

MAPA DE ZONAS SÍSMICAS DE CATALUÑA

R. Secanell¹, X. Goula², T. Susagna^{1,2}, J. Fleta², A. Roca²

¹Observatori Fabra

²Servei Geològic, Institut Cartogràfic de Catalunya

RESUMEN

Para la evaluación de la peligrosidad sísmica en Cataluña se ha utilizado un nuevo catálogo sísmico revisado y una nueva zonación sismotectónica. Se han ajustado los datos sísmicos a tres modelos de ocurrencia de terremotos: una distribución doblemente truncada del tipo Gutenberg-Richter, un modelo de valores extremos (Gumbel I y III), y un modelo poissoniano no estacionario. Después de verificar el carácter cuasi estacionario del catálogo sísmico, la evaluación de la peligrosidad sísmica se ha realizado mediante un modelo probabilista y un modelo determinista en términos de intensidad macrosísmica. La precisión de la evaluación probabilista de la peligrosidad sísmica se ha estimado mediante un análisis de sensibilidad de tipo Montecarlo. Se presenta un mapa de zonas sísmicas obtenido a partir del análisis conjunto probabilista y determinista para un suelo de tipo medio. Por último, se consideran, a escala regional, los efectos de suelo.

Palabras clave: zonación sísmica, peligrosidad, períodos de retorno, efectos de suelo..

SUMMARY

In order to evaluate the seismic hazard in Catalonia a new earthquake catalogue and a new seismic zonation have been used. Seismic data have been adjusted to three occurrence models: a doubly truncated distribution of Gutenberg-Richter, a model of extreme values (Gumbel I and III), and a poissonian non-stationary model. After verifying the quasi-stationary character of the seismic catalogue, the evaluation of seismic hazard has been carried out through a probabilistic model and a deterministic model in terms of macroseismic intensity. The accuracy of the seismic hazard probabilistic evaluation has been estimated by means of a Montecarlo sensitivity analysis. It is presented a map of seismic zones obtained from a joint probabilistic and deterministic process for mean soil condition. Finally soil effects are considered at a regional scale.

Key words: seismic zonation, hazard assessment, return periods, local effects.

Introducción

Hasta la fecha, existen estudios de peligrosidad sísmica a escala de la totalidad de la Península Ibérica (Martín Martín, 1984), y también de distintas regiones, como por ejemplo de la Comunidad Valenciana (Giner, 1996). Los últimos estudios realizados en Cataluña, como los de Egozcue et al. (1991) y Vives (1991), mostraban la necesidad de revisar los datos sísmicos para reducir las incertidumbres en los resultados de las evaluaciones.

En este trabajo se ha desarrollado y aplicado una metodología de cálculo, que incluye estimación de incertidumbres y que se puede esquematizar de la siguiente forma:

- Consideración de un nuevo catálogo sísmico para Cataluña (Susagna et al., 1999; Susagna y Goula, 1999) y regiones adyacentes a partir de la revisión y comparación crítica de los datos proporcionados por diversas fuentes.
- Consideración de una zonación sismotectónica de Cataluña y regiones vecinas que tiene en cuenta los actuales conocimientos geológicos, geofísicos y sísmicos de la región a zonificar , basándose en criterios expresados de manera explícita (Fleta et al., 1996; Autran et al., 1998).
- Determinación de los modelos de sismicidad más representativos de la zona. Para ello, se han ajustado los datos sísmicos disponibles a diversas distribuciones de ocurrencia temporal de terremotos. Las distribuciones ajustadas son la distribución poissoniana estacionaria equivalente a la de Gutenberg-Richter, la de valores extremos Gumbel I y III y, por último, una distribución poissoniana no estacionaria.
- Determinación de leyes de atenuación de la intensidad sísmica en función de la distancia que más se ajustan a los datos disponibles en Cataluña, para las distintas zonas.
- Con estas premisas se calcula la peligrosidad sísmica en términos de intensidad macrosísmica. Se presenta el mapa probabilista de la peligrosidad sísmica realizado con distribuciones de tipo Gutenberg-Richter y un método del tipo Mc Guire (1976). Se realiza un estudio, a partir de simulaciones de tipo Montecarlo, para determinar la incertidumbre inherente a la realización del mapa probabilista de peligrosidad sísmica. También se presenta un mapa determinista de peligrosidad sísmica. El mapa de zonas sísmicas que se propone combina el mapa probabilista de peligrosidad sísmica para un periodo de retorno de 500 años y los trazos característicos del mapa determinista.
- Por último, se tienen en cuenta de forma simplificada los efectos locales considerando las características geológicas de los diferentes núcleos urbanos de los municipios de Cataluña.

