla 2 – Parámetros sísmicos transformados a la escala de magnitud local.

| Zona | Superficie (km ²) | Profundidad (Km) | M _l min | M _l max | M | M |
|------|-------------------------------|------------------|--------------------|--------------------|-------|-------|
| 1 | 14100 | 7 | 3.8 | 5.4 | 3.585 | 0.100 |
| 2 | 4600 | 7 | 3.8 | 5.9 | 3.092 | 0.128 |
| 4 | 16190 | 10 | 4.1 | 6.7 | 2.415 | 0.157 |
| 5 | 23100 | 10 | 4.1 | 5.9 | 2.537 | 0.040 |
| 6 | 8000 | 10 | 4.1 | 4.8 | 3.802 | 0.099 |
| 7 | 7200 | 15 | 4.4 | 6.7 | 2.731 | 0.957 |
| 8 | 7700 | 15 | 4.4 | 6.7 | 3.300 | 0.218 |
| 9 | 9600 | 10 | 4.1 | 5.4 | 3.340 | 0.070 |
| 10 | 19700 | 10 | 4.1 | 7.2 | 2.310 | 0.635 |
| 11 | 40100 | 10 | 4.1 | 5.9 | 1.704 | 0.060 |

Relación de atenuación

La relación de atenuación desarrollada por Ambraseys et al (1996) se usó para calcular la peligrosidad sísmica en términos de valores espectrales de aceleración. Esta relación de atenuación, basada en datos europeos de movimiento fuerte, toma en consideración el tipo de suelo al calcular los valores espectrales de aceleración. La relación de atenuación de Ambraseys et al. (1996) presenta la siguiente forma:

$$\log(y) = C_1 + C_2 M + C_4 \log(r) + C_a S_a + C_s S_s + \omega P \quad (2)$$

$$r = \sqrt{d^2 + h_0^2}$$

La variable, “y”, representa el valor espectral de aceleración para cierta combinación de periodo estructural, magnitud (M) y distancia (r). La escala de magnitud usada es la magnitud de ondas de superficie. La distancia, r, esta definida como la distancia más corta entre la estación y la proyección en la superficie de la falla y se mide en kilómetros. Las constantes C₁, C₂, C₄, C_a, C_s, h₀, y P dependen del periodo estructural considerado. La constante P toma el valor de 0 para el percentil 50 y el valor de 1 para el percentil 84. Para esta evaluación de la peligrosidad, se usa el percentil 50 para obtener valores espectrales medios. Las constantes S_a y S_s pueden tener valores de 0 y 1. Para evaluar la aceleración espectral en roca, las constantes S_a y S_s toman el valor de 0. Para suelos compactos, S_a es igual a 1 y S_s es

igual a 0, mientras que para suelos blandos se invierten estos valores.

Se tuvo que buscar una escala de magnitud común entre los parámetros sísmicos de las zonas de Cataluña y la relación de atenuación de Ambraseys et al. (1996). Ante la falta de datos regionales para desarrollar una relación entre magnitud local, M_L , y la magnitud de superficie de ondas, M_S , y asumiendo que para la región de estudio las magnitudes M_L y m_b son aproximadamente iguales, se decidió usar la relación entre M_S y m_b propuesta por Dufumier (2002), desarrollada con sismos de Francia y sus zonas limítrofes, y que se muestra a continuación.

$$M_S = 1.75m_b + 4.43 \quad (3)$$

Peligrosidad sísmica determinista para un suelo medio

La peligrosidad sísmica determinista se ha definido en torno a dos sismos históricos que causaron daños en casas, iglesias y castillos de la ciudad de Barcelona. El primer evento considerado corresponde al sismo del 1448 en la región de Cardedeu con epicentro a 25 Km al norte del centro de la ciudad. Con una intensidad epicentral de VII grados en la escala MSK, este sismo representa el efecto de un sismo moderado y cercano a la ciudad. El otro evento es el sismo del 1428 en la región de Girona. Este sismo de intensidad de IX grados en la escala MSK ocurrió a una distancia epicentral de 90 Km al norte de Barcelona. El sismo del 1428 se incluye en el escenario determinista por representar los efectos de un evento de alta intensidad a una distancia considerable de la ciudad pudiendo presentar gran influencia en los periodos largos del espectro de respuesta de aceleración.

