

La avalancha de rocas de Son Cocó (Alaró, Mallorca). Descripción y análisis del movimiento

R. M. Mateos⁽¹⁾, I. García-Moreno⁽¹⁾, J.M. Azañón⁽²⁾ y M. Tsige⁽³⁾

(1) Instituto Geológico y Minero de España. Avda. Ciudad Querétaro s/n. 07007 Palma de Mallorca.
rm.mateos@igme.es; inmaculada.garcia@igme.es

(2) Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra. Universidad de Granada-CSIC. Campus Fuentenueva. 18002 Granada.
jazanon@ugr.es

(3) Departamento de Geodinámica. Universidad Complutense de Madrid. Avda. Complutense s/n. 28040 Madrid.
meaza@geo.ucm.es

RESUMEN

El temporal de lluvia y frío que afectó a Mallorca durante los meses de octubre de 2008 a enero de 2009, ha desencadenado numerosos movimientos de ladera, registrándose 12 movimientos significativos en la Serra de Tramuntana, algunos de los cuales han afectado seriamente a las vías de comunicación. La noche del 19 de diciembre de 2008 tuvo lugar, en la vertiente oriental del Puig de s'Alcadena (tm de Alaró), un gran desprendimiento de rocas que generó una avalancha sobre la ladera, con un alcance de unos 650 m. La avalancha arrasó el bosque de pinar que encontró a su paso, dejando una lengua de bloques de unos 60.000 m² de superficie y 300.000 m³ de volumen. Algunos de los bloques movilizados presentan volúmenes superiores a 1.500 m³ y varios miles de toneladas de peso. La rotura en cuña del escarpe rocoso del Puig de s'Alcadena se produce a través de dos planos, que coinciden con las principales directrices tectónicas de la Sierra. La coincidencia de lluvias intensas y continuadas en la zona (150 mm en 24 horas y 672 mm de lluvia acumulada), con la ocurrencia de bajas e inusuales temperaturas (inferiores a 0°C), fue el motor desencadenante de la avalancha. Afortunadamente, no se registraron daños personales ni materiales.

Palabras clave: avalancha rocosa, desprendimiento rocoso, lluvias intensas, Mallorca

Son Coco rock avalanche (Majorca, Spain). Description and analysis of movement

ABSTRACT

From October 2008 to January 2009, Majorca island was affected by a period of intense rainfall and low temperatures which triggered numerous slope movements, 12 being registered in the Tramuntana Range, some of which seriously affected the road network. On the night 19th December 2008, a rockfall on the eastern slope of the Puig de s'Alcadena (Alaró) took place, generating a rock avalanche with a length of 650 m. The rock avalanche destroyed the pine wood in its path, leaving a tongue of blocks over an area of 60.000 m² and 300.000 m³ in volume. Some of the blocks have a volume of over 1,500 m³ and are several tones in weight. The wedge failure on the scarp of Puig de s'Alcadena is produced on two planes which coincide with the main tectonic features of the Range. The fact that heavy and continuous rainfall (150 mm in 24 h and 672 mm of accumulated rainfall) coincided with unusually low temperatures (below 0°C), was the triggering factor of the avalanche. Fortunately, no serious damage occurred

Key words: heavy rainfall, Majorca, rock avalanche, rock fall, Spain

Introducción

Los grandes desprendimientos rocosos y avalanchas de roca se generan principalmente en cadenas montañosas con un clima glaciario – periglaciario. La meteorización de la roca por gelifracción y las variaciones de los esfuerzos a los que se ven sometidos los escarpados valles, por las modificaciones del balance de hielo en los glaciares, son los principales factores que determinan estas grandes roturas (Hewitt *et al.*, 2008). La bibliografía muestra numerosos ejemplos

de este tipo de procesos en regiones como las mencionadas anteriormente. Algunos fueron tremendamente destructivos, como la avalancha de rocas de Tajford (Noruega), de más de 10⁶ m³ de volumen, que en 1934 generó un tsunami sobre el fiordo que acabó con la vida de 47 personas (Hermanns *et al.*, 2006). En la cordillera de los Alpes, las avalanchas de roca y derrubios son fenómenos también muy frecuentes (Guadagno *et al.*, 2005; Hermanns *et al.*, 2006). La avalancha de rocas de Thurwieser (Alpes italianos), en septiembre de 2004, movilizó unos 3.10⁶ m³ de

roca, recorriendo una distancia superior a 3 km (Pirulli, 2008). No obstante, es la cordillera del Himalaya, y concretamente la región del Annapurna (Nepal), la que registra gigantescos movimientos en masa como los mencionados, teniendo constancia de avalanchas de roca con volúmenes entre 1- 5 km³ (Weidinger, 2006).

En España, las avalanchas de roca no son procesos frecuentes, debido principalmente a las condiciones climáticas de nuestro país. Si lo son los desprendimientos rocosos, que generan numerosas pérdidas económicas, afectando en numerosas ocasiones a poblaciones y vías de comunicación. El desprendimiento de Azagra (Navarra), en julio de 1874, causó 92 víctimas mortales y la destrucción casi total del pueblo (Bonachea, J., 2006). Recientemente, numerosos desprendimientos de rocas – Tenerife (2002), Mogán (Gran Canaria, 2002), Cala Ramón (Girona, 2003), Barruera (Lleida, 2003) y Montserrat (Barcelona, 2008), entre otros- causaron varias víctimas mortales y graves afecciones a las carreteras.

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 (figura 1). La abrupta orografía de esta sierra ligado a su complejidad geológica y a la existencia de un clima mediterráneo, con lluvias torrenciales concentradas en cortos períodos de tiempo, condiciona una intensa dinámica de laderas con la consecuente ocurrencia de movimientos de diversas tipologías (Mateos, 2001; Mateos y Azañón, 2005).

Los desprendimientos rocosos son fenómenos muy frecuentes en la Sierra de Tramuntana, asociados generalmente a los escarpes rocosos de los frentes de cabalgamiento que configuran esta cadena montañosa. El 16 de marzo de 1857, un gran desprendimiento de rocas en la vertiente norte del Puig des Teix arrasó gran parte del olivar de la Possesió des Teix (Llabrés, 1962). En septiembre de 1993 un desprendimiento rocoso sepultó varias casetas para guardar barcas en la Cala de Banyalbufar (Ferrer *et al.*, 1997), determinando el cierre de esta pequeña playa hasta que se acometieron las obras de estabilización (Alonso y Moreno, 2004). Recientemente, en febrero del año 2005, un desprendimiento de rocas sepulta en Son Matge (Valldemossa) uno de los yacimientos arqueológicos más importantes de la Prehistoria mallorquina (Mateos y Azañón, 2005); y en marzo del año 2006, un desprendimiento rocoso taponó parcialmente el curso del torrente de Es Racó (Fornalutx). Todos los desprendimientos rocosos registrados se han producido tras la ocurrencia de intensas lluvias, especialmente durante los meses

otoñales, cuando tienen lugar los episodios de “gota fría” en el Mediterráneo occidental (Mateos *et al.*, 2007).

El temporal de lluvia y frío de Octubre 2008-Enero 2009

Entre los días 21 de octubre de 2008 y 9 de enero de 2009, Mallorca ha vivido uno de los episodios más fríos y lluviosos que se recuerdan. En el sector central de la Sierra de Tramuntana se han registrado los mayores valores de precipitaciones intensas desde que se dispone de datos instrumentales (año 1944). El día 15 de diciembre de 2008 se registraron valores de lluvia de 276 mm en 24 horas en el entorno de Lluc (sector central de la sierra); y las lluvias acumuladas durante los dos meses y medio de temporal superan los 1600 mm en el lugar anteriormente citado, siendo la precipitación media anual de la isla en esta zona de 1200 mm (Mateos, 2001). Los elevados valores de precipitaciones han coincidido con bajas e inusuales temperaturas (inferiores a 0°C), produciéndose copiosas nevadas, así como heladas en las zonas más elevadas de la Sierra.

Como consecuencia de este temporal se han desencadenado 12 movimientos de ladera relevantes en la Sierra de Tramuntana (figura 1). Las tipologías de los movimientos son muy diversas: deslizamientos en materiales arcillosos, hundimientos kársticos, desprendimientos rocosos e incluso una avalancha de rocas. En la figura 2 se muestran las fotografías de algunos de estos movimientos, destacando el desprendimiento rocoso de Gorg Blau, que mantuvo cortada durante varios meses la carretera C-710, que vertebraba la Sierra de Tramuntana.

En el presente trabajo se describe y analiza la avalancha de rocas que tuvo lugar, la noche del 19 de diciembre de 2008, en la vertiente oriental del Puig de s'Alcadena (tm de Alaró). Se trata del movimiento de mayor envergadura de los acaecidos durante el citado temporal, con una gran repercusión en los medios de comunicación

Objetivos

En el presente trabajo se analiza con detalle la avalancha de rocas de Son Cocó, que tuvo lugar la noche del 19 de diciembre de 2008, en la vertiente oriental del Puig de s'Alcadena (tm de Alaró, Mallorca). El manuscrito pretende cumplimentar los siguientes objetivos principales:

- Conocer la tipología de rotura.