En este trabajo se ha tenido especial cuidado en la elección de los datos de entrada necesarios para el cálculo de la peligrosidad sísmica dada la importancia que éstos tienen en la estimación de la peligrosidad sísmica y su precisión.

Datos sísmicos

Para la evaluación de la peligrosidad sísmica se ha realizado, en primer lugar, un análisis de los datos de sismicidad disponibles. Para ello, se ha utilizado un nuevo catálogo macrosísmico que contiene la información proporcionada fundamentalmente por las siguientes fuentes:

- Para la zona de Cataluña y sus alrededores la información ha sido extraída del catálogo realizado por Susagna y Goula (1999) que constituye el Volumen 1 del Atlas Sísmico de Cataluña (Susagna et al., 1999).
- Para la Comunidad Valenciana se han utilizado los datos proporcionados por el Instituto Geográfico Nacional (IGN, 1991), que incluye el catálogo de Mezcua y Martínez Solares (1984), completados por la revisión de Bisbal (1984).
- Para la región de la parte noroccidental de los Pirineos se han utilizado los datos proporcionados por IGN (1991) y la base de datos francesa SIRENE (1994).

Para la evaluación de la peligrosidad sísmica se ha adoptado también una zonación sismotectónica a partir de los resultados de estudios recientes realizados en Cataluña (Fleta et al., 1996) y en Francia (Autran et al.1998) en las que de manera explícita se detallan los criterios utilizados. En este estudio se han caracterizado las líneas que definen cada zona según unos parámetros geológicos (allí donde es posible) o de agrupamientos de sismicidad.

En la figura 1 se muestran los epicentros de sismos de intensidad igual o superior a V (MSK) de la zona de estudio (Cataluña) así como los epicentros de las regiones vecinas que pueden influir en el cálculo de la peligrosidad. Están también marcadas las líneas que definen las distintas zonas sismotectónicas, señaladas en trazo discontinuo cuando se han seguido criterios tectónicos y en continuo cuando sólo se ha considerado la sismicidad (Fleta, J. & Goula, X., 1999)

