

Reactivación de deslizamientos costeros por el desarrollo urbanístico en el litoral granadino. Monitorización DInSAR e inventario de daños

*Coastal landslide reactivation caused by the urban development in the coastal fringe of Granada (Spain).
DInSAR monitoring and damage inventory*

Jose Miguel Azañón¹, Rosa María Mateos², Davide Notti¹, Jorge Pedro Galve¹, Francisca Fernández¹, Francisco Javier Roldán², Oriol Monserrat³, Francisco Lamas¹ y Vicente Pérez¹

¹ Departamento de Geodinámica, Universidad de Granada. Campus de Fuentenueva s/n, 18071 Granada, España. jazanon@ugr.es, davidenotti@gmail.com, jpgalve@gmail.com, paquifchacon@ugr.es, flamas@ugr.es, vperez@ugr.es

² Instituto Geológico y Minero de España. Urb. Alcázar del Genil, Edificio Zulema, 18006 Granada, España. rm.mateos@igme.es, fj.roldan@igme.es

³ Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya (CTTC), Divisió de Geomàtica. Avda. Carl Friedrich Gauss 7, 08860 Castelldefels, Barcelona, España. oriol.montserrat@cttc.es

ABSTRACT

The Marina del Este and Los Cármenes del Mar resorts, in the municipality of Almuñécar (Granada) were developed onto areas with large-dormant landslides, as they generally present a more gentle slope than adjacent stable zones. Consequently, landslides have been reactivated, as DInSAR results confirm. During the rainy winter 2009-2010, movements were accelerated. Severe damages in dwellings have been reported and some houses have been evacuated, causing a great social alarm. The present work shows the great requirement to take into account natural hazards in land-use planning and urban policy in hazardous areas in Spain, which is highly significant to protect the public from geological risks.

Key-words: Coastal landslides, reactivation, DInSAR, land-use planning.

RESUMEN

Las urbanizaciones de Marina del Este y Los Cármenes del Mar, en el municipio granadino de Almuñécar, se construyeron sobre antiguos deslizamientos costeros, aprovechando la topografía más suave que dejan las masas deslizadas. El urbanismo ha desencadenado la reactivación de los movimientos, cuyas tasas de velocidad han sido cuantificadas con técnicas DInSAR, registrando una importante aceleración durante el invierno lluvioso 2009-2010. Se han reconocido importantes daños en las viviendas, algunas de ellas ya desalojadas al presentar graves daños estructurales, lo que ha despertado una gran alarma social. El presente trabajo pone de manifiesto la imperiosa necesidad de incorporar los estudios de riesgos geológicos en la planificación urbanística y en la ordenación del territorio, asignatura pendiente de la legislación española.

Palabras clave: Deslizamientos costeros, reactivación, DInSAR, desarrollo urbanístico.

Geogaceta, 59 (2016), 83-86
ISSN (versión impresa): 0213-683X
ISSN (Internet): 2173-6545

Fecha de recepción: 3 de julio de 2015
Fecha de revisión: 20 de octubre de 2015
Fecha de aceptación: 27 de noviembre de 2015

Introducción

El rápido desarrollo urbanístico de la costa mediterránea española durante los últimos 30 años se ha caracterizado, entre otras cosas, por ignorar el contexto geológico del terreno y no incluir los riesgos naturales en la planificación territorial (Mateos, 2007).

La costa acantilada del litoral granadino ha sido objeto de un intenso urbanismo sobre laderas con una elevada pendiente y materiales altamente tecto-

nizados. El escarpado litoral de la franja occidental del municipio de Almuñécar ofrece un amplio catálogo de deslizamientos, algunos de ellos de grandes dimensiones. La topografía algo más suave que proporcionan las masas deslizadas, donde se ha alcanzado un cierto perfil de equilibrio, favorece el emplazamiento de urbanizaciones y complejos residenciales. Los depósitos de deslizamientos antiguos constituyen terrenos muy codiciados por las empresas promotoras al ofrecer, no sólo magníficas vistas al mar, sino tam-

bién un relativo fácil acceso y acondicionamiento.