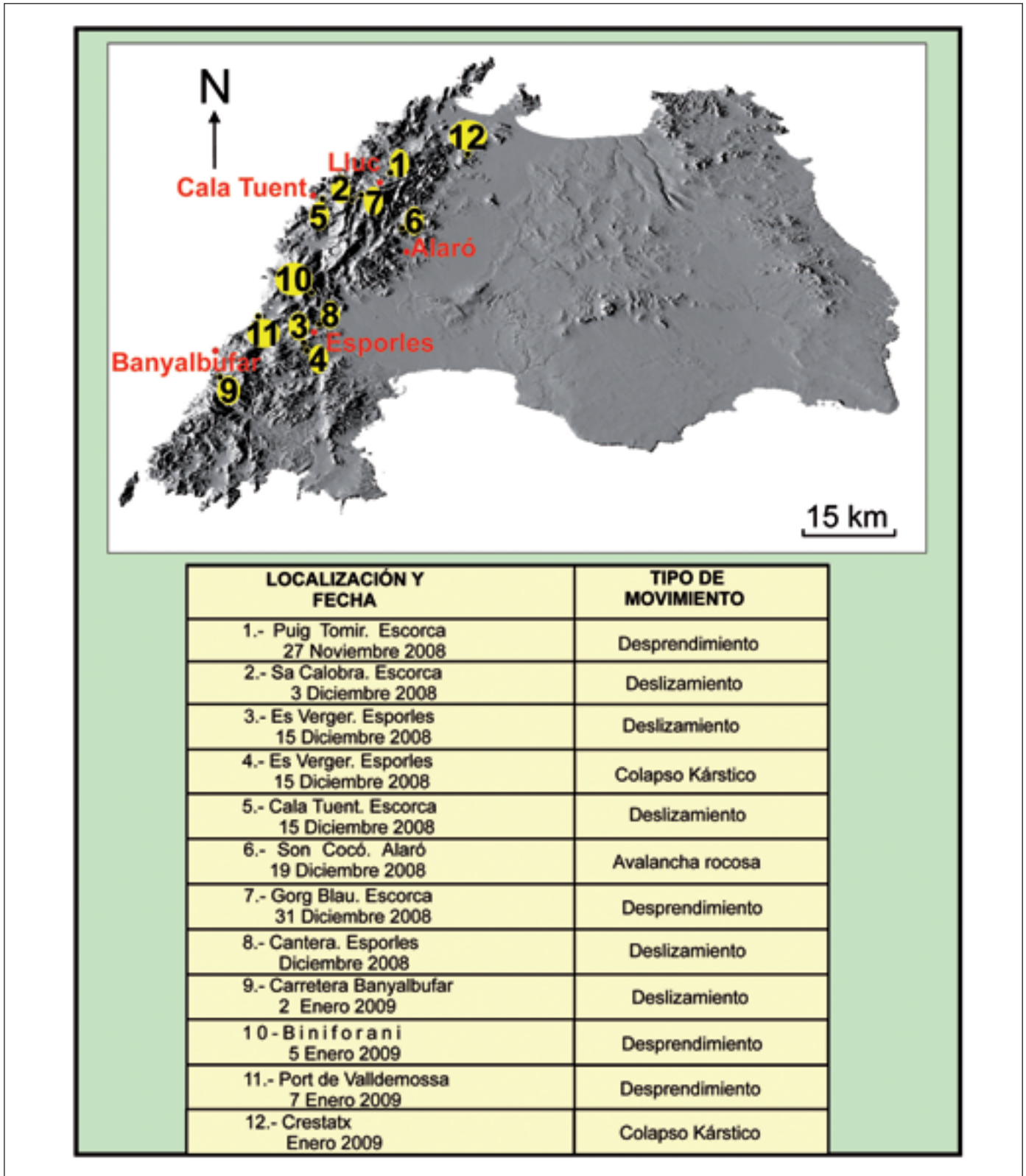


Figura 1. Modelo Digital de la Isla de Mallorca, donde se localizan los 12 movimientos de ladera más relevantes que desencadenó el temporal de lluvia y frío de octubre 2008- enero 2009

Figure 1. Digital Model of the Island of Majorca representing the 12 most relevant slope movements caused by the period of intense rainfall and low temperatures

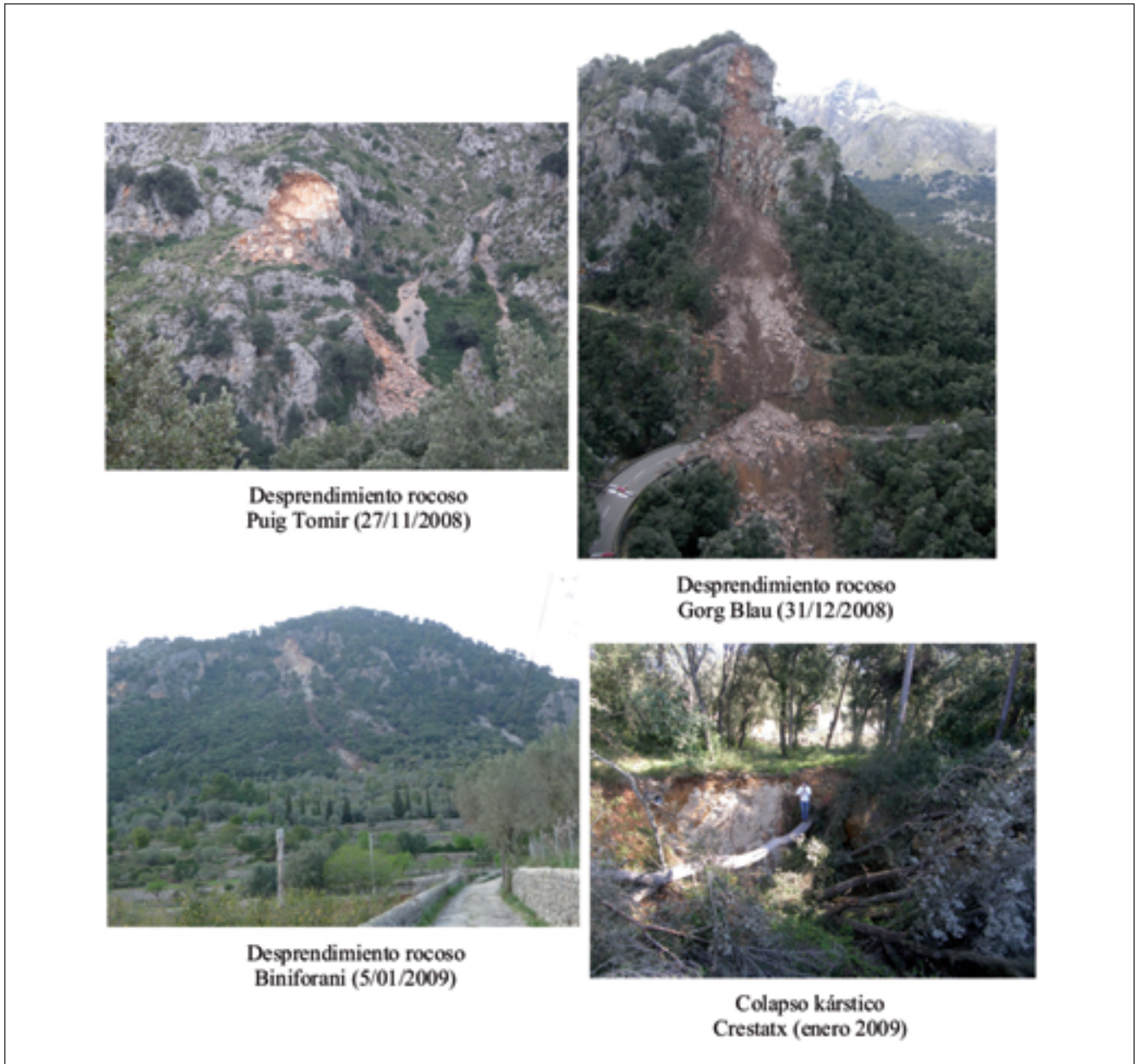


Figura 2. Diferentes movimientos de ladera acaecidos durante el temporal de lluvia y frío (octubre 2008-enero 2009) en la Isla de Mallorca. Destaca el desprendimiento de rocas de Gorg Blau, el último día del 2008, que mantuvo cortada la principal carretera de la Sierra de Tramuntana durante varios meses

Figure 2. Various slope movements which took place during the period of intense rainfall and cold weather (October 2008-January 2009) on the island of Majorca. One of the most relevant being the Gorg Blau rockfall, on the last day of 2008, which led to the main road of the Range being blocked

- Determinar las características del movimiento.
- Analizar los factores condicionantes.
- Analizar y determinar los factores que desencadenaron la avalancha.

