



## Movimientos de ladera inducidos por terremotos en España y Portugal

### *Seismic-induced landslides in Spain and Portugal*

Delgado, J.<sup>(1)</sup>; Marques, F.S.F.<sup>(2)</sup>; Vaz, T.V.<sup>(3)</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Ciencias de la Tierra, Universidad de Alicante, Ap. Correos 99, 03080 Alicante, jose.delgado@ua.es

<sup>2</sup> Departamento e Centro de Geologia, Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, Lisboa

<sup>3</sup> Instituto de Geografia e Ordenamento do Território, Universidade de Lisboa, Lisboa

#### Resumen

La ocurrencia de inestabilidades de ladera inducidas por terremotos es conocida en España y Portugal desde épocas remotas. Durante las últimas décadas, varios grupos de investigación han realizado estudios al respecto que han permitido recopilar información sobre este fenómeno. En este trabajo se presenta una revisión de las aportaciones realizadas y se presenta una base de datos elaborada a partir de tales contribuciones, la cual contiene eventos desencadenantes de inestabilidades asociadas ocurridos en la Península Ibérica y territorios insulares de España y Portugal. A partir de ella se analiza las características de las inestabilidades inducidas, considerando su tipología y las distancias de ocurrencia en función de la magnitud de los eventos desencadenantes. Los datos constituyen una base para futuros estudios de riesgos asociados a este fenómeno.

**Palabras clave:** Movimientos de ladera; Terremotos; Tectónica Activa; Mapas previsoires; España; Portugal.

#### Abstract

The occurrence of seismic-induced landslides is known in Portugal and Spain since remote epochs. During the last decades, several research groups have studied this topic gathering information about it. In this work, a revision of the contributions is done and a database of induced landslides is presented also, which contains both triggering events and associated landslides in the Iberian Peninsula and insular areas. From this database, an analysis of landslide characteristics is done by considering its typology and the epicentral distance as a function of the magnitude of causative event. These data constitute a base for future studies of the risk associated to this phenomenon.

**Key words:** Landslide; Earthquake; Active Tectonics; Hazard map; Spain; Portugal.



## 1. Introducción

Los terremotos constituyen un efectivo agente desencadenante de inestabilidades de ladera (Keefer, 1984), causando frecuentes daños a la sociedad (Bird y Bommer, 2004). A nivel internacional, la problemática que plantea este fenómeno sismo-inducido ha sido muy estudiada desde hace varias décadas (Keefer, 1984; Rodríguez *et al.*, 1999; Wasowski *et al.*, 2011). En la Península Ibérica, aunque la ocurrencia de movimientos de ladera sismo-inducidos está documentada desde muy antiguo, su estudio es relativamente reciente, tanto en España como en Portugal, a diferencia de los estudios de movimientos de ladera inducidos por otras causas (lluvia, erosión, etc.).

Actualmente, el estudio de los movimientos de ladera sismo-inducidos en la Península Ibérica ha sido abordado desde múltiples aproximaciones: (1) en el marco de estudios de Tectónica Activa, (2) el análisis de inestabilidades concretas, (3) la elaboración de mapas previsores, y (4) la realización de inventarios asociados a eventos sísmicos concretos. En el presente trabajo se hace una revisión de estas contribuciones, poniendo especial énfasis en el inventario de inestabilidades de ladera resultante y en las características de las inestabilidades resultantes a la luz de la información disponible.

## 2. Inestabilidades sismo-inducidas en el marco de estudios de Tectónica Activa

En los estudios de Tectónica Activa no es frecuente que se reconozcan o caractericen inestabilidades: el tiempo transcurrido desde el episodio de actividad de la falla en cuestión hasta la actualidad es tal que muchas de las inestabilidades reconocibles pueden atribuirse a múltiples causas, siendo difícil su asignación a un paleoevento concreto. Igualmente, existen dudas acerca de la magnitud y localización exacta del evento causante. Como consecuencia, existen incertidumbres inherentes a algunos resultados obtenidos; así, el estudio de una ladera inestable en el valle

inferior del río Tajo permitió a Fonseca *et al.* (2000) y a Vilanova y Fonseca (2004) deducir la existencia de falla activa. Sin embargo, Cabral y Marques (2001) y Cabral *et al.* (2011) señalaron que dicha ladera ya era inestable en condiciones estáticas, aunque no pudiera descartarse un origen sísmico. Tan sólo en el caso de estudios realizados sobre fallas con actividad en épocas históricas (recientes) se han podido identificar y asociar inestabilidades a terremotos. Tal es el caso de los estudios sobre la falla de Sencelles, Mallorca (Silva *et al.*, 2001) o del terremoto de Carmona de 1504 (Vollmert *et al.*, 2011).

A partir de esta información se está procediendo a la catalogación de los efectos geológicos de los terremotos en España mediante la aplicación de la Escala Macrosísmica de efectos Ambientales de los terremotos ESI-2007 (Michetti y Esposito, 2007; Reicherter *et al.*, 2009; INQUA, 2013). El catálogo preliminar incluye 32 movimientos de ladera sísmicamente inducidos: 6 grandes deslizamientos y 23 desprendimientos (Silva *et al.*, 2008). Los datos analizados indican, en casi todos los casos, que las áreas macrosísmicas poseen una extensión alrededor de 80-100 km<sup>2</sup>, pero los efectos geológicos relevantes (de mayores dimensiones) apenas llegan a afectar a áreas de 10 km<sup>2</sup>, incluso aquellos relacionados con intensidades mayores o iguales a VII (EMS).

## 3. Estudio dinámico de inestabilidades de ladera

Esta línea de investigación consiste en la descripción y/o análisis dinámico de inestabilidades concretas en relación con terremotos. Los primeros trabajos realizados consistieron en la descripción de inestabilidades sismo-inducidas y el análisis de variables del entorno (no sísmicas) que pudieron favorecer la movilización o el alcance de la masa inestable durante el terremoto. Así, Sanz (1992, 1997) estudió el deslizamiento de Güevéjar (Granada), recuperando información histórica acerca de su evolución post-terremoto y demostró la importancia que tuvo el agua freática para su re-

petida reactivación por efecto sísmico (1755 y 1884). Ferreira *et al.* (2002), por su parte, analizaron el debris-flow de Vila Franca do Campo (Azores), desencadenado por el terremoto de 1522, que destruyó la ciudad y causó 5000 muertes. Marques *et al.* (2009) estudiaron dicho evento a través de documentos históricos, campañas arqueológicas y trabajo de campo, identificando los materiales movilizados y procediendo a su caracterización sedimentológica. A través de modelos numéricos simularon la inestabilidad, permitiendo obtener una perspectiva más realista de las áreas afectadas.

En el tiempo, este tipo de trabajos han evolucionado hacia la elaboración de modelos geomecánicos de las inestabilidades sismo-inducidas o de ciertos taludes/inestabilidades en áreas sísmicas con el fin de obtener parámetros de interés sobre la severidad de la sacudida necesaria para desestabilizar la ladera o reactivar una inestabilidad ya existente: Alcoy (García-Mayordomo, 1998, 1999), Andorra (Mavrouli *et al.*, 2009), Güevéjar (Jiménez Pintor y Azor, 2006), Praia do Telheiro (Marques, 2001, 2005, 2007). En otros casos, dichos modelos han sido realizados para evaluar un posible origen sísmico de determinadas inestabilidades observadas en

campo, como Balitx (Mateos *et al.*, 2012) o Peñón de Oceanilla (Sanz, 2010).

En íntima relación con los anteriores estudios están los análisis retrospectivos al objeto de determinar la distancia máxima a la que puede encontrarse un epicentro para que se pueda generar/reactivar una inestabilidad concreta (Rodríguez-Peces, 2008, 2010; Rodríguez-Peces *et al.*, 2008; 2011a, b).

