

ESTUDIO PRELIMINAR DE LA ESTABILIDAD EN CONDICIONES DINÁMICAS DEL DESLIZAMIENTO DE BÀLITX (SIERRA DE TRAMUNTANA, MALLORCA)



M.J. Rodríguez-Peces¹, R.M. Mateos², J.M. Azañón^{3,4}, J. García-Mayordomo⁵

¹Dpto. de Geodinámica. Universidad Complutense de Madrid. Ciudad Universitaria, s/n. 28040-Madrid, España. martinjr@geo.ucm.es

²Instituto Geológico y Minero de España (IGME). Avda. Ciudad de Querétaro, s/n. 07007. Palma de Mallorca. rm.mateos@igme.es

³Dpto. de Geodinámica, Universidad de Granada, Campus de Fuentenueva s/n, 18071 Granada, España. jazanon@ugr.es

⁴Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra (UGR-CSIC), Granada, España.

⁵Instituto Geológico y Minero de España (IGME). C/La Calera, 1. 28760. Tres Cantos (Madrid), España. julian.garcia@igme.es

RESUMEN

En este trabajo se realiza un estudio preliminar de estabilidad retrospectivo en condiciones dinámicas del deslizamiento de Bàlitz (Mallorca). Este gran movimiento de ladera se localiza en la franja costera del sector central de la Sierra de Tramuntana, en la parte noroccidental de la isla de Mallorca. El área se caracteriza por el predominio de materiales rocosos carbonatados (calizas y dolomías) del Jurásico inferior (Lías) que configuran espectaculares acantilados rocosos de varios centenares de metros de altura. En el caso del deslizamiento de Bàlitz, estos materiales carbonatados se disponen sobre los materiales blandos del Triásico (facies Keuper), constituidos principalmente por margas y arcillas con yesos. Teniendo en cuenta que en la isla de Mallorca existen registros de sismicidad histórica y que, además, presenta una peligrosidad sísmica moderada, el estudio en condiciones dinámicas del deslizamiento de Bàlitz ha permitido confirmar su posible origen sísmico. Se ha estimado que el deslizamiento pudo ser provocado por un terremoto de magnitud moderada a alta ($M_w=4.7-6.5$) localizado en las inmediaciones del deslizamiento (≤ 20 km).

Palabras clave: Bàlitz, Deslizamiento, Ladera, Mallorca, Paleosismicidad, Sierra de Tramuntana

SUMMARY

In this work we perform a slope stability back-analysis of the Bàlitz landslide in dynamic conditions. This slope instability is located on the coast of the central sector of the Tramuntana Range, in Majorca Island. This area is characterized by the predominance of Jurassic limestones, on which spectacular cliffs of several hundred metres have been developed. In the Bàlitz landslide, these carbonated materials lie on top of Triassic soft materials (Keuper facies), composed mainly of marls and clays with gypsum. In this work we focus on analyzing the possibility that the Bàlitz landslide was triggered by an earthquake. Majorca Island, although it is considered as a region of low-to-moderate seismic hazard, shows historical damaging earthquakes and Quaternary active faults. We have concluded preliminary that the Bàlitz landslide could have been triggered by a moderate-to-large earthquake ($M_w=4.7-6.5$) located relatively close to the landslide (≤ 20 km).

Keywords: Bàlitz, Landslide, Majorca, Slope, Palaeoseismicity, Tramuntana Range

Introducción

La isla de Mallorca, localizada en el Mediterráneo occidental, presenta diferentes dominios geomorfológicos, destacando la Sierra de Tramuntana en el sector noroccidental de la isla. La estructura geológica de la sierra condiciona una vertiente septentrional y costera muy abrupta, con el predominio de acantilados de gran altura sobre el mar. La línea de cumbres supera los 700 m, con numerosos picos con altitudes superiores a los 1000 m, siendo el sector central de la cordillera el más elevado, destacando el Puig Major (1445 m) como la montaña más alta de Baleares.

Desde el punto de vista geológico, Mallorca representa un segmento emergido del denominado Promontorio Balear, que constituye la prolongación hacia el Mediterráneo de las Zonas Externas de las Cordilleras Béticas (Fontboté et al., 1990). Este promontorio está constituido por materiales desde el Paleozoico hasta el Mioceno medio, deformados por la orogenia alpina desde finales del Oligoceno hasta el Serravaliense (Sabat et al., 1988 and Gelabert et al., 1992). A finales del Mioceno comenzó un nuevo periodo extensivo, que determina la actual configuración de la isla (Fig. 1) en sierras (horsts) y cubetas (grabens), con una dirección predominante de las estructuras NE-SO (Alvaro, 1987, Benedicto et al., 1993).