La clasificación de este movimiento como avalancha de rocas abre un posible campo de discusión. Aunque la magnitud del movimiento- inferior a 1 millón de m³- descartaría su clasificación como ava-

lancha (Hsü, 1975); la generación, tras el desprendimiento, de un movimiento masivo de los bloques desplazándose a grandes velocidades por la ladera, en contraste con un movimiento de fragmentos aislados (Hungar y Evans, 1988), ha sido el criterio utilizado para su clasificación como avalancha de rocas- *rock avalanche* (Evans *et al.*, 1989; Nicoletti y Sorriso-Valvo, 1991). Autores como Hutchinson (1988), avalan la generación de movimientos de este tipo de menores magnitudes.

Contexto geológico y geográfico

La Serra de Tramuntana constituye una escarpada región montañosa al N de la isla de Mallorca, alineada de NE a SO a lo largo de 90 km de longitud; y en ella se encuentran las máximas elevaciones de las Baleares (Puig Major, 1445 m). Estos relieves están constituidos principalmente por potentes masas de calizas y dolomías mesozoicas estructuradas mediante un sistema imbricado de cabalgamientos vergen-

tes hacia el NO, cuyo nivel regional de despegue está constituido por los materiales de naturaleza arcilloso-evaporítica del Keuper (figura 3). El "máximo" de la orogenia alpina en esta cadena montañosa tuvo lugar durante el Mioceno inferior y medio, comenzando a partir del Serravaliense una etapa distensiva, caracterizada por fallas normales de gran longitud, que configuran la morfoestructura de la isla en el actual sistema de altos y cubetas (Gelabert, 1998).

El Puig de S'Alcadena (tm de Alaró) se ubica en la vertiente meridional de la Sierra de Tramuntana, y constituye un importante resalte topográfico (815 m) que representa las últimas estribaciones de la Sierra hacia el Llano de Inca- Sa Pobla. En la figura 4 se representa el Modelo Digital del Terreno de la zona de estudio, con la ubicación de la avalancha y de las diferentes estaciones meteorológicas empleadas para el presente trabajo.

Desde el punto de vista geológico, el Puig de S'Alcadena constituye una lámina cabalgante hacia el NO sobre los materiales del Jurásico superior y Oligoceno, que afloran en el vecino Puig de Sant

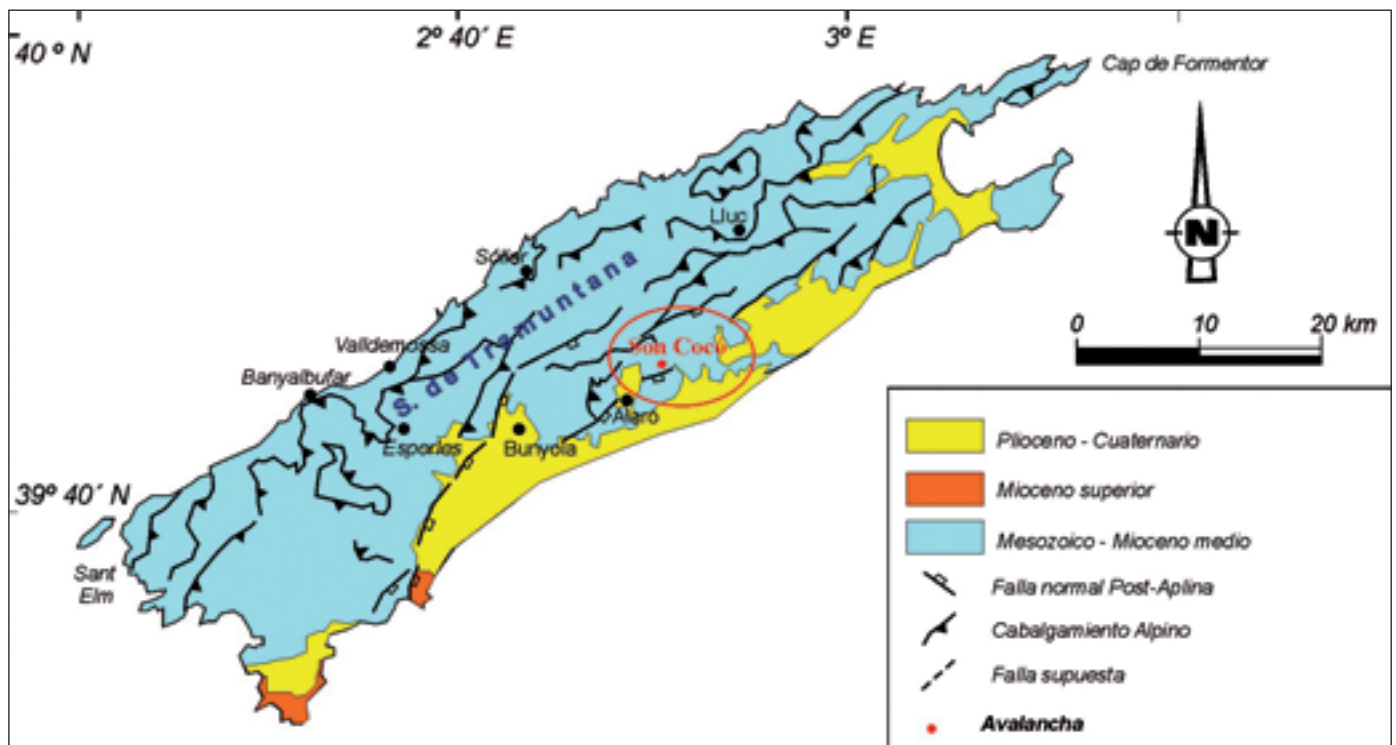


Figura 3. Contexto geológico de la zona de estudio. Se observa la estructura de la Sierra de Tramuntana, constituida por un sistema imbricado de cabalgamientos vergentes hacia el NO, que afecta principalmente a los materiales carbonatados del Mesozoico. Hacia la vertiente sur, grandes fallas normales delimitan el borde de la Sierra. Se localiza la avalancha rocosa de Son Cocó al NE de la localidad de Alaró. *Figure 3. Geological context of the study area, representing the structure of the Tramuntana Range, made up of several trusts towards the NW, which mainly affect the Mesozoic limestone. Large normal faults which border the southern slope of the Range can be observed. The Son Coco avalanche is indicated*

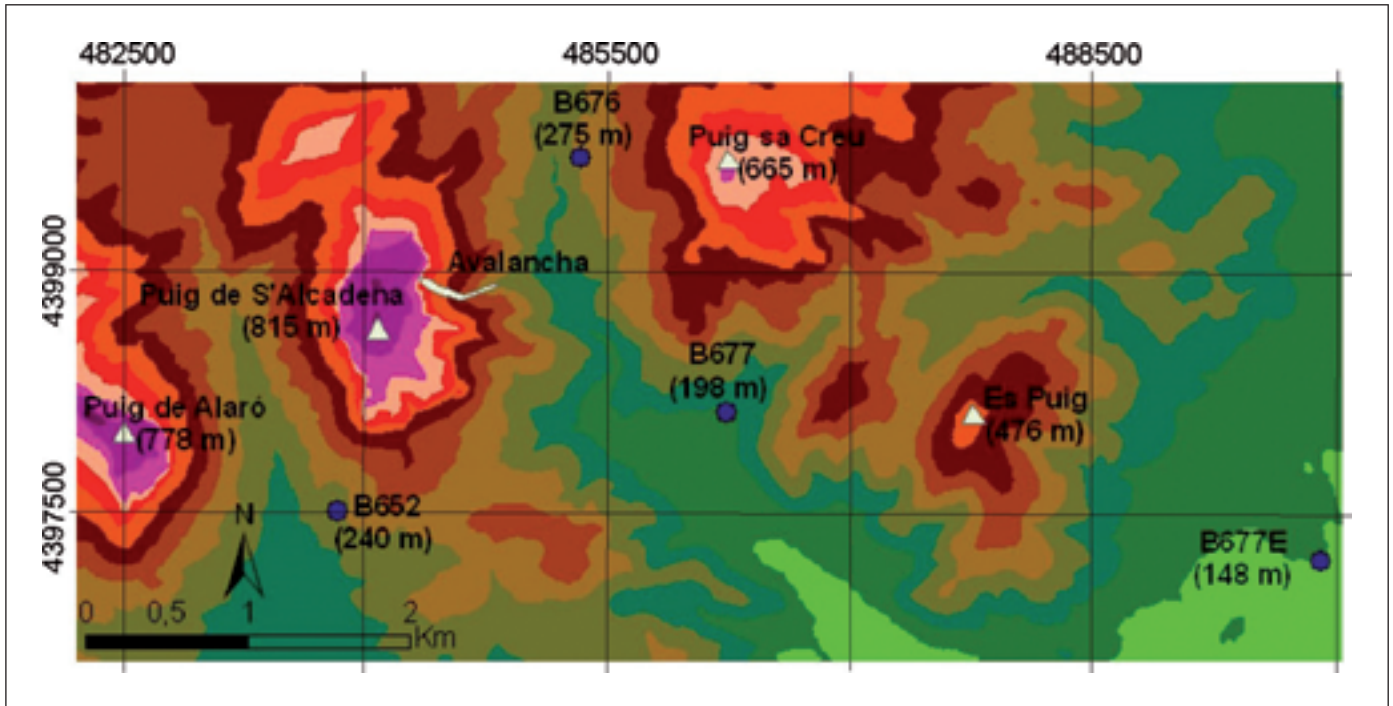


Figura 4. Modelo digital del terreno que muestra la localización de la avalancha, en la vertiente oriental del Puig de S'Alcadeha, así como las diferentes estaciones meteorológicas empleadas para el presente estudio (B676, B677, B677E y B652)