En este tipo de estudios sólo se tiene en cuenta la aceleración pico del terremoto, pero otras características de la sacudida, como son la duración o el contenido en frecuencias, no son consideradas. Tan sólo en análisis dinámicos *sensu stricto* se pueden incluir todas las características de los terremotos.

Esteve (2011) ha estudiado el comportamiento dinámico del deslizamiento de El Molinar (Alcoy, Alicante; Figura 1) considerando un sismograma compatible con las características del evento que se supone lo activó en 1620 (amplitud, duración y contenido en frecuencias). Los resultados indican que actualmente la respuesta dentro de la masa variaría por efecto de unos rellenos existentes en su cabecera, que amplificarían la respuesta en bajas frecuencias (< 3 Hz), mientras que el



Figura 1. Vista actual del deslizamiento en suelos de El Molinar (coherent landslide *sensu* Keefer, 1984). Este deslizamiento fue inducido por el terremoto de 1620, Mw 5.5 (Tabla 1).  
Figure 1. Current view of El Molinar soil slide (coherent landslide *sensu* Keefer, 1984). This landslide was induced by the 1620, Mw 5.5, earthquake (Table 1).

resto del cuerpo del deslizamiento amplificaría las altas frecuencias.

Las inestabilidades producidas en la Rambla de los 17 Arcos durante el terremoto de Lorca (Mayo 2001, Mw 5.1; Figura 2) han sido estudiadas por Alfaro *et al.* (2012a) y por Delgado *et al.* (2013a). Sus resultados ponen de manifiesto el control que tiene el ángulo de incidencia de la acción sísmica, así como la propia interacción de ésta con la ladera, en la localización de las inestabilidades en campo cercano. Resultados similares han obtenido Rodríguez-Peces *et al.* (2013b) a partir del análisis de fracturación de los macizos rocosos involucrados.

Más recientemente, Delgado *et al.* (2013b) han presentado los primeros datos experi-

mentales de registros sísmicos obtenidos en grandes inestabilidades existentes (Güevéjar, Diezma y El Molinar). Los resultados demuestran que cada inestabilidad tiene un patrón propio de respuesta, pero que en todos los casos se observa que los registros sísmicos obtenidos dentro de la masa inestable son claramente diferentes a los observados fuera de ella, siendo notable el caso de Diezma, donde la amplificación del movimiento del suelo es hasta 3-4 veces en cierto rango de frecuencias.

La realización de estudios dinámicos *sensu stricto* es todavía poco frecuente porque requieren información (geológica, geotécnica, sísmica) o equipamiento (estaciones sísmicas, prensas dinámicas, etc.) que raras veces está disponible.



Figura 2. Movimientos complejos (deslizamiento-desprendimiento) en calcarenitas inducidos por el terremoto de Lorca de 2011, Mw 5.1 (disrupted landslide *sensu* Keefer, 1984).

Figure 2. Complex landslides (slide-fall) in calcarenites induced by the Lorca earthquake of 2011, Mw 5.1 (disrupted landslide *sensu* Keefer, 1984).

#### 4. Mapas previsores de inestabilidades de ladera

Una consecuencia de los estudios realizados sobre inestabilidades individuales es la aplicación del conocimiento adquirido para realizar zonaciones del territorio y delimitar áreas propensas a sufrir inestabilidad durante terremotos. Hasta la fecha la mayoría de los mapas previsores realizados se han basado en el método del bloque rígido deslizante o Newmark (Jibson, 1993, 2007; Jibson *et al.*, 2000). En él se considera el estado de la ladera (a partir de imponer un modelo de rotura plana), calculando la denominada aceleración crítica (*ac*) como la aceleración mínima necesaria para alcanzar un equilibrio estricto en la ladera (Factor de Seguridad = 1), y se compara con la acción sísmica (acelerogramas). Permite determinar la probabilidad de rotura por acción sísmica en función del denominado desplazamiento de Newmark (*DN*), o desplazamiento acumulado durante la sacudida cuando la aceleración del terremoto excede el valor de *ac* de la ladera. De esta forma se han propuesto mapas previsores para zonas de Alicante (Delgado *et al.*, 2004a, b, 2006), Andorra (Coral Moncayo, 2002; Figueras *et al.*, 2005), Granada y Murcia (Rodríguez-Peces, 2008, 2010; Rodríguez-Peces *et al.*, 2008, 2009a, b, c, d, 2011c, d, 2012, 2013a; García-Mayordomo *et al.*, 2009).

Si bien el método de Newmark ha sido muy utilizado, no es el único. Así, Mulas *et al.* (2001, 2003) en su estudio de diversos valles del Pirineo Central, realizaron una clasificación del territorio a partir de una combinación (matriz) de parámetros específicos de la ladera (litología, pendiente, etc.) y de la acción sísmica (intensidad macrosísmica esperada en 475 años). Más recientemente, Mulas *et al.* (2010) han realizado un estudio comparativo de diversas técnicas para la elaboración de mapas previsores en las mismas zonas. De la comparativa realizada señalan tres elementos clave: (1) un conocimiento detallado de la acción sísmica, siendo muy interesante disponer de medidas in situ mediante acelerómetros, (2) los mapas deben realizarse para

cada tipología de inestabilidad, pues los condicionantes (tanto estáticos como dinámicos) varían de una tipología a otra, y (3) considerar la variabilidad de las propiedades geotécnicas de los materiales.

Otra alternativa metodológica es la usada por Peláez *et al.* (2005), que elaboraron mapas de peligrosidad sísmica para el SE de la Península Ibérica en términos de Intensidad Arias (*IA*), parámetro de movimiento del suelo que tiene en cuenta no sólo la amplitud de la sacudida, sino también el contenido en frecuencias y la duración del evento. Para representar los resultados utilizaron valores de 0.11, 0.32 y 0.54 m/s, valores umbral de *IA* para que ocurran inestabilidades de tipo desprendimiento, deslizamientos coherentes y extensiones laterales, respectivamente (Keefer y Wilson, 1989). El mapa de peligrosidad resultante, con un 10% de excedencia en 50 años (periodo de retorno de 475 años), muestra que el sector central de la cordillera Bética y parte de la provincia de Alicante podrían verse afectados por desprendimientos. Sólo el sector de Granada y Campo de Dalías (Almería) registrarían valores de *IA* suficientemente altos como para ser esperables deslizamientos coherentes.

Hasta la fecha, la realización de mapas previsores se ha encontrado con una limitación básica: la ausencia de inventarios completos de inestabilidades inducidas por terremotos concretos, que permitan una correcta calibración de las diversas metodologías disponibles. Hasta hace poco tiempo este control se ha efectuado con pocas inestabilidades (Delgado *et al.*, 2006; Rodríguez-Peces *et al.*, 2011c,d), lo que hace que las incertidumbres sean inherentes a los resultados. No obstante, terremotos recientes, para los que se disponen de inventarios quasi-completos, están permitiendo superar estas limitaciones. Así, Marques *et al.* (2007), utilizando las más de 250 inestabilidades desencadenadas por la serie sísmica de 2005 en Fogo-Congro (San Miguel, Azores), efectuaron un análisis de susceptibilidad a partir de regresión logística, utilizando como variables la distribución

espacial de las inestabilidades, la litología, la distancia al epicentro, la pendiente y la orientación de las vertientes. Este tipo de aproximación tiene gran importancia en el ámbito de la ordenación del territorio al permitir identificar las zonas de futura ocurrencia de inestabilidades. Rodríguez-Peces *et al.* (2012, 2013a) utilizaron un inventario de inestabilidades desencadenadas por el terremoto de Lorca de 2011 (volumen > 1 m<sup>3</sup>) y un DEM de 4 m de resolución espacial en un análisis de Newmark. Los resultados obtenidos ponen de manifiesto que la mayoría de las inestabilidades (desprendimientos en roca) ocurrieron en zonas donde *DN* fue inferior a 2 cm.

