

CARACTERIZACIÓN DE LA ACCIÓN SÍSMICA ENFOCADA A ESTUDIOS DE RIESGO SÍSMICO A ESCALA URBANA. APLICACIONES EN ALMERÍA Y ALHAMA DE GRANADA.



J. M. Gaspar-Escribano¹, A. Rivas-Medina¹, M. Navarro², B. Benito¹, M.J. García¹

¹ Universidad Politécnica de Madrid, jorge.gaspar@upm.es

² Universidad de Almería, mnavarro@ual.es

RESUMEN

Una de las principales diferencias entre estudios de riesgo sísmico a escalas regional y urbana se refiere a la caracterización de la acción sísmica. En los estudios regionales, se impone el método probabilista, en el que habitualmente el resultado se expresa por medio de mapas de aceleración esperada para un periodo de retorno dado y espectros de peligrosidad uniforme. Sin embargo, en los estudios urbanos se requiere un mayor grado de detalle, tanto en la definición de las fuentes sismogénicas como en la caracterización del movimiento esperado, sobre el que inciden de manera fundamental posibles efectos de resonancia con el suelo en el emplazamiento y/o con las estructuras asentadas en el mismo. En este trabajo se presentan diversas propuestas de caracterización de la acción sísmica en entornos urbanos. Para su aplicación práctica, se usarán datos de dos localidades concretas: Almería, donde se usará un escenario sísmico compatible con el sismo de control de la peligrosidad en rangos de aceleración esperados para un periodo de retorno de 475 años y en Alhama de Granada, donde el movimiento sísmico corresponde al que generaría un terremoto similar al de Andalucía de 1884, con fuente en la falla de Zafarraya.

Palabras clave: Peligrosidad sísmica urbana, Escenario sísmico, Almería, Terremoto de Andalucía 1884

SUMMARY

A principal difference between seismic risk studies at regional and urban scales refers to the characterisation of seismic actions. In regional studies prevails the probabilistic seismic hazard estimates (presented as maps or uniform hazard spectra for prescribed return periods). By contrast, in urban studies a higher degree of detail is required, both in definition of seismic sources and on expected ground motion characterisation, where issues such as resonance effects with soil layers and overlying structures are relevant.

Different approaches to seismic action characterisation in urban environments are shown. Two cities (in Southern Spain) are selected for the implementation of some examples: A hazard-consistent seismic scenario related to the hazard controlling earthquakes for ground motions expected in the 475-year return period level is used in Almería. An earthquake scenario similar to the 1884 Andalusia earthquake is generated in the Zafarraya fault for the definition of the seismic action in Alhama de Granada.

Keywords: Urban seismic hazard, Seismic scenario, Almería, 1884 Andalusia earthquake

Introducción y objetivo

Los estudios de riesgo sísmico combinan el movimiento sísmico esperado en el terreno (acción sísmica), las distribuciones de elementos humanos y materiales expuestos junto con sus respectivas vulnerabilidades para estimar el daño esperado y los costes asociados. La manera de cuantificar estos factores depende drásticamente de la escala de trabajo considerada: En estudios de riesgo regional (unidades de trabajo del orden de 10^3 m) el grado de detalle es inferior a los estudios de riesgo urbano (unidades de trabajo del orden de 10^1 - 10^2 m).

En los primeros, la acción sísmica se suele representar mediante los resultados de un estudio probabilista de peligrosidad sísmica para un periodo de retorno preestablecido y en condiciones de suelo uniformes (habitualmente en roca). En zonas de sismicidad baja a moderada, como España, además estos mapas se basan (habitualmente) en modelos de sismicidad zonificados, en los que en lugar de usar fallas sismogénicas se emplean zonas extensas de características sísmicas uniformes. Asimismo, se usan modelos de movimiento fuerte diseñados con un conjunto de variables independientes fácilmente disponibles, como la magnitud y la distancia fuente-emplazamiento, y por tanto se ignoran otros modelos más recientes (como los modelos NGA) que incluyen una serie de parámetros relacionados con el espesor del paquete sedimentario y la geometría de la ruptura que no se pueden implementar en un estudio a escala regional. A tenor de las limitaciones impuestas por estos condicionantes, el resultado es un mapa de peligrosidad en el que la aceleración presenta variaciones suaves, que dentro del ámbito de un municipio (pocos km^2 de área), apenas se aprecia. Sobre este mapa de aceleraciones esperadas en roca se aplican los factores de amplificación asociados a la estructura y características geológicas del subsuelo. El mapa final resultante refleja fundamentalmente el efecto de sitio, quedando el efecto de la peligrosidad en roca enmascarado.