Figure 4. Digital terrain model of the area, showing the location of the weather stations used in the present work (B676, B677, B677E y B652) as well as the rock avalanche

Miquel (figura 5). En el Puig de S'Alcadeha afloran en la base los materiales del Rhetiense – carniolas, dolomías y margas-, materiales blandos que ofrecen unos relieves más suaves (pendiente en torno a 25°) que las calizas liásicas que afloran en la cima. Éstos últimos materiales dan lugar a un escarpe rocoso, prácticamente vertical, de unos 150 m de altura, afectado por una serie de discontinuidades que independizan bloques de gran magnitud susceptibles de desprenderse. Las discontinuidades más penetrativas del escarpe presentan direcciones N30°E y N90°E, y buzamientos de 80° hacia la ladera. La primera de las direcciones indicada parece seguir las directrices tectónicas de la sierra, ya que es paralela a los frentes de los mantos de cabalgamiento.

Características del movimiento y modelo de rotura

La noche del 19 de diciembre de 2008 tuvo lugar, en la vertiente oriental del Puig de s'Alcadeha, un gran desprendimiento rocoso que generó una avalancha de rocas sobre la ladera. El desprendimiento se generó en el escarpe de roca caliza que corona la montaña, afectando a una superficie del mismo de unos

7.500 m². A simple vista parece una rotura planar de forma triangular, pero analizado con detalle, se constata una rotura en cuña (figura 6), condicionada por la existencia de dos planos de discontinuidad casi verticales, con direcciones N30°E y N90°E, indicados anteriormente. En la figura 7 se muestran dos fotografías del escarpe, antes y después de la rotura. En la fotografía realizada en la primavera del 2006, se observa con nitidez ambos planos de discontinuidad, siendo más patente el que presenta una dirección N30°E, y que independizan grandes bloques de roca paralelepípedicos adosados al escarpe y con la altura del mismo (≈ 150 m). La morfología escalonada del escarpe denota la ocurrencia de numerosos desprendimientos en cuña antiguos, confirmando que éste es el patrón de rotura en el mismo. En la fotografía citada, se observa también la existencia de un saliente rocoso en la zona donde posteriormente se produjo la rotura, delimitado por ambas discontinuidades.

Una vez producido el desprendimiento, se generó una avalancha de bloques que arrastró gran parte de los materiales blandos del Rhetiense de la base del escarpe. Miles de bloques fueron saltando, rodando y reptando ladera abajo y, en su desplazamiento, arrasaron el bosque de pinos que encontraron a su paso

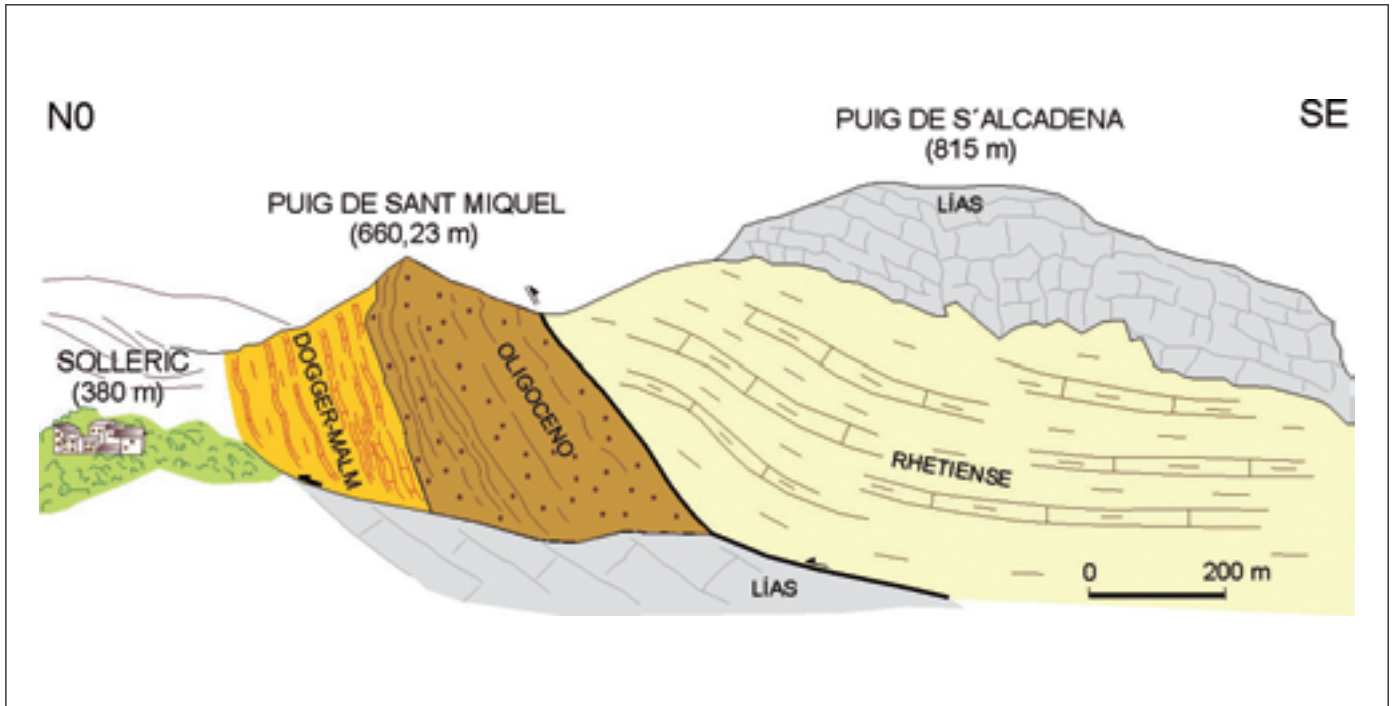


Figura 5. Corte geológico de la zona de estudio. El Puig de S'Alcadena constituye una lámina cabalgante sobre los materiales del Jurásico superior y Oligoceno del Puig de Sant Miquel. En el Puig de S'Alcadena afloran los materiales del Rhetiense y del Lías, éstos últimos constituidos por calizas de naturaleza muy dura, que dan lugar a un escarpe casi vertical que corona la montaña. (Modificado de Gelabert, 1998)

Figure 5. Geological cross section. The Puig de s'Alcadena thrust over the Puig de Sant Miquel which consist of Upper Jurassic and Oligocene materials. The Puig de s'Alcadena is an outcrop of Rhetiense and Lias materials, the latter being very hard limestone, giving rise to an almost vertical scarp which crowns the mountain. (Modified from Gelabert, 1998)

(figura 8). El alcance de la avalancha depende de varios factores (Kilburn y Sorensen, 1998): de la energía potencial disponible después del desprendimiento (directamente proporcional al volumen de masa desprendida), del grado de fragmentación de la roca, y de la tasa de desaceleración del movimiento por la colisión entre los bloques y la resistencia de la capa basal. En este caso hay que añadir un factor adicional - la topografía original de la ladera-, que condiciona una ligera curva en la trayectoria de la avalancha (figura 12) que facilita su frenado y, consecuentemente, reduce el alcance de la avalancha (Nicoletti y Sorriso Valvo, 1991).

La anchura de la lengua formada por la avalancha se va reduciendo ladera abajo, siendo de unos 100 m en las cotas más altas y de unos 40 m en la parte baja (figura 9). La superficie total de terreno invadida por los bloques se estima en unos 60.000 m² y el volumen total de material movilizado en unos 300.000 m³.

El tamaño de los bloques de roca es muy variable, llegando algunos a tener dimensiones de unos 1.500

m³ de volumen y varios miles de toneladas de peso (figura 10). También se observan diferentes litologías en los bloques, desde las dolomías muy alteradas del Rethiense hasta las calizas compactas del Lías, con gran presencia de sedimentos más finos, que corresponden a los niveles más blandos del Rethiense (margas). No obstante, los bloques de mayor tamaño corresponden a los materiales desprendidos del escarpe (calizas liásicas). Como indican otros autores sobre la distribución de los bloques en una avalancha (Vallejo, 1980 y Bagnold, 1954), se produce una clasificación inversa en el tamaño de los mismos, quedando los de mayor tamaño "flotando" en la superficie de la avalancha (figura 11). La curva que describe la trayectoria del movimiento, al adaptarse a la topografía original de la ladera, condiciona una desaceleración del movimiento y, consecuentemente, la acumulación de los bloques de mayor tamaño en este sector (figura 12)

Afortunadamente la avalancha de rocas se frenó a media ladera, no afectando a las Casas de Son Cocó, que se encontraban en la dirección de avance de la



Figura 6. Rotura en cuña en el escarpe de rocas calizas que corona el Puig de s'Alcadena, de unos 150 m de potencia. Los dos planos de rotura, N30°E y N90°E, coinciden con las principales directrices tectónicas de la Sierra

Figure 6. Wedge failure in the scarp which crowns the Puig de s'Alcadena, with a thickness of 150 m. The two breaking planes, N30°E and N90°E, coincide with the main tectonic features of the Range

lengua (figura 14). La gran visibilidad del Puig de s'Alcadena desde cualquier punto de la mitad septentrional de la isla (figura 13), ha despertado un enorme

interés social por este movimiento, ampliamente mostrado por los medios de comunicación (El Mundo, 2009; Última Hora, 2009).

