

# LOS MOVIMIENTOS DE LADERA EN LA SIERRA DE TRAMUNTANA DE LA ISLA DE MALLORCA: TIPOS, CARACTERÍSTICAS Y FACTORES CONDICIONANTES

R.M. Mateos<sup>1</sup>, J.M. Azañón<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Instituto Geológico y Minero de España, Avda. Ciudad Querétaro s/n, 07007 Palma de Mallorca. mallorca@igme.es

<sup>2</sup> Departamento de Geodinámica, Universidad de Granada, Avda. Fuentenueva s/n, 18002 Granada. jazanon@ugr.es

**Resumen:** El abrupto relieve de la Sierra de Tramuntana de la Isla de Mallorca, su diversidad geológica, así como la existencia de un clima mediterráneo, son los principales factores que controlan el desarrollo de movimientos de ladera en esta cadena montañosa. Se han identificado diferentes tipologías, estableciendo tres grupos principales: desprendimientos rocosos, deslizamientos en roca y movimientos en suelos. Los desprendimientos rocosos son los movimientos más frecuentes y están ligados a accidentes morfológicos y/o tectónicos. Se han observado bloques desprendidos con volúmenes superiores a 300 m<sup>3</sup>. Los deslizamientos en roca son movimientos de grandes dimensiones (varios millones de metros cúbicos), que afectan fundamentalmente a las calizas liásicas, el esqueleto principal de la Sierra, y configuran la actual morfología de su margen litoral. No se tiene constancia de su ocurrencia en épocas históricas, pero sus características geomorfológicas y su relación con importantes depósitos no consolidados en el litoral indica que se trata de movimientos recientes. Se han diferenciado deslizamientos en roca de tipo rotacional y traslacional, aunque éstos últimos parecen estar relacionados con movimientos actualmente activos de tipo «extensión lateral». Los movimientos que afectan a suelos son más superficiales que los anteriores, destacando los flujos y los movimientos complejos, entre los que se encuentran aquellos que han causado mayores daños: el deslizamiento de Biniarroi (1721) y reactivaciones posteriores (1813, 1943) y el de Fornalutx (1924, 1974). En el presente trabajo se analizan los diferentes tipos de movimientos, así como los factores que condicionan su formación.

**Palabras clave:** deslizamientos, laderas, Mallorca.

**Abstract:** The main factors that control slope movements development in the Tramuntana Range (Majorca Island) are steep relief, geological diversity and the Mediterranean climatic conditions. The identified slope movements have been grouped into three main types: rock-falls, rock-slides and soil movements. Rock-falls are the most widespread slope instability phenomena. These movements are related to litho-structurally controlled topographic scarps. Blocks of more than 300 m<sup>3</sup> in volume have been identified. The rock-slides are large (several millions of cubic meters in volume) and primarily affect Liassic limestones, the main litho-stratigraphical unit forming the Tramuntana Range. These slides constitute the main processes involved in the morphogenesis of the coast. Despite the lack of historical records, the geomorphic characteristics of these landslides and their relationship with the existence of important unconsolidated sediment accumulation in the submerged littoral fringe, show that they are recent movements. Two types of rock-slides have been differentiated: rotational and translational, although the last type seems to be related to actually active spread movements. The movements affecting soil material are shallower and may involve flow and complex movements. This type includes the slope movements which have caused the greatest damages, like the Biniarroi recurrent landslide (1721, 1813 and 1943) and the Fornalutx landslide (1924, 1974). This paper analyses the different types of slope movements and their conditioning factors.

**Keywords:** landslides, slope, Majorca Island.

Mateos, R.M. y Azañón, J.M. (2005): Los movimientos de ladera en la Sierra de Tramontana de la Isla de Mallorca: tipos, características y factores desencadenantes. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 18 (1-2): 87-97.

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 (Fig. 1). La estructura geológica de esta cadena alpina condiciona una vertiente meridional suave y una vertiente litoral o septentrional mucho más accidentada y abrupta, con predominio de acantilados de gran altura sobre el mar. La línea de cumbres supera los

600 m, siendo el sector central el más elevado. Existen numerosas cimas con altitudes superiores a los 1000 m, destacando el Puig Major como el pico más alto de la isla (1445 m). Su abrupta topografía ligada a la complejidad geológica y a la existencia de un clima mediterráneo, con lluvias torrenciales concentradas en cortos períodos de tiempo, condiciona el desarrollo de movimientos de ladera de diversas tipologías.