### 5. Inventario y catalogación de inestabilidades sismo-inducidas

La abundante documentación histórica disponible, tanto en España como en Portugal, ha permitido identificar inestabilidades asociadas a terremotos ocurridos en fechas tan tempranas como el año 382 b.C. (Vaz, 2010). Diversos documentos históricos describen claramente la ocurrencia de inestabilidades de ladera inducidas por terremotos (Moreira de Mendonça, 1758; Prado, 1863; Fernández Castro *et al.*, 1885; Orueta, 1885; entre otros muchos). Frecuentemente esta documentación ha sido recopilada en el marco de estudios de sismicidad histórica, facilitando su posterior consulta (IGN, 1980; Vidal, 1986; Barata *et al.*, 1989; Martínez Solares, 2001; Olivera *et al.*, 2006; entre otros). A partir de esta información, diversos autores han elaborado, a su vez, catálogos de inestabilidades sismo-inducidas por determinados eventos, tanto en España como en Portugal.

A partir de registros históricos, Zêzere *et al.* (2001) describen las inestabilidades de Costa do Castelo y de Santa Catarina, localidades afectadas por los terremotos de 1512 y 1597, respectivamente, procurando reconstruir sus características y tipologías. Marques (2004) estudió la relación directa entre sismos, erupciones y factores meteorológicos en la ocurrencia de inestabilidades en las islas Azores,

enriqueciendo la base de datos de inestabilidades sismo-inducidas en la región. A partir del trabajo inicial de Zêzere *et al.* (2001), Vaz (2010) y Vaz y Zêzere (2011) identificaron 29 inestabilidades provocados por la actividad sísmica en Portugal. La identificación del tipo de inestabilidad se basó en fotografías, datos históricos, arqueológicos, modelos digitales del terreno y reconocimiento de campo. No obstante, muchas veces no se pudieron clasificar debido a lo incompleto de los datos históricos. Para aquellos que sí se pudo hacer correctamente, la mayoría de ellos correspondían a inestabilidades de tipo “disrupted” (sensu Keefer, 1984), desprendimientos de rocas. Un resultado muy relevante de este trabajo fue encontrar diferencias significativas en la distribución espacial de las inestabilidades en Portugal en función del factor desencadenante: las inestabilidades desencadenadas por precipitaciones se concentraban esencialmente en el sector centro y norte del país, donde la energía del relieve es mayor, mientras que las sismo-inducidas ocurren mayoritariamente en el sur y centro de Portugal, siguiendo la distribución de las intensidades sísmicas máximas observadas en el periodo histórico e instrumental.

Delgado *et al.* (2011b) han elaborado un catálogo de inestabilidades sismo-inducidas en la Cordillera Bética a partir de documentación histórica, de la inspección y verificación sobre el terreno así como de los inventarios realizados *in situ* de eventos recientes (1999 a 2005). Los datos recopilados señalan que las inestabilidades de tipo “disrupted” son las más frecuentes, a semejanza de lo observado en Portugal (Vaz, 2010).

Las inestabilidades inducidas por eventos recientes (1999 hasta la actualidad) han sido inventariadas a partir de inspecciones *in situ*. Así, Mulas (1999) inventarió parte de las inestabilidades desencadenadas por el terremoto de Mula (2/Feb/1999, Mw 4.7). De la misma forma, Alfaro *et al.* (2012b,c,d) han publicado el inventario de inestabilidades desencadenadas por el terremoto de Lorca (11/May/2011, Mw 5.1) y Marques *et al.* (2007) hicieron lo

propio de la serie sísmica de 2005 de Fogo-Congro (San Miguel, Azores). La principal limitación de estos estudios ha consistido en la falta de material cartográfico post-terremoto, que sirva de apoyo para una rápida inspección regional e identificación de las inestabilidades en áreas remotas.

A partir de los trabajos de Vaz (2010) y Delgado *et al.* (2011b), así como de la información recogida en los trabajos anteriormente mencionados, se ha elaborado un catálogo de terremotos e inestabilidades sismo-inducidas en la Península Ibérica (Tabla 1, Figura 3).

## 6. Discusión

El análisis del catálogo elaborado permite extraer información útil acerca de las inestabilidades. Un primer aspecto a señalar es que la inestabilidad más frecuentemente documen-

tada es la denominada de tipo “disrupted”, que consiste en desprendimientos en suelos o rocas, o pequeños deslizamientos cuya masa se desorganiza al progresar el movimiento de la masa (Figura 4). Este tipo de inestabilidad puede ocurrir incluso para eventos de baja magnitud ( $M \sim 2.6$ , Tabla 1) en laderas que se encontraban en equilibrio estricto en el momento de ocurrir el terremoto. Para eventos de magnitud moderada a baja ( $M_w < 5.5$ ), como son todos los ocurridos en el periodo post-1999 (Figura 3), prácticamente constituyen la única tipología desencadenada. En cambio, la proporción de las otras tipologías (deslizamientos coherentes y flujos) aumenta para magnitudes  $M_w > 5.5$ . Ello es debido a que el movimiento del suelo durante estos eventos tiene una duración y amplitud mayor, así como un contenido apropiado de bajas frecuencias, que es capaz de excitar las grandes masas de este tipo de inestabilidades y ponerlas en movimiento.

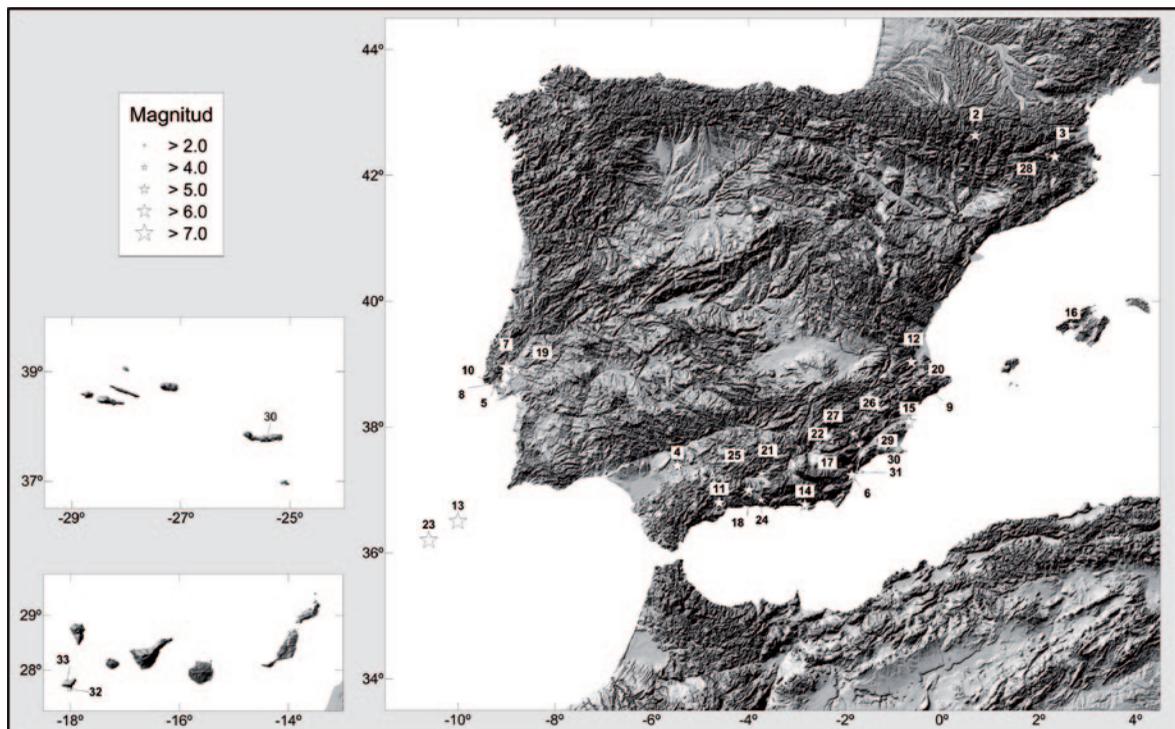


Figura 3. Terremotos desencadenantes de movimientos de ladera en España y Portugal. El número hace referencia a la primera columna de la Tabla 1.