Movilidad, relación H/L

El alcance del movimiento (L) es de 650 m, desde el frente de rotura hasta el último de los bloques encontrados ladera abajo, salvando una diferencia de cota de unos 275 m (H). La relación **H/L** es de 0.42, lo que corresponde a un ángulo de 23°. Este parámetro H/L, que representa la tangente del ángulo de alcance, se utiliza por numerosos autores para evaluar la movilidad de diferentes tipologías de movimientos de ladera (Kilburn y Sorensen, 1998; Corominas, 1996). Hsü, 1975 considera las avalanchas de roca como fenómenos de gran movilidad y establece que este tipo de movimientos presentan valores de H/L inferiores a 0,6. Nicoletti y Sorriso – Valvo, 1991 analizan este parámetro en 40 avalanchas de roca seleccionadas de la literatura y distribuidas por todo el planeta. Según estos autores, el valor de H/L obtenido para Son Cocó (0.42) indica una elevada y rápida disipación de la energía de la avalancha, probablemente condicionada por su adaptación a la morfología local y al posible efecto de "frenado" de la presencia de bosque. Similar valor de H/L muestra la avalancha de

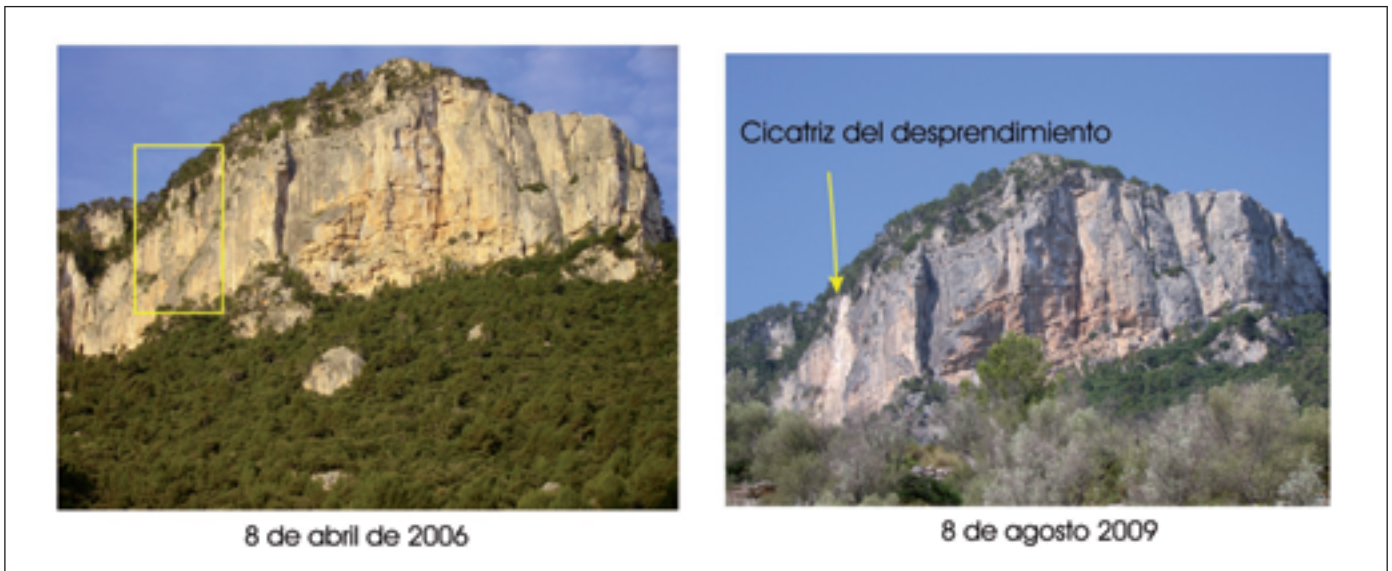


Figura 7. Escarpe del Puig de s'Alcadena, antes y después de la rotura. Se observan los dos planos de discontinuidad que afectan el macizo rocoso y que independizan grandes bloques de roca con forma de cuña. En la fotografía de la izquierda se observa un saliente rocoso en la zona donde, posteriormente, se produjo la rotura

Figure 7. Puig de s'Alcadena scarp, before and after the failure. The two planes of failure affecting the massif can be observed; these caused the separation of large wedge shaped blocks. In the left hand photo, an overhanging block can be seen in the same area where subsequently the failure was produced



Figura 8. Avalancha de bloques sobre la ladera, con un alcance de 650 m y una anchura de la lengua de hasta 100 m. El bosque de pinar quedó completamente arrasado
Figure 8. Rock avalanche with a length of 650 m and a tongue with up to 100 m in width. The pine wood was completely swept away



Figura 9. Final de la lengua de la avalancha, que se va estrechando progresivamente hasta quedar paralizada a media ladera
Figure 9. End of the tongue of the avalanche, which gets progressively narrower until it stops half way down slope



Figura 10. El tamaño de los bloques de roca es variable llegando algunos a tener dimensiones de hasta 1.500 m³ de volumen y varios miles de toneladas de peso. En la foto, el último bloque que cierra la avalancha, obsérvese el tamaño con la persona que hace de escala
Figure 10. The size of the blocks is variable, with some of them being up to 1.500 m³ in volume and several thousand tonnes in weight. In the photo, the last block of the avalanche can be seen, with some indication of scale being provided by the person next to it



Figura 11. Granuloclasificación inversa. Los bloques de mayor tamaño se quedan "flotando" sobre la superficie de la avalancha
Figure 11. Inverse grading. Mass larger particles move towards the free surface



Figura 12. Curva en la trayectoria de la avalancha, que se adapta a la topografía original de la ladera. Este hecho produce un frenado del movimiento y, consecuentemente, una acumulación de los mayores bloques transportados

Figure 12. A curve in the avalanche path due to the original topography of the slope. This produces a reduction of movement velocity and, consequently, an accumulation of the larger blocks being transported

Costantino (Italia) de 1973, con un alcance de 2.240 m y un volumen de 20 millones de m³ de roca (Guerricchio y Melidoro, 1973; Nicoletti y Sorriso – Valvo, 1991).

Análisis de los factores desencadenantes

El clima de Mallorca es típicamente mediterráneo, con unas temperaturas medias templadas y un régimen de precipitaciones estacional. Los episodios de gota fría son frecuentes en los meses otoñales, debido a la llegada de las primeras masas de aire frío en altura, que contrastan con la elevada temperatura que aún mantiene el mar. La pluviometría decrece de norte a sur y está muy influenciada por la orografía de la isla. De esta forma, en el sector central de la Sierra de Tramuntana se registran precipitaciones medias anuales de 1200 mm, mientras que en el sur de la isla (Llucmajor- Campos) no se superan los 350 mm de lluvia al año (Mateos, 2001).

El episodio de lluvia y frío vivido en Mallorca, entre el 21 de octubre de 2008 y el 9 de enero de 2009, no responde al modelo habitual de "gota fría", debido principalmente a su extensión en el tiempo y a las