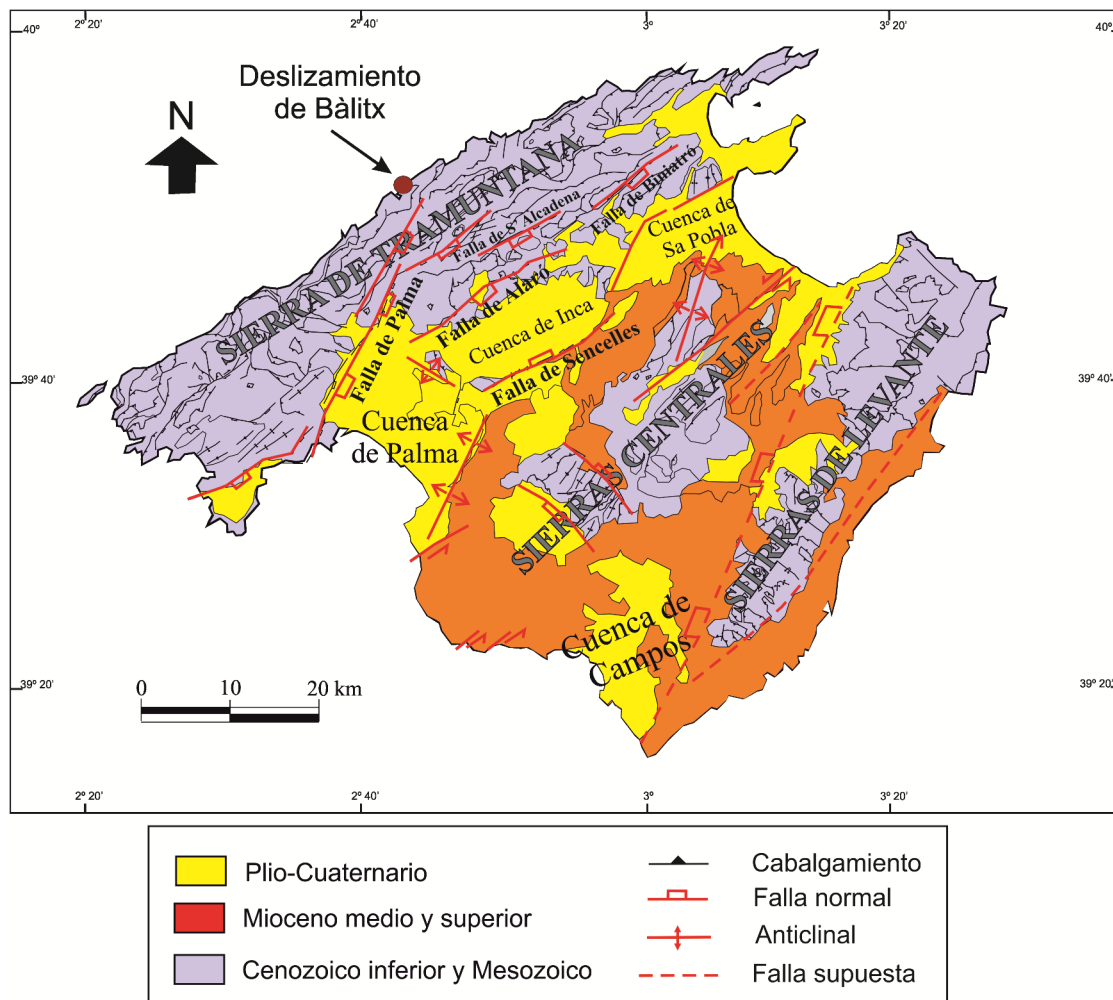


Figura 1. Mapa geológico simplificado de la Isla de Mallorca. Se observan las tres sierras principales de la isla, que constituyen estructuras alpinas neógenas, destacando la Sierra de Tramuntana en el sector noroccidental de la isla. Las cuencas, semi-grabens desarrollados a lo largo de fallas normales post-miocenas, determinan grandes cubetas de relleno post-orogénicas. En color rojo se representan las principales estructuras post-alpinas, destacando en el margen meridional de la Sierra de Tramuntana las fallas activas de Palma, s'Alcadena, Biniatró y Alaró (modificado de Gelabert, 1998).