Figure 3. Earthquakes that triggered landslides in Portugal and Spain. Number refers to first column in Table 1.

Tabla 1. Características de los eventos desencadenantes de inestabilidades y distancias epicentrales máximas observadas para cada tipología (*sensu* Keefer, 1984). Tipologías: “Dis.” – Disrupted; “Coh” – Coherent; “Flow” – Flujos.

Table 1. Characteristics of earthquakes triggering landslides and maximum observed epicentral distances for each typology (*sensu* Keefer, 1984). Typology: “Dis.” – Disrupted; “Coh” – Coherent; “Flow” – Flow.

Evento	Fecha	Lon	Lat	Z	Magnitud Mw/Ms/otra	Imsk	Dist. máx. (km)			Area km <sup>2</sup>
							Dis.	Coh.	Flow	
1	00/00/0382	-12.00	36.00	-	- / - / 7.5	-	584			
2	02/03/1373	0.68	42.63	16	6.5 / - / -	VIII-IX		74.5		
3	02/02/1428	2.33	42.30	9	6.5 / - / -	IX		9.1		
4	05/04/1504	-5.47	37.38	-	6.9 / - / -	VIII-IX	-	17.6	-	
5	28/01/1512	-9.20	38.70	-	- / - / 6.3	-	-	-	6	
6	09/11/1518	-1.87	37.23	-	6.1 / - / -	VIII-IX	1.4	-	-	
7	26/01/1531	-9.00	38.95	-	- / - / 7.1	IX	96	-	29	
8	22/07/1597	-9.20	38.70	-	- / - / 5.7	-	5	-	-	
9	02/12/1620	-0.47	38.70	-	5.5 / - / -	VII-VIII	0.3	1.3	-	3.6
10	24/06/1626	-9.20	38.70	-	- / - / 4.0	-	6	-	-	
11	09/10/1680	-4.60	36.80	-	6.8 / - / -	VIII-IX	-	23.2	-	
12	23/03/1748	-0.63	39.03	-	6.2 / - / -	IX	11.3	-	-	
13	01/11/1755	-10.00	36.50	-	8.7 / - / -	XI-XII	769	577	-	
14	25/08/1804	-2.83	36.77	-	6.4 / - / -	VIII-IX	32.5	26	-	857
15	21/03/1829	-0.68	38.08	-	6.6 / - / -	IX-X	38.7	-	-	
16	15/05/1851	2.67	39.63	-	5.2 / - / -	VII	23			
17	10/06/1863	-1.93	37.37	-	4.2 / - / -	VI-VII	8.5	-	-	66
18	25/12/1884	-3.98	37.00	-	6.5 / - / -	IX-X	35.8	45.4	39.4	3170
19	23/04/1909	-8.80	38.90	-	- / - / 6.0	IX	165	-	-	
20	07/01/1945	-0.58	38.80	-	4.8 / 4.8 / -	VII	15.4	-	-	
21	19/04/1956	-3.73	37.26	5	5.0 / 5.0 / -	VIII	4.8	-	-	
22	09/06/1964	-2.57	37.74	5	4.8 / 4.8 / -	VIII	8.4	2.3	-	34
23	28/02/1969	-10.60	36.20	22	- / - / 7.5	VII	222	-	-	
24	24/06/1984	-3.74	36.84	5	5.0 / 5.0 / -	V	10.4	13.6	-	104
25	24/10/1991	-4.07	37.25	5	- / - / 2.6	-	7.9			
26	02/02/1999	-1.50	38.10	1.1	4.7 / 4.7 / -	VI	19.8	8.8	-	185
27	06/08/2002	-1.84	37.90	1.2	5.0 / 4.8 / -	V	4.2	-	-	3.5
28	21/09/2004	2.16	42.34	3	- / - / 4.0	V-VI	5	-	-	
29	29/01/2005	-1.76	37.85	10.9	4.8 / 4.7 / -	VI	16.3	-	-	18
30	10/05/2005	-25.43	37.74	4	- / - / 3.9	VI	6	-	-	10
31	11/05/2011	-1.71	37.72	4	5.1 / - / -	VII	9.6	4.3	-	104
32	29/08/2011	-1.65	37.28	3	- / - / 2.7	III	13.9	-	-	
33	08/10/2011	-18.02	27.65	12	4.0 / - / 4.4	V	4.5			
34	11/11/2011	-18.05	27.78	21	- / - / 4.6	IV-V	7			

Considerando las distancias epicentrales máximas de ocurrencia de las inestabilidades en función de la magnitud del evento (Figura 5), se observa un comportamiento dispar. Así, para terremotos de magnitud  $M_w > 5.5$ , las inestabilidades inducidas se encuentran a distancias inferiores a los valores máximos propuestos por Keefer (1984). Las excepciones son los eventos 1 y 13 (SW Cabo de San Vicente), y 19 (Benavente), todos ellos históricos, donde el error de localización epicentral es elevado y, en consecuencia, también lo son las distancias calculadas. Adicionalmente, por lo elevado de la magnitud de alguno de estos eventos, tal vez el uso de distancias epicentrales no sea correcto, siendo más apropiadas las distancias a la falla causante.

Para magnitudes  $M_w < 5.0$ , sin embargo, la mayoría de las distancias máximas observadas superan las distancias máximas propuestas por Keefer (1984), constituyendo *outliers sensu Delgado et al.* (2011a). En este caso, y como quiera que la mayoría de estos eventos han tenido lugar durante el periodo instrumental reciente, estas distancias no pueden atribuirse a errores de localización epicentral. También es remarcable en esta figura que para magnitudes  $M_w \leq 5.0$ , la gran mayoría de los datos representados proceden del área de estudio, siendo pocos los procedentes de otras partes del mundo. Teniendo presente que entre los datos usados por Keefer (1984) para establecer las distancias máximas que propuestas sólo había tres eventos de magnitud inferior a 5.5, parece razonable que las distancias máximas en dicho rango de magnitudes ( $M_w < 5.0$ ) sean revisadas.

Otro aspecto significativo de la Figura 5 es que para magnitudes moderadas a altas (e.g.  $M_w > 6.0$ ), las distancias epicentrales máximas observadas para inestabilidades de tipo “coherent” son, en ocasiones, mayores que las observadas para la tipología “disrupted”, lo cual es contradictorio (se requiere más energía para poner en movimiento una gran masa-deslizamiento coherente- que no un bloque suelto de suelo o roca). Incluso hay eventos

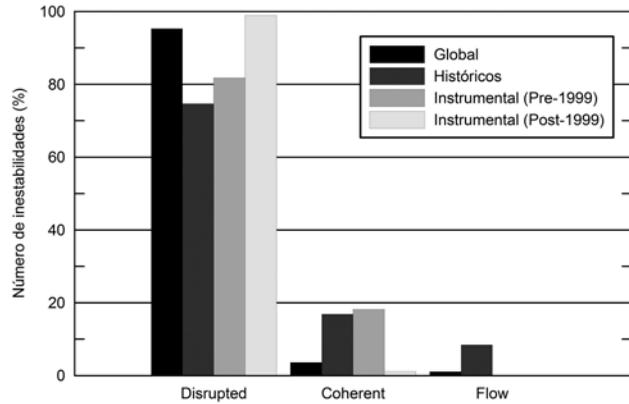


Figura 4. Frecuencia para cada tipología de inestabilidad sismo-inducida en diversos intervalos temporales.