El presente trabajo se centra en dos zonas del litoral de Almuñécar, concretamente en los parajes de Cerro Gordo y Punta de la Mona, ubicados en ambos extremos de la Bahía de La Herradura (Fig. 1A). La urbanización Los Cármenes del Mar (Fig. 1B) se enclava en el paraje natural Maro-Cerro Gordo y comenzó su construcción a finales de la década de los años 90. La urbanización Marina del Este se extiende por la vertiente oriental del

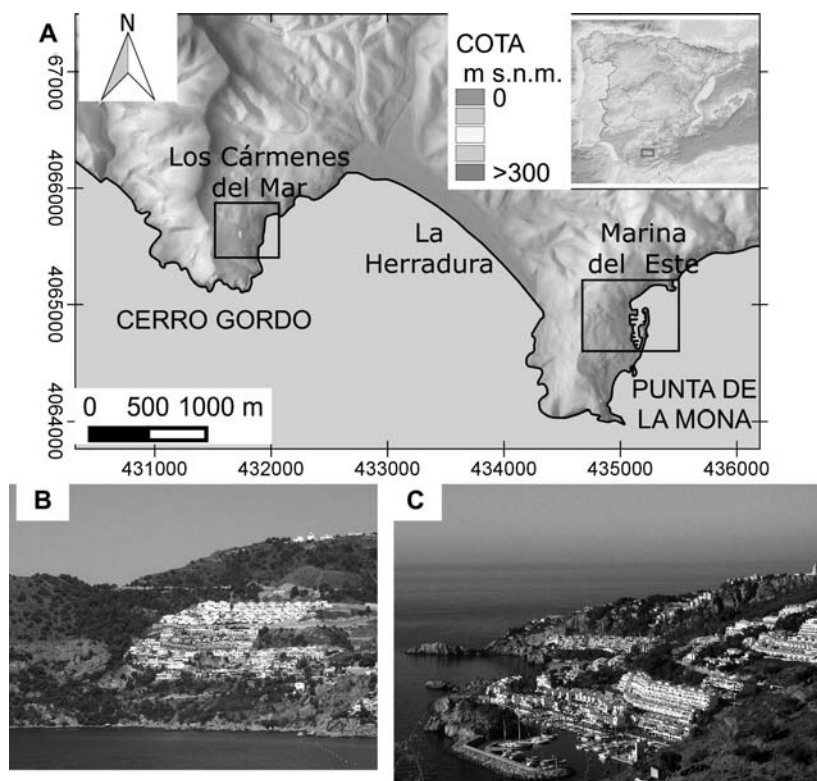


Fig. 1.- A) Situación de los promontorios de Cerro Gordo y Punta de La Mona, en ambos extremos de la Bahía de La Herradura. Localización de las dos urbanizaciones: B) Los Cármenes del Mar; C) Marina del Este. Figura en color en la web.

Fig. 1.- A) Geographical settings of Cerro Gordo and Punta de la Mona promontories at both ends of the Bay of La Herradura. B) Los Cármenes del Mar; C) Marina del Este. Colour figure on the web.

Promontorio de la Punta de la Mona, iniciándose el urbanismo en 1977 con la construcción de un puerto deportivo (Fig. 1C). Posteriormente, la ladera se ha ido ocupando con urbanizaciones, complejos residenciales y viviendas de alto nivel, hasta el año 2001. En ambos casos, el desarrollo urbanístico se llevó a cabo en terrenos afectados por antiguos deslizamientos, muy vulnerables frente a una posible reactivación.

La realidad presente en ambas zonas es un gran número de viviendas gravemente afectadas, con daños estructurales, grietas y otros desperfectos. En el sector de Los Cármenes del Mar denominado *Casas Especiales*, la situación es la ruina total y abandono de cuatro viviendas de grandes dimensiones, y en el sector *Pueblos* hay más de 20 casas con graves afecciones, 7 de ellas desalojadas, hecho que ha generado una gran alarma social.

En el presente trabajo se analizan con detalle ambas zonas. En primer lugar, se identifican los deslizamientos en fotografía aérea cuando los terrenos aún eran vírgenes. Posteriormente, se investiga la aparición de los primeros daños en las construc-

ciones e indicios de movimientos, analizando su evolución a lo largo del tiempo, así como su relación con el desarrollo urbanístico y el régimen de lluvias. Paralelamente, se lleva a cabo un inventario de daños en las viviendas y zonas anexas, estableciendo una serie de grados según la escala de Cooper (2008). A partir de los datos, se superpone el mapa de daños al mapa geomorfológico, con la finalidad de determinar las zonas más activas. Finalmente, se lleva a cabo una monitorización DInSAR en Marina del Este mediante el procesado de 25 imágenes radar del satélite ENVISAT, adquiridas durante el periodo comprendido entre mayo 2003 y diciembre 2009. Para el procesado se ha empleado la técnica Persistent Scattered Interferometry (PSI) (Crossetto *et al.*, 2011), con la finalidad de cuantificar los desplazamientos y su evolución en el tiempo.