La Sierra de Tramuntana es por lo tanto una cadena Alpina formada por un sistema imbricado de cabalgamientos vergentes hacia el NO y cuyo nivel regional de despegue lo constituyen los materiales de naturaleza arcilloso-evaporítica del Triásico superior (Gelabert, 1998). El esqueleto principal de la sierra está constituido por las calizas y dolomías del Jurásico inferior (Lías), rocas duras que determinan el relieve tan abrupto de la sierra y el claro predominio de las morfologías propias del Karst.

Desde un punto de vista sismotectónico, la isla de Mallorca presenta una actividad sísmica baja. El registro instrumental muestra que la sismicidad actual es superficial (<10 km de profundidad) y de baja magnitud ($m_b < 3.5$), concentrándose preferentemente en el sector central de la isla y en la Cuenca de Palma (Silva et al., 2001). De hecho, en la Sierra de Tramuntana no hay sismicidad histórica ni instrumental. Esto puede deberse en parte a una ausencia de información por el despoblamiento histórico de esta zona de la isla. En contraste con el periodo instrumental, el registro histórico presenta eventos fuertes, como el terremoto de Palma de 1851 ($I_{MSK} = VIII$), el mayor sentido en la isla. Este evento sísmico causó importantes daños en edificios de la Bahía de Palma y pueblos del entorno, así como algunas inestabilidades de ladera (desprendimientos) y la apertura de fracturas y grietas en la Sierra de Tramuntana donde las intensidades fueron de $I_{MSK} = IV-V$ (Silva et al., 2001). Este terremoto pudo estar asociado a la rotura de la Falla de Sencelles, con dirección predominante NE-SO y una longitud de aproximadamente 14 km. Estudios paleosísmicos han establecido que esta falla activa pudo haber generado terremotos con $M_w > 5.5$ durante el Cuaternario (Silva et al., 2001). Entre las fallas activas más próximas al deslizamiento de Bàlità destaca la Falla de Palma (Fig. 1), la de mayor longitud de la isla (40 km), que delimita el borde meridional de la Sierra de Tramuntana (Gelabert, 1998). Esta falla está relacionada con algunos terremotos recientes de magnitud $M < 4$. Además, se han encontrado anomalías geotérmicas en pozos localizados en la falla, y con aguas a temperaturas cercanas a los 30°C en el entorno de las localidades de Puigpunyent y Bunyola (IGME, 1987; López y Mateos, 2006), en el sector meridional y central de la falla. El despoblamiento histórico de la Sierra de Tramuntana quizás determinó que no existan registros de terremotos históricos en esta región.

En el presente trabajo se realiza un estudio de estabilidad en condiciones dinámicas del deslizamiento de Bàlità, teniendo en cuenta que en la isla de Mallorca existen registros de sismicidad histórica y que, además, presenta una peligrosidad sísmica moderada. Este estudio permite discriminar el posible origen sísmico del deslizamiento, así como estimar los potenciales terremotos que pudieron estar relacionados con su inestabilidad.

El deslizamiento de Bàlità

El área del deslizamiento de Bàlità se localiza en la franja costera del sector central de la Tramuntana, en el tramo comprendido entre el Puerto de Sóller y Cala Tuent (Fig. 1 y 2). Desde el punto de vista estructural, en este tramo litoral se observan dos líneas principales de fracturación, con direcciones N20°E y N70°E respectivamente (Mateos y Azañón, 2007). Estas fracturas, visibles a escala regional, juegan un papel fundamental en la dinámica de las laderas y determinan unos rasgos geomorfológicos predominantes en el paisaje, al definir los grandes escarpes de roca e incisiones en la costa (Fig. 2).