Las magnitudes asignadas a estos eventos se pueden observar en el recuadro de la Figura 2 y fueron calculadas usando las relaciones magnitud-intensidad para Cataluña y la relación M_S - m_b de Dufumier (2002). Su magnitud M_S junto a su distancia epicentral fueron incorporadas en la relación de atenuación de Ambraseys et al. (1996) (suelo rocoso) para obtener los espectros de respuesta de aceleración de la Figura 2. Como se puede observar el sismo del 1428 domina el espectro para los periodos largos. La envolvente de ambos espectros se considera como el espectro determinista representativo para la ciudad de Barcelona dado que se ha calculado con las distancias mínimas entre la ciudad y los epicentros de los sismos más importantes ocurridos históricamente en la región. La Figura 2 muestra la incertidumbre del espectro de aceleración determinista debido a la desviación estándar de la relación de atenuación de Ambraseys et al., (1996).

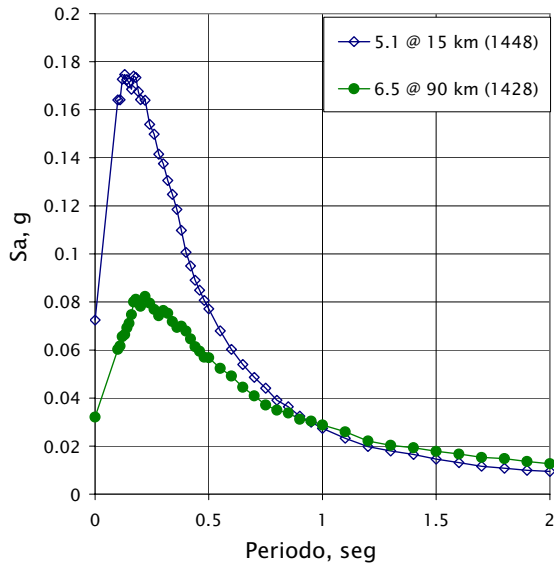


Figura 2 – Sa en Barcelona debido a los sismos de 1448 y 1428.

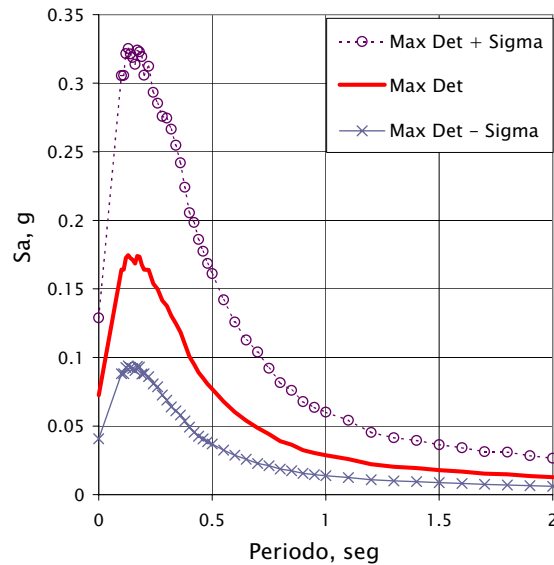


Figura 3 – Sa determinista para suelo medio en Barcelona.

La aceleración máxima del terreno obtenida en este escenario determinista corresponde a una aceleración de 0.07g. Según la relación entre el PGA y la intensidad presentada en la Norma Española, NCSR-02 (2002), la intensidad de VI-VII grados determinada por Secanell (1999) para la ciudad de Barcelona corresponde a una aceleración pico del suelo de 0.06g. Por lo que se puede observar una buena correspondencia entre los niveles de aceleración máxima del terreno obtenido en ambos casos.

Peligrosidad sísmica probabilista para un suelo medio

La peligrosidad sísmica probabilista para un suelo medio en Barcelona se basó en los parámetros sísmicos obtenidos para la zonificación sismotectónica de la región de Cataluña por Secanell (1999). Estos parámetros transformados a una escala de magnitud junto a la relación de atenuación de Ambraseys et al. (1996) se implementaron en el programa de ordenador CRISIS99 para obtener la peligrosidad sísmica en suelo medio para la ciudad. La malla de cálculo sobre la ciudad tenía un intervalo de 0.015 grados tanto en longitud como en latitud.