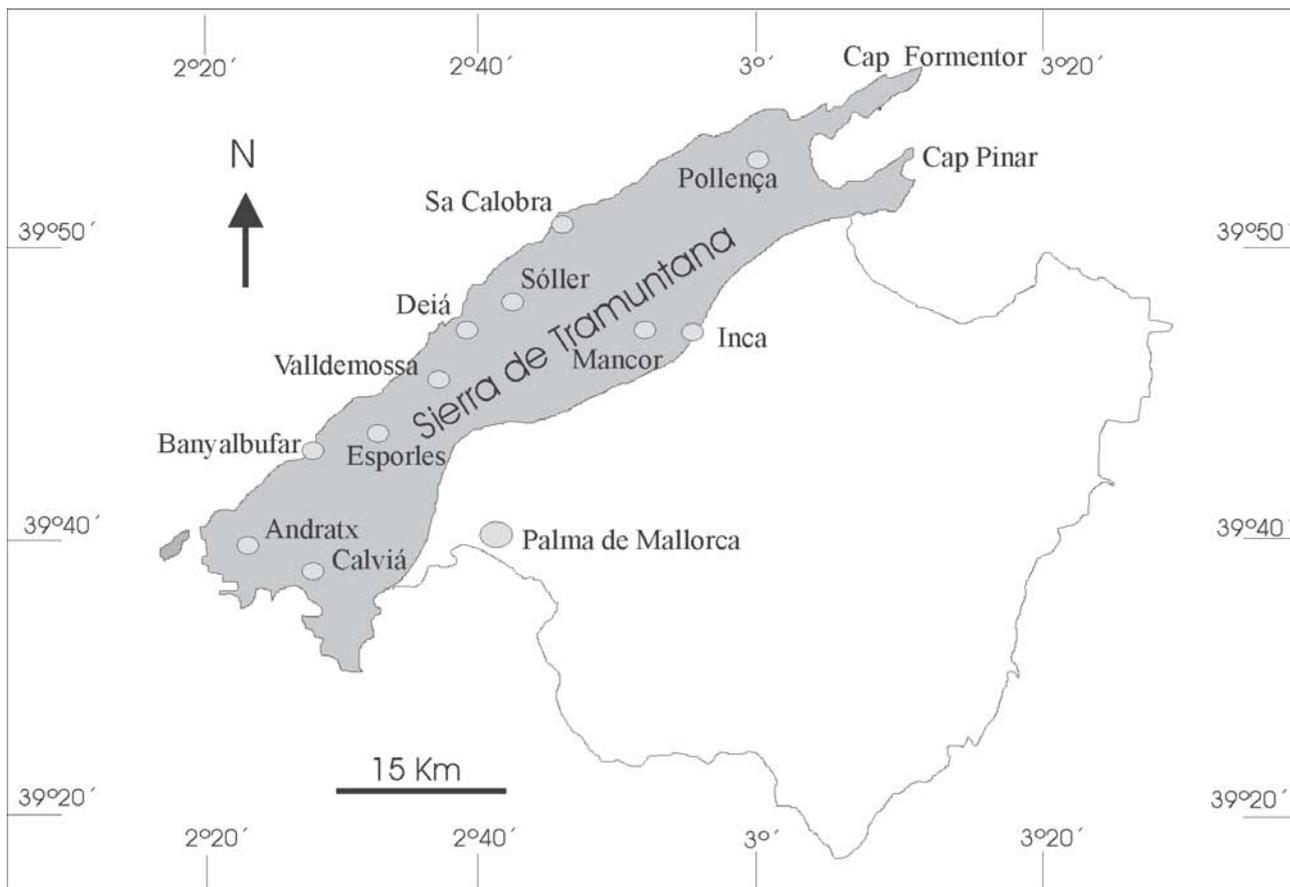


Figura 1.- Localización de la Sierra de Tramuntana en la Isla de Mallorca y sus principales poblaciones.

El incremento desmesurado del turismo en la isla durante los últimos 30 años, que se refleja en la afluencia de más de 10 millones de turistas al año y en una explosión urbanística que está experimentando la franja costera, determina la enorme importancia del estudio de este tipo de fenómenos y su correcta caracterización y localización.

Durante el año 2000 se llevó a cabo un inventario de movimientos de ladera en la Sierra de Tramuntana de Mallorca realizando un exhaustivo trabajo de campo con el apoyo de fotografía aérea a escala 1:18.000. Se inventariaron 144 movimientos de ladera, estableciendo sus características y tipos de rotura. Paralelamente, se realizó una revisión bibliográfica con la finalidad de buscar referencias a movimientos de ladera históricos que, por los daños causados, quedaran registrados en los anales de la época. El resultado fue de 22 registros en la Sierra de Tramuntana, desde principios del Siglo XVIII hasta la actualidad, realizándose una interpretación del tipo de movimiento en base a la información aportada por el autor. Ambos inventarios, representados en una cartografía geológica, a escala 1:25.000, han permitido diferenciar tres grupos principales de movimientos (Varnes, 1978; Cruden y Varnes, 1996) así como establecer sus características y factores condicionantes. Los movimientos se pueden agrupar en:

- ♦ Desprendimientos rocosos
- ♦ Deslizamientos de roca, rotacionales y trasnacionales

- ♦ Movimientos de suelos, entre los que se han identificado flujos y movimientos complejos

Los desprendimientos rocosos y los movimientos en suelos son movimientos actualmente funcionales, de los cuales se tienen numerosos registros históricos a lo largo de los dos últimos siglos. Los deslizamientos en roca son de mayor envergadura, y determinan la morfología actual de la vertiente septentrional de la Sierra. Aunque no se tiene registro histórico de estos grandes deslizamientos, sus características geomorfológicas indican que corresponden a movimientos recientes y quizás podrían estar ligados a períodos climáticos más húmedos que el actual o a eventos sísmicos prehistóricos.

