

Comparación del método de Newmark a escala regional, local y de emplazamiento: el caso del desprendimiento de la Paca (Murcia, SE España)

Comparing Newmark's method at regional, local and site scales: seismically-induced La Paca rock-fall case (Murcia, SE Spain)

Martín Jesús Rodríguez-Peces⁽¹⁾, Julián García-Mayordomo⁽²⁾ y José Miguel Azañón^(1,3)

⁽¹⁾ Departamento de Geodinámica. Facultad de Ciencias. Universidad de Granada, C/Fuentenueva s/n. 18002. Granada. marpeces@ugr.es

⁽²⁾ Instituto Geológico y Minero de España (IGME). C/La Calera, 1. 28760. Tres Cantos (Madrid). julian.garcia@igme.es

⁽³⁾ Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra (UGR-CSIC), C/Fuentenueva s/n. 18002. Granada. jazañon@ugr.es

ABSTRACT

The Lorca Basin (Murcia) is located in one of the most seismically active regions of Spain. This area is very interesting for studying earthquake-induced slope instabilities as there are well known cases associated to specific earthquakes (e.g., 2002 Bullas, 2005 La Paca). In this work we present our investigations at regional, local and site scales. For regional and local scales, we have used a GIS to develop an implementation of Newmark's sliding rigid block method. We have particularly introduced a new variation to consider soil and topographic amplification effects. Subsequently, we have produced «Newmark displacement» maps for deterministic seismic scenarios. We have found that rock-falls produced during the last earthquakes in Lorca Basin are associated to Newmark displacements lower than 2 cm. To support this hypothesis we have applied the Newmark method to La Paca rock-fall at a site scale. We have performed a back-analysis to estimate the static safety factor and the critical acceleration. Finally, we have compared the safety factor, the critical acceleration and the Newmark displacement calculated at La Paca rock-fall at a site scale with our GIS estimations in order to improve the calibration of Newmark's method at the regional scale.

Key words: Critical acceleration, GIS, Newmark, rock-falls, seismic amplification

Geogaceta, 46 (2009), 151-154
ISSN: 0213683X

Introducción

En 1965 el Ingeniero Civil Nathan M. Newmark ideó un sencillo método para estimar el desplazamiento permanente producido por un movimiento sísmico en presas de tierra (Newmark, 1965). Este método, con ligeras variaciones, fue posteriormente aplicado con éxito al estudio de laderas naturales (Wilson y Keefer, 1983) y, actualmente, es común su aplicación en estudios de evaluación de la ocurrencia de inestabilidades de ladera desencadenadas por terremotos (e.g. Miles y Ho, 1999; Jibson *et al.*, 2000; Luzi *et al.*, 2000; Romeo, 2000; Carro *et al.*, 2003; Murphy y Mankelov, 2004). Sin embargo, existen muy pocos estudios que aborden esta problemática en España (e.g. Mulas *et al.*, 2003; Delgado *et al.*, 2006).

En este trabajo presentamos un análisis sobre inestabilidades de ladera generadas por terremotos a tres escalas diferentes: regional, local y de emplazamiento. Para la

escala regional, hemos aplicado el método de Newmark mediante un SIG (ArcGIS) y, además, hemos desarrollado una nueva herramienta para tener en cuenta los efectos de amplificación sísmica relacionados con el tipo de suelo y con la topografía. Posteriormente, hemos generado mapas de desplazamiento de Newmark para diferentes escenarios sísmicos en la Cuenca de Lorca (Región de Murcia). Esta región, además de presentar un notable nivel de actividad sísmica y contener algunas de las fallas activas con mayor potencial sísmico en España, tiene casos reconocidos de desprendimientos asociados a terremotos modernos (Bullas 2002, La Paca 2005).

Para las escalas local y de emplazamiento, hemos aplicado el método de Newmark al conocido caso del desprendimiento de la Paca (Fig. 1) que fue provocado por el terremoto de La Paca en 2005 ($m_{bLg}=4.7$, $I_{EMS}=VII$). Este terremoto produjo daños en las poblaciones de La Paca y de Zarcilla de Ramos y causó una importante alarma social.

Para la escala de emplazamiento, hemos realizado un análisis retrospectivo del desprendimiento de La Paca para calcular el factor de seguridad estático previo al terremoto y la correspondiente aceleración crítica.



Fig. 1.- Desprendimiento producido por el terremoto de La Paca en 2005 en dolomías triásicas.

Fig. 1.- Rock-fall induced by 2005 La Paca earthquake in Triassic dolomites.