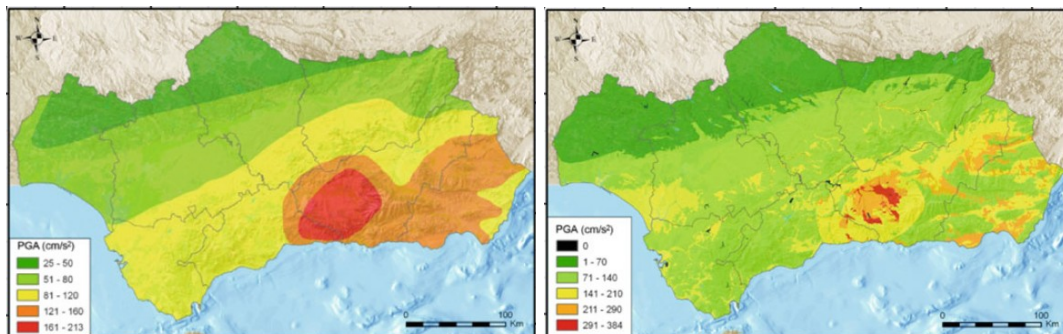


Figura 1. Mapa de peligrosidad sísmica en condiciones de roca (izq.) e incluyendo el efecto de sitio para la comunidad autónoma de Andalucía (Benito et al., 2010).

En los estudios locales, la caracterización del efecto de suelo debe ser todo lo individualizada posible (en función de las limitaciones del proyecto), aumentando el trabajo empírico sobre el terreno y limitando las extrapolaciones estadísticas en la medida de lo posible. En este ámbito, el desarrollo de medidas in situ encaminadas a cuantificar el efecto de sitio (estructura de velocidades de ondas de cizalla promedio en los 30 m más superficiales (v_{s30}), periodos predominantes del suelo; Navarro et al., 2001) y de los periodos de vibración natural de estructuras (Navarro et al., 2007) ayudan a cartografiar las zonas donde se pueden prever efectos de resonancia por la superposición de los movimientos naturales del suelo y de las edificaciones con los de la acción sísmica dentro de un mismo rango espectral (Gaspar-Escribano et al. 2010). En este caso la acción sísmica se debe asociar a un escenario sísmico concreto, y no solo a una estimación probabilista en la que la

contribución a la peligrosidad de varias fuentes impide identificar de forma directa el terremoto que causa el riesgo calculado. En esta presentación se profundiza en el tema de la caracterización de la acción sísmica enfocada a aplicaciones de riesgo sísmico en entornos urbanos situados en zonas de sismicidad baja a moderada, como ocurre en España.

Acción sísmica en entornos urbanos: consideraciones generales

Como se ha mencionado anteriormente, a la hora de definir la acción sísmica en entornos urbanos se debe hacer el esfuerzo de aumentar grado de detalle de los elementos que la componen, Para ello se debería escoger un escenario sísmico que contara con estas características:

- Encontrar una falla sísmica generadora del terremoto que define el escenario sísmico considerado que se pueda considerar activa y cuya cinemática permita proponer un mecanismo focal.
- Disponer de un conocimiento detallado de la estructura v_{s30} de la zona de estudio, así como de la estructura del subsuelo de la ciudad (al menos del espesor de la capa de sedimentos).