De los resultados obtenidos se pudo observar que la variación de los valores de aceleración espectral dentro de la ciudad de Barcelona es mínima. Por esta razón se puede considerar que el espectro de respuesta de aceleración para un suelo medio es constante dentro de la ciudad de Barcelona. La Figura 4 muestra los espectros de respuesta para un suelo medio asociados a periodos de retorno de 100, 475, 1000 y 1500 años. En esta figura también se muestran los valores de la aceleración máxima del terreno (PGA) asociados a estos periodos de retorno. El PGA asociado a un periodo de retorno de 475 años es 0.10g, siendo un 30% mayor que el correspondiente valor de 0.06g según el estudio de Secanell (1999) usando la transformación PGA-intensidad propia de la norma sismorresistente española, NCSR-02 (2002).

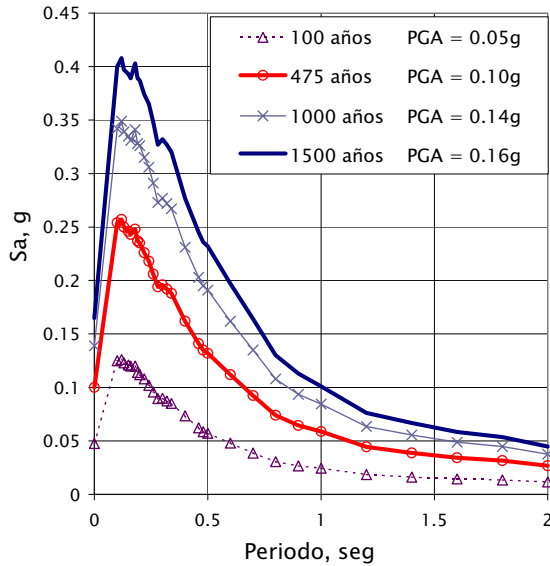


Figura 4 – Sa para suelo medios asociados a diferentes períodos de retorno.

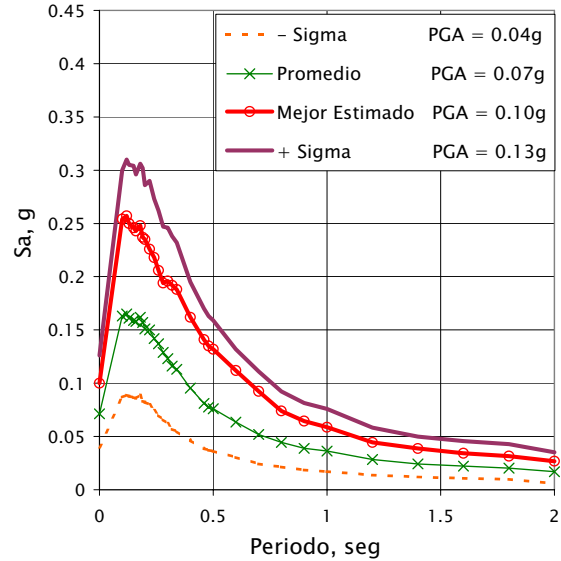


Figura 5 – Influencia del ω de la atenuación de Ambraseys et al. (1996) en el Sa para 475 años.

La Figura 5 muestra la influencia de la desviación estándar, ω , de la relación de atenuación de Ambraseys et al. (1996) en el espectro de aceleración obtenido para un suelo medio en Barcelona. El programa CRISIS99 fue diseñado de manera que siempre integra con respecto a la desviación estándar de la relación de atenuación, generando así espectros considerados como el mejor estimado posible. Para generar espectros promedios, espectros más ω , y espectros menos ω se usó en el programa CRISIS99 una desviación estándar cercana a cero.

El espectro que se recomienda para la ciudad de Barcelona es el considerado como mejor estimado posible. Este espectro es entre un 40 y un 75 % mayor que el espectro promedio, y entre un 15 y un 30% menor que el espectro más un ω .

Efectos de suelos: factores de amplificación espectral

Cid et al. (2001) desarrollaron una zonación sísmica para la ciudad de Barcelona teniendo en cuenta efectos de suelo, Figura 6, y asignaron a cada zona una función de transferencia promedio. El suelo tipo I está formado por capas superficiales de materiales aluviales del Holoceno, mientras que el suelo tipo II consta de materiales superficiales del Pleistoceno. El suelo tipo III se representa por una capa de materiales del Cuaternario sobre una capa de materiales del Pleistoceno. La zona R, o roca de referencia, se caracteriza por una función de transferencia plana.