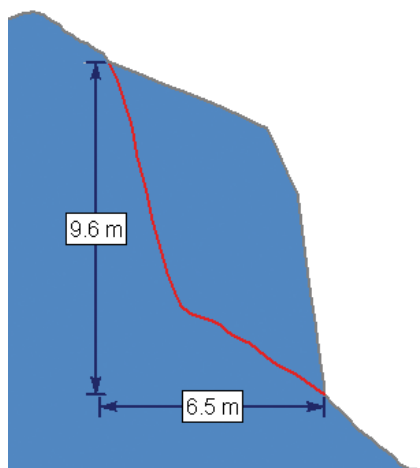


Fig. 2.- Modelo del desprendimiento de La Paca empleado en el programa de estabilidad de laderas (Slide). La línea roja muestra la superficie de rotura.

Fig. 2.- La Paca rock-fall model used in the slope stability software (Slide). The red line shows the failure surface.

Por último, hemos comparado los valores de factor de seguridad, de aceleración crítica y de desplazamiento de Newmark obtenidos a escala de emplazamiento con las estimaciones realizadas mediante el SIG con la finalidad de mejorar la calibración del método de Newmark a escala regional.

Metodología

El método de Newmark (1965) o del «bloque rígido deslizante» establece que, dada una ladera con factor de seguridad estático conocido, la aceleración sísmica horizontal mínima necesaria para sobrepasar la resistencia al corte e iniciar el desplazamiento es:

$$a_c = (FS - 1) g \text{ sen}(\alpha) \quad [1]$$

donde a_c es la aceleración crítica (unidades g, $1g = 9,8 \text{ m/s}^2$), g es la aceleración de la gravedad, FS es el factor de seguridad estático y α es el ángulo del talud. La aceleración crítica es un índice de susceptibilidad de las laderas a inestabilidades inducidas sísmicamente. Conocida la aceleración crítica, el cálculo del desplazamiento teórico que se produce en la ladera a causa del terremoto – i.e., desplazamiento de Newmark (D_N), se realiza integrando doblemente los intervalos de tiempo en que la aceleración crítica es superada durante una historia completa del movimiento del suelo (acelerograma). Sin embargo, para aplicar el método de Newmark a escala regional es más conveniente emplear ecuaciones de regresión del D_N con parámetros del movimiento del suelo tales como la Intensidad de Arias o la aceleración sísmica de pico (PGA, *Peak Ground Acceleration*) (cf. Jibson, 2007).

Obtención del Mapa de Factor de Seguridad y de Aceleración Crítica

Para generar el mapa de aceleración crítica, se ha compuesto un mapa litológico a partir del mapa geológico digital a escala 1:50.000 del Instituto Geológico y Minero de España (IGME). Hemos distinguido 3 grupos litológicos en función de sus características resistentes y geomecánicas, así como su comportamiento frente a movimientos de ladera (Tabla I). A cada unidad litológica se le han asignado valores medios de peso específico, cohesión y ángulo de fricción extraídos de bibliografía geotécnica y de

ensayos de laboratorio (cf. Rodríguez-Peces, *et al.*, 2009). En la tabla I se muestra los valores de los parámetros resistentes que finalmente han sido adoptados en los cálculos posteriores. Para aplicar el método a escala regional hemos generado un mapa de pendientes a partir de un modelo digital de elevaciones (MDE) con un tamaño de píxel de 25x25 m. Este MDE fue obtenido a partir de los mapas topográficos del Instituto Geográfico Nacional (IGN). Para la escala local, generamos un mapa de pendientes a partir de un MDE con un tamaño de píxel de 2,5x2,5 m. Este MDE fue obtenido en una campaña de campo mediante un escáner láser terrestre en el área del desprendimiento de La Paca.

El mapa de factor de seguridad se ha calculado asumiendo un modelo simple de equilibrio límite con talud infinito. Para ello, se combinan los mapas de parámetros resistentes con el mapa de pendientes mediante la ecuación (Jibson *et al.*, 2000):

$$FS = \frac{c'}{\gamma t \text{ sen} \alpha} + \frac{\tan \phi'}{\tan \alpha} - \frac{m \gamma_w \tan \phi'}{\gamma \tan \alpha} \quad [2]$$

donde c' es la cohesión efectiva, ϕ' es el ángulo de fricción efectivo, α es el ángulo del talud, γ es el peso específico del material del talud, γ_w es el peso específico del agua, t es el espesor normal a la superficie de rotura y m es el grado de saturación de la superficie de rotura. Se ha considerado un grado de saturación nulo de la superficie de rotura y un espesor normal a la superficie de rotura de 3 m (Rodríguez-Peces *et al.*, 2009).