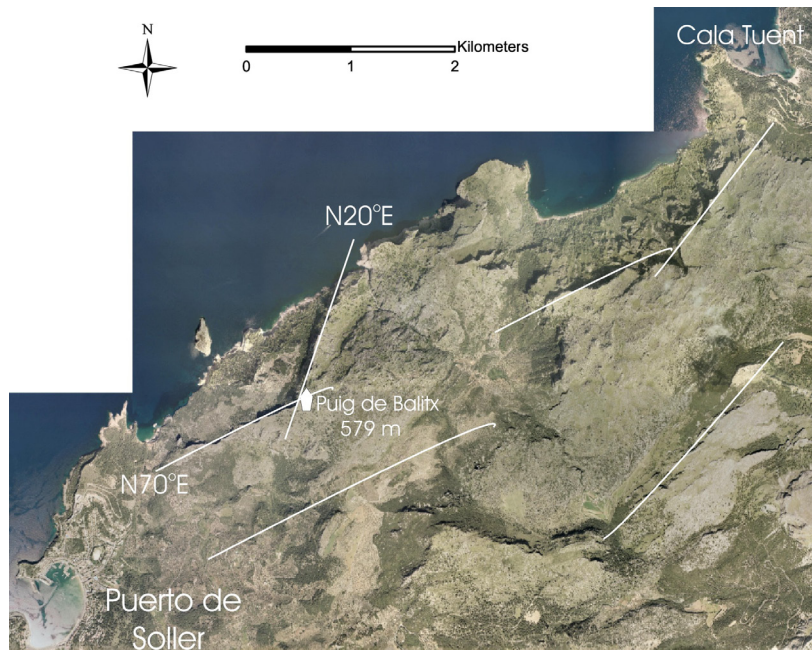


Figura 2. Foto aérea de la zona costera comprendida entre el Puerto de Sóller y Cala Tuent, en el sector central de la Sierra de Tramuntana. Se representan las principales líneas de fracturación de la zona, que juegan un papel fundamental en la dinámica de vertientes de este tramo litoral.

La zona de Bàltx comprende un área triangular de 1,2 km² situada a 1,5 km al NE del Puerto de Sóller (Fig. 2). Constituye un gran deslizamiento rocoso de tipo cuña, cuyos planos de rotura coinciden con las dos líneas principales de fracturación patentes en la zona. Probablemente se trata de la reactivación de dos fallas normales post-miocenas, resultado de la fase distensiva que comenzó a finales del Oligoceno. El relieve de Bàltx es muy abrupto, en apenas 720 m se pasa de una cota de 579 m (Puig de Bàltx) al nivel del mar. El escarpe de rotura del deslizamiento, de forma triangular, presenta unas paredes prácticamente verticales de casi 300 m de altura (Fig. 3), y el material movilizado por el deslizamiento se estima en unos 200 millones de metros cúbicos de roca (Mateos, 2001).



Figura 3. Fotografía aérea oblicua del deslizamiento de Bàltx. Se observan con nitidez los dos planos de rotura que determinan este deslizamiento en cuña, así como la morfología del bloque movilizado.

En la Figura 4, se representa un esquema geológico del deslizamiento de Bàltx, donde uno de los principales planos de deslizamiento se interpreta como la reactivación de una falla normal. El nivel de despegue basal del deslizamiento coincide a su vez con un cabalgamiento que representa una superficie de debilidad que pone en contacto niveles más blandos (yesos y margas) con niveles más duros y competentes del Triásico superior, aflorando estos últimos de forma espectacular en la costa, con una nítida estratificación.

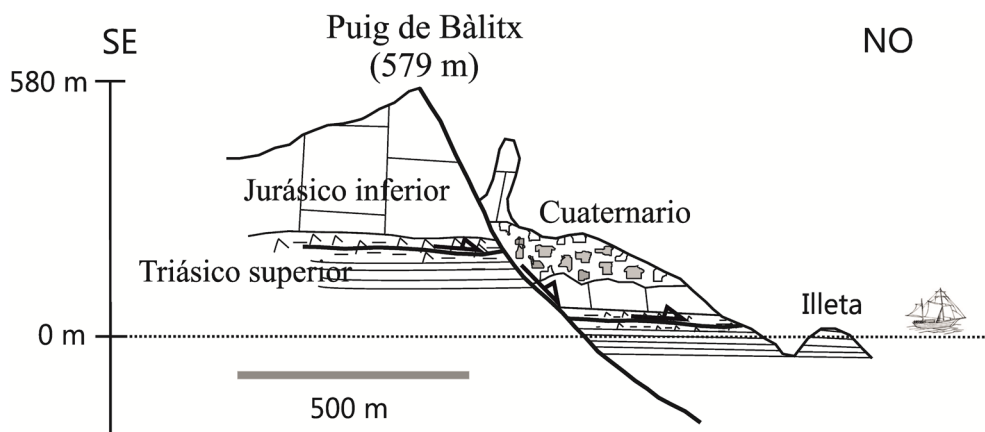


Figura 4. Corte geológico del deslizamiento de Bàltx. Uno de los planos de rotura del deslizamiento coincide con una falla normal, mientras que la superficie basal coincide con el cabalgamiento de los niveles más competentes del Jurásico inferior (Lías) con los más blandos del Triásico superior (Keuper-Rethiense), concretamente a través de un nivel de margas con yesos bien visibles desde la costa. Jurásico inferior (Lías): calizas masivas; Triásico superior: Dolomías bien estratificadas en la base y niveles de margas con yesos a techo; Cuaternario: brechas cementadas y karstificadas.