Además, es necesario tener un control adecuado de las posiciones relativas de la fuente con cada uno de los emplazamientos en los que se calcula la peligrosidad porque a escala urbana los efectos de directividad y de la posición del emplazamiento sobre el bloque superior o inferior de la falla tienen mucha importancia. Estas consideraciones son más importantes a distancias fuente-emplazamiento cortas. En este caso, factores como la profundidad de la ruptura o el buzamiento y acimut de la falla pueden cobrar importancia. Por ejemplo, la Figura 2 muestra la distribución de aceleraciones máximas del terreno causadas por un evento de las mismas características, pero en el que la profundidad del techo de la superficie de ruptura se encuentra a diferente altura. Debido a la geometría de la falla (falla normal situada al norte de la ciudad y que buza hacia ésta), el aumento en esa profundidad implica un acercamiento de la ruptura a la ciudad en distancia horizontal (no en la vertical). Dicha diferencia conlleva un cambio significativo en la distribución de aceleraciones calculadas en sustrato rocoso: las mayores aceleraciones se obtienen en la parte norte de la ciudad en un caso y en la parte oeste de la ciudad en el otro caso.

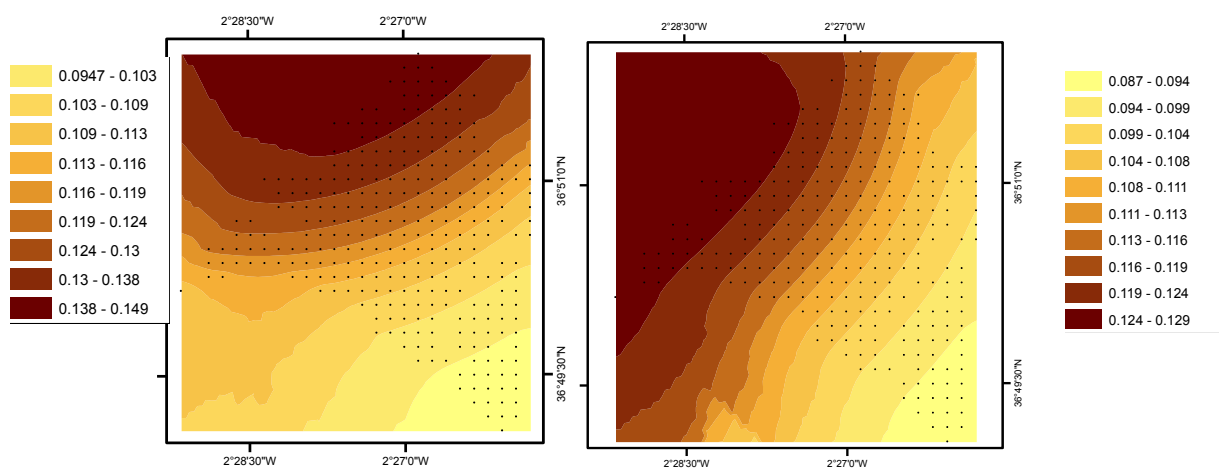


Figura 3. Distribución de PGA en roca para un terremoto de magnitud M_w 5.0 con mecanismo de falla normal, buzamiento 60° , acimut 340° a una distancia de la traza de la falla de 15 km un techo de ruptura a 2km (izq.) y a 8 km (dcha.). Los puntos negros indican los puntos de cálculo.

De acuerdo con estas premisas, parece razonable utilizar los modelos del movimiento fuerte complejos, que tienen en cuenta parámetros de fuente y de estructura del emplazamiento detallados (modelos NGA Power et al., 2008; y modelos Europeos recientes como Ambraseys et al. 2005 y Akkar y Bommer 2011) que permitan obtener una imagen más fina de la distribución del movimiento esperado en el núcleo urbano analizado. De este modo, la imagen final del mapa de aceleraciones esperadas reflejará no solo el efecto del sitio (como en el caso del cálculo de peligrosidad regional) sino también de la posición y orientación de la falla con respecto al emplazamiento. En especial, para configuraciones de distancia fuente-emplazamiento inferiores a los 15 km, la aceleración esperada puede modificarse (disminuir) en un factor superior a 2 para PGA, comparable al máximo factor de amplificación esperable por efecto de suelo (Figura 2).