Finalmente, el mapa de aceleración crítica se construye combinando el mapa de factor de seguridad con el de pendientes de acuerdo con la ecuación [1].

Escenarios Sísmicos y Cálculo de los Mapas de Desplazamiento de Newmark

La estimación del desplazamiento de Newmark se ha realizado considerando dos escenarios sísmicos deterministas: la ocurrencia del terremoto de la Paca en 2005 con $M_w=4,8$ (Benito *et al.*, 2007) o del terremoto más probable para un periodo de retorno de 475 años con $M_w=5,0$ (Gaspar-Escribano *et al.*, 2008). Para el terremoto de La Paca, se ha calculado la PGA en roca que se produciría en función de la distancia al epicentro mediante la ecuación de atenuación de Sabetta y Pugliese (1996). El desprendimiento de La Paca está situado a 7,2 km del epicentro del terremoto de La Paca. En esta localización, la PGA promedio predicha es de 0,09g. Otras estimaciones de PGA en

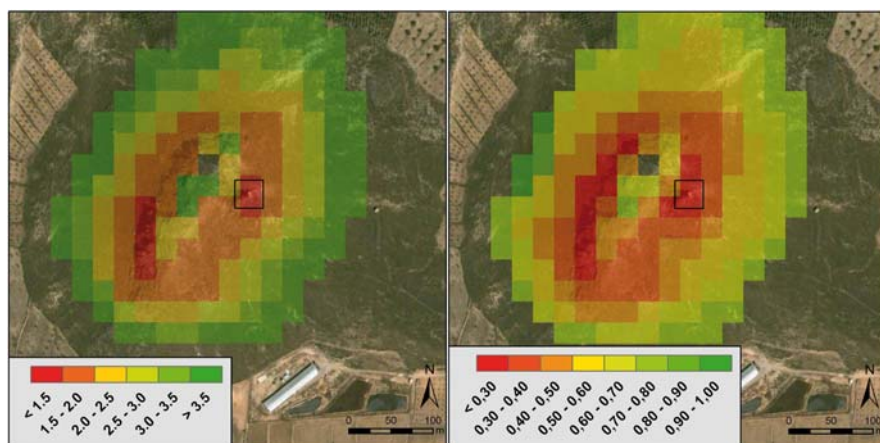


Fig. 3.- Mapas de factor de seguridad (A) y de aceleración crítica (B) en el área del desprendimiento de La Paca con tamaño de píxel de 25x25 m (escala regional). El cuadrado negro indica la localización de la superficie de rotura del desprendimiento de La Paca.

Fig. 3.- Safety factor (A) and critical acceleration (B) maps at La Paca rock-fall area at a 25x25 meters pixel resolution (regional scale). The critical acceleration is given in g units ($1g=9,81 \text{ m/s}^2$). The black square indicates La Paca rock-fall failure surface location.

roca son de 0,12g a 0,20g para un terremoto de $M_w=4,8$ a una distancia epicentral de 5 km y de 0,08 g a 0,12 g para el mismo terremoto a una distancia epicentral de 10 km (Gaspar-Escribano y Benito, 2007). Por lo tanto, hemos considerado una PGA de 0,13 g para la ocurrencia del terremoto de la Paca en 2005 ($M_w=4,8$).

Los valores de PGA de los escenarios sísmicos considerados han sido calculados en condiciones de roca. Por tanto, es necesario corregir estos valores para tener en cuenta los efectos de amplificación por el tipo de suelo y por la topografía. Los factores de amplificación de suelo (Tabla I) se han adaptado de los obtenidos en el Proyecto RISMUR (Benito *et al.*, 2006). Para la amplificación topográfica, se ha implementado una herramienta de cálculo en el SIG considerando las pendientes y la altura relativa de las crestas montañosas, con base en las recomendaciones del Eurocódigo-8 (CEN, 2004; Rodríguez-Peces *et al.*, 2009).

Finalmente, los mapas de desplazamiento de Newmark se han calculado considerando la ecuación de regresión de Jibson (2007) en función del cociente de aceleración crítica y PGA:

$$\log D_N = 0.215 + \log \left[\left(1 - \frac{a_c}{PGA} \right)^{-2.341} \left(\frac{a_c}{PGA} \right)^{-1.458} \right] \quad [3]$$

donde D_N es el desplazamiento de Newmark (en cm), a_c es la aceleración crítica y PGA es la aceleración sísmica máxima.