En la superficie de la masa deslizada se observa un potente nivel de brechas carbonatadas, altamente karstificadas, que tienen su origen en la caída de grandes bloques de calizas del escarpe principal. Estas brechas han sido datadas con U/Th, obteniéndose una edad de 82.5 (± 5.6) ka (Mateos y Azañón, 2007), que corresponde al Pleistoceno superior. En el año 2009 se llevó a cabo una datación con U/Th de un cristal de calcita estriado, situado en el plano de la falla más septentrional del deslizamiento, obteniéndose una edad superior a 400 ka, fuera del rango del método de datación empleado (Noller et al., 2000).). El deslizamiento sigue activo, observándose una amplia zona hundida en cabecera, así como numerosas grietas que afectan al bloque hundido. Probablemente la erosión marina del pie del deslizamiento reactiva un movimiento muy lento, pero continuo, de la ladera.

Caracterización geotécnica

Los principales materiales involucrados en el deslizamiento de Bàltx son las calizas masivas del Lías, las dolomías estratificadas del Rethiense y el nivel de margas con yesos del Keuper, cuyas propiedades geotécnicas se describen en la Tabla 1. Los valores de los parámetros resistentes han sido interpretados a partir de muestras representativas obtenidas en sondeos realizados en trabajos previos en áreas adyacentes al deslizamiento (Mateos, 2001; Mateos et al., 2002; Mateos et al., 2008). Para el análisis de estabilidad se han seleccionado los valores residuales de estos parámetros asumiendo que las superficies de rotura habrían sido movilizadas antes de la generación del deslizamiento.

Tabla 1. Resumen de las propiedades geotécnicas de los materiales involucrados en el deslizamiento de Bàltx. γ , Peso específico aparente; c , Cohesión residual; ϕ , Ángulo de fricción residual; σ_c , Resistencia a compresión simple.

Material	γ (kN/m ³)	c (MPa)	ϕ (°)	σ_c (MPa)
Brechas carbonatadas (Pleistoceno)	25.27	0.12	28	45
Calizas (Lías)	26.81	0.12	49	40-85
Dolomías (Rethiense)	25.45	0.05	22	10-25
Margas con yesos (Keuper)	19.61	0.04	25	0.25-1.4

Análisis retrospectivo de estabilidad

En el análisis de la estabilidad del deslizamiento, se ha seleccionado la superficie de rotura más probable teniendo en cuenta los dos planos preferentes de debilidad: la falla normal y el cabalgamiento basal. Para el estudio en condiciones dinámicas, se ha considerado el valor máximo de aceleración sísmica (*Peak Ground Acceleration*, PGA) como parámetro representativo del movimiento del terreno relacionado con la ocurrencia de un terremoto. Se ha considerado un escenario sísmico determinista para un terremoto similar al mayor sentido en Mallorca en tiempo históricos, es decir, el terremoto de Palma de 1851 ($I_0=VIII$). La PGA se ha estimado a partir de los valores de intensidad que, en el caso de los sismos históricos, es el único parámetro sísmico disponible. El valor de intensidad en el emplazamiento del deslizamiento de Bàltx ($I=V$) se ha obtenido del mapa de isosistas de este terremoto (Silva et al., 2001). En este trabajo se ha considerado la relación Intensidad-PGA propuesta por Margottini et al. (1992) para la estimación de los valores de PGA:

$$\log \text{PGA} = - 2.634 + 0.258 * I$$

donde la PGA está en unidades de aceleración de la gravedad ($1g=9.81 \text{ m/s}^2$) y la intensidad macrosísmica (I) está referida a la escala EMS-98. Esta ecuación fue desarrollada combinando los registros de acelerogramas e intensidades de las bases de datos italianas (periodo 1980-1990). Esta relación representa un método razonable para estimar los valores de PGA, ya que Italia y España comparten el mismo contexto sismotectónico (el límite de placas entre África y Europa) y la tipología de las edificaciones son similares. A partir de esta relación, se ha estimado una PGA media de 0.045g considerando el valor de intensidad ($I=V$) para el terremoto de Palma de 1851 en el emplazamiento del deslizamiento.