Contexto geológico

Las urbanizaciones de Los Cármenes del Mar y Marina del Este se ubican en el denominado Complejo Alpujárride de las Zonas Internas de las Cordilleras Béticas (Avidad y Gar-

cia-Dueñas, 1981; Azañón y Crespo-Blanc, 2000). En conjunto, en ambas zonas, predominan mármoles grises con paquetes intercalados de esquistos grafitosos, cuarcitas y gneises. El contexto estructural es complejo; los materiales se encuentran muy fracturados y tectonizados, limitados por fallas extensionales de gran ángulo de dirección ESE-WNW. Los materiales se comportan en conjunto como una mega-brecha donde los procesos de karsificación afectan intensamente a los materiales carbonatados, observándose un relieve caótico, con grandes bloques de mármoles desplazados sobre los esquistos.

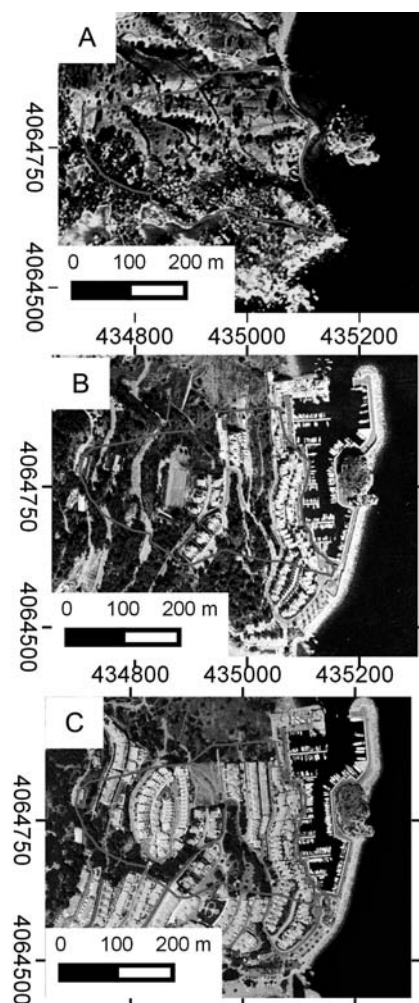


Fig. 2.- Evolución de la ladera donde se ubica Marina del Este. A) Se reconoce el deslizamiento en la imagen aérea de 1957. B) Imagen de 1997; el puerto deportivo y las primeras urbanizaciones en la base de la ladera ya están construidas. C) Imagen de 2010; el urbanismo se ha extendido ladera arriba sobre la superficie del deslizamiento.

Fig. 2.- Temporal evolution of the Marina del Este slope. A) The landslide can be identified in the 1957 aerial photo. B) 1997 image, where the marina and the first resort at the toe of the slope were built. C) 2010 image, when the urban development was completed upward slope over the landslide body.

Historial de las laderas

Se han analizado fotografías aéreas y ortoimágenes disponibles desde 1957, con el objetivo de conocer los cambios sufridos en ambas laderas.

Marina del Este

En la fotografía de 1957 (Fig. 2A) se identifica un paleodeslizamiento con una superficie de 0,85 km² que no presentaba entonces signo alguno de actividad. La longitud original del deslizamiento se calcula en unos 420 m, con anchuras variables, entre 150 y 250 m. La cabecera se ubica a una cota de 115 m y la masa deslizada se extiende hasta el mar. El deslizamiento parece ser de tipo planar (Cruden y Varnes, 1996), movilizándose un espesor de 20 m de material muy alterado (AYESA, 2011).

