Intensidad Arias probabilística en el Sureste de España, para un período de retorno de 475 años, como paso previo a estudios de movimientos de ladera inducidos por terremotos

J.A. Peláez[1], J. Delgado[2], C. López Casado[3] y J. Henares[3]

1 Dpto. de Física, Universidad de Jaén, Virgen de la Cabeza 2, 23071 Jaén. japelaez@ujaen.es
2 Dpto. de Ciencias de la Tierra, Universidad de Alicante, Ap. de Correos 99, 03080 Alicante. jose.delgado@ua.es
3 Dpto. de Física Teórica y del Cosmos, Universidad de Granada, Avda. Severo Ochoa s/n, 18071 Granada. clcasado@ugr.es, nechman@hotmail.com

ABSTRACT

In this work we present some results of a recent appraisal of the seismic hazard in southeastern Spain in terms of Arias intensity. The main aim of this work is to show, for a certain return period, which are the seismically triggered landslide prone areas in this region, from a probabilistic point of view. Also, for a certain location, the worst likely landslide category. This work is a first stage in a future process of landslide spatial prediction. As a significant result, for a return period of 475 years, we have obtained seismic hazard values above 0.1 m/s for the Arias intensity in almost the Betic Cordilleras. This can be considered as a typical value of a region with moderate seismic hazard values. In the Granada Basin, for the same return period, we have obtained seismic hazard values of the order of 0.4 m/s for shallow soils and 0.3 m/s for deep soils.

Key words: *seismic hazard, Arias intensity, landslides, spatially-smoothed seismicity approach.*

INTRODUCCIÓN

Todos los recientes estudios de peligrosidad de movimientos de ladera inducidos por terremotos se basan en una u otra forma en la metodología propuesta por Newmark (1965). A partir de la llamada aceleración crítica, la mínima aceleración del terreno requerida para producir inestabilidad, junto con alguna variable que nos mida la sacudida sísmica, podemos calcular mediante ecuaciones de regresión empíricas el llamado desplazamiento de Newmark, es decir, el desplazamiento permanente inducido en el terreno por el terremoto. Conocido éste, podemos obtener la probabilidad de que se produzca un movimiento de ladera en una determinada localización utilizando, por ejemplo, la metodología propuesta por Jibson *et al.* (2000). En esta metodología, la variable utilizada para describir la sacudida es la llamada intensidad Arias (1970), la cual es una medida de la intensidad del terremoto basada en registros instrumentales. Realmente, esta variable es la más utilizada en estudios de movimientos de ladera inducidos por terremotos, ya que está fuertemente relacionada, entre otros, con la ocurrencia de los diferentes tipos de movimientos, con el potencial de licuefacción y los desplazamientos observados.

En este trabajo presentamos sucintamente la metodología y resultados, para el sureste de España, de la evaluación de la peligrosidad sísmica en términos de esta variable, la intensidad Arias. Pretendemos que los resultados sean un primer paso en la evaluación de la peligrosidad sísmica probabilística de movimientos de ladera inducidos por terremotos, es decir, en un proceso de predicción espacial de movimientos de ladera en esta región.

La metodología que hemos utilizado en la evaluación de la peligrosidad ya fue utilizada por los autores de este trabajo en estudios previos de la peligrosidad sísmica en todo el ámbito de la Península Ibérica (Peláez y López Casado, 2002).

MÉTODO Y RESULTADOS

El método empleado en la evaluación de la peligrosidad sísmica es el llamado de la sismicidad suavizada espacialmente (Frankel, 1995), una metodología que trata de combinar las ventajas de los clásicos métodos paramétricos y no paramétricos. Se consideran fuentes sísmicas, en donde los parámetros b (representa en cierta forma la proporción entre grandes y pequeños terremotos en una región) y m_{max} (magnitud máxima) de las relaciones de recurrencia de terremotos son constantes, como en los métodos paramétricos. Sin embargo, se considera la sismicidad allí donde se ha producido, como en los no paramétricos. Aún así, se suaviza espacialmente el número acumulativo de terremotos a la hora de tener en cuenta la incertidumbre en la localización de los epicentros y que el proceso de generación de terremotos no es puntual. Los detalles de la metodología pueden consultarse, por ejemplo, en Frankel (1995) y Peláez y López Casado (2002).