Se ha estimado además varios valores de magnitud-distancia epicentral desde el deslizamiento de Bàltx de posibles terremotos cuya PGA podría haber sido capaz de superar un cierto valor de aceleración crítica y, por tanto, provocar el deslizamiento. Para obtener el valor de PGA horizontal se ha empleado una selección de diferentes ecuaciones de predicción del movimiento del terreno (*Ground Motion Prediction Equations*, GMPE) correspondientes al área mediterránea (Skarlatoudis et al., 2003; Ambraseys et al., 2005; Akkar y Bommer, 2007; Bindi et al., 2010). Los valores de PGA estimados de este modo son para condiciones de sustrato rocoso, por lo que no tienen en cuenta los efectos de amplificación sísmica. Puesto que el deslizamiento se desarrolla en materiales rocosos, esta amplificación se debe únicamente a la topografía. En este trabajo se ha considerado de manera simplificada las recomendaciones descritas en el Apéndice A del Eurocódigo-8 (CEN, 2004), donde se establece que para laderas con pendiente superior a 30° y una altura mayor a 30 m desde su base hasta la cima, como es el presente caso, se debe aplicar un factor de amplificación topográfica de 1.4.

Resultados

El análisis retrospectivo de estabilidad realizado indica que el deslizamiento de Bàltx presentaba un factor de seguridad estable ($FS=1.57$) en condiciones no saturadas (Fig. 5). Si se considera el nivel de margas con yesos totalmente saturado, el factor de seguridad se reduce hasta $FS=1.10$, permaneciendo estable. Este hecho, junto con que no se observan manantiales en el contacto entre las calizas y las margas, parece indicar que el nivel freático no afecta al nivel crítico de margas con yesos. El valor mínimo de aceleración sísmica requerido para provocar el deslizamiento (aceleración crítica) en condiciones secas es de 0.119g, mientras si se considera las margas saturadas el valor disminuye a 0.019g. El hecho de que el terremoto de Palma de 1851 no ocasionó el movimiento del deslizamiento y que produjo una PGA estimada de 0.045g, valor que dobla prácticamente la aceleración crítica para el caso saturado, apoya la hipótesis de que no fue provocado debido a la presencia de agua y que, por tanto, pudo tener un origen sísmico.