*Figure 4. Seismic-induced landslide typology frequency for several time intervals.*

para los cuales sólo hay información sobre inestabilidades de tipo “coherent”, incluso a grandes distancias (Tabla 1). Este hecho pone de relieve que el catálogo recopilado es incompleto, faltando información sobre desprendimientos para estos eventos (históricos en todos los casos), pero también demuestra que las inestabilidades reconocidas debieron causar un impacto notable en la sociedad de su momento (bien por sus dimensiones o por los daños causados), que explica que quedarán registradas en las crónicas de la época.

Finalmente, atendiendo a la superficie de territorio afectada por inestabilidades (Figura 5), son pocos los datos disponibles todavía. Mientras los eventos de mayor magnitud/intensidad se caracterizan por áreas claramente inferiores a los máximos observados por Keefer (1984) y Rodríguez *et al.*, (1999), para magnitudes bajas ( $M_w < 5.0$ ) estas áreas son elevadas, próximas o incluso superiores a los valores máximos observados a nivel mundial (Keefer, 1984). Es también llamativo que pese a las grandes distancias epicentrales observadas, el área afectada es proporcionalmente baja. Ello es debido a que varios de los eventos que desencadenaron inestabilidades a grandes distancias (*outliers*) tenían su epicentro fuera de las zonas afectadas por inestabilidades, lo que incrementa las distancias, pero no las áreas (Delgado *et al.*, 2011b).

A la hora de interpretar los anteriores resultados no debe olvidarse que el catálogo disponible es claramente incompleto, especialmente para los eventos históricos (anteriores a 1945). Además, los errores de localización de los epicentros (y la consiguiente distancia epicentral) pueden superar la decena de kilómetros en los eventos históricos, localizados a partir de información macrosísmica. En cam-

bio, la información es cada vez más precisa con el tiempo, de manera que los eventos registrados a partir de 1999, se caracterizan por errores de localización epicentral pequeños (inferior a 3 km) y los inventarios realizados se pueden considerar prácticamente completos para inestabilidades de cierto volumen ( $> 1-10 \text{ m}^3$ ). Es por ello que los resultados y conclusiones deben tomarse con precaución.

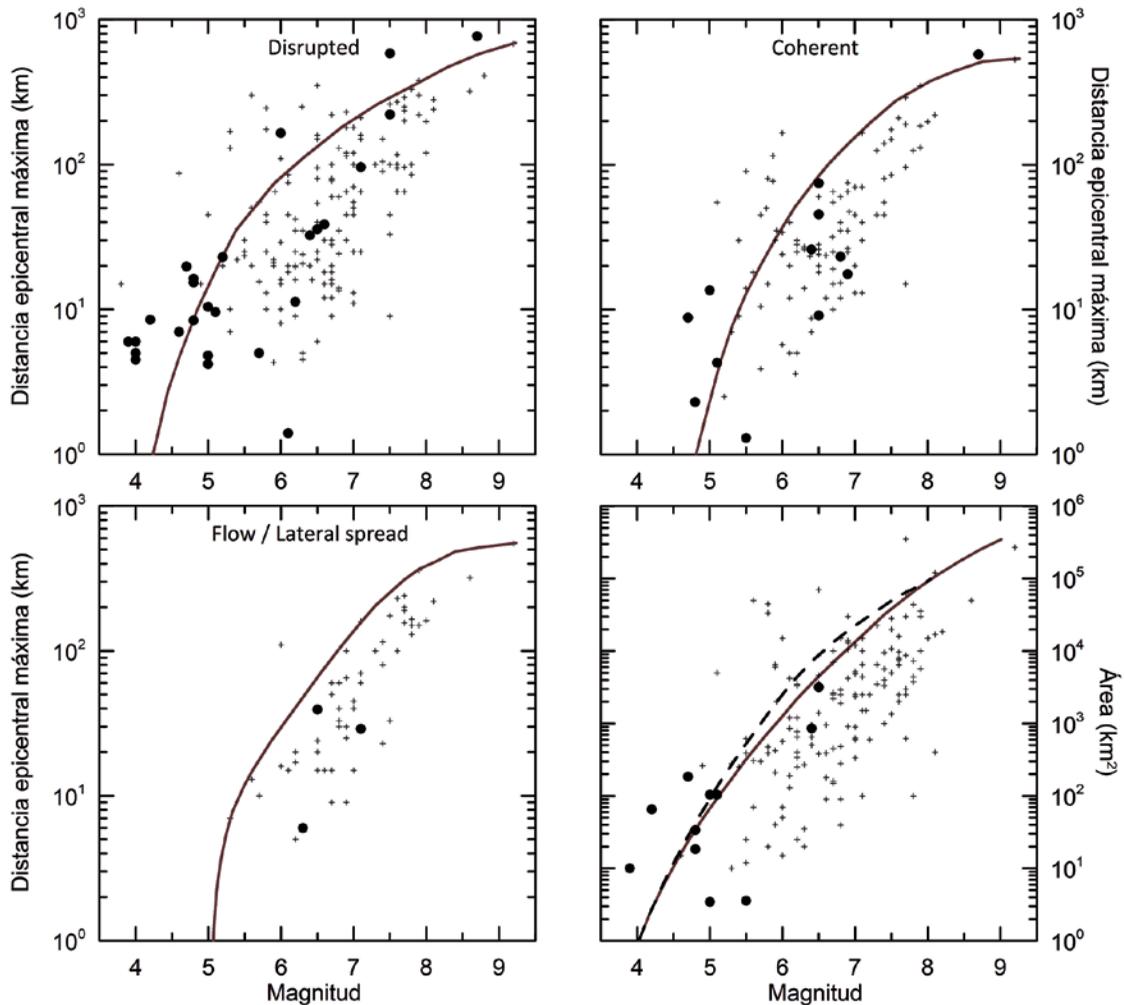


Figura 5. Distancias epicentrales máximas observadas y área de afección en función de la magnitud del terremoto. Círculos: datos Tabla 1; Cruces: datos del resto del mundo (Delgado *et al.*, 2011a); Línea continua: distancias epicentrales/áreas máximas de ocurrencia de inestabilidades según Keefer (1984); Línea discontinua: áreas máximas de ocurrencia de inestabilidades según Rodríguez *et al.* (1999).

Figure 5. Maximum epicentral distance observed and area affected by landsliding as a function of event magnitude. Circles: Data from Table 1; Cross: Worldwide data (Delgado *et al.*, 2011a); Continuous line: maximum epicentral distance/area of occurrence of induced landslides after Keefer (1984); Discontinuous line: maximum area of affection of instabilities after Rodríguez *et al.* (1999).

## 7. Conclusiones

Los datos aportados por diversos trabajos han permitido elaborar una base de datos de terremotos desencadenantes (34) y sus correspondientes inestabilidades (>650). La base de datos sólo puede considerarse completa para eventos posteriores a 1999, mientras que es tanto más incompleta cuanto más antiguo es el evento.

Los datos actualmente disponibles indican que las inestabilidades de tipo “disrupted” son las más frecuentes, siendo casi las únicas reconocidas para eventos de magnitud  $M_w < 5.5$ ; en cambio, las inestabilidades de tipo “coherent” sólo se reconocen con cierta frecuencia para eventos de magnitud  $M_w > 5.5$ . Las distancias máximas de ocurrencia de inestabilidades de tipo disrupted (10 – 20 km) y coherent (10 – 15 km) son, proporcionalmente, grandes para eventos de magnitud  $M_w < 5.0$ , siendo muchas de ellas mayores que las distancias máximas recogidas en la literatura (5 – 10 km y 5 km respectivamente). El área afectada por inestabilidades es relativamente pequeña para los pocos eventos disponibles de magnitud moderada a alta (entre 850 y algo menos de 3200 km<sup>2</sup>). En cambio, es próxima a los valores máximos observados a nivel mundial para eventos de magnitud baja,  $M_w < 5.0$  (aproximadamente 100 km<sup>2</sup>).

## Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el proyecto CGL2011-30153-C02-02 y por el grupo de investigación VIGROB-184 (Universidad de Alicante).

Los autores quieren expresar su agradecimiento a P. Alfaro (UA), J.M. Azañón (UGR), D. Clavero (UGR), S. Figueras (IGC), J. García-Mayordomo (IGME), F.J. García-Tortosa (UJA), J. Garrido (UGR), L. Hernández (COPTPT-GC), L. Lenti (IFSTTAR), J.A. López (IES J. Arcas), C. López-Casado (UGR), A. Macau (IGC), S. Martino (ULS), J. Mulas (IGME), J.A. Peláez (UJA), M.J. Rodríguez-Peces (UCM), J.C. Santamarta (ULL),

E. Sanz (UPM), P.G. Silva (USAL) y J.L. Zêzere (UL) por su ayuda en la recopilación de la información presentada.

## Referencias

- Alfaro, P.; Delgado, J.; García-Tortosa, F.J.; Giner, J.J.; Lenti, L.; López-Casado, C.; Martino, S.; Scarascia-Mugnoza, G. (2012a). The role of near-field interaction between seismic waves and slope on the triggering of a rockslide at Lorca (SE Spain). *Natural Hazards and Earth System Science*, 12, 3631-3643.
- Alfaro, P.; Delgado, J.; García-Tortosa, F.J.; Lenti, L.; López, A.; López-Casado, C.; Martino, S. (2012b). Widespread landslides induced by the  $M_w$  5.1 Lorca, SE Spain, earthquake of 11 May 2011. *Engineering Geology*, 137-138, 40-52.
- Alfaro, P.; Delgado, J.; García-Tortosa, F.J.; Lenti, L.; López, A.; López-Casado, C.; Martino, S. (2012c). Landslides induced by the May 11 (2011), Lorca (SE Spain), earthquake ( $M_w$  5.1). *Proc. ESC-ISL*, Banf, 5 p.
- Alfaro, P.; Delgado, J.; García-Tortosa, F.J.; Lenti, L.; López, A.; López-Casado, C.; Martino, S. (2012d). Movimientos de ladera inducidos por el terremoto de Lorca. *VII Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica*, San Sebastián, 6 p.
- Barata, M.R.; Braga, M.L.; Wagner, M.; Guerra, B.; Alves, J.; Neto, J. (1989). *Sismicidade de Portugal - Estudo da Documentação dos Séculos XVII e XVIII*. Vol II, Ministério do Planeamento e da Administração do Território, Secretaria de Estado do Ambiente e dos Recursos Naturais, Gabinete de Protecção e Segurança Nuclear. Lisboa.
- Bird, J.F.; Bommer, J.J. (2004). Earthquake losses due to ground failure. *Engineering Geology*, 75, 147-279.
- Cabral, J.; Marques, F. (2001). Paleoseismological studies in Portugal: Holocene thrusting or landslide activity? *EOS Transactions*, 82 (32), 351-352.
- Cabral, J.; Marques, F.; Figueiredo, P.; Matias, L. (2011). Active surface faulting or landsliding in the Lower Tagus Valley (Portugal)? A solved controversy concerning the Vila Chã de Ourique site. *Journal of Seismology*, 15(2), 215-234.
- Coral Mocayo, H. (2002). Utilización de métodos experimentales y de simulación numérica para la microzonificación sísmica de áreas urbanas.

- zadas en Andorra. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña.
- Delgado, J.; Peláez, J.A.; Tomás, R.; Estévez, A.; López Casado, C.; Doménech, C.; Cuenca, A.; Henares, J. (2004a). Susceptibilidad a movimientos de ladera inducidos por terremotos en Alcoy (Alicante) y sectores adyacentes. *Geotemas*, 6, 285-288.
- Delgado, J.; Peláez, J.A.; Tomás, R.; López Casado, C.; Estévez, A.; Doménech, C.; Cuenca, A. (2004b). Incertidumbres en la determinación de la susceptibilidad a movimientos de ladera inducidos por terremotos en Alcoy (Alicante). En: *Medio ambiente, recursos y riesgos naturales. Análisis mediante Tecnología SIG y Teledetección* (C. Conesa García; Y. Álvarez Rigel; J.B. Martínez-Guevara, eds.). Murcia, Volumen II, 165-175.
- Delgado, J.; Peláez, J.A.; Tomás, R.; Estévez, A.; López Casado, C.; Doménech, C.; Cuenca, A. (2006). Evaluación de la susceptibilidad de las laderas a sufrir inestabilidades inducidas por terremotos. Aplicación a la cuenca de drenaje del río Serpis (provincia de Alicante). *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 19(3-4), 197-218.
- Delgado, J.; Garrido, J.; López-Casado, C.; Martino, S.; Peláez, J.A. (2011a). On far field occurrence of seismically induced landslides. *Engineering Geology*, 123, 204-213.
- Delgado, J.; Peláez, J.A.; Tomás, R.; García-Tortosa, F.J.; Alfaro, P.; López-Casado, C. (2011b). Seismically-induced landslides in the Betic Cordillera (S Spain). *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 31, 1203-1211.
- Delgado, J.; Alfaro, P.; García-Tortosa, F.J.; Giner, J.; Lenti, L.; López-Casado, C.; Martino, S.; Scarascia-Mugnozza, G. (2013a). Análisis de la interacción entre el campo de ondas y la geometría de una ladera inestable durante el terremoto de 2011 en Lorca (Mw 5.1): Implicaciones prácticas. VIII Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables. Palma de Mallorca, Volumen III, 1242-1253.
- Delgado, J.; Esteve, C.; Garrido, J.; Giner, J.; Jáuregui, P.; Lenti, L.; López-Casado, C.; Martino, S.; Soler, J.L. (2013b). Primeros datos experimentales sobre el comportamiento dinámico de grandes deslizamientos en la Cordillera Bética. VIII Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables. Palma de Mallorca, Volumen III, 1231-1241.
- Esteve, C. (2011). Análisis dinámico del deslizamiento de El Molinar (Alcoy). Proyecto Fin de Carrera. Universidad de Alicante.
- Fernández Castro, M.; Lasala, J.P.; Cortázar, D.; Gonzalo y Tarín, J. (1885). *Terremoto de Andalucía: Informe de la Comisión nombrada para su estudio dando cuenta del estado de los trabajos en 7 de marzo de 1885*. Imp. M. Tello, Madrid.
- Ferreira, A.B.; Zêzere, J.L.; Rodrigues, M.L. (2002). Historical Seismicity and Landslides in Portugal. Examples from the 16th Century. In: *Geomorphology: from Expert Opinion to Modelling. A tribute to Professor Jean-Claude Flageollet*, (D. Delahaye; O. Maquaire, eds.). Rouen, 105-114.
- Figuerras, S.; Macau, A.; Goula, X.; González, M. (2005). Aplicación del método de Newmark para el estudio de los movimientos de ladera activados por terremotos en Andorra. *VI Simposio Nacional sobre taludes y laderas inestables*. Valencia, Volumen III, 12.
- Fonseca, F.; Bosì, V.; Vilanova, S.P.; Meghraoui, M. (2000). Investigations unveil Holocene thrusting for onshore Portugal. *EOS Transactions*, 81, 412-413.
- García-Mayordomo, J. (1998). Riesgo Sísmico en la Cuenca de Alcoy (Alicante). Aproximación a una Zonificación Sísmica. Tesis del Máster, Universidad Complutense de Madrid.
- García-Mayordomo, J. (1999). Zonificación Sísmica de la Cuenca de Alcoy mediante un Sistema de Información Geográfico. *1er Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*. Murcia, 443-450.
- García-Mayordomo, J.; Rodríguez Peces, M.J.; Azañón, J.M.; Insua-Arévalo, J.M. (2009). Advances and trends on earthquake-triggered landslide research in Spain. *1st INQUA-IGCP-567 International Workshop on Earthquake Archaeology and Palaeoseismology*, Baelo Claudia, 4 p.
- IGN (1980). *El terremoto de Andalucía del 25 de diciembre de 1884*. Publicaciones IGN, Madrid.
- INQUA (2013). [www.eecatalog.sinanet.apat.it/terremoti/index.php](http://www.eecatalog.sinanet.apat.it/terremoti/index.php).
- Jibson, R.W. (1993). Predicting earthquake-induced landslide displacements using Newmark's sliding block analysis. *Transportation Research Record*, 1411, 9-17.
- Jibson, R.W. (2007). Regression models for estimating coseismic landslide displacement. *Engineering Geology*, 91, 209-218.
- Jibson, R.W.; Harp, E.L.; Michael, J.A. (2000). A method for producing digital probabilistic seismic landslide hazard maps. *Engineering Geology*, 58, 271-289.