En 1977 comenzó la adecuación de la zona para su urbanización, abriéndose los accesos. Entre mediados de la década de los 80 y 1997 se construyó el puerto deportivo, así como los primeros complejos residenciales en la parte baja de la ladera (Fig. 2B). En esta época se detectan los primeros movimientos en la zona del puerto, adoptándose medidas de contención y drenaje. Desde 1997 hasta 2001, la urbanización se extiende ladera arriba. En la actualidad, el 60% de las viviendas están construidas sobre la superficie del

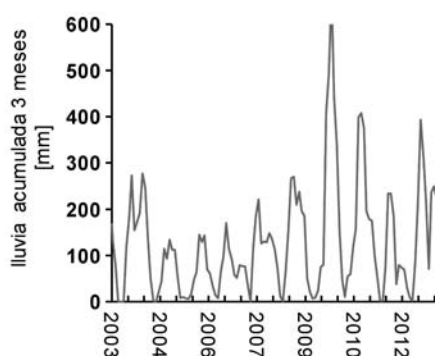


Fig. 3.- Lluvia acumulada en los 3 meses de invierno durante el periodo 2003-2013. Se puede apreciar el pico de lluvia en 2009-2010, con valores ligeramente superiores a 600 mm (Estación AEMET de Almuñécar).

Fig. 3.- Accumulated rainfall during the 3 months of winter for the period 2003-2013. The rainy period 2009-2010 is distinguished and shows values slightly over 600 mm (Almuñécar AEMET rainfall station).

deslizamiento original (Fig. 2C). Durante el invierno 2009-2010 tuvo lugar un periodo muy lluvioso, registrándose precipitaciones acumuladas en los tres meses invernales superiores a 600 mm (Fig. 3). Durante este periodo el deslizamiento se reactivó, generando extensos daños a las viviendas, especialmente en las más cercanas al puerto, y dando lugar a nuevas obras de reparación y contención que continúan hasta la actualidad.

Cármenes del Mar

En la fotografía aérea de 1957 (Fig. 4A) se identifican cuatro deslizamientos coalescentes en la ladera (A, B, C y D). Parece tratarse igualmente de deslizamientos planares que afectan a la capa más superficial y alterada del terreno. Datos inclinométricos de AYESA (2011) ponen de manifiesto planos de rotura superficiales, entre 2-5 m de profundidad, aunque no se descartan planos de rotura más profundos.

En la figura 4B se observa que las urbanizaciones se han construido sobre los deslizamientos C y D, concretamente sobre sus cabeceras. El deslizamiento C parece ser el más activo, y en particular el sector C', en cuya cabecera se registran los mayores daños.

La urbanización de Los Cármenes del Mar comenzó a construirse en 1997, y comprende diferentes sectores que se extienden a lo largo de la ladera: Los Altos, Mirador, Pueblos, Casas Especiales, Atarazanas y Calaiza, con un total de 500 viviendas, de las cuales un 30% son residencias habituales. El urbanismo finalizó en el año 2006, aunque posteriormente se han levantado algunas viviendas en el sector oriental (Fig. 4).

En el año 2005 comenzaron a detectarse los primeros problemas, con la aparición de grietas en algunas viviendas, pérdidas de agua en las piscinas etc. De forma similar a Marina del Este, fueron las lluvias del invierno 2009-2010 (Fig. 3) las que desencadenaron daños graves, afectando seriamente a los sectores de Calaiza, Pueblos, Atarazanas y Casas Especiales. Desde entonces se ha producido un desalojo progresivo de numerosas viviendas, declarándose como "ruina total" el sector de Casas Especiales. Aunque la constructora llevó a cabo algunas obras de contención, éstas han sido insuficientes