Para calcular los espectros con efectos de suelo propios de cada zona fue necesario encontrar registros de aceleración reales cuyo espectro de aceleración tuviera la misma forma que los espectros obtenidos para un suelo medio en Barcelona. Los registros de aceleración fueron elegidos de la base de datos de movimientos

fuertes europeos ENEA/IC/CEA/SSN (2000). Se tomó la precaución de que la diferencia entre el promedio de los espectros de respuesta reales y los espectros obtenidos para suelo medio no excediera del 20 %.

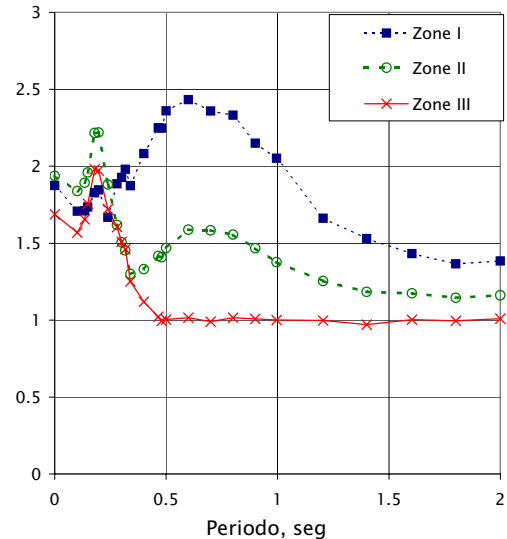
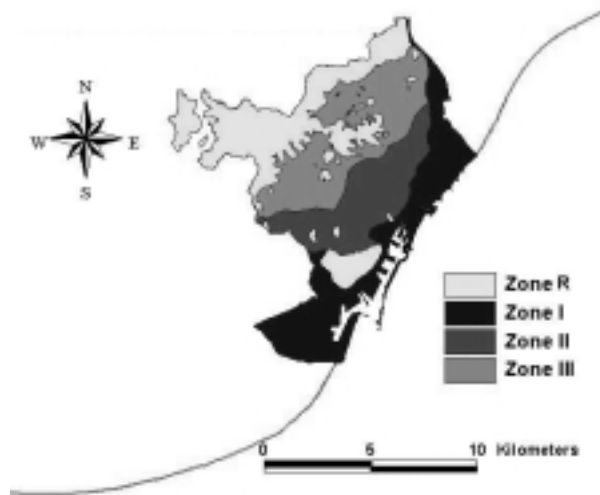


Figura 6 – Zonación sísmica de Barcelona **Figura 7 – Factores de amplificación teniendo en cuenta en efectos de suelo, espectral obtenidos para las tres zonas de suelo en Barcelona.** Cid et al. (2001).

Ambraseys et al. (1996) define su atenuación para un tipo medio de roca con velocidad de corte mayor de 750 m/s, por esto pareció adecuado usar los afloramientos rocosos del Terciario como referencia. Una vez reducidas las funciones de transferencia de Cid et al. (2001) usando el Terciario como referencia, se realizó la convolución de estas con los registros de aceleración reales. De esta convolución se obtuvo un espectro para cada zona que incluye efectos del suelo y al ser comparado con el espectro para suelo medio obtenido para la ciudad se obtuvieron los factores de amplificación. Los factores de amplificación se muestran en las Figura 7.

Peligrosidad sísmica con efectos de suelo

Los factores de amplificación obtenidos fueron aplicados al espectro de respuesta de aceleración para suelo medio probabilista, así como al determinista, para obtener los espectros de respuesta recomendados para cada una de las zonas de suelos en Barcelona. Las Figuras 8 y 9 muestran los mapas de la distribución del nivel de PGA determinista y probabilista, respectivamente, en la ciudad de Barcelona.



Figura 8 – Valores del PGA (g) esperado en Barcelona según el método determinista.



Figura 9 – Valores del PGA (g) esperado en Barcelona según el método probabilista.

Los espectros de aceleración con efectos de suelos para la ciudad de Barcelona obtenidos mediante métodos deterministas y probabilistas se muestran en las Figuras 10 y 11, respectivamente. Hay que destacar las importantes amplificaciones obtenidas de un factor cerca de 2 para todos los tipos de suelo a una periodo de 0.2 segundos y para periodos más largos hasta 1 segundo para los suelos más blandos de tipo I en las zonas de materiales deltaicos.