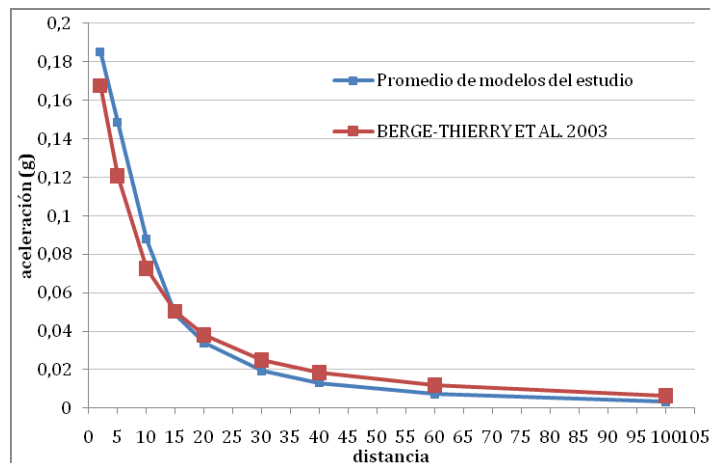


Figura 3. Curvas de atenuación de la PGA con la distancia para un terremoto de magnitud 6.

Una vez formuladas estas consideraciones previas necesarias a la hora de acometer un estudio de peligrosidad a escala municipal, se pueden plantear dos fundamentalmente dos enfoques: uno posee una base más probabilista, que se basa en los resultados de un estudio regional de peligrosidad sísmica; y el otro representa un escenario más determinista, que trata de reproducir un evento ocurrido en el pasado y proyectar sus efectos en el presente.

Ejemplo 1: Escenario con base probabilista

Generalmente, primero se acomete el estudio de riesgo sísmico a escala regional, y una vez identificados los municipios en los que es más urgente desarrollar planes para la emergencia sísmica, se desarrollan los estudios de riesgo sísmico a escala urbana, con mayor grado de detalle.

Si se dispone de una estimación probabilista de la peligrosidad en un municipio, la pregunta directa es: ¿qué terremoto (es decir, con qué magnitud y a qué distancia) es el responsable, en mayor medida de dicha peligrosidad? Para obtener dicho terremoto, que se llama terremoto de control, se recurre a la llamada *desagregación de la peligrosidad*, que consiste en recalcular la peligrosidad sísmica para obtener la combinación de magnitud y distancia que mayor contribución presentan a la excedencia de un movimiento objeto dado (Bazzurro y Cornell, 1999). Para aplicaciones de riesgo sísmico en una ciudad, es recomendable emplear la acción sísmica relacionada con un mismo terremoto de control por escenario considerado para toda la ciudad. Habitualmente se toma un escenario más

probable, dado por el terremoto de control de la PGA en un periodo de retorno de 475 años, y eventualmente por otro escenario menos probable, asociado a un periodo de retorno o a otro movimiento objeto, por ejemplo, SA(1s) esperada con un periodo de retorno de 475 años.

En el ejemplo considerado se definen dos escenarios sísmicos para la ciudad de Almería que corresponden a los terremotos de control consistentes con los resultados del estudio de peligrosidad (Gaspar-Escribano et al., 2010). Para el escenario 1, se tiene un terremoto a corta distancia (5-10 km) y magnitud de 5.0, relacionado con el sismo de control para la PGA esperada en un periodo de retorno de 475 años; y otro escenario asociado a un sismo de mayor distancia (15-20 km) y mayor magnitud (6.0) que controla la peligrosidad para el mismo periodo de retorno y aceleraciones espectrales de 1s.

La fuente del terremoto de magnitud 5.0 se puede situar en alguna de las numerosas fallas de unos 10-15 km de longitud cartografiadas en el entrono de Almería. En este caso, se ha seleccionado una falla normal, que limita la cuenca del río Andarax. Los resultados obtenidos, que ya incluyen el efecto de suelo, se muestran en la Figura 4. Se aprecia como la combinación del mapa de aceleraciones en roca, con valores máximos en el norte y mínimos en el sur, con el de factores de amplificación por efecto de sitio, con valores máximos en el sureste de la ciudad, da como resultado un mapa de aceleraciones esperadas en suelo cuyo patrón de variación es difícil de predecir de antemano.