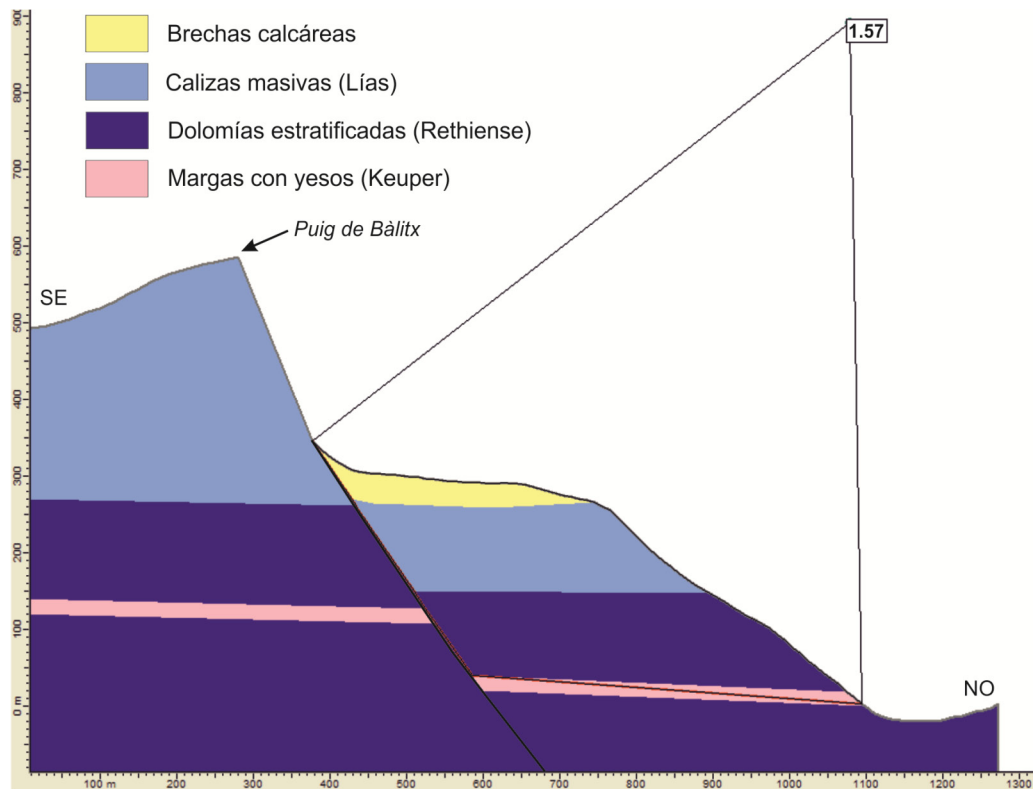


Figura 5. Perfil geológico-geotécnico longitudinal del deslizamiento de Bàltx considerado en los cálculos de estabilidad. La superficie de rotura se muestra mediante una línea roja.

Los valores más probables de magnitud-distancia desde el deslizamiento de Bàltx, de los potenciales terremotos que han podido ser capaces de superar la aceleración crítica en condiciones secas (0.119g), se han obtenido considerando el rango de magnitudes más razonables considerando la longitud de las fallas activas presentes en el área (Tabla 2). Las magnitudes obtenidas deben ser consideradas como magnitudes mínimas puesto que un terremoto que presente una magnitud superior a la estimada, para cada par de valores de magnitud-distancia, también podría provocar el deslizamiento. Por otra parte, las distancias epicentrales obtenidas representan las distancias máximas a las que se deben de localizar los terremotos para llegar a influir en el deslizamiento.

Tabla 2. Valores de magnitud y distancia más probables correspondientes a los terremotos que pudieron haber provocado el deslizamiento de Bàltx al superar la aceleración crítica estimada en condiciones no saturadas. M_w : magnitud momento; R_{ep} : distancia epicentral desde el deslizamiento de Bàltx (km).

M_w	4.7	5.0	5.5	6.0	6.5
R_{ep}	≤ 1.0	≤ 4.1	≤ 8.3	≤ 12.8	≤ 18.2

Este análisis indica que el deslizamiento de Bàltx pudo ser provocado por un terremoto de magnitud momento mínima entre 4.7 y 6.5, a condición de que estuviese localizado en los primeros 18 kilómetros en torno al deslizamiento. Teniendo en cuenta esta limitación espacial, alguno de estos terremotos se puede relacionar con la rotura de alguna de las fallas activas de Mallorca. En particular, el desencadenante de la inestabilidad pudo ser un terremoto de $M_w \geq 5.5$ relacionado con la Falla de Palma o algunos de sus segmentos (Figura 1), localizada en un perímetro en torno a 5-20 km del deslizamiento. El presente estudio nos permite además descartar los terremotos generados por las fallas localizadas a más de 20 km del deslizamiento (ej. Falla de Sencelles).

Conclusiones

El estudio de estabilidad realizado en el deslizamiento de Bàltx ha permitido evaluar el posible origen sísmico del mismo. Se ha comprobado que el deslizamiento se produjo a favor de dos discontinuidades bien definidas: una falla normal y una superficie de cabalgamiento basal. Se ha encontrado que el deslizamiento permaneció estable aún cuando se consideran condiciones saturadas en el nivel crítico de margas con yesos. Por último, se ha estimado que el deslizamiento de Bàltx pudo ser provocado por un terremoto de magnitud moderada a alta ($M_w=4.7-6.5$) localizado en las inmediaciones del deslizamiento (≤ 20 km). Este evento sísmico pudo además estar relacionado con la actividad de la Falla de Palma, una falla activa de 40 km de longitud y con sismicidad instrumental asociada.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por los proyectos de investigación TOPOIBERIA CONSOLIDER-INGENIO2010 CSD2006-00041, CGL2008-03249/BTE y FASE-GEO CGL2009-09726.