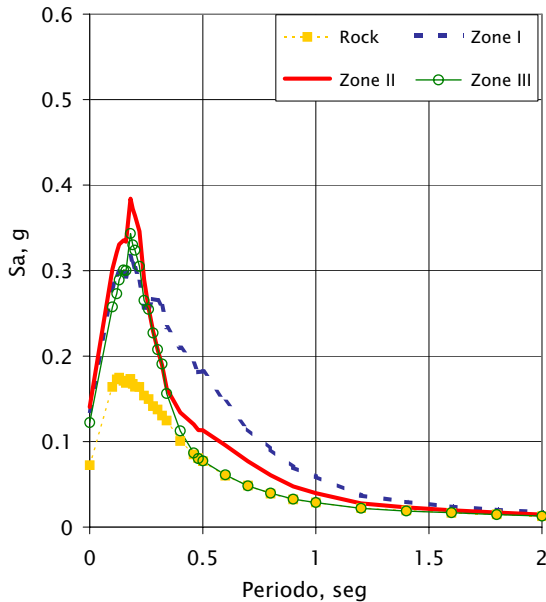


Figura 10 – Sa determinista (promedio) con efectos de suelos para la ciudad de Barcelona.

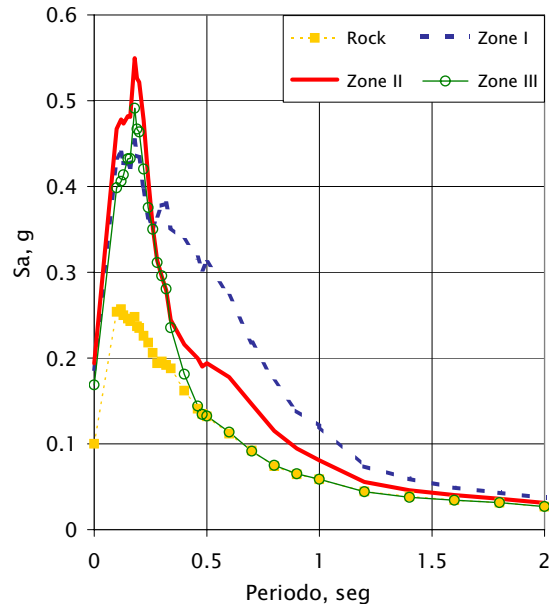


Figura 11 – Sa probabilista (mejor estimado posible) con efectos de suelos para Barcelona.

Conclusiones

La evaluación de la peligrosidad sísmica en términos de valores espectrales de aceleración para la ciudad de Barcelona se realizó usando métodos probabilistas y

deterministas. Los resultados del pico de aceleración obtenidos se encuentran dentro del rango de valores obtenidos en estudios previos como se puede observar en la Figura 11. El PGA determinista obtenido en este estudio es muy similar al relacionado con Secanell (1999) y al límite inferior del rango propuesto para Barcelona por el proyecto GSHAP (Jiménez et al. 1999). Mientras tanto el PGA obtenido en el método probabilista para un periodo de retorno de 475 años es mayor que el propuesto por Secanell (1999) y esta dentro del rango de los resultados del GSHAP.