Gran parte de los deslizamientos traslacionales descritos podrían estar relacionados con movimientos actualmente activos de mayor envergadura, presentes en la vertiente litoral de la Sierra. Estos movimientos de tipo «extensión lateral», dan lugar a numerosos bloques de roca que «navegan» muy lentamente por las laderas.

### Contexto geológico y climático

Las rocas más antiguas de la Isla de Mallorca afloran en el litoral de la Sierra de Tramuntana y corresponden a retazos de metapelitas ligeramente metamorfizadas del Carbonífero (Rodríguez Perea, 1998). El resto de la serie corresponde a materiales con edades comprendidas entre el Triásico inferior (Buntsandstein) y la

actualidad, existiendo dos discontinuidades estratigráficas importantes de finales del Mesozoico y comienzos del Mioceno (Gelabert, 1998). De forma simplificada puede decirse que, excepto los materiales del Triásico inferior (Buntsandstein) y superior (Keuper), que son sedimentos terrígenos y evaporíticos, el resto de la serie se caracteriza por sedimentos carbonatados y/o detríticos carbonatados, constituyendo las calizas y dolomías del Lías el esqueleto principal de la Sierra.

A gran escala, y teniendo en cuenta los materiales aflorantes, pueden diferenciarse dos zonas en la Sierra de Tramuntana: Una zona NE, desde Sóller hasta Cabo Formentor (Fig. 1), donde predominan los afloramientos de rocas carbonatadas del Lías, que configuran un relieve abrupto con acantilados de gran altura en la franja costera; y una zona SO, desde Sóller hasta Andratx (Fig. 1), donde, además de los anteriores, afloran materiales blandos y de naturaleza fina, lo que determina un relieve más suave que la zona septentrional.

Desde el punto de vista estructural, la Sierra de Tramuntana corresponde a un sistema imbricado de cabalgamientos vergentes hacia el NO, cuyo nivel regional de despegue está constituido por los materiales de naturaleza arcilloso-evaporítica del Keuper. 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).

En la figura 2 se muestra el mapa geológico simplificado de la isla de Mallorca (Gelabert, 1998), donde se observa el predominio de materiales mesozoicos en la Sierra de Tramuntana así como su estructuración.

Desde el punto de vista climático, la Sierra de Tramuntana se encuentra dentro del ámbito del clima mediterráneo. Su topografía determina las variaciones climáticas típicas de las zonas montañosas: aumento de la precipitación y disminución de la temperatura con la altura. De esta forma, en la zona central más elevada de la Sierra de Tramuntana (área de Lluc), las precipitaciones anuales pueden ser superiores a los 1200 mm, mientras que hay áreas del litoral meridional (Andratx, Calvià) que no superan los 400 mm anuales.

El registro de movimientos de ladera pone de manifiesto que su ocurrencia está claramente ligada con episodios de lluvias intensas (Mateos, 2001), concentradas en cortos períodos de tiempo, principalmente en los meses otoñales de octubre y noviembre.