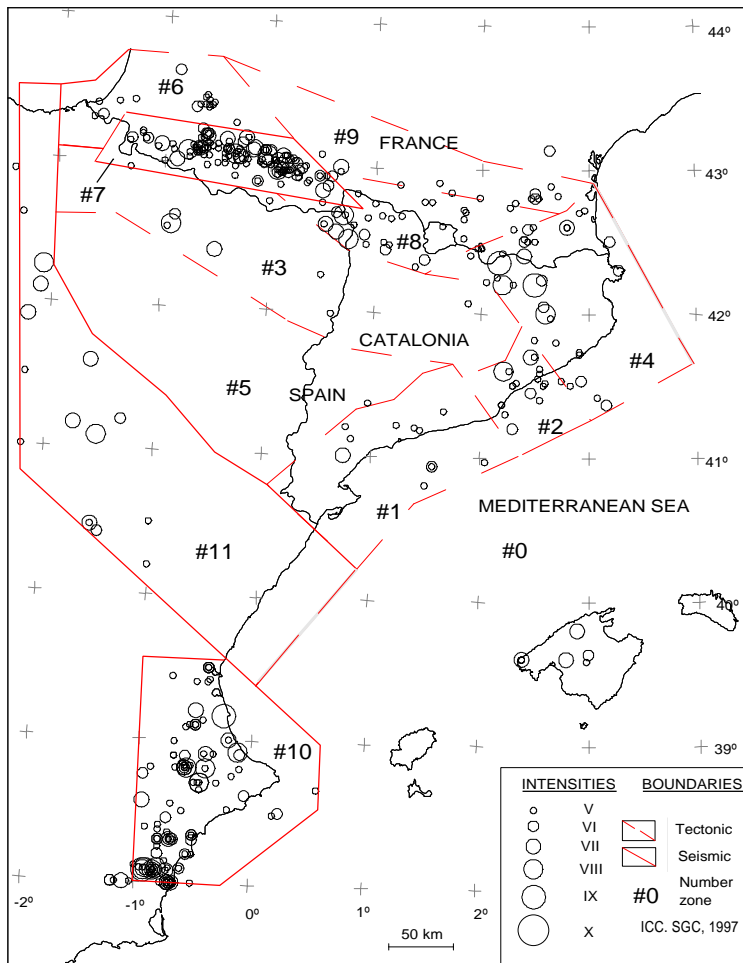


Figura 1. Zonación sismotectónica de Cataluña y regiones vecinas.

Modelos de ocurrencia temporal de terremotos

Se ha realizado un exhaustivo análisis de completitud del catálogo macrosísmico utilizando análisis gráficos y analíticos (Achard & Goula, 1980) tanto para cada una de las zonas sismotectónicas definidas como para toda Cataluña considerada como una única zona. Una vez realizada la selección de los datos se ha procedido al análisis de la sismicidad a partir del ajuste, en cada zona sismotectónica, de los datos sísmicos disponibles a varios modelos de ocurrencia temporal de sismos: modelos poissonianos estacionarios y modelos poissonianos no estacionarios.

Los modelos estacionarios utilizados han sido, en primer lugar, la distribución de Gutenberg-Richter doblemente truncada (Goula & Godefroy, 1985):

$$\Pr(I \geq i) = a * (\exp(-b * (i - i_0)) - \exp(-b * (i_{max} - i_0))) / (1 - (\exp(-b * (i_{max} - i_0)))) \quad (1)$$

donde P_r representa la probabilidad de obtener una intensidad epicentral igual o superior a una intensidad i dada, i_0 representa la intensidad epicentral mínima tenida en cuenta y i_{max} representa la intensidad epicentral máxima que se puede alcanzar en la zona de estudio.

En segundo lugar, se han ajustado los datos sísmicos a la distribución de valores extremos Gumbel I:

$$G_n^1(z) = \exp[-\exp(-b_G(z-u))] \quad (2)$$

donde los valores característicos de la distribución de Gumbel I b_G e u se obtienen mediante una regresión lineal. Por último, los datos sísmicos han sido ajustados a la distribución de valores extremos de Gumbel III,

$$G_n^3(z) = \exp\left[-\left(\frac{w-z}{w-U}\right)^k\right] \quad (3)$$

donde los valores característicos de la distribución de Gumbel III, U , k y w han sido obtenidos mediante una regresión lineal, fijando primero el valor de w al máximo valor de la intensidad, i_{\max} .

El modelo poissoniano no estacionario ajustado ha sido el propuesto por Savy (1978), con una función densidad de probabilidad del tipo:

$$P(N_s = k) = \frac{e^{-a(s)} a(s)^k}{k!} = \frac{\left(\frac{c}{b} s^b\right)^k e^{-\frac{c}{b} s^b}}{k!} \quad (4)$$

donde la función densidad de probabilidad de tener k terremotos en un tiempo s sigue una distribución poissoniana con la tasa de anual de ocurrencia de terremotos variable en función del tiempo transcurrido desde el último evento.

La aplicación del último modelo permite obtener como resultado (Secanell, 1999) un comportamiento cuasi estacionario de la sismicidad de la región por lo que el modelo de Gutenberg-Richter será adecuado para los cálculos de peligrosidad.

Atenuación de la intensidad sísmica

Se han hallado las leyes de atenuación de la intensidad con la distancia para los sismos de los que se dispone de datos suficientes de intensidad puntual. Estos terremotos corresponden a los más importantes ocurridos en Cataluña. La ley de atenuación utilizada se deriva del modelo de atenuación de Sponheuer (1960), con dos parámetros ajustables, el coeficiente de atenuación anelástico y la profundidad del foco sísmico.