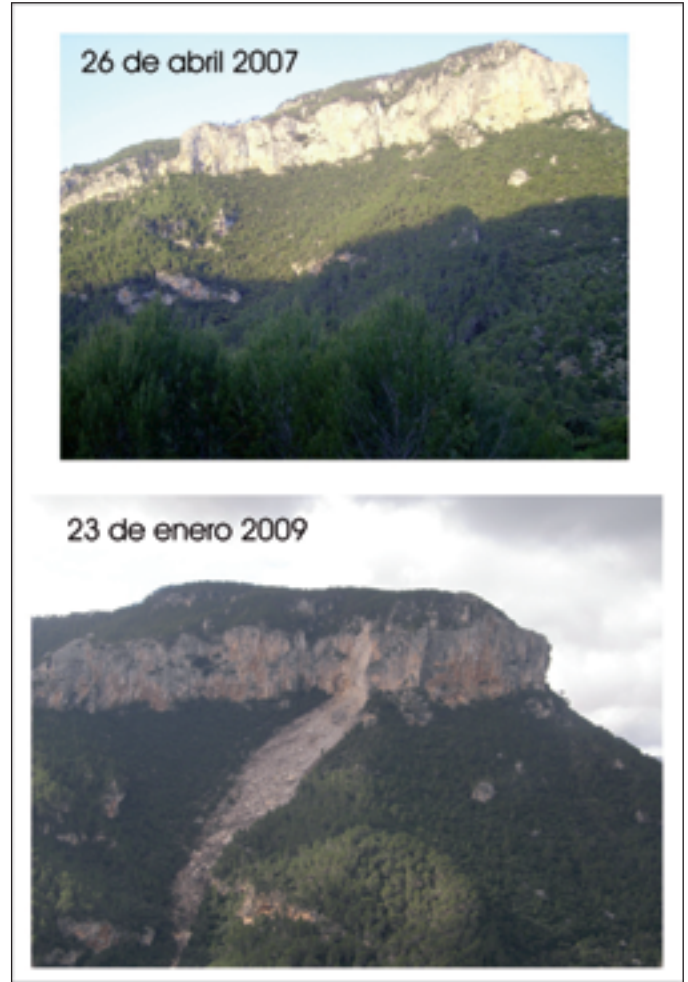


Figura 13. Impronta en el paisaje de la avalancha de rocas de Son Cocó. La gran visibilidad del Puig de s'Alcadena desde cualquier punto de la mitad septentrional de la isla, ha despertado un enorme interés social por este movimiento

Figure 13. Impact of the avalanche on the landscape. The clear visibility of Puig de s'Alcadena from any place in the northern half of the island has aroused great social interest in this movement

bajas temperaturas registradas, inusuales en estas islas mediterráneas, donde las temperaturas extremas se ven atenuadas por la cercanía al mar.

Precipitaciones

Para el análisis de las precipitaciones acaecidas durante el temporal, se ha dispuesto de los datos facilitados por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) de precipitaciones diarias, desde el periodo comprendido entre el 1 de octubre y el 9 de enero de 2009. Los datos recabados pertenecen a las cuatro



Figura 14. Mapa topográfico de la zona donde se representa el alcance de la avalancha de rocas de Son Cocó
Figure 14. Topographic map of the area representing the extend of the Son Cocó avalanche

estaciones meteorológicas más cercanas a la zona de estudio (figura 4 y tabla 1). En la tabla 1, además de la información relativa a las estaciones meteorológicas empleadas, se muestran los valores máximos de lluvia registrados en 24 horas, que corresponden al día 15 de diciembre (3 días antes de la avalancha), así como los valores de lluvia acumulada, desde que comenzaron las lluvias hasta el día que se produjo el movimiento (19 diciembre).

El día 15 de diciembre se registraron en la zona precipitaciones de hasta 150 mm en 24 horas, y como se observa en la figura 15, ya se habían producido también lluvias intensas (en torno a 80 mm en 24 horas) varios días previos al movimiento. Las lluvias acumuladas en la zona, el día que se produjo el movimiento, ascienden a valores de hasta 672 mm, y ligeramente superiores a 1400 mm en el sector central de la Sierra (figura 16).

Temperaturas

Los valores de temperatura mínima diaria registrados (datos AEMET), corresponden a una de las estaciones más cercanas al movimiento- B677 Lloseta- Es Torell- situada a una cota de 148 m. Para hacer una estimación de la temperatura en el escarpe de rotura, situado a una cota media de unos 700 m, se ha aplicado un gradiente térmico de $-6,5^{\circ}\text{C}$ cada 1000 metros (Bastida, 2005); restando por lo tanto $-3,6^{\circ}\text{C}$ a los valores registrados en la estación. En la figura 17 se representa la gráfica de temperaturas mínimas diarias, tanto en la estación meteorológica como en el escarpe donde se produce la rotura. En este último se obtienen valores de temperatura inferiores a 0°C (hasta $-1,6^{\circ}\text{C}$ el día 11 de diciembre), y es constatable que la rotura tiene lugar tras los días donde las temperaturas sufren los máximos descensos. Nótese

Estación	X (UTM)	Y (UTM)	Nombre	Precipitación máxima diaria (mm)	Precipitación acumulada (mm) 01/10/08 - 19/12/08
B652	483812	4397514	Alaró Son Bergas	92.0 (15/12/2008)	546.5
B676	485316	4399701	Alaró S'Hort Nou	149.4 (15/12/2008)	671.8
B677	486217	4398128	Lloseta S'Estorell	85.5 (15/12/2008)	521.5
B677E	489900	4397200	Lloseta Son Balle	65.9 (15/12/2008)	449.7

Tabla 1. Estaciones pluviométricas cercanas al movimiento y valores de precipitaciones máximas y acumuladas registrados. Localización de las estaciones en figura 4

Table 1. Rain gauges close to the movement, as well as maximum and accumulated rainfall data recorded. Weather stations indicated in figure 4

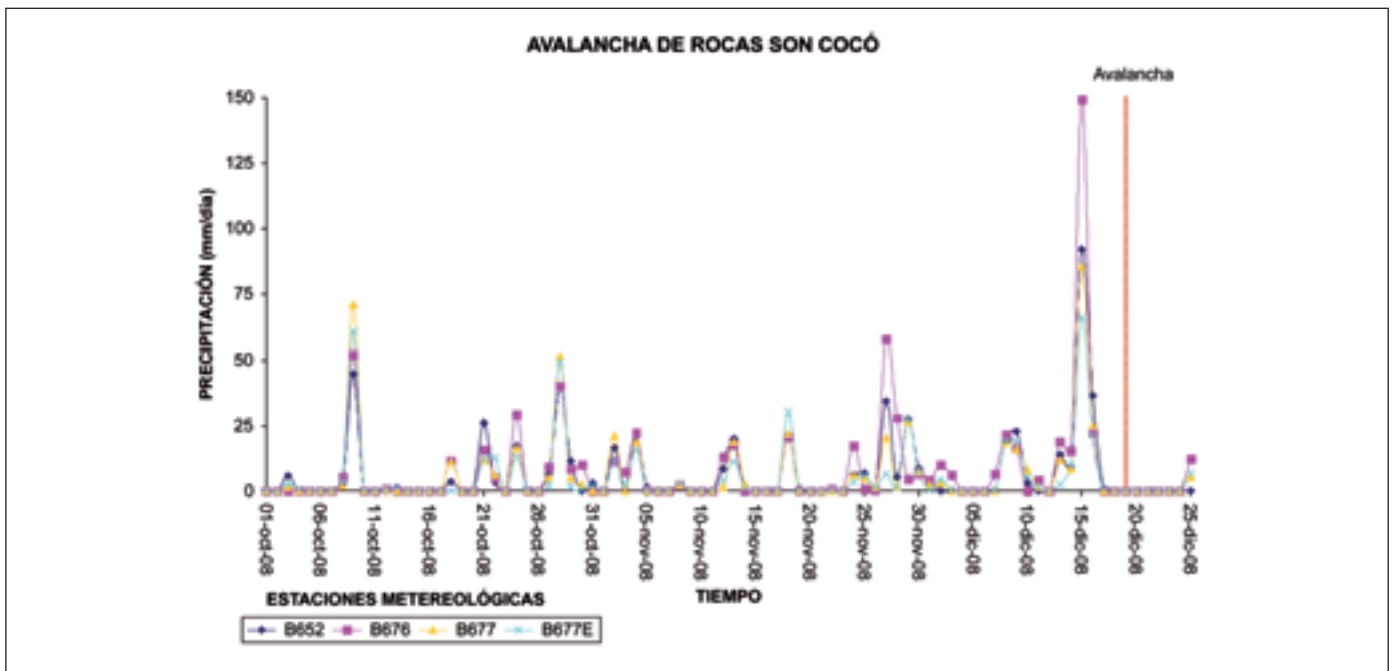


Figura 15. Precipitaciones ocurridas en la zona desde el 1 de octubre al 25 de diciembre. Es de destacar que el 15 de diciembre se registraron lluvias de hasta 150 mm en 24 horas. Varios días previos al movimiento también se registran precipitaciones intensas, con valores cercanos a los 80 mm diarios

Figure 15. Rainfall in the area, from 1st October to 25th December 2008. It should be pointed out that, on the 15th December, rainfall up to 150 mm in 24 h was recorded. Several days prior to the movement, intense rainfall was also recorded, with values up to 80 mm per day

también las fluctuaciones térmicas días previos al movimiento, con variaciones de hasta 10°C en las temperaturas mínimas.