Cálculo de los Valores Reales de Factor de Seguridad y de Aceleración Crítica

Para el cálculo de los valores reales de factor de seguridad y de aceleración crítica, se ha realizado un análisis retrospectivo del desprendimiento de La Paca. Para ello hemos realizado una campaña de campo para obtener la geometría y los parámetros resistentes de la ladera. En primer lugar, hemos empleado un escáner láser terrestre en el emplazamiento del desprendimiento de La Paca para obtener un MDE de alta resolución (0,20x0,20 m). Con este MDE y las observaciones de campo se ha generado el perfil topográfico de la ladera correspondiente a la trayectoria de los bloques de roca caídos. Por último, se han establecido los parámetros resistentes de la superficie de rotura, localizada en dolomías triásicas, a partir de datos de campo y mediante el empleo del martillo de Schmidt y siguiendo el criterio de Barton-Bandis. El valor del coeficiente de rugosidad de la discontinuidad (JRC, *Joint Roughness*

Coefficient) obtenido es de 5 y la resistencia a compresión de la discontinuidad (JCS, *Joint wall Compressive Strength*) es de 25.550 kN/m² (19.520-31.580 kN/m²). El valor del ángulo de fricción residual es de 30° (26-34°).

Para generar el modelo de la ladera (Fig. 2) hemos utilizado un programa de análisis de estabilidad de laderas en 2D (Rocscience Inc. SLIDE). En este modelo, hemos fijado el valor de aceleración sísmica mediante iteración hasta que el factor de seguridad obtenido fuera igual a 1 (condiciones metaestables). Este valor de aceleración sísmica representa una estimación más precisa de la aceleración crítica del desprendimiento de La Paca. El valor real de factor de seguridad previo al terremoto de La Paca en 2005 se ha obtenido eliminando el efecto de la aceleración sísmica.

Resultados y Discusión

Resultados a Escala Regional

En el área de rotura del desprendimiento de la Paca y con un tamaño de píxel de 25x25 m, los valores de factor de seguridad varían entre 1,4 y 2,0 y los valores de aceleración crítica entre 0,22 g y 0,50 g (Fig. 3).

Los desplazamientos de Newmark estimados a escala regional para la ocurrencia del terremoto más probable para un periodo de retorno de 475 años ($M_w=5,0$) presentan valores bajos, en su mayoría menores de 2 cm (Rodríguez-Peces *et al.*, 2009). Sin embargo, el escenario sísmico para el terremoto de La Paca en 2005 ($M_w=4,8$) presenta desplazamientos de Newmark nulos.

Grupo litológico	Dolomías y calizas	Conglomerados, areniscas y arcillas	Arcillas, margas, areniscas y yesos
Peso específico (kN/m ³)	25 (23-27)	22 (20-24)	21 (18-24)
Cohesión (kN/m ²)	46 (0-108)	31 (4-16)	36 (35-117)
Angulo de fricción (°)	30 (21-39)	33 (27-39)	26 (22-30)
FAS	1	1.8	1.8

Tabla I.- Grupos litológicos, parámetros resistentes considerados en el cálculo del factor de seguridad (el rango inicial de valores se indica entre paréntesis) y factores de amplificación del suelo (FAS) adoptados.

Table I.- Lithological groups, strength parameters considered in the calculation of safety factor (initial range of values of the strength parameters are in brackets) and soil amplification factors (FAS).

Resultados a Escala Local

En el área de rotura del desprendimiento de la Paca y con un tamaño de píxel de 2,5x2,5 m, los valores de factor de seguridad varían entre 1,0 y 1,7 y los valores de aceleración crítica entre 0,03g y 0,45g (Fig. 4).

Los desplazamientos de Newmark para la ocurrencia del terremoto más probable para periodo de retorno de 475 años ($M_w=5,0$) presentan valores más elevados, siendo mayores de 2 cm y, localmente, mayores de 5 cm (Rodríguez-Peces *et al.*, 2009). Por otra parte, el escenario sísmico para el terremoto de La Paca en 2005 ($M_w=4,8$) presenta desplazamientos de Newmark menores de 2 cm.