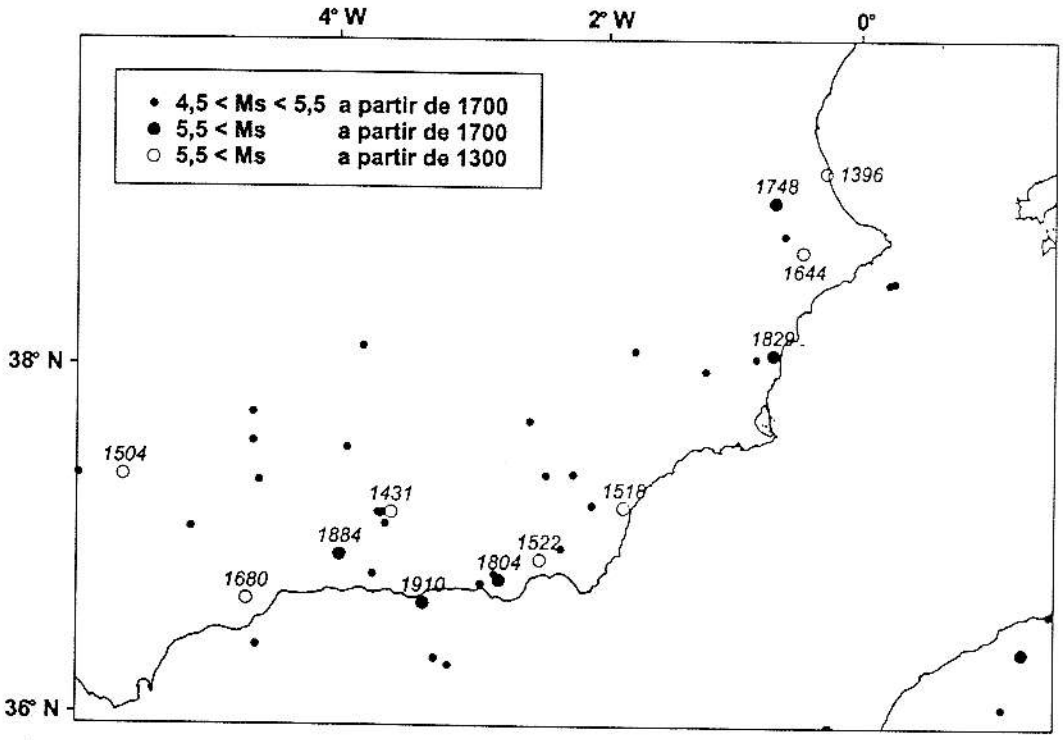

FIGURA 1. *Mapa donde se muestran los terremotos más importantes de la región de estudio en los últimos 700 años incluidos en la evaluación de la peligrosidad sísmica.*

Hemos trabajado con el catálogo sísmico nacional (Mezcua y Martínez Solares, 1983) actualizado a 1999, incluyendo diversas reevaluaciones de terremotos. Se han utilizado cuatro modelos de sismicidad completos y Poissonianos: *a)* los terremotos con magnitud superior a 5,5 M_S a partir de 1300, *b)* los de magnitud superior a 4,5 M_S a partir de 1700, *c)* los de magnitud superior a 3,5 M_S a partir de 1920, y *d)* los de magnitud superior a 2,5 M_S a partir de 1960. La sismicidad incluida en los dos primeros modelos citados, la más energética, puede observarse en la figura 1. Tras calcular la peligrosidad con cada uno de los modelos de sismicidad, el resultado final se ha obtenido promediando los resultados parciales. Para ello, cada uno de los modelos contribuye con diferente peso, atendiendo al período de retorno que se considera y al tiempo que abarca cada uno de los modelos.