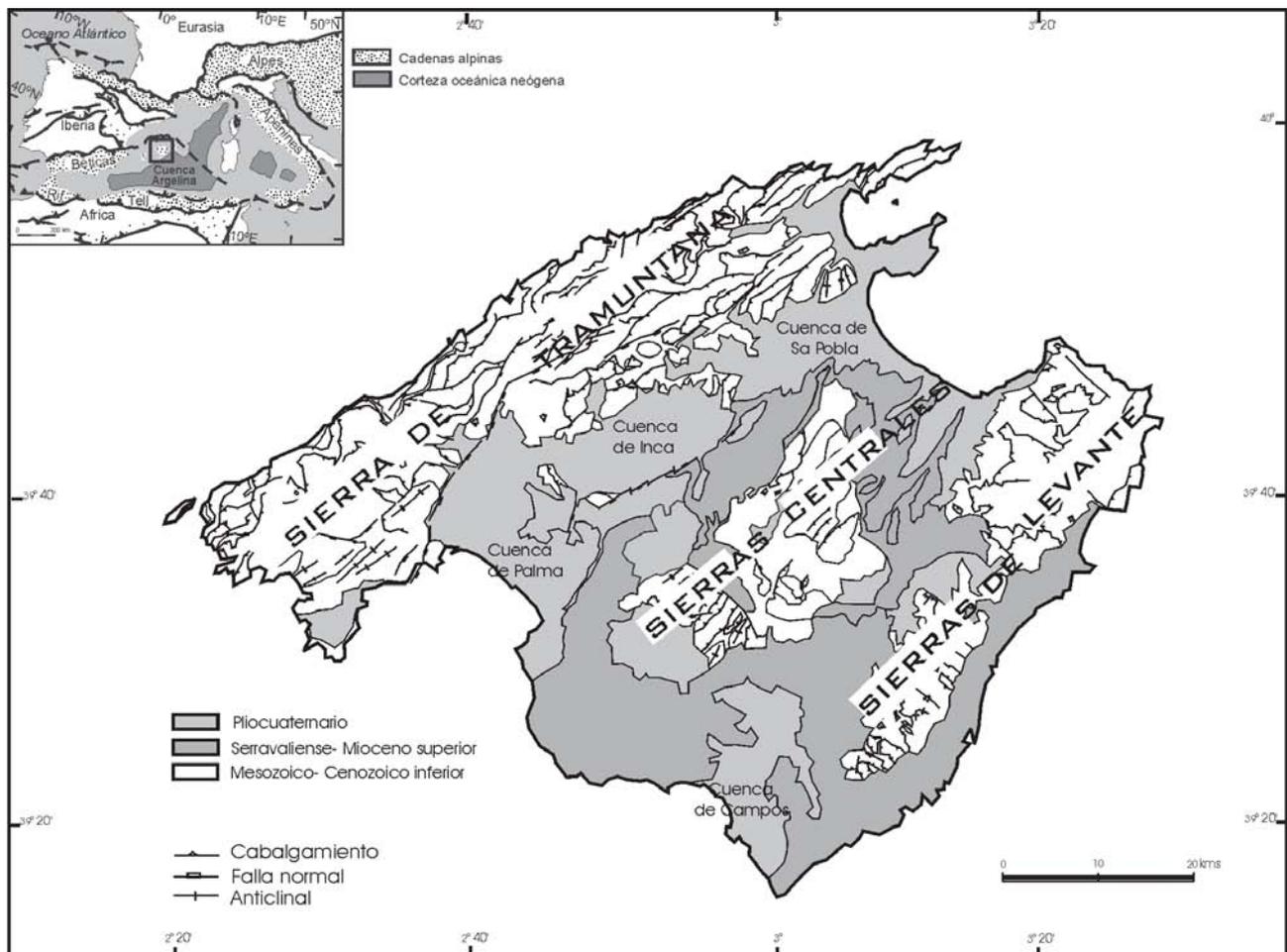


Figura 2.- Localización del Archipiélago Balear en el contexto geológico del Mediterráneo occidental y mapa geológico simplificado de la Isla de Mallorca (Gelabert, 1998).

## Tipos de movimientos

Durante el año 2000, se ha llevado a cabo en la zona de estudio un inventario de movimientos de ladera, mediante trabajo de campo y apoyo con fotografía aérea a escala 1:18.000 (vuelo de 1997). Para cada movimiento inventariado se ha realizado una ficha que, de forma esquemática, recoge la información referente a los siguientes puntos:

- ♦ Localización exacta del movimiento.
- ♦ Actividad
- ♦ Tipo de movimiento
- ♦ Geología: litología y estructura
- ♦ Geometría del talud: orientación, altura y pendiente
- ♦ Características y geometría del movimiento
- ♦ Otras características: presencia de agua, vegetación, estado de alteración superficial del material
  - ♦ Daños materiales y afecciones
  - ♦ Factor desencadenante y estimación de la peligrosidad

Se han inventariado 144 movimientos de ladera en la zona de estudio. La tabla I muestra el número de movimientos de ladera, según su tipología, en las dos zonas diferenciadas en la Sierra de Tramuntana: la mitad NE, donde predominan las rocas carbonatadas duras del Lías; y la mitad SW, donde, además de los anteriores, afloran materiales geológicos menos competentes de naturaleza fina, como los correspondientes al Keuper, Mioceno inferior etc. Esta diferenciación geológica pone de manifiesto que, en el sector más septentrional, los movimientos predominantes son los desprendimientos rocosos y los deslizamientos en roca, mientras que en el meridional son los movimientos que afectan a suelos.

En la figura 3 se muestra parte del inventario realizado en la zona de estudio, que corresponde al área central de la Sierra de Tramuntana (Fig. 1), donde mayor número de eventos se han registrado y donde están presentes los tres tipos principales de movimientos diferenciados. Se observa que hacia el NE predominan los desprendimientos rocosos.

De forma paralela se ha llevado a cabo una investigación bibliográfica de citas, artículos, noticias en

prensa etc. que hagan referencia a movimientos de ladera ocurridos en la Isla de Mallorca, obteniéndose referencias de 30 movimientos relevantes desde finales del siglo XVII hasta la actualidad. 22 de ellos están localizados en la Sierra de Tramuntana. En la tabla II se muestra este inventario de eventos históricos donde, en base a las descripciones que realizan los diferentes autores, se ha reconstruido el tipo de movimiento y las causas que lo generaron.

A partir del inventario de movimientos realizado en campo y de la recopilación bibliográfica de eventos de inestabilidad de laderas llevada a cabo, se pueden establecer las características de los diferentes tipos de movimientos identificados.

### *Desprendimientos rocosos*

Cruden y Varnes (1996) establecen que un desprendimiento se origina con el despeque de una masa de roca de un farallón o ladera de elevada pendiente, a favor de una superficie en la cual puede o no haber desplazamiento de cizalla. Posteriormente, el material desciende principalmente a través del aire mediante caída libre, rebote o rodadura. El movimiento es muy rápido a extremadamente rápido, según la clasificación establecida a este respecto por Varnes (1978).