Los ajustes realizados muestran una baja atenuación de la intensidad en Cataluña con valores del coeficiente de atenuación anelástica menores a 0.001 km^{-1} . Estos bajos valores de este coeficiente coinciden con otros estudios realizados en la región (Canas et al., 1987; Vives, 1991, Secanell et al., 1996). Los valores para el otro parámetro, profundidad focal, oscilan entre 5 y 15 km.

Evaluación de la peligrosidad sísmica

Una vez definidas las leyes de atenuación para cada zona sismotectónica se han realizado cálculos de peligrosidad sísmica utilizando tres métodos: un método determinista, un

método probabilista utilizando la distribución de Gutenberg-Richter doblemente truncada y otro método probabilista zonificado que utiliza parámetros deducidos de distribuciones de valores extremos.

Con cada uno de los tres métodos se han obtenido mapas de peligrosidad sísmica expresados en términos de intensidad. El mapa determinista de la figura 2 muestra las intensidades máximas probablemente percibidas a lo largo de la historia sísmica conocida en Cataluña.

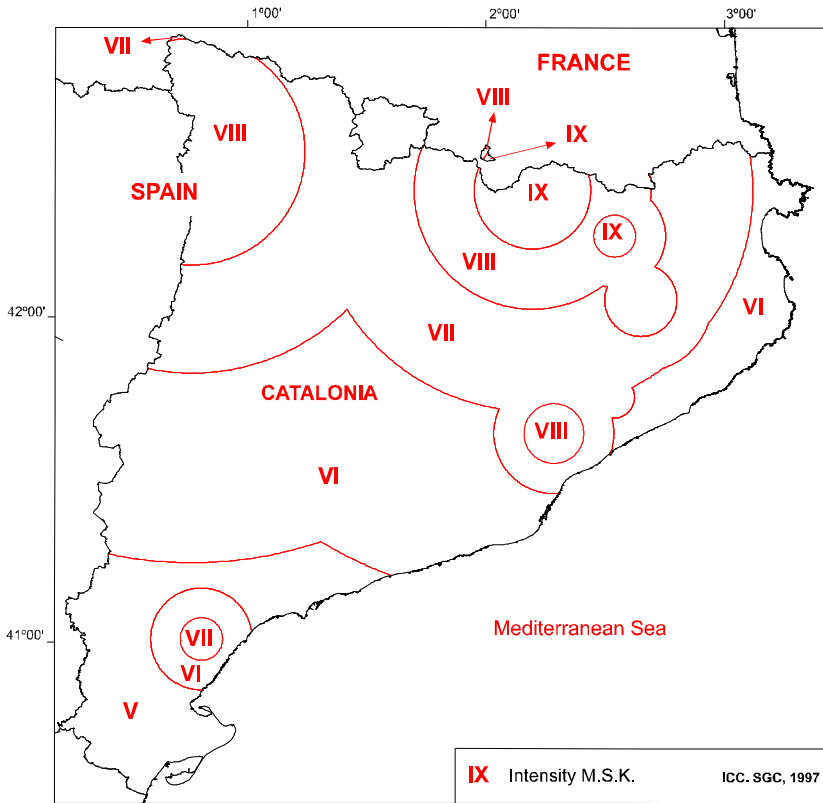


Figura 2. Mapa de intensidades máximas probablemente percibidas (1300-1996).

Los mapas de peligrosidad sísmica basados en los parámetros de la distribución de Gumbel I no muestran diferencias significativas con los mapas obtenidos utilizando la distribución de Gutenberg-Richter doblemente truncada, que es la utilizada en el mapa presentado en la figura 3, en el que se muestran las intensidades asociadas a un período de retorno de 500 años.