Resultados a Escala de Emplazamiento

El valor de aceleración crítica calculado mediante el programa Slide y el per-

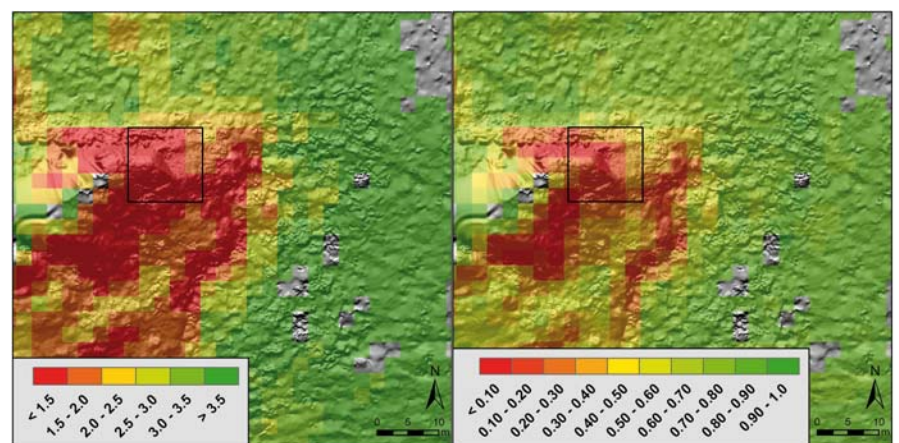


Fig. 4.- Mapas de factor de seguridad (A) y de aceleración crítica (B) en el área del desprendimiento de La Paca con tamaño de píxel de 2,5x2,5 m (escala local). El cuadrado negro indica la localización de la superficie de rotura del desprendimiento de La Paca.

Fig. 4.- Safety factor (A) and critical acceleration (B) maps at La Paca rock-fall area at a 2,5x2,5 meters pixel resolution (local scale). The critical acceleration is given in g units ($Ig=9,81 \text{ m/s}^2$). The black square indicates La Paca rock-fall failure surface location.

Escala	Regional	Local	Emplazamiento
FS	1.46	1.10	1.09
a_c	0.25	0.08	0.09
D_N La Paca	0	0.18	0.18
D_N $M_w=5$	0.35	3.82	1.98

Tabla II.- Comparación entre los valores de factor de seguridad estático (FS), aceleración crítica (a_c , unidades g) y desplazamiento de Newmark (D_N , cm) obtenidos en el desprendimiento de La Paca para las escalas regional, local y de emplazamiento.

Table II.- Comparison among static safety factor (FS), critical acceleration (a_c , g units) and Newmark displacement (D_N , cm) values for regional, local and site scales at La Paca rock-fall location.

fil topográfico de alta resolución del desprendimiento de La Paca es de 0.09g. Este valor es una estimación coherente ya que es menor que la PGA (0,13g) estimada para el terremoto de La Paca en 2005. El valor de factor de seguridad obtenido mediante el método de equilibrio límite de Janbu simplificado para el desprendimiento de La Paca es de 1,09.

Comparación de los resultados

Hemos realizado una comparación entre los valores de factor de seguridad, aceleración crítica y desplazamiento de Newmark obtenidos en la zona de rotura del desprendimiento de La Paca para las diferentes escalas consideradas.

Para la escala regional (mapa con tamaño de píxel de 25x25 m) hemos obtenido un valor relativamente alto de factor de seguridad y, por lo tanto, un valor relativamente alto de aceleración crítica (Tabla II). De hecho, el escenario determinista para el terremoto de La Paca en 2005 ($M_w=4,8$) presenta desplazamientos de Newmark nulos, lo que implica que la ladera no se mueve con dicho terremoto. Por tanto, un mapa regional con tamaño de píxel de 25x25 m no es apropiado para estimar el desplazamiento de Newmark para la localización específica del desprendimiento de La Paca. Sin embargo, los mapas regionales de factor de seguridad y de aceleración crítica (Fig. 3) sí son útiles para identificar preliminarmente las áreas con mayor potencial de peligro y que pueden ser estudiadas con mayor detalle posteriormente.

Para la escala local (mapa con tamaño de píxel de 2,5x2,5 m) hemos obtenido valores más bajos de factor de seguridad y de aceleración crítica (Tabla II). En este caso, el valor del factor de seguridad previo al terremoto está muy próximo a la condición de inestabilidad ($FS < 1.0$). Además, estos

mapas permiten identificar el área de rotura del desprendimiento de La Paca con razonable precisión (Fig. 4). El escenario determinista para el terremoto de La Paca en 2005 ($M_w=4,8$) presenta un desplazamiento de Newmark de 0,18 cm en la zona de rotura del desprendimiento de La Paca. Por tanto, este valor sería potencialmente suficiente para generar desprendimientos como el de La Paca.