Los desprendimientos rocosos son los movimientos más frecuentes en la zona de estudio, como pone de manifiesto la existencia numerosos bloques con este origen en la mayoría de las laderas de la Sierra y a su ocurrencia cada vez que se produce un evento de lluvias intensas (Mateos, 2001). Pueden ser de dimensiones muy diversas, observándose bloques con volúmenes superiores a 300 m<sup>3</sup>. Los escarpes de gran desnivel, que constituyen los materiales carbonatados duros del Lías, son las principales zonas de generación de desprendimientos. Estos escarpes pueden estar relacionados con accidentes geomorfológicos de diversa naturaleza, tales como: escarpes de falla, frentes y rampas laterales de mantos de cabalgamiento, paredes de los valles producidos por disolución kárstica, así como escarpes de cabecera de grandes deslizamientos en roca. Se han identificado también desprendimientos en taludes con alternancia de rocas blandas y duras, favoreci-

ZONA	Desprendimientos rocosos	Deslizamientos en roca			Movimientos en suelos	
		Rotacionales		Planares	Flujos	Complejos
Zona septentrional	30	20	6	12		3
Zona meridional	26	5	5	3	9	25
TOTAL	56	25	11	15	9	28

**Tabla I.-** Número de movimientos de ladera, según tipologías, inventariados en las dos zonas de la Sierra de Tramuntana. Total de movimientos inventariados: 144.

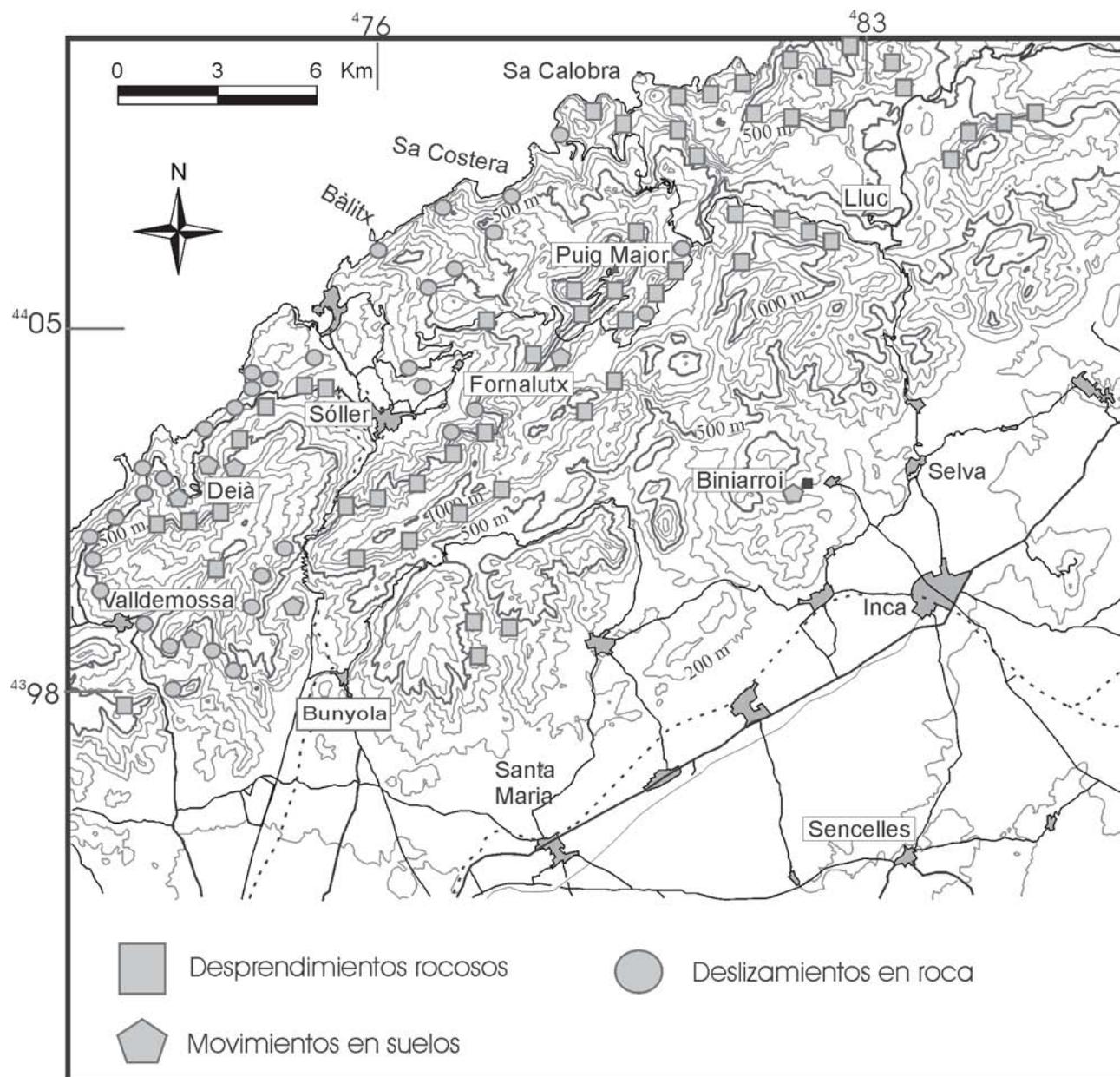


Figura 3.- Inventario de movimientos de ladera en el sector central de la Sierra de Tramontana.

dos por procesos de erosión diferencial, así como en zonas de la franja litoral, donde la acción erosiva del oleaje provoca el descalce (socavación) de los acantilados.