El procedimiento usado para la estimación probabilista de la peligrosidad sísmica está esencialmente basado en el modelo de Cornell (1968), modificado con posterioridad por McGuire (1976) y adaptado a las leyes de atenuación de tipo Sponheuer y un modelo doblemente truncado por Goula & Godefroy (1985). En el modelo, la sismicidad se considera homogénea en cada zona sismotectónica y caracterizada por los parámetros sísmicos definidos por el modelo de ocurrencia temporal de terremotos. El método calcula la probabilidad de excedencia de diferentes intensidades en cada emplazamiento debido a las distintas zonas sismotectónicas teniendo en cuenta las leyes de atenuación. Se obtienen valores comprendidos entre V-VI ($I > 5.25$) en la parte sur hasta VII-VIII ($I > 7.25$) en la zona noroccidental de la región. Para determinar la incertidumbre en los cálculos de peligrosidad se ha realizado un análisis de sensibilidad. Para ello, se ha desarrollado un sistema estadístico de tipo Montecarlo que permite determinar el error cometido en el cálculo directo de la peligrosidad sísmica de una manera más realista. El cálculo de errores en seis localidades, Barcelona, Girona, Lleida, Tarragona, Olot y Viella que, por su situación geográfica, son

representativas del error que se puede esperar en cualquier punto de Cataluña. En la figura 4 se compara, en el caso de Barcelona, las frecuencias de las intensidades obtenidas en la simulación de Montecarlo para un período de 500 años, para 100 realizaciones, con las esperadas según una distribución gaussiana. Se ha podido constatar que la desviación típica, es decir, el error cometido en el cálculo de la peligrosidad sísmica para los periodos de retorno de 500, 1000, 2000 i 10000 años oscilan entre los 0.25 y los 0.45 grados de intensidad MSK. Este error es del todo aceptable dada la naturaleza del parámetro intensidad.

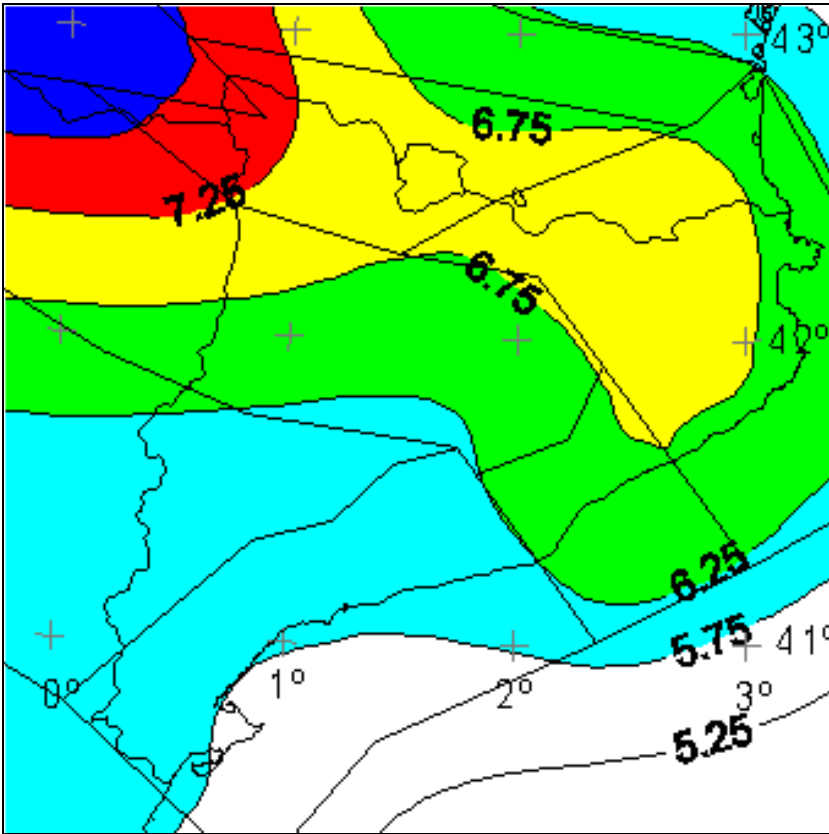


Figura 3. Mapa probabilista de peligrosidad sísmica expresado por las intensidades asociadas (con dos decimales) a un periodo de retorno de 500 años.