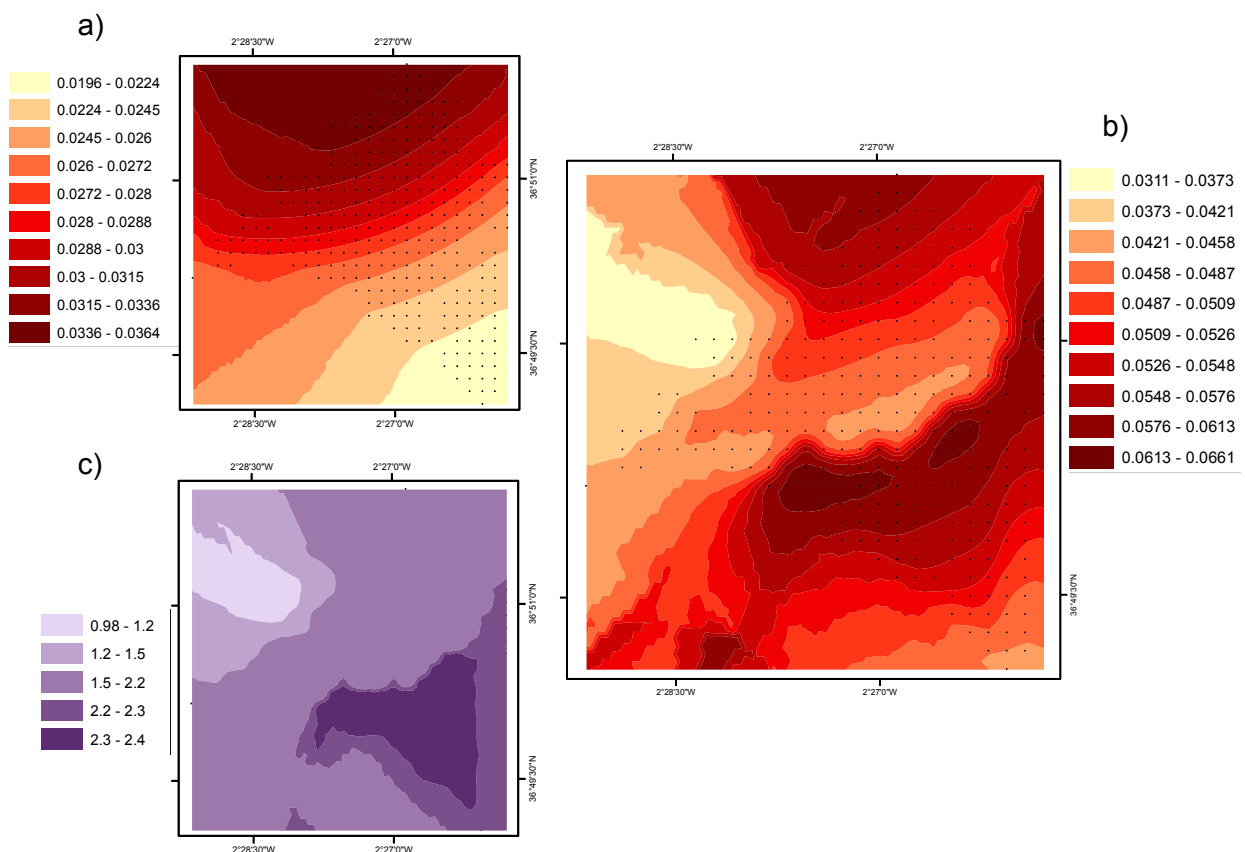


Figura 4. Resultados para el escenario 1 de Almería. a) Mapa de SA(1s) esperada en roca; b) factores de amplificación predichos; c) Mapa de SA(1s) esperada incluyendo efectos de sitio.

El escenario 2 se asocia a la única falla del entorno de Almería que satisface el condicionante de distancia y que tiene una longitud suficientemente larga como para poder generar un terremoto de magnitud 6.0. Se trata del tramo marino de la falla de Carboneras,

situada al sur de la ciudad, con un azimut de unos 60° y cinemática de desgarre puro. Los resultados se muestran en la Figura 5. En este caso, como las zonas de máxima aceleración en roca coinciden con las de máxima amplificación por efecto de sitio, la distribución de aceleraciones esperadas presenta una distribución esperable con máximos valores en la zona sureste de la ciudad.