Referencias:

- Akkar, S. y Bommer, J.J. (2007), "Empirical prediction equations for peak ground velocity derived from strong-motion records from Europe and the Middle East". *B Seismol Soc Am*, 97, 511-530.
- Alvaro, M. (1987), "La tectónica de cabalgamientos de la Sierra Norte de Mallorca (Islas Baleares)". *Bol Geol Min*, 98, 34-41.
- Ambraseys, N.N., Douglas, J., Sarma, S.K. y Smit, P.M. (2005), "Equations for the Estimation of Strong Ground Motions from Shallow Crustal Earthquakes Using Data from Europe and the Middle East: Horizontal Peak Ground Acceleration and Spectral Acceleration". *B Earthq Eng*, 37, 1-53.
- Benedicto, A., Ramos, E., Casas, A., Sabat, F. y Barón, A. (1993), "Evolución tectosedimentaria de la cubeta neógena de Inca (Mallorca)". *Rev Soc Geol España*, 6, 167-176.
- Bindi, D., Luzi, L., Massa, M. y Pacor, F. (2010), "Horizontal and vertical ground motion prediction equations derived from the Italian Accelerometric Archive (ITACA)". *B Earthq Eng*, 8, 1209-1230.
- CEN (Comité Européen of Normalisation) (2004), "Eurocode 8: design of structures for earthquake resistance. Part 1: general rules, seismic actions and rules for buildings". EN 1998-1, Bruselas.
- Fontboté, J.M., Guimerá, J., Roca, E., Sabat, F., Santanach, P., Fernández-Ortigosa, F. (1990), "The Cenozoic evolution of Valencia Trough (Western Mediterranean)". *Rev Soc Geol España*, 3, 249- 259.
- Gelabert, B., Sabat, F., Rodríguez-Perea, A. (1992), "A structural outline of the Serra de Tramuntana of Mallorca (Balearic Islands)". *Tectonophysics*, 203, 167-183.
- Gelabert, B. (1998), "La Estructura Geológica de la Mitad Occidental de la Isla de Mallorca". Colección Memorias del ITGE, 129 pp.
- IGME (1984), "Proyecto de investigación geotérmica preliminar del Pirineo oriental, zona meridional del prelitoral catalán e Islas Baleares". Vol.3. Estudio geotérmico preliminar de Baleares, 182 pp. Inédito
- López, J.M. y Mateos, R.M. (2006), "Control estructural de las anomalías geotérmicas y la intrusión marina en la Plataforma de Lluçmajor y la Cubeta de Campos (Mallorca)". En: *Las Aguas Subterráneas en los Países Mediterráneos*. Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España. Serie Hidrogeología y Aguas Subterráneas, Madrid, 17, 607-613.
- Mateos, R.M. (2001), "Los movimientos de ladera en la Serra de Tramuntana (Mallorca). Caracterización geomecánica y análisis de la peligrosidad". Tesis Doctoral, Universidad Complutense de Madrid, 299 pp.

- Mateos, R.M., Ferrer, M. y González de Vallejo, L.I. (2002), "Los materiales rocosos de la Sierra de Tramuntana (Mallorca). Caracterización geomecánica y clasificación geotécnica". *Bol Geol Min*, 113 (4), 415-427.
- Mateos, R.M. y Azañón, J.M. (2007), "Dinámica de laderas en la vertiente costera de la sierra de Tramuntana de la isla de Mallorca, desde el Pleistoceno superior". *Resúmenes XII Reunión Nacional del Cuaternario. SGE*, 45-47.
- Mateos, R.M., Bermejo, M., Hijazo, T., Rodríguez-Franco, J.A., Ferrer, M., González de Vallejo, L.I. y García, I. (2008), "Los deslizamientos de la ladera de la margen izquierda del torrente de Fornalutx (Mallorca)". *Bol Geol Min*, 119(4), 443-458.
- Noller, J.S., Sowers, J.M. y Lettis, W.R., eds. (2000). "Quaternary Geochronology. Methods and Applications". AGU. Reference Shelf 4, 582 pp.
- Sabat, F., Muñoz, J.A., y Santanach, P. (1988), "Transversal and oblique structures at the Serres de Llevant thrust belt (Mallorca Island)". *Geol Rundsch*, 77, 529-538.
- Skarlatoudis, A.A., Papazachos, B.N., Margaritis, N., Theodulidis, C., Papaioannou, I., Kalogeras, E.M., Scordilis, E.M. y Karakostas, V. (2003), "Empirical peak ground-motion predictive relations for shallow earthquakes in Greece". *B Seismol Soc Am*, 93, 2591-2603.
- Silva, P.G., González Hernández, F.M., Goy, J.L., Zazo, C. y Carrasco, P. (2001). "Paleo and historical seismicity in Mallorca (Balears, Spain): a preliminary approach". *Acta Geol Hisp*, 36(3-4), 245-266.