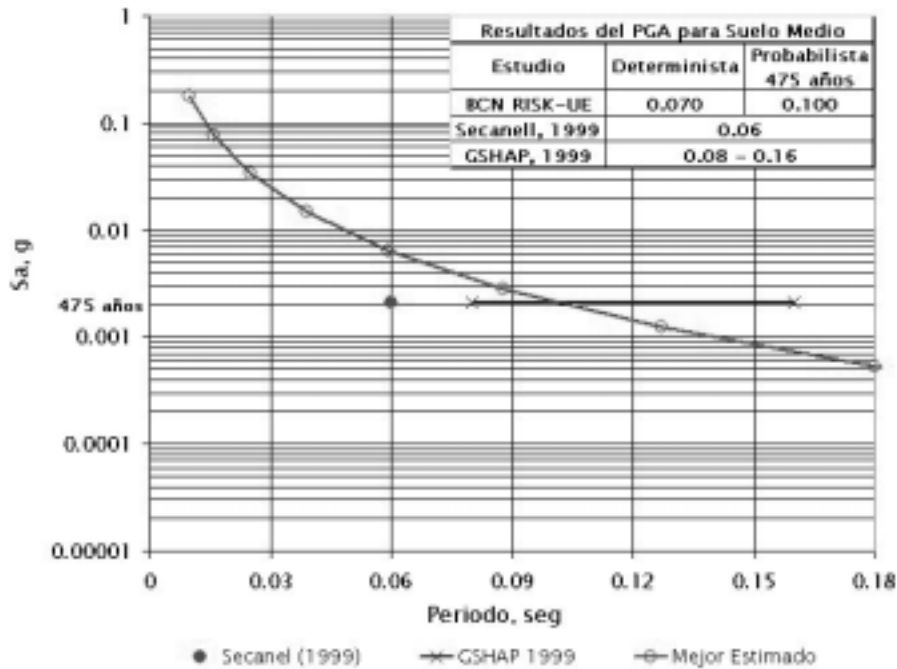


Figura 11 – Comparación de resultados para el PGA con algunos estudios previos.

Los factores de amplificación obtenidos implican amplificaciones espectrales significativas que son mayores a las presentadas por la ley de atenuación de Ambraseys et al. (1996) y la norma sismorresistente española, NCSR-02 (2002). Aun así los niveles de amplificación obtenidos son muy similares a los propuestos en el Eurocódigo 8 y a los presentados por registros de aceleración reales provenientes de sismos similares al que se espera puede afectar a la ciudad de Barcelona. La clase de suelo A del Eurocódigo 8 presenta un espectro similar al obtenido para la zona de suelo R de Barcelona. Las amplificaciones obtenidas para las zonas de suelo II y III en Barcelona corresponden a las propias de la clase de suelo B del Eurocódigo 8, mientras que las amplificaciones obtenidas para la zona de suelo I en Barcelona se encuentran entre las amplificaciones esperadas para las clases de suelo C y D del Eurocódigo 8.

Los resultados de los espectros de respuesta se han incorporado en mapas por medio de un sistema geográfico de información que serán usados como datos de entrada en el desarrollo de escenarios de riesgo sísmico de la ciudad de Barcelona.

Referencias:

- € Ambraseys, N. N., Simpson, K. A., y Bommer, J.J. (1996), "Prediction of horizontal response spectra in Europe". *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, N° 25, pp. 371-400.
- € Cid, J., Susagna, T., Goula, X., Chavarria, L., Figueras, S., Fleta, J., Casas, A., y Roca, A. (2001), "Seismic Zonation of Barcelona Based on Numerical Simulation of Site Effects". *Pure Applied Geophysics*, Vol. 158, N° 12, pp. 2559-2577.
- € ENEA/IC/CEA/SSN (2000), "European Strong-Motion Database". CD-ROM
- € Dufumier, H. (2002), "Synthesis of magnitude and focal mechanism computations for the M_w 4.5 earthquakes in France for the period 1995-2000". *Journal of Seismology*, N° 6, pp.163-181.
- € Fleta, J., Escuer, J., Goula, X., Olivera, C., Combes, Ph., Grellet, B. y Granier, Th. (1996), "Zonación tectónica, primer estadio de la zonación sismotectónica del NE de la Península Ibérica". (Cataluña). *Geogaceta*, N° 20, pp. 853-856.
- € Jiménez, M.J., García-Fernandez, M. and the GSHAP Ibero-Maghreb Working Group, (1999), "Seismic hazard assessment in the Ibero-Maghreb region". *Annali di Geofisica*, Vol. 42, No. 6, pp. 1057-1065
- € NCSR-02 (2002), "Normativa de Construcción Sismorresistente Española". Real Decreto 997/2002. Boletín Oficial del Estado No 244 del 11 de octubre de 2002.
- € Ordaz, M., Aguilar, A. y Arboleda, J. (1999), "Program for computing seismic hazard, CRISIS99-18". UNAM, Mexico.
- € RISKUE (2002), "RISKUE: An advanced approach to earthquake risk scenarios with application to different European cities". Proyecto Unión Europea. Contrato: EVK4-CT-2000-00014
- € Secanell, R. (1999), "Avaluació de la perillositat sísmica a Catalunya: anàlisi de sensibilitat per a diferents models d'ocurrència i paràmetres sísmics". PhD Thesis. University of Barcelona, 335 pp.

Agradecimientos

Este trabajo se ha realizado como parte de la participación de la ciudad de Barcelona en el proyecto europeo "RISKUE: an advanced approach to earthquake risk scenarios with application to different European cities" financiado por la Comunidad Europea bajo el contrato: EVK4-CT-2000-00014.