Recientemente, el 10 de febrero de 2005, ha tenido lugar en el municipio de Valldemossa un desprendimiento rocoso de grandes dimensiones, que sepultó gran parte del yacimiento arqueológico de Son Matge, considerado como el más importante de la prehistoria mallorquina. El desprendimiento de numerosos bloques, algunos de más de 150 m<sup>3</sup> de volumen, generó una avalancha de rocas que arrasó la vegetación de la ladera, afectando a una superficie aproximada de 2000 m<sup>2</sup> (Fig. 4).

En algunos escarpes de la Sierra, la frecuencia de caída de rocas es tan elevada que se forman al pie del talud acumulaciones potentes de derrubios, dando lu-

gar a canchales con extensiones de hasta 32.000 m<sup>2</sup> (Serra de Son Torella).

#### *Deslizamientos en roca*

Son movimientos de ladera de una masa de roca a lo largo de una o varias superficies de rotura o de una estrecha zona con una intensa deformación por cizalla. La masa desplazada lo hace rígidamente y, aunque puede llegar a fragmentarse, se considera que lo hace como un bloque único (Corominas, 1989). A menudo, los primeros síntomas de la formación de un deslizamiento es la apertura de grietas en la ladera original, a lo largo de lo que posteriormente será el escarpe de rotura o cabecera del deslizamiento (Cruden y Varnes, 1996).

Los deslizamientos en roca en la Sierra de Tramontana son los movimientos de mayor envergadura, pu-

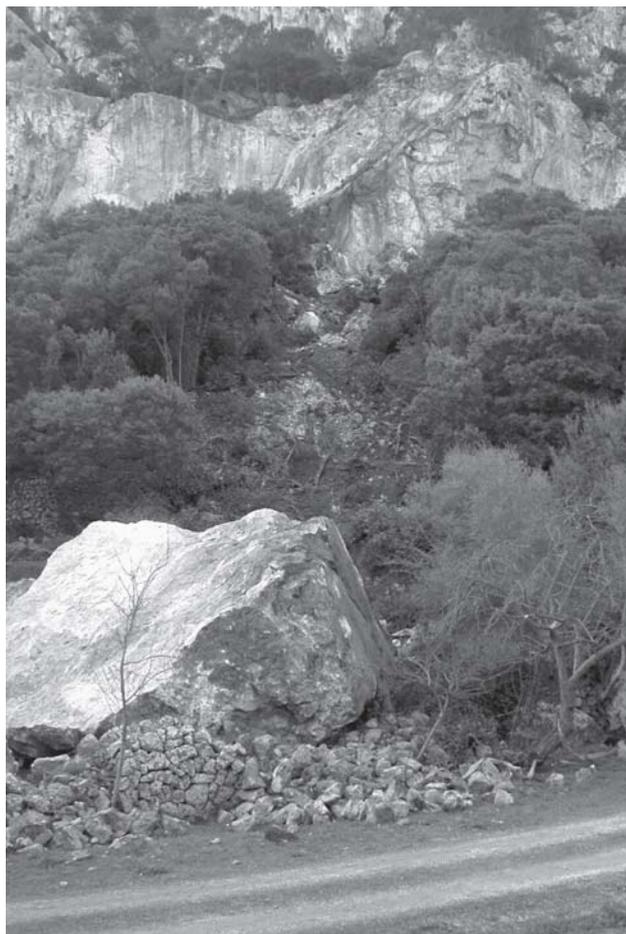
Lugar	Fecha	Tipo movimiento	Daños y afecciones	Causa	Ref. Bibliográfica
Biniarroy (Mancor del Valle)	24 de Marzo de 1721	Deslizamiento de tierras	Tierras de cultivo. Abandono del núcleo de población	Lluvias intensas	Mateu, B.1914
Carretera Pollença-Illuc	1749	Derrumbe de bancales	Tierras de cultivo	Lluvias	Fontseré, 1918
Sóller	1795	Desprendimiento masivo de rocas	camino Palma-Sóller		Bover .1856
Sóller	25 de noviembre de 1810	Desprendimientos rocosos	Camino Palma-Sóller.	¿Lluvias?	Bover. 1856
Biniarroy (Mancor del Valle)	1816	Deslizamiento de tierras	Predio Sa Fontgarrove	Lluvias intensas	Mateu, B.1914
Lluch-Alcari	1853?	Deslizamiento	Olivares	¿Lluvias intensas?	Darder, B.1924
Orient (Bunyola)	1854?	Deslizamiento		¿Lluvias intensas?	Darder, B.1924
Coll de Sóller	16 de Marzo de 1857	Desprendimiento masivo de rocas	Poseción des Teix,olivar d'En Xorc	¿Lluvias?	Llabrés,1962
Formalutx	21 de Dic. 1924	Deslizamiento		Lluvias intensas	Darder. B.1924
Estellencs	1931	Deslizamiento	Varias casas de la población l n	¿Lluvias?	Grimalt. 1990
Estellencs	25 de septiembre de 1971	Deslizamientos y desprendimientos	Corte de la carretera. Incomunicación del pueblo de Estellencs	Lluvias intensas	Diario de Mallorca 26/ 09/ 71
Esportes, Banyalbufar, Bunyola	31 de diciembre de 1973	Deslizamientos y desprendimientos	Corte carretera Esportes- Banyalbufar. Corte del ferrocarril Palma- Sóller a la altura de Bunyola	Lluvias intensas	Diario de Mallorca 03/ 01/ 1973
Valldemossa, Esportes, Estellencs	29 de Marzo de 1974	Deslizamientos	Corte carretera Palma- Valldemossa y del camino Esportes- Estellencs	Temporal de lluvias	Diario de Mallorca. 31/ 03/ 74
Deià	18 y 19 de Octubre de 1978	Deslizamiento	Desalojo de diversas casas y hundimiento de Sa Coma de Can Pebo	Temporal de lluvias.	Serrat, 1985
Lluc	1 de marzo de 1979	Deslizamiento	Corte carretera Lluc-Pollença	Temporal de lluvia y nieve	Balears, 02/ 03/ 79
Port de Valldemossa	29 de septiembre de 1984	Desprendimientos rocosos	Corte de carretera	Temporal de lluvia	Diario de Mallorca 30/ 09/ 84
Calvià	15 de Noviembre de 1985	Deslizamientos	Corte carretera Palma- Andratx	Temporal de lluvias	Diario de Mallorca 16/ 11/ 85
Coll de Sóller	18 de febrero de 1987	Deslizamiento de tierras	Carretera Palma- Sóller, altura Ses Porreres.	Lluvias continuadas	Última Hora 18/ 02/ 1987
Banyalbufar	Septiembre 1993	Deslizamiento en cuña, desprendimiento	Alcobas para barcas en la Cala de Banyalbufar	Lluvias continuadas	Ferrer et al. 1997
Cap de Formentor	Septiembre 1994	Desprendimiento rocoso	Carretera Cap de Formentor	Lluvias	Diario de Mallorca
Sa Costera (Escoça)	Septiembre 1997	Desprendimientos rocosos	Corte carretera de acceso a Sa Costera. Evacuación de turistas por vía marítima	Lluvias	Diario de Mallorca
Sóller (Urb. De la Filadora)	9 de febrero de 1999	Corrimiento de tierras	4 camiones sepultados	Temporal de lluvia y nieve. Intensas lluvias	Última Hora 10/ 02/ 1999