- Jiménez Pintor, J.; Azor, A. (2006). El Deslizamiento de Güevéjar (provincia de Granada): un caso de inestabilidad de laderas inducida por sismos. *Geogaceta*, 40, 287-290.
- Keefer, D.K. (1984). Landslides caused by earthquakes. *Geological Society of America Bulletin*, 95, 406-421.
- Keefer, D.K.; Wilson, R.C. (1989). Predicting earthquake-induced landslides, with emphasis on arid and semi-arid environments. In: *Landslides in a semi-arid environment* (P.M. Sadler; D.M. Morton, eds.). Inland Geological Society, 2, 118-149.
- Marques, F. (2001). The deep seated landslide of Praia do Telheiro (SW coast of Algarve, Portugal). *Comunicações do IGM*, 88:,185-201.
- Marques, F. (2005). The "Praia do Telheiro" landslide: a 1755 Lisbon earthquake triggered slope instability? *International conference 250th Anniversary of the Lisbon Earthquake, Lisbon*, 399-403.
- Marques F. (2007). The seismically triggered deep-seated landslide of Praia doTelheiro (SW Portugal). *EGU General Assembly 2007. Geophysical Research Abstracts*, 9, 10894.
- Marques, R. (2004). *Contribuição para o conhecimento da instabilidade geomorfológica nas Açores: Estudo de movimentos de vertente associados a diferentes mecanismos desencadeantes*. Tese de Mestrado em Vulcanologia e Riscos Geológicos, Departamento de Geociências, Universidade dos Açores.
- Marques, R.; Queiroz, G.; Coutinho, R.; Zêzere, J.L. (2007). Actividade geomorfológica desencadeada pela crise sísmica de 2005 no Vulcão do Fogo (S. Miguel, Açores): avaliação da susceptibilidade com recurso a regressão logística. *Publicações da Associação Portuguesa de Geomorfólogos*, 5, 47-61.
- Marques, R.; Zêzere, J.L.; Gaspar, J.L.; Amaral, P. (2009). Reconstituição e Modelação Probabilística da escoada detrítica de Vila Franca do Campo desencadeada pelo sismo de 22 de Outubro de 1522 (S. Miguel, Açores). *Publicações da Associação Portuguesa de Geomorfólogos*, 4, 175-182.
- Martínez Solares, J.M. (2001). *Los efectos en España del terremoto de Lisboa (1 de noviembre de 1755)*. Monografía 19, Ministerio de Fomento, Dirección General del Instituto Geográfico Nacional, Madrid.
- Mateos, R.M.; Rodríguez-Peces, M.J.; Azañón, J.M.; Rodríguez- Fernández, J.; Roldán, F.J.; García- Moreno, I.; Gelabert, B.; García-Mayordomo, J. (2012). El deslizamiento de Bàltx (Mallorca) y su posible origen sísmico. Procesos activos de expansión lateral desde el Pleistoceno Superior. *Boletín Geológico y Minero*, 124(1), 41-61.
- Mavrouli, O.; Corominas, J.; Wartman, J. (2009). Evaluación del peligro de desprendimientos rocosos inducidos por terremotos: El Solà de Santa Coloma, Andorra. VII Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables, Barcelona. Volumen II, 675-686.
- Michetti, A.M.; Esposito E. (2007). Environmental Seismic Intensity Scale 2007 – ESI 2007. In: *Memorie Descrittive della Carta Geologica d'Italia* (E. Vittori; L. Guerrieri, eds.). LXXIV. Servizio Geologico d'Italia, Dipartimento Difesa del Suolo, APAT, SystemCart Srl, Roma, Italy, 7–54.
- Moreira de Mendonça, J. (1758). *Historia universal dos terremotos, que tem havido no mundo, de que ha noticia, desde a sua criação até o seculo presente. Com huma narraçam individual do terremoto do 1 de Novembro de 1755, e noticia verdadeira dos seus effeitos em Lisboa, todo Portugal, Algarves e mais partes da Europa*.
- Mulas, J. (1999). *Inventario de inestabilidades desencadenadas por el terremoto de Mula de febrero de 1999*. IGME, Madrid. 2 Mapas. Inédito.
- Mulas, J.; Ponce de León, D.; Martínez, M.; Pardo, J.M. (2001). Diseño de una metodología para la zonificación de la inestabilidad de laderas naturales producidas por terremotos. Aplicación a una zona del Pirineo Central (Huesca). *V Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables*. Volumen III, 1241-1252.
- Mulas, J.; Ponce de León, D.; Reoyo, E. (2003). Microzonación sísmica de movimientos de ladera en una zona del Pirineo Central. *2º Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Málaga, 13-26.
- Mulas, J.; Ponce de León, D.; Pardo Sanjurjo, J.M.; Bardasano, L.; Prieto Martín, A.; Carnicero, C.L.; Herrera, G. (2010). *Microzonación sísmica de las inestabilidades de ladera. Diseño de una metodología y su aplicación a una zona piloto en el Pirineo aragonés (Alto Tena, Huesca)*. Informes Técnicos, nº 2, IGME. CD-Rom.
- Olivera, C.; Redondo, E.; Lambert, J.; Riera Melis, A.; Roca, A. (2006). *Els terratrèmols dels segles XIV i XV a Catalunya*. Institut Cartografic de Catalunya, Generalitat de Catalunya, Barcelona.