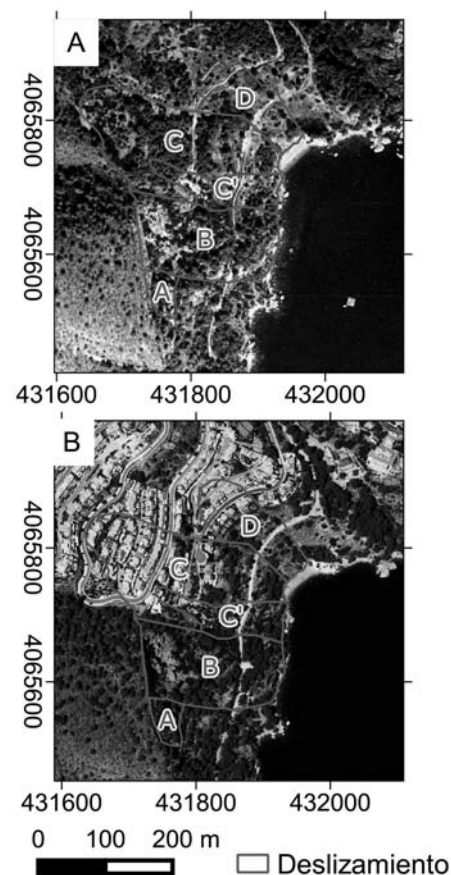


Fig. 4.- Evolución de la ladera donde se ubica Los Cármenes del Mar. A) Imagen de 1957; se reconocen cuatro deslizamientos coalescentes (A, B, C y D). B) Imagen de 2010, la urbanización se construyó sobre la cabecera de los deslizamientos B y C; los sectores C' y C son los más afectados.

Fig. 4.- Temporal evolution of the Los Cármenes del Mar slope. A) Four landslides (A, B, C, and D) can be identified in the 1957 aerial photo. B) 2010 image; urban development was settled at the head of C and D landslides. Sectors C' and C' record the most severe damages.

y poco efectivas. La situación está ahora en manos de la justicia, con decenas de familias afectadas a la espera de una resolución.

Monitorización DInSAR

El análisis de imágenes radar del satélite ENVISAT, durante el periodo mayo 2003- diciembre 2009, pone de manifiesto desplazamientos entre 5 y 15 mm/año. Los puntos con mayores velocidades se localizan en la masa deslizada, concretamente en la cabecera y el pie (Fig. 5A). Datos inclinométricos posteriores (AYESA, 2011) ponen de manifiesto una aceleración del movimiento tras las lluvias del 2009-2010, con desplazamientos entre 40 y 90 mm/año.

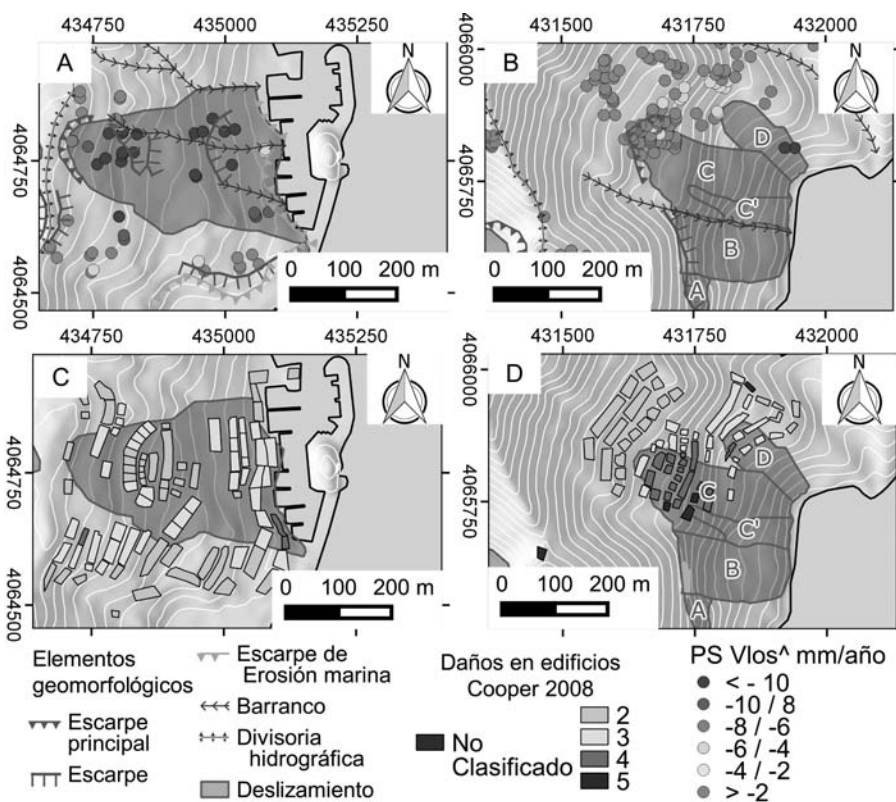


Fig. 5.- A) y B) Datos PS obtenidos con el procesado DInSAR (2003-2009) en ambas laderas en Marina del Este (A) y Los Cármenes del Mar (B). C) y D) Inventario de daños según la clasificación de Cooper (2008) en Marina del Este (C) y Los Cármenes del Mar (D). Los deslizamientos aparecen representados en todas las figuras. Figura en color en la web.