Análisis del motor desencadenante

La coincidencia de lluvias intensas y continuadas en la zona, con bajas temperaturas que pueden producir

heladas, parece ser el motor desencadenante de la avalancha. Por un lado, la incidencia de las intensas lluvias sobre el macizo rocoso, generando sobrepresiones y saturando las grietas preexistentes. Por otro lado, la acción de las heladas, que contribuye a la apertura de las grietas, como consecuencia de la presión inducida por la formación de cristales de hielo; proceso tanto más efectivo cuanto más fracturada está la roca de partida (véase figura 7). Diversos auto-

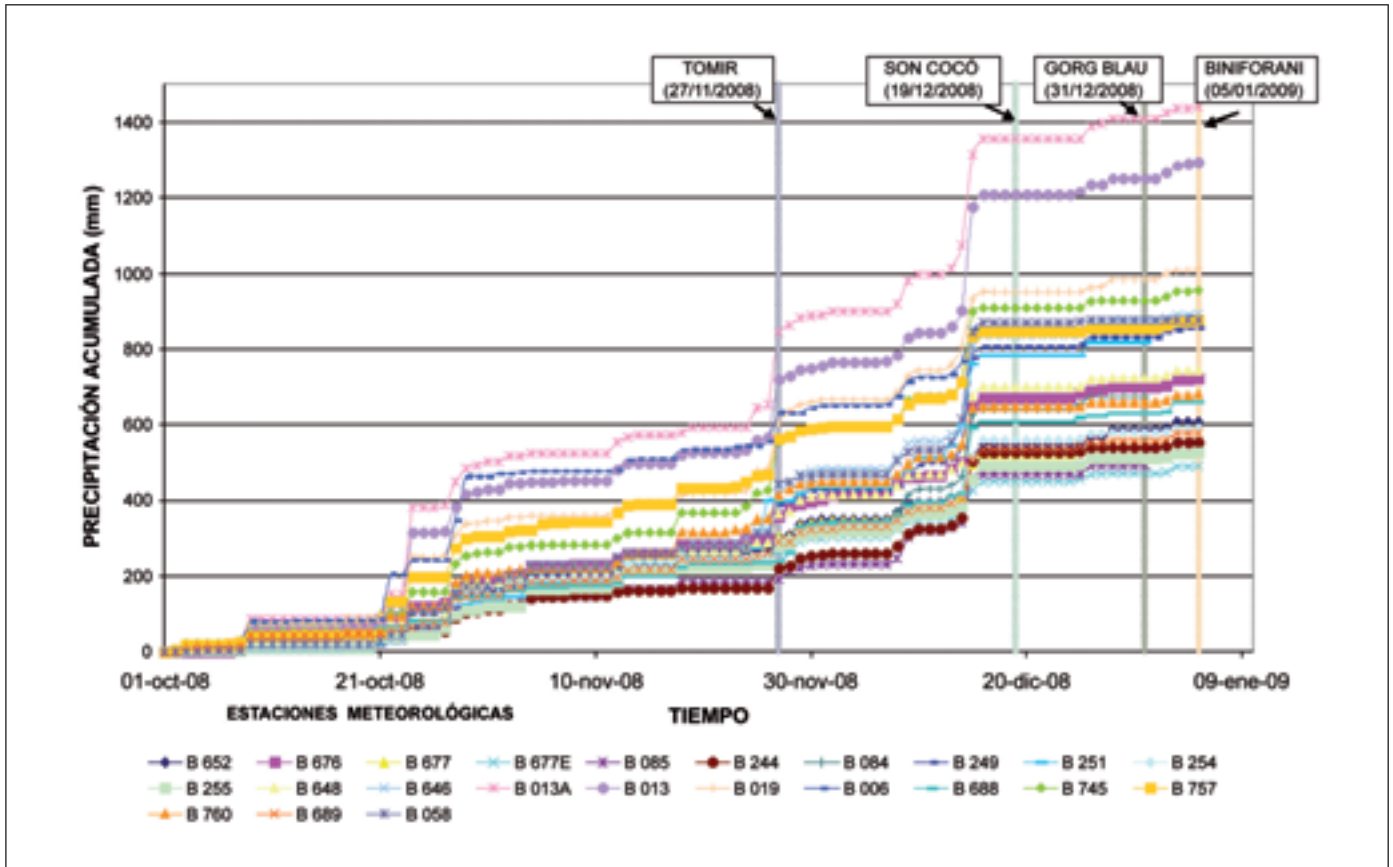


Figura 16. Precipitación acumulada desde el 01 de octubre de 2008 al 9 de enero de 2009. El 19 de diciembre la lluvia acumulada llegó a alcanzar valores de hasta 1400 mm en el corazón de la Serra de Tramuntana (Lluc) y de 672 mm en una de las estaciones más cercanas al movimiento (B677). Se representan también otros movimientos relevantes ocurridos durante el temporal, indicados en las figuras 1 y 2

Figure 16. Accumulated rainfall from 1st October 2008 to 9th January 2009. On 19th December, the accumulated rainfall reached values of up to 1.400 mm in the heart of the Tramuntana Range (Lluc) and 672 mm in one of the gauges closest to the movement (B677). Other movements, indicated in figures 1 and 2, are represented

res han comprobado experimentalmente que este fenómeno de gelifracción se intensifica al aumentar la frecuencia de los cambios térmicos, mientras que el valor absoluto de la oscilación térmica tiene poca influencia (Orozco *et al.*, 2002), tal y como ha ocurrido durante el citado temporal. Ambos efectos conjugados han desencadenado un desprendimiento de gran magnitud en el escarpe, generándose una energía potencial tal que ha determinado una elevada movilidad de la masa de bloques ladera abajo, dando lugar a la avalancha.

Conclusiones

La noche del 19 de diciembre de 2008 tuvo lugar, en la vertiente oriental del Puig de s'Alcadena (Alaró, Mallorca), un gran desprendimiento de rocas que

generó una avalancha sobre la ladera. Este movimiento constituye el de mayor envergadura de los 12 catalogados durante el largo temporal de lluvia y frío que afectó Mallorca, durante los meses de octubre 2008-enero 2009.

El desprendimiento se originó en el escarpe que corona el Puig de s'Alcadena, constituido por calizas masivas del Lías. Se trata de una rotura en cuña, condicionada por la existencia de dos planos de fractura casi verticales, con direcciones N30°E y N90°, que independizaban grandes bloques de roca paralelepípedicos de unos 150 m de altura. Este es el patrón de rotura del citado escarpe.

Debido a la gran magnitud del desprendimiento, a la elevada pendiente de la ladera, así como a la falta de estructura y cohesión de los bloques, se generó una avalancha de rocas, descendiendo la masa a gran velocidad ladera abajo. El alcance de la lengua se

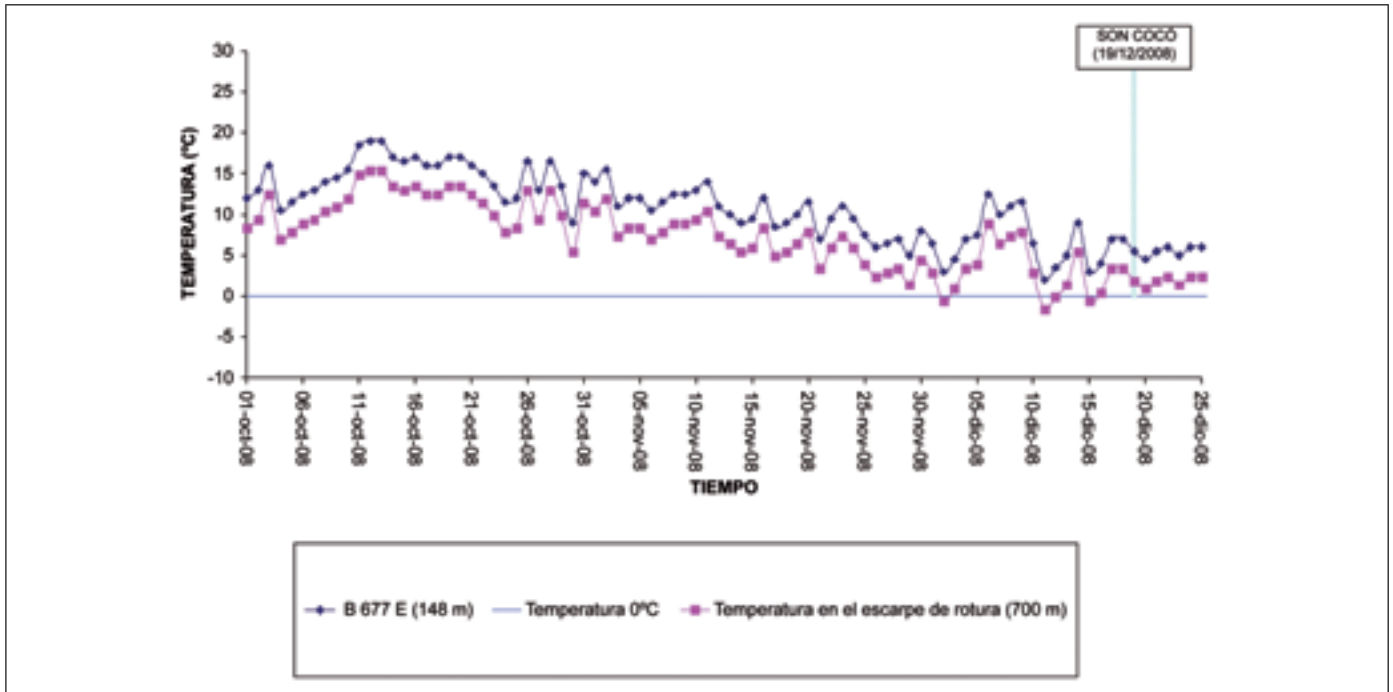


Figura 17. Temperaturas mínimas a cota 148 m, desde el 01 de octubre al 29 de enero de 2009 en la estación más cercana a la zona de estudio y temperaturas mínimas corregidas a 675 m de altitud (cota media del escarpe de rotura). La avalancha de rocas tiene lugar tras los días donde las temperaturas sufren los máximos descensos

Figure 17. Minimum temperatures at 148 m (Rain gauge B677), from 1st October 2008 to 29th January 2009, and corrected minimum temperatures at 675 m (average high of the escarp failure). The rock avalanche took place after the coldest period

estima en unos 650 m, invadiendo una superficie de terreno de unos 60.000 m². El volumen total de material movilizado se ha estimado en unos 300.000 m³. La avalancha arrasó el bosque de pinos que encontró a su paso, dejando una visible impronta en el paisaje.