Tabla II.- Movimientos históricos registrados en la Sierra de Tramontana.

diendo involucrar millones de metros cúbicos de material. Afectan principalmente a los materiales duros carbonatados del Lías, que constituyen macizos rocosos muy fracturados. El contacto geológico de éstos con los materiales infrayacentes del Keuper, de naturaleza mar-

gosa con presencia de yesos, determina en la mayoría de los casos el plano de rotura.

Los deslizamientos que afectan a estos materiales rocosos pueden ser a su vez de varios tipos, en función de la trayectoria descrita (Corominas, 1989):



**Figura 4.-** Avalancha de rocas en la ladera septentrional del Puig des Boixos (10 de febrero 2005), t.m. de Valldemossa, sepultando gran parte del Yacimiento arqueológico de Son Matge, al pie del escarpe rocoso.

*Deslizamientos rotacionales.* Son movimientos a lo largo de una superficie de rotura curvilínea y con la concavidad hacia arriba. El terreno experimenta un giro, según un eje imaginario situado por encima del centro de gravedad de la masa desplazada. Si la superficie de rotura es circular o cicloidal en perfil, la cinemática determina que la masa desplazada se mueva sin apenas deformación interna. La cabecera del material desplazado se mueve casi de forma vertical, mientras que la superficie superior lo hace mediante un giro contra ladera, originando una depresión (Cruden y Varnes, 1996). En este tipo de movimientos es muy común el retroceso del deslizamiento hacia cabecera, lo que da lugar a un movimiento múltiple y retrogresivo, formándose diversos escarpes de rotura muy verticalizados.