Fig. 5.- A) and B) PS data from DInSAR processing (2003-2009) for both areas of Marina del Este (A) and Los Cármenes del Mar (B). C) and D) Damage inventory applying Cooper (2008) classification for Marina del Este (C) and Los Cármenes del Mar (D). Landslides are also shown in all the figures. Colour figure on the web.

En el caso de Los Cármenes del Mar, la monitorización DInSAR no ha dado resultados válidos. Los puntos PS obtenidos (escasos) se ubican en el sector más septentrional de la ladera y prácticamente fuera de los deslizamientos (Fig. 5B). Los grandes daños observados inducen a pensar que las velocidades pueden haber sido muy altas, fuera del rango permitido por las técnicas radar.

Inventario de daños

En enero de 2015 se llevó a cabo un detallado inventario de daños en ambas zonas, no sólo en los edificios, sino también en carreteras de acceso y zonas comunes. Se aplicó la clasificación de Cooper (2008) que establece diferentes grados de daños: desde 0 (ningún daño) hasta 7 (colapso total). En las figuras 5C y 5D se representa el inventario de daños realizado en ambas zonas, superpuesto al mapa geomorfológico. En el caso de Marina del Este, los mayores daños se regis-

tran en el pie del deslizamiento (hasta grado 4), concretamente en el sector más cercano al puerto donde algunas viviendas ya han sido desalojadas. En Los Cármenes del Mar los edificios más afectados se encuentran en las cabeceras de los deslizamientos C y D, y concretamente en el sector C', donde se ubican las Casas Especiales, cuyos daños se han categorizado con un grado 5: daños estructurales muy severos.

Conclusiones y discusión

Las urbanizaciones de Marina del Este y Los Cármenes del Mar, en el municipio granadino de Almuñécar, son un claro ejemplo de las deficiencias de la legislación española en cuanto a la inclusión de los riesgos geológicos en la planificación urbanística se refiere. En ambos casos, la edificación se llevó a cabo sobre antiguos deslizamientos costeros claramente identificables en el terreno.

La topografía algo más suave que dejan las masas deslizadas en el contexto de relieves costeros muy abruptos, ha determinado que sean zonas muy codiciadas para el urbanismo. La reactivación de antiguos deslizamientos costeros es un proceso fácil, especialmente si se carga la ladera, se realizan desmontes, se modifica la red natural de drenaje etc., teniendo en cuenta además que la erosión marina ya actúa de forma natural sobre el pie de los deslizamientos, colaborando a reducir la resistencia de las laderas.

El presente trabajo pone de manifiesto la utilidad de aplicar técnicas combinadas a la hora de abordar este tipo de peligros geológicos que permiten, no sólo identificar los deslizamientos, sino también cuantificar y monitorizar su actividad.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado en el marco del proyecto TOPOBÉTICA "Relieve y procesos activos relacionados con la evolución tectónica de la Cordillera Bético-Rifeña". CGL2011-29920 del VII Plan Nacional de Investigación Científica. Nuestro agradecimiento a la revisión realizada por la Dra. Mercedes Ferrer y el Dr. Martín J Rodríguez-Peces, por sus importantes aportaciones al manuscrito.

Referencias

Avidad, D. y Garcia-Dueñas, V. (1981). *Mapa Geológico de España, 1:50.000, hoja nº 1055 (Motril) y memoria*. IGME, Madrid, 36 p.

Azañón, J.M. y Crespo-Blanc, A. (2000). *Tectonics* 19, 549-565.

AYESA (2011). *Proyecto constructivo de medidas de estabilización del deslizamiento de la ladera de la Punta de la Mona, Almuñécar (Granada)*. Informe inédito.

Cooper, A.H. (2008). *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology* 41, 409-424.

Crosetto, M., Monserrat, O., Cuevas, M. y Crippa, B. (2011). *Remote Sensing* 3, 305-318.

Cruden, D.M. y Varnes, D.J. (1996). En: *Landslides, Investigation and Mitigation, Transportation* (A.K. Turner y R.L. Schuster, Eds.), Research Board Special Report 247, Washington D.C., 36-75.

Mateos, R.M. (2007). *Journal of the European Federation of Geologists* 23, 25-30.