- Orueta y Duarte, D. (1885). *Informe sobre los terremotos ocurridos en el sud de España en diciembre de 1884 y enero de 1885*. Imprenta F. Muñoz, Málaga.
- Peláez, J.A.; Delgado, J.; López-Casado, C. (2005). A preliminary probabilistic seismic hazard assessment in terms of Arias intensity in southeastern Spain. *Engineering Geology*, 77, 139-151.
- Prado, C. (1863). Terremotos en la provincia de Almería. *Escenas Contemporáneas*, 1, 385-386.
- Reichert, K.; Michetti A.M.; Silva, P.G. (2009). Palaeoseismology: historical and prehistorical records of earthquake ground effects for seismic hazard assessment. *Soc. Geol. London Spec. Publ.*, 316, 1-10.
- Rodríguez, C.E.; Bommer, J.J.; Chandler, R.J. (1999). Earthquake-induced landslides: 1980-1997. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 18, 325-346.
- Rodríguez-Peces, M.J. (2008). *Evaluación regional de inestabilidades de ladera por efecto sísmico: Mapas de desplazamiento de Newmark para la Cuenca de Lorca, Cuenca de Granada y Sierra Nevada*. Tesis de Máster. Universidad de Granada.
- Rodríguez-Peces, M.J. (2010). *Analysis of earthquake-triggered landslides in the South of Iberia: Testing the use of the Newmark's method at different scales*. Tesis doctoral, Universidad de Granada.
- Rodríguez-Peces, M.J.; García-Mayordomo, J.; Azañón, J.M.; Jabaloy, A. (2008). Evaluación de inestabilidades de ladera por efecto sísmico en la Cuenca de Lorca (Murcia): Implementación del método de Newmark en un SIG. *Boletín Geológico Minero*, 119 (4), 459-472.
- Rodríguez-Peces, M.J.; García-Mayordomo, J.; Azañón, J.M. (2009a). Comparing Newmark's method at regional, sub-regional and site scales: seismically induced La Paca rock-fall case (Murcia, SE Spain). *8IWSMRR Workshop Abstract and Short Paper CD, 8th International Workshop on Seismic Microzoning and Risk Reduction*, Aguadulce.
- Rodríguez-Peces, M.J.; García-Mayordomo, J.; Azañón, J.M. (2009b). Comparación del método de Newmark a escala regional, local y de emplazamiento: el caso del desprendimiento de la Paca (Murcia, SE España). *Geogaceta*, 46, 151-154.
- Rodríguez-Peces, M.J.; García-Mayordomo, J.; Azañón, J.M. (2009c). Evaluación regional de inestabilidades de ladera inducidas por terremotos para diferentes escenarios sísmicos en Sierra Nevada (Granada, SE España). *VII Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables*, Barcelona. Volumen II, 687-698.
- Rodríguez-Peces, M.J.; García-Mayordomo, J.; Azañón, J.M.; Insua-Arévalo, J.M.; Pérez-García, J.L.; Delgado, J. (2009d). Comparación del método de Newmark a Escala regional, Local y de Emplazamiento en las Cuencas de Lorca y de Granada (SE España). *VII Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables*, Barcelona. Volumen II, 699-710.
- Rodríguez-Peces, M.J.; Azañón, J.M.; García-Mayordomo, J.; Yesares, J.; Troncoso, E.; Tsige, M. (2011a). The Diezma landslide (A-92 motorway, Southern Spain): history and potential for future reactivation. *Bulletin of Engineering Geology and Environment*, 70, 681-689.
- Rodríguez-Peces, M.J. García-Mayordomo, J.; Azañón, J.M.; Insua-Arévalo, J.M.; Jiménez Pintor, J. (2011b). Constraining pre-instrumental earthquake parameters from slope stability back-analysis: Palaeoseismic reconstruction of the Güevéjar landslide during the 1st November 1755 Lisbon and 25th December 1884 Arenas del Rey earthquakes. *Quaternary International*, 242, 76-89.
- Rodríguez-Peces, M.J.; García-Mayordomo, J.; Azañón, J.M.; Jabaloy, A. (2011c). Regional Hazard Assessment of Earthquake-Triggered Slope Instabilities Considering Site Effects and Seismic Scenarios in Lorca Basin (Spain). *Environmental & Engineering Geoscience*, 18 (2), 183-196.
- Rodríguez-Peces, M.J.; Pérez-García, J.L.; García-Mayordomo, J.; Azañón, J.M.; Insua-Arévalo, J.M.; Delgado, J. (2011d). Applicability of Newmark method at regional, sub-regional and site scales: seismically induced Bullas and La Paca rock-slide cases (Murcia, SE Spain). *Natural Hazards*, 59, 1109-1124.
- Rodríguez-Peces, M.J.; García-Mayordomo, J.; Martínez-Díaz, J.J.; Tsige, M. (2012). Inestabilidades de ladera provocadas por el terremoto de Lorca de 2011 (Mw 5.1): comparación y revisión de estudios de peligrosidad de movimientos de ladera por efecto sísmico en Murcia. *Boletín Geológico y Minero*, 123 (4), 459-472.
- Rodríguez-Peces, M.J.; García-Mayordomo, J.; Martínez-Díaz, J.J. (2013a). Slope instabilities triggered by the 11th May 2011 Lorca earthquake (Murcia, Spain): comparison to previous hazard assessments and proposition of a new hazard map and probability of failure

- equation. *Bulletin of Earthquake Engineering*, on-line first. DOI: 10.1007/s10518-013-9509-5.
- Rodríguez-Peces, M.J.; Martínez-Díaz, J.J.; García-Mayordomo, J.; Tsige, M. (2013b). La orientación de la sacudida sísmica como factor desencadenante de inestabilidades de ladera: El caso del Terremoto de Lorca de 2011. VIII Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables, Palma de Mallorca. Volumen III, 1254-1265.
- Sanz, E. (1992). El deslizamiento de ladera de Güevéjar (Granada) durante los terremotos de Lisboa (1755) y Andalucía (1884). *III Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables*, 195-203.
- Sanz, E. (1997). Le mouvement de versant de Güevejar (Grenade) au cours des tremblements de terre de Lisbonne (1755) et d'Andalousie (1884). *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 56, 83-87.
- Sanz, E. (2010). El antiguo deslizamiento rocoso del Peñón de Oceanilla (Sierra de Cabrejas, Cordillera Ibérica, Soria). *Geogaceta*, 48, 227-230.
- Silva, P.G.; González Hernández, F.M.; Goy, J.L.; Zazo, C.; Carrasco, P. (2001). Paleo and historical seismicity in Mallorca (Balears, Spain): a preliminary approach. *Acta Geológica Hispánica*, 36 (3-4), 245-266.
- Silva, P. G.; Rodríguez-Pascua, M.A.; Pérez-López, R.; Bardají, T.; Lario, J.; Alfaro, P.; Martínez-Díaz, J.J.; Reichert, K.; Giménez, J.; Giner, J.; Azañón, J.M.; Goy, J.L.; Zazo, C. (2008). Catalogación de los efectos geológicos y ambientales de los terremotos en España en la Escala ESI-2007 y su aplicación a los estudios paleosismológicos. *Geotemas*, 6, 1063-1066.
- Vaz, T. (2010). *Contribuição para o estudo dos movimentos de vertente desencadeados por eventos sísmicos em Portugal Continental*. Dissertação de Mestrado em Geografia Física e Ordenamento do Território, Universidade de Lisboa.
- Vaz, T.; Zêzere, J.L. (2011). Landslides induced by seismic events in Portugal mainland: identification and characterization. *Geophysical Research Abstracts*, 13, EGU2011-4802.
- Vidal, F. (1986). *Sismotectónica de la región Béticas-Mar de Alborán*. Tesis doctoral. Universidad de Granada.
- Vilanova, S.P.; Fonseca, J. (2004). A falha do Vale Inferior do Tejo na análise da perigosidade sísmica. *Sísmica 2004 - 6º Congresso Nacional de Sismologia e Engenharia Sísmica*, 379-388.
- Wasowski, J.; Keefer, D.; Lee, Ch. L. (2011). Toward next generation of research on earthquake-induced landslides: Current issues and challenges. *Engineering Geology*, 122, 1-8.
- Vollmert, A.; Reicherter, K.; Silva, P.G.; Fernandez-Steeger, T.M. (2011). Landslide mapping to analyse earthquake environmental effects (EEE) in Carmona, Spain – relation to the 1504 event? *2nd INQUA-IGCP-567 International Workshop on Active Tectonics, Earthquake Geology, Archaeology and Engineering*, Corinth.
- Zêzere, J.L.; Ferreira, A.B.; Rodrigues, M.L. (2001). Actividade sísmica e instabilidade de vertentes na cidade de Lisboa. V Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables, Madrid. Volumen III, 253-1264.