La relación de atenuación utilizada ha sido la propuesta por Sabetta y Pugliese (1996). Esta relación, con expresión

$$\log I_a = a + b\,M + c \log (R^2 + h_0^2)^{1/2} + e_1 S_1 + e_2 S_2 \qquad (1)$$

relaciona la intensidad Arias (I_a) con la magnitud (M) y la distancia epicentral (R) o distancia a la falla. S_1 y S_2 son variables mudas, que se consideran para incluir una clasificación del tipo de suelo, y a, b, c, h_o, e_1 y e_2 son parámetros. Los tres tipos de suelo que los autores consideran a través de esta relación son los siguientes: *a)* suelo rocoso (V_S > 800 m/s), *b)* suelo blando (400 < V_S < 800 m/s) superficial (h < 20 m), y *c)* suelo blando (400 < V_S < 800 m/s) profundo (h > 20 m). La denominación de suelo rocoso se corresponde con el terreno tipo I (roca compacta, suelo cementado o granular muy denso), y el blando con el terreno tipo II (roca muy fracturada, suelos granulares densos o cohesivos duros), considerados en la vigente norma de construcción sismorresistente española.

Aquí mostramos algunos de los resultados obtenidos, concretamente, dos mapas de intensidad Arias (Fig. 2) con una probabilidad de superación del 10% en 50 años, es decir, para un período de retorno de 475 años, período de tiempo utilizado convencionalmente en estudios de Ingeniería Sísmica.

Para los dos tipos de suelos blandos que hemos tenido en cuenta, los de mayor interés en este tipo de estudios por ser los que más fácilmente pueden experimentar este tipo de movimientos, observamos una misma morfología en los mapas, aunque alcanzándose diferentes valores. En ambos casos, los máximos valores se observan en la Cuenca de Granada y en el suroeste de la provincia de Almería. Por ejemplo, para suelos blandos superficiales llegan a alcanzarse valores de 0,38 y 0,33 m/s, respectivamente, en las zonas citadas. En el caso de suelos blandos profundos estos valores son ligeramente inferiores, de 0,30 y 0,26 m/s, respectivamente. En conjunto, los valores encontrados en las Béticas son los típicos de una región con peligrosidad sísmica moderada, es decir, valores probabilísticos de intensidad Arias por encima de 0,1 m/s para un período de retorno de 475 años.