La masa desplazada presenta una enorme heterometría, con bloques de roca de hasta 1.500 m³ de volumen. Los bloques de mayor tamaño quedaron flotando sobre la superficie de la avalancha, originándose una clasificación inversa del material.

La influencia de la morfología local fue decisiva en la movilidad de la avalancha. Valores de H/L de 0.42 ponen de manifiesto una rápida disipación de la energía, condicionada por la presencia de una curva en la trayectoria de la avalancha, así como un cierto efecto de frenado por la presencia de bosque. Esta desaceleración queda constatada por la acumulación en la curva de los mayores bloques transportados.

Días previos a la rotura se registraron en la zona precipitaciones intensas de hasta 150 mm en 24 horas (15 de diciembre). Las lluvias acumuladas, desde el día que comenzó el temporal hasta el día que se produjo el movimiento, ascienden a valores de 672 mm.

La rotura tiene lugar tras una serie de días inusual-

mente fríos, donde se registran temperaturas inferiores a 0° C. Se producen también fluctuaciones de las temperaturas mínimas de hasta 10°C, días previos a la rotura.

La conjugación de precipitaciones intensas y continuadas en la zona junto a la acción de las heladas, constatadas por las bajas temperaturas registradas, parece ser el motor desencadenante de la rotura.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado en el marco del proyecto CICYT: CGL2008-03249/BTE. Los datos meteorológicos han sido facilitados por la Agencia Estatal de Meteorología. Las fotografías previas a la rotura han sido cedidas por el Sr. Josep Coll Mir. Nuestro enorme agradecimiento a la Direcció General de Emergències de la Consellería de Interior del Govern Balear, que amablemente nos invitaron a realizar un vuelo en helicóptero por la zona. Muy especialmente, nuestra gratitud al Dr. Jordi Corominas Dulcet, que nos ha facilitado las claves y la bibliografía adecuadas para entender este tipo de procesos.

Referencias

- Alonso, J. y Moreno, A. 2004. Proyecto de estabilización de taludes en la Cala de Banyalbufar, Mallorca (España). *Informes de la Construcción*. Vol. 55, nº 489. Febrero 2004.
- Bagnold, R.A. 1954. Experiments on a gravity-free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid under shear. *Proceedings, Royal Society of London, Series A*, Vol. 225, 49-63.
- Bastida, F. 2005. *Geología, una visión moderna de las Ciencias de la Tierra*. Volumen I. Editado por TREA Ciencias. 523 p.
- Bonachea, J. 2006. *Desarrollo, aplicación y validación de procedimientos y modelos para la evaluación de amenazas, vulnerabilidad y riesgo debidos a procesos geomorfológicos*. Tesis doctoral. Universidad de Cantabria, 435 pp.
- Corominas, J. 1996. The angle of reach as a mobility index for small and large landslides. *Canadian Geotechnical Journal*, 33(2), 260-271.
- El Mundo, 2009. Las lluvias resquebrajan Mallorca. *Diario El Mundo*, miércoles 21 de enero de 2009. Sección Ciencia. P. 39.
- Evans, S.G., Clague, J.J., Woodsworth, G.J. y Hungr, O. 1989. The Pandemonium Creek Rock Avalanche, British Columbia. *Canadian Geotechnical Journal*, 26 (3), 427-446.
- Ferrer, M., López, J.M., Mateos, R.M, Morales, R. y Rodríguez-Perea, A. 1997. Análisis de los Desprendimientos Rocosos en la Cala de Banyalbufar. *Boletín Geológico y Minero*, 87, 39-51.
- Gelabert, B. 1998. La Estructura Geológica de la Mitad Occidental de la Isla de Mallorca. Tesis Doctoral. *Colección Memorias del I.T.G.E*, 129 pp.
- Guadagno, F.M., Forte, R., Revellino, P., Fiorillo, F., Focareta, M. 2005. Some aspects of the initiation of debris avalanches in the Campania Region: the role of morphological slope discontinuities and the development of failure. *Geomorphology*, 66, 237-254.
- Guerricchio, A. y Melidoro, G. 1973. Segni premonitori e collassi delle grandi frane nelle metamorfiti della valle della Fiumara Buonamico (Aspromonte, Calabria) (Warning signs and collapses of the great landslides in the metamorphites of the valley of the Buonamico Fiumara (Aspromonte Range, S. Italy): *Geologia Applicata e Idrogeologia*, 8, 315-316.
- Hermanns, R.L., Blikra, L.H., Naumann, M., Nilsen, B., Panthi, K.K., Stromeyer, D., Longya, L., 2006. Examples of multiple rock-slope collapses from Köfels (Ötz valley, Austria) and western Norway. *Engineering Geology*, 83, 94-108.
- Hewitt, K., Clague, J.J., Orwin, J.F. 2008. Legacies of rock slope failures in mountain landscapes. *Earth- Science Reviews*, 87, 1-38.
- Hsu, K.J. 1975. Catastrophic Debris Streams (Sturzstroms) generated by Rockfalls. *Bulletin of the Geological Society of America*, 86 (1), 129-140.
- Hungr, O. y Evans, S.G. 1988. Engineering evaluation of fragmental rockfall hazards. En: *Proceedings of the 5th International Symposium on Landslides*, 1, 685-690.
- Hutchinson, J.N. 1988. General Report: Morphological and Geotechnical Parameters of Landslides in relation to Geology and Hydrogeology. En: *Proc. Fifth International Symposium on Landslides (C. Bonnard, ed)*. A.A. Balkema, Rotterdam, Netherland, Vol. 1, 3-35.
- Kilburn, C.R.J. y Sorensen, S.A. 1998. Runout lengths of sturzstroms. The control of initial conditions and fragment dynamics. *Journal of Geophysical Research*, 103, 17877-17884.
- Llabrés Bernal, J. 1962. *Noticias y relaciones históricas de Mallorca III (1841-1869)*. Societat Arqueològica Lul.liana. Escuela Tipográfica Provincial, Palma, 1045 p.
- Mateos, R.M. 2001. *Los movimientos de ladera en la Serra de Tramuntana (Mallorca). Caracterización geomecánica y análisis de la peligrosidad*. Tesis Doctoral. Servicio de Publicaciones de la Universidad Complutense de Madrid, 299 pp.
- Mateos, R.M. y Azañón, J.M. 2005. Los movimientos de ladera en la Sierra de Tramuntana de la Isla de Mallorca: tipos, características y factores condicionantes. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 18 (1-2): 89-99.
- Mateos, R.M., Azañón, J.M., Morales, R. y López- Chicano, M. 2007. Regional prediction of landslides in the Tramuntana Range (Majorca) using probability analysis of intense rainfall. *Zeitschrift für Geomor.*, 51.3, 287-306.
- Nicoletti, P.G. y Sorriso- Valvo, M., 1991. Geomorphic Controls of the Shape and Mobility of Rock Avalanches. *Bulletin of the Geological Society of America*, 103 (10), 1365-1373.
- Orozco, M., Azañón, J.M., Azor, A. y Alonso- Chaves, F. 2002. *Geología Física*. Paraninfo Thomson Learning Eds. 187 p.
- Pirulli, M. 2008. The Thurwieser rock avalanche (Italian Alps): Description and dynamic analysis. *Engineering Geology*, 99, 103-116.
- Ultima Hora 2009. Las lluvias convierten Mallorca en un laboratorio para predecir riesgos de desprendimientos. *Diario Última Hora*, martes 20 de enero de 2009. Part forana, 39.
- Vallejo, L.E. 1980. Cliff collapse and rock avalanches (sturzstroms) in the Mackenzie Mountains, northwestern Canada. *Canadian Geotechnical Journal*, 17, 149-151.
- Weidinger, J.T. 2006. Predesign, failure and displacement mechanisms of large rockslides in the Annapurna Himalayas. Nepal. *Engineering Geology*, 83, 201-216.

Recibido: agosto 2009

Revisado: octubre 2009

Aceptado: diciembre 2009

Publicado: abril 2010