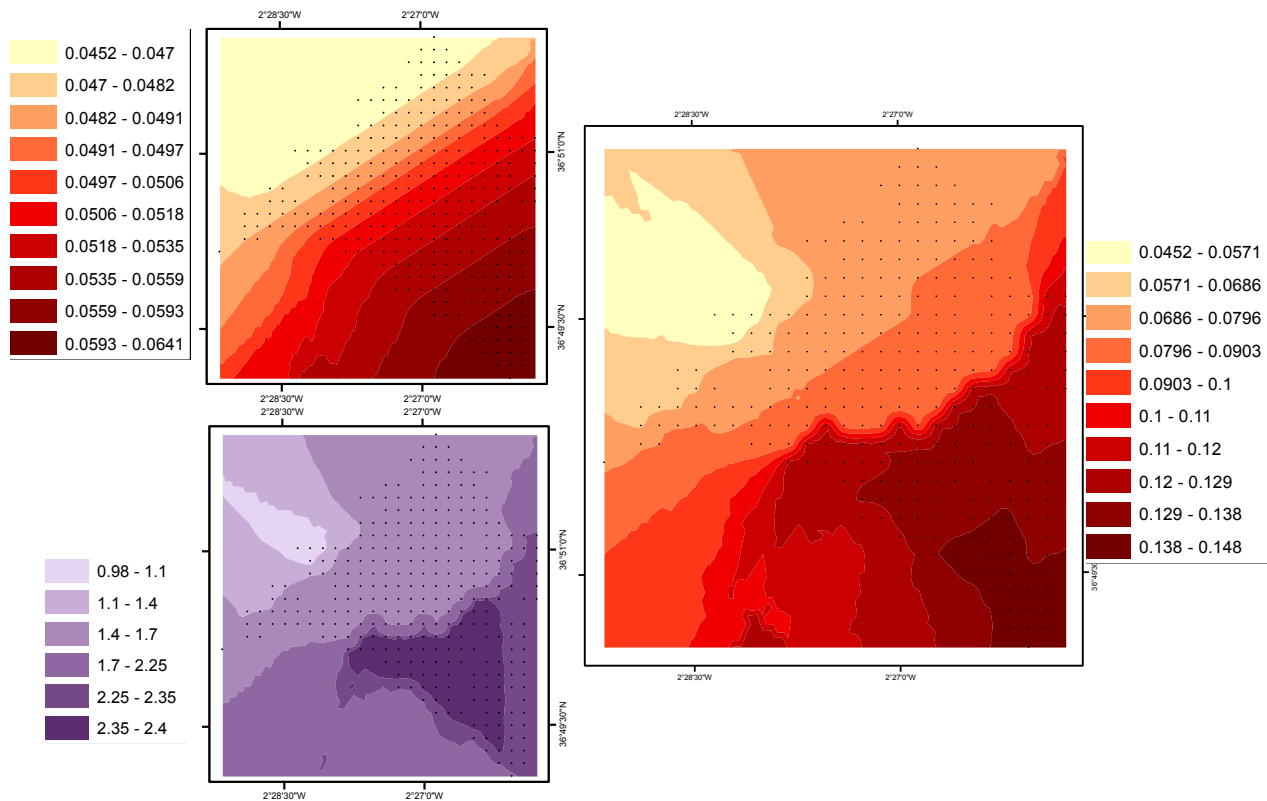


Figura 5. Resultados para el escenario 2 de Almería. a) Mapa de SA(1s) esperada en roca; b) factores de amplificación predichos; c) Mapa de SA(1s) esperada incluyendo efectos de sitio.

Ejemplo 2: Escenario con base determinista

En este caso no se trata de encontrar un terremoto de control con base probabilista, sino que se intenta reproducir un sismo similar al Terremoto de Andalucía, ocurrido el 25 de Diciembre de 1884 con epicentro cerca de Arenas del Rey (Granada). La fuente de este terremoto se asocia con la falla de Zafarraya, situada en el límite sur de la Cuenca de Granada, con un movimiento normal y un plano de falla buzando al norte. La magnitud modelizada es 6.5 y los resultados se obtienen para la población de Alhama de Granada, situada a unos 15 km de la traza de la falla en superficie.

La distribución de aceleraciones máximas del terreno en este caso se ha representado mediante el promedio en las unidades censales de la población (Figura 6). Esta representación puede ser útil a la hora de organizar los recursos por distritos de la población.