Para la escala de emplazamiento hemos obtenido valores de factor de seguridad y de aceleración crítica muy similares a los obtenidos a escala local (Tabla II). El factor de seguridad previo al terremoto es ligeramente menor y también está próximo a la condición de inestabilidad. En este caso, el escenario determinista para el terremoto de La Paca en 2005 ($M_w=4,8$) también presenta un desplazamiento de Newmark de 0,18 cm en la zona de rotura del desprendimiento de La Paca.

Por lo tanto, el mapa a escala local es el más apropiado para realizar una estimación del desplazamiento de Newmark para la localización específica del desprendimiento de La Paca.

Conclusiones

El método de Newmark se emplea habitualmente para evaluar a escala regional las inestabilidades de ladera por efecto sísmico. Sin embargo, en este trabajo se ha comprobado que para escalas regionales los resultados pueden no ser satisfactorios. En cambio para escalas locales (tamaño de píxel de 2,5x2,5 m) se ha comprobado que la previsión de los mapas de desplazamiento Newmark coincide bastante con la que se obtendría en estudios de detalle a escala del emplazamiento.

Por otra parte, el hecho de que los valores de factor de seguridad obtenidos a escala local y de emplazamiento sean muy similares, permite justificar los valores de parámetros resistentes y el método de equilibrio límite empleados a escala regional y local.

Las estimaciones de los valores de PGA y de los desplazamientos de Newmark serían mucho más precisas si se dispusiera de un acelerograma del terremoto de la Paca en 2005 representativo del emplazamiento del desprendimiento de La Paca. Por último, hay que tener en cuenta que estas conclusiones deben ser contrastadas con el estudio de más casos de inestabilidades de ladera provocadas por terremotos.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por los proyectos de investigación:

TOPOIBERIA CONSOLIDER-INGENIO2010 CSD2006-00041, CGL2008-03249/BTE y MMA083/2007. Agradecemos a José Delgado la revisión del texto.

Referencias

- Benito, B., Capote, B., Murphy, P., Gaspar-Escribano, J.M., Martínez-Díaz, J.J., Tsige, M., Stich, D., García-Mayordomo, J., García, M.J., Jiménez, M.E., Insua-Arévalo, J.M., Álvarez-Gómez, J.A. y Canora, C. (2007). *Bulletin of the Seismological Society of America*, 97, 671-690.
- Benito B., Gaspar-Escribano J.M., García-Mayordomo J., Jiménez M.E. y García Rodríguez, M.J. (2006). *Proyecto RISMUR*. IGN y Protección Civil de Murcia.
- Carro, M., De Amicis, M., Luzi, L. y Marzorati, S. (2003). *Engineering Geology*, 69, 139-159.
- Comité Européen of Normalisation (CEN) (2004). *Eurocode 8: design of structures for earthquake resistance*. EN 1998-1, Brussels.
- Delgado, J., Peláez, J.A., Tomás R., Estévez, A., López Casado, C., Doménech C. y Cuenca A. (2006). *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 19, 197-218.
- Gaspar-Escribano, J.M. y Benito, B. (2007). *Bulletin of the Seismological Society of America*, 97, 531-544.
- Jibson, R.W. (2007). *Engineering Geology*, 91, 209-218.
- Jibson, R.W., Harp, E.L. y Michael, J.A. (2000). *Engineering Geology*, 58, 271-289.
- Luzi, L., Pergalani, F. y Terlien, M.T.J. (2000). *Engineering Geology*, 58, 313-336.
- Miles, S.B. y Ho, C.L. (1999). *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 18, 305-323.
- Mulas, J., Ponce de León, D. y Reoyo, E. (2003). En: *2º Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, 13-26.
- Murphy, W. y Mankelaw, J.H. (2004). *Journal of Earthquake Engineering*, 8, 133-157.
- Newmark, N.M. (1965). *Géotechnique*, 15, 139-160.
- Rodríguez Peces, M.J., García Mayordomo, J., Azañón-Hernández, J.M. y Jabaloy Sánchez, A. (2009). *Boletín Geológico y Minero*, 119 (4).
- Romeo, R. (2000). *Engineering Geology*, 58, 337-351.
- Sabetta, F. y Pugliese, A. (1996). *Bulletin of the Seismological Society of America*, 86, 337-352.
- Wilson, R.C. y Keefer, D.K. (1983). *Bulletin of the Seismological Society of America*, 73, 863-877.