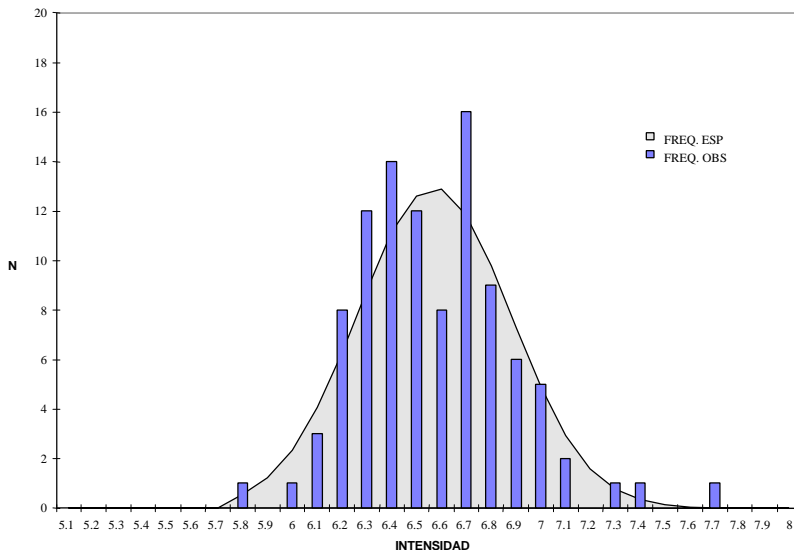


Figura 4. Comparación de las frecuencias observadas de las intensidades asociadas a un periodo de retorno de 500 años obtenidas con 100 simulaciones con las frecuencias esperadas según una distribución gaussiana para la ciudad de Barcelona.