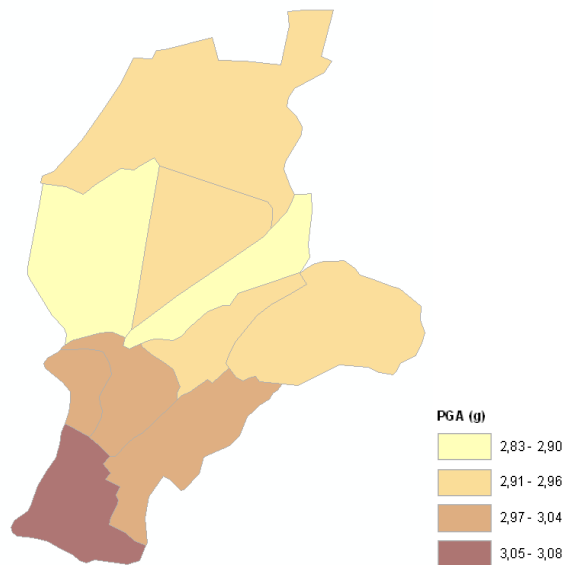


Figura 6. Resultados para Alhama de Granada. PGA promedio esperada en cada distrito de la población para un sismo de magnitud 6.5 en la falla de Zafarraya.

Conclusiones

El grado de detalle necesario en un estudio de riesgo sísmico a escala urbana supone un cambio importante con respecto al enfoque comúnmente dado en estudios de peligrosidad a escala regional. Las consideraciones sobre el tipo de suelo, la estructura de la cuenca sedimentaria, la posición del emplazamiento en relación a la falla, el mecanismo focal y la profundidad del techo de la ruptura son factores que inciden de manera determinante en el movimiento fuerte predicho que deben ser tenidos en cuenta.

Dos enfoques diferentes para caracterizar la acción sísmica en un estudio de riesgo urbano se presentan en este artículo. El uso de uno o de otro tiene propósitos diferentes. El escenario basado en estudios probabilistas es útil para la planificación de la respuesta ante el riesgo sísmico urbano contemplando un nivel de probabilidad uniforme para toda la ciudad. Por su parte, el escenario basado en un modelo determinista trata de reproducir un terremoto pasado para tratar de explicar los daños observados y extraer lecciones aprendidas del mismo.

Referencias:

- Akkar S., Bommer J.J., (2010). Empirical Equations for the Prediction of PGA, PGV and Spectral Accelerations in Europe, the Mediterranean Region and the Middle East, *Seismol Res Let*, 81, 195-206.
- Ambraseys N.N., Douglas J., Sarma S.K., Smit P.M. (2005), "Equations for the Estimation of Strong Ground Motions from Shallow Crustal Earthquakes Using Data from Europe and the Middle East: Horizontal Peak Ground Acceleration and Spectral Acceleration", *Bull Earthquake Eng*, 3, 1–53.
- Bazzurro P., Cornell C. A. (1999). "Disaggregation of seismic hazard", *Bull Seism Soc Am*, 89, 501-520.
- Benito M. B., Navarro M., Vidal M., Gaspar-Escribano, J. M., García-Rodríguez J. M., Martínez-Solares, J. M. (2010) "A new seismic hazard assessment in the región of

- Andalusia (Southern Spain)" Bull Earthquake Eng, 8, 739-766.
- Gaspar-Escribano J. M., Navarro M., Benito B., García-Jerez A., Vidal F. (2010), "From regional- to local-scale seismic hazard assessment: examples from Southern Spain", Bull Earthquake Eng, 8, 1547–1567.
 - Navarro M., Enomoto T., Sánchez F. J., Matsuda I., Iwatate T., Posadas A., Luzón F., Vidal F., Seo K. (2001) "Surface soil effects study using short-period microtremor observations in Almeria City, Southern Spain." Pure Appl Geophy, 158, 2481–2497.
 - Navarro M., Vidal F., Enomoto T., Alcalá F.J., Sánchez F.J., Abeki N. (2007) "Analysis of site effects weightiness on RC building seismic response. The Adra (SE Spain) example." Earthq Eng Struct Dyn, 36, 1363–1383.
 - Power M., Chiou B., Abrahamson N., Bozorgnia Y., Shantz T., Roblee T. (2008), "An Overview of the NGA Project." Earthquake Spectra, 24, 3