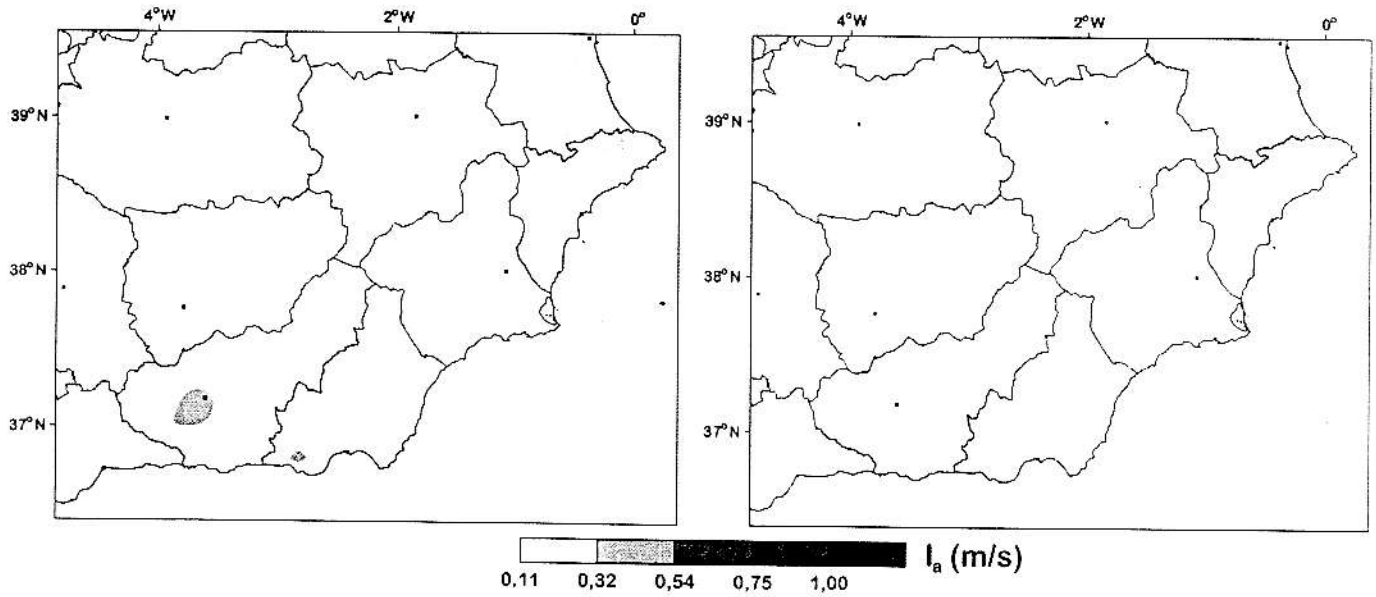

FIGURA 2. *Mapas de peligrosidad sísmica en términos de la intensidad Arias, con una probabilidad de superación del 10% en 50 años, es decir, para un período de retorno de 475 años. Se muestran los resultados para suelo blando (400 < V_S < 800 m/s), a la izquierda para los superficiales (h < 20 m) y a la derecha para los profundos (h > 20 m).*

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los valores utilizados en el curvado de los mapas de la figura 2 requieren una explicación detallada. Los valores de intensidad Arias de 0,11, 0,32 y 0,54 m/s son los comúnmente aceptados (Keefer y Wilson, 1989) como los que desencadenan, respectivamente, los siguientes tipos de movimientos de ladera: 0,11 m/s los desprendimientos, deslizamientos y avalanchas; 0,32 m/s los desplomes, deslizamientos de bloques y flujos de tierras, y 0,54 m/s las extensiones laterales y flujos. Como se observa en la figura 2, el valor de 0,54 m/s no llega a alcanzarse en ningún caso en esta región, desde un punto de vista probabilístico, para un período de retorno de 475 años. El valor de 0,32 m/s sólo se alcanza en la Cuenca de Granada y en el suroeste de Almería (zona epicentral de los terremotos de Adra-Mar de Aborán, con intensidad máxima VII-VIII, y Dalías, con intensidad epicentral VIII-IX, ambos de 1804) para el caso de suelos blandos superficiales. El valor de 0,11 m/s se alcanza en un área extensa, tanto en el caso de suelos blandos superficiales como en el de profundos.

Estos mapas probabilísticos de intensidad Arias, aunque no lo son en sí, podrían considerarse como mapas "probabilísticos" de susceptibilidad a movimientos de ladera inducidos por terremotos. Nos indican en cada caso, en función del tipo de suelo, probabilísticamente el área que podría verse afectada, para un período de retorno de 475 años, por los diferentes tipos de movimientos de ladera inducidos por terremotos citados con anterioridad. Evidentemente, esto será así siempre y cuando las características geológicas y geomorfológicas sean las convenientes. En cualquier caso, lo que sí nos detallan de forma inmediata son las áreas en las que no son probables, para dicho período de retorno, movimientos de ladera inducidos por terremotos.

REFERENCIAS

Arias, A. (1970): A measure of earthquake intensity. En: *Seismic design for nuclear power plants* (R.J. Hansen, Ed.). The Massachusetts Institute of Technology Press, Cambridge, 438-483.

Frankel, A. (1995): Mapping seismic hazard in the Central and Eastern United States. *Seismological Research Letters*, 66: 8-21.

Jibson, R.W., Harp, E.L. y Michael, J.A. (2000): A method for producing digital probabilistic seismic landslides hazard maps. *Engineering Geology*, 58: 271-289.

Keefer, D.K. y Wilson, R.C. (1989): Predicting earthquake-induced landslides, with emphasis on arid and semi-arid environments. En: *Landslides in a semi-arid environment* (P.M. Sadler y D.M. Morton, Eds.). Inland Geological Society, Vol. 2: 118-149.

Mezcua, J. y Martínez Solares, J.M. (1983): *Sismicidad del área Ibero-Mogrebí*. Instituto Geográfico Nacional, Madrid, 300 p.

Newmark, N.M. (1965): Effects of earthquakes on dams and embankments. *Geotechnique*, 15: 139-160.

Peláez, J.A. y López Casado, C. (2002): Seismic hazard estimate at the Iberian Peninsula. *Pure and Applied Geophysics*, 159: 2699-2713.

Sabetta, F. y Pugliese, A. (1996): Estimation of response spectra and simulation of nonstationary earthquake ground motions. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 86: 337-352.