MAPA DE ZONAS SÍSMICAS

ICC / SGC

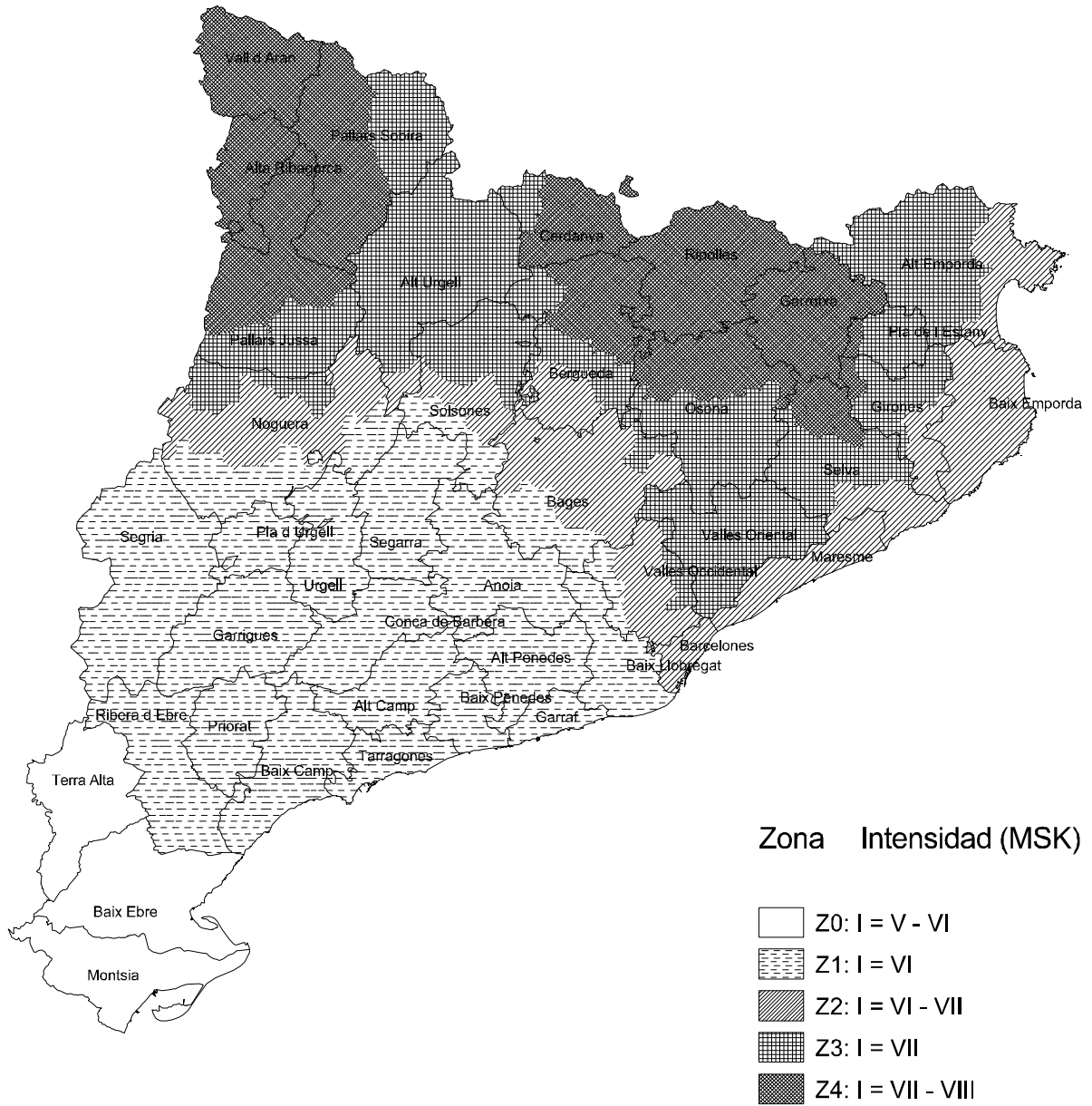


Figura 5. Mapa de zonas sísmicas de Cataluña.

A continuación se propone un mapa de zonas sísmicas (figura 5) que combina las características fundamentales de los mapas determinista y probabilista. El mapa se ha constituido a partir del mapa de intensidades asociadas a un período de retorno de 500 años, las cuales se han modificado en medio grado si la diferencia con el mapa determinista es mayor de 1 grado. Los valores finales obtenidos corresponden en la parte central de Cataluña a valores medios de la distribución de intensidades para un período de retorno de 500 años (figura 3). En la parte Norte, a valores medios más uno o dos veces la desviación standard y en la parte sur a valores medios menos una o dos veces la desviación standard.

Por último y a efectos de su aplicación a los planes de emergencia de Protección Civil, se han considerado los efectos locales para tener en cuenta la amplificación producida por los suelos blandos. Los efectos locales se han incorporado según la caracterización geológica de los 944 núcleos urbanos de Cataluña (Fleta et al., 1998) donde se distinguen 4 tipos de suelos que van desde roca (R) a suelos A, B y C de menos a más blando. Del total de municipios el 45 % se encuentran en suelo de tipo medio A, por lo que podemos considerar que el mapa de zonas sísmicas está referenciado a este tipo de suelo. Para los dos tipos de suelos más blandos (B y C) se aumenta la intensidad esperada del mapa de zonas sísmicas en 0.5 grados. Teniendo en cuenta que una parte importante de núcleos urbanos se asientan en valles aluviales, un 26 % de las poblaciones aumenta en medio grado la intensidad del mapa de zonas sísmicas de la figura 5.

Conclusiones

Del análisis probabilista de la peligrosidad sísmica combinado con el análisis determinista se ha obtenido un mapa de zonas sísmicas en términos de intensidad macrosísmica. La máxima intensidad que presenta es de VII-VIII en dos zonas, ambas en la zona pirenaica, una centrada en la comarca del Ripollés y una segunda en la Vall d'Aran y Alta Ribagorça. Estos valores máximos están de acuerdo con el valor máximo propuesto por la norma sismorresistente NCSE-94 dado para Cataluña, pero que sólo aparece en la zona del Ripollès. También queda ampliada a la mayor parte de la región el área con intensidad igual o superior a VI (MSK).

La consideración de la geología de las zonas urbanas permite corregir el mapa del posible efecto de amplificación producido por la presencia de suelos blandos.

Referencias

- Achard, V. & Goula, X. (1988), "Contribution a un zonage sismotectonique de la France. Calcul des caracteristiques sismiques necessaires a une evaluation probabiliste de l'alea sismique". Rapport SASC/88-58. Commissariat à l'Energie Atomique. Institut de protection et de sûreté nucléaire. 93 pp.
- Autran, A., Blès, J. L., Combes, Ph., Cushing, M., Dominique, P., Durouchoux, Ch., Gariel, J. C., Goula, X., Mohammadium, B. & Terrier, M. (1998), "Probabilistic seismic hazard assesment in France. Part One: Seismotectonic zonation". Proc. Eleventh European Conference on Eartquake Engineering. Paris. (CD-ROM).
- Bisbal, L. (1984), "Estudio de la distribución de intensidades sísmicas en el ámbito valenciano. Su incidencia en las obras públicas". Tesis de doctorado. Universidad Politécnica de Valencia.
- Canas, J. A., Egozcue, J. J., Pujades, L., & Pérez, J. A. (1987), "Crustal coda Q in the Iberian Peninsula, Am. Geophys 5B, 657-662.
- Cornell, C. A. (1968), "Engineering Seismic Risk Analysis". Bull. Seismol. Soc. Am. Vol. 58, 1583-1606.

- Egozcue, J.J., Barbat, A., Canas, J.A., & Miquel, J. (1991), "A method to estimate intensity occurrence probabilities in low seismic activity regions". *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 20, 43-60.
- Fleta, J. & Goula, X. (1999), "Zonificació sismotectónica de Catalunya" Atlas Sísmic de Catalunya. Vol. 2. Institut Cartogràfic de Catalunya. (En preparació).
- Fleta, J., Escuer, J., Goula, X., Olivera, C., Combes, Ph., Grellet, B. & Granier, Th. (1996), "Zonación tectónica, primer estadio de la zonación sismotectónica del NE de la península Ibérica (Catalunya)". *Geogaceta*, Vol. 20, 853-856.
- Fleta, J., Estruch, I. & Goula, X. (1998), "Geotechnical characterization for the regional assesment of seismic risc in Catalonia". Proc. of the IV Meeting of Environmental and Engineering Geophysical Society (European Section). Barcelona. 669-702.
- Giner, J.J. (1996), "Sismicidad y peligrosidad sísmica en la Comunidad Autónoma Valenciana. Análisis de incertidumbres". Tesis de doctorado. Universidad de Granada. 295 p
- Goula, X. & Godefroy, P. (1985), "Évaluation de l'aléa simique régional. Zonage à petite échelle". *Génie Parasismique*. 207-221.
- IGN (1991) . Catálogo Sísmico. Fichero informático.
- Martín Martín A. J. (1984), "Riesgo sísmico en la península ibérica". Tesis de Doctorado. Talleres del Instituto Geográfico Nacional. 235 pp.
- Mc Guire, R. (1976), "EQRISK. Evaluation of earthquake risk to site. Fortran computer program for seismic risk analysis". Geological. Open File. Report 76-67; 92 pp.
- Mezcua, J. y J.M. Martínez Solares (1983), "Sismicidad del Area Ibero-Mogrebí". Instituto Geográfico Nacional, publicación nº 203, 299 pp.
- SIRENE (1994), (BRGM-CEA-EDF), "Fichier de Sismicité Historique de la France", Fichero Informático.
- Savy, J. (1978), "Determination of seismic design parametres: a stochastic approach". The John A. Blume Earthquake Engineering Center. Department of Civil Engineering Stanford University. Report nº 34. 215 pp.
- Secanell, R. (1996) "Contribució a la definició de la magnitud local de terratrèmols adaptada a Catalunya". Tesis de Licenciatura. Universidad de Barcelona.
- Secanell, R. (1999), "Avaluació de la perillositat sísmica a Catalunya: anàlisi de sensibilitat per a difrents models d'ocurrència i parámetros sísmics". Tesis Doctoral. Universitat de Barcelona.
- Sponheuer, W. (1960), "Methoden zur Herdtiefenbestimmung in der Makroseismick", *Freiberger Forschungshefte*, C88, 117 pp.
- Susagna, T., Goula, X. & Roca, A. (1999). "Catálogo de sismicidad: Volumen I del atlas sísmico de Catalunya". Proc. Primer congreso Nacional de Ingenieria sísmica. Murcia. (en este volumen).
- Susagna, T. & Goula, X. (1999). "Catatàleg de Sismicitat". Atlas Sísmic de Catalunya. Vol. 1. Institut Cartogràfic de Catalunya. (En prensa).
- Vives, V. (1991), "Parámetros sísmicos de interés ingenieril en el noreste y levante de la Península Ibérica. Aplicación a la zona de Ascó". Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Barcelona. 336 pp.