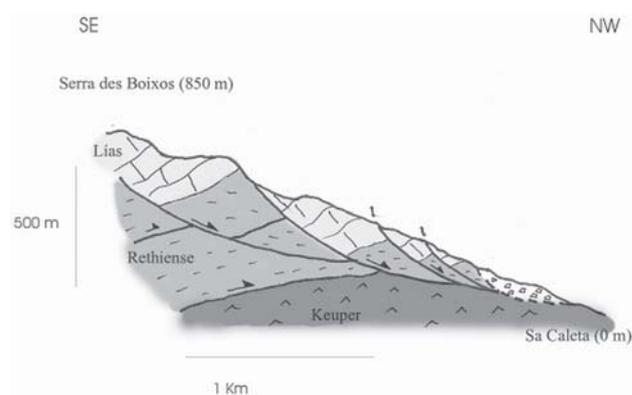
Estos deslizamientos tienen lugar preferentemente en materiales homogéneos, como los macizos rocosos densamente fracturados de calizas y dolomías liásicas que forman la Sierra de Tramuntana. La superficie de rotura generalmente aprovecha planos de discontinuidad preexistentes en la roca, o contactos geológicos entre materiales de diferente competencia. En este último caso, el plano de rotura suele coincidir con el techo del Keuper y, en ocasiones, con el contacto entre las rocas carbonatadas del Lías y los materiales más blandos del Rethiense. Los escarpes de cabecera de estos

deslizamientos se alinean de forma paralela a los principales frentes de cabalgamiento, así como a la actual línea de costa (NE-SO). Se observan movimientos de este tipo a diferentes altitudes, tanto en los altos relieves de la sierra, como en su franja litoral. La patente expresión morfológica de los escarpes de rotura evidencia la génesis reciente de estos movimientos.

La figura 5 muestra un corte geológico de un deslizamiento rotacional múltiple situado en la franja costera entre las localidades de Valldemossa y Deià. Se han diferenciado cuatro planos de rotura subcirculares que afectan a una escama principal de cabalgamiento que superpone materiales carbonatados liásicos e infra-liásicos sobre los sedimentos del Keuper. Este contacto tectónico parece haber controlado la rotura inicial, ya que los materiales del Keuper constituyen un nivel blando impermeable. La superficie de terreno afectada por este deslizamiento rotacional múltiple se estima en 3 Km<sup>2</sup>, la profundidad de la superficie principal de rotura se cifra en torno a los 450 m y el volumen de roca movilizada en 1,5 x 10<sup>9</sup> m<sup>3</sup>.

*Deslizamientos traslacionales.* El mecanismo que inicia el movimiento es una rotura por cizalla, que se produce a lo largo de una o más superficies planas o muy poco onduladas. La trayectoria que describe el movimiento es eminentemente rectilínea. En base a la consideración de que el movimiento se produzca a lo largo de una única superficie o sobre superficies de distinta dirección, se pueden distinguir: roturas planas y en cuña (Corominas, 1989).

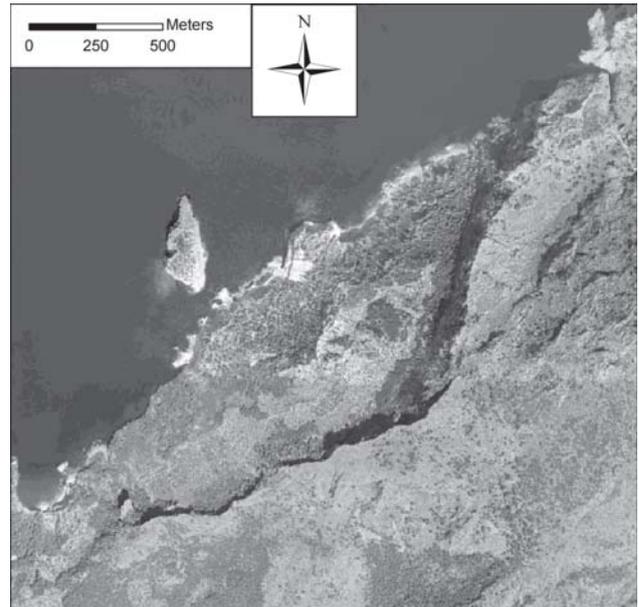
a) Deslizamientos en cuña. Son también movimientos a gran escala, cartografiables con fotografía aérea. Se observan principalmente en la costa comprendida entre Sóller y Sa Calobra (ver Figs. 1y 2). Estos deslizamientos vienen condicionados por dos familias de fracturas principales con direcciones N15° E y N 105° E respectivamente, y buzamientos de unos 50° hacia el mar. La intersección de estos dos planos de fractura condiciona la generación de grandes cuñas de roca que deslizan hacia el mar describiendo una trayectoria paralela a la línea de intersección. En la figura 6 se observa el gran deslizamiento en cuña de Bàltx, con un volumen de roca movilizada que supera los 200 x 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>. El escarpe



**Figura 5.-** Esquema de un deslizamiento rotacional múltiple en la costa de Valldemossa-Deià, en el sector central de la Sierra de Tramontana.



**Figura 6.-** Vista oblicua y ortofoto del deslizamiento en cuña de Bálitx, en la costa de Sóller, donde se observa con claridad los dos planos de rotura.



de cabecera de este deslizamiento forma paredes casi verticales de hasta 100 m de altura, formadas por las calizas liásicas, las cuales constituyen frentes de desprendimientos rocosos en cuyo pie se forman importantes volúmenes de depósitos coluviales.

Las zonas litorales sumergidas de la Sierra de Tramuntana con mayor espesor de acumulación de sedimentos no consolidados corresponden con la localización de estos grandes deslizamientos. Mateos (2002) pone de manifiesto la existencia de una buena correlación espacial entre los deslizamientos en roca cartografiados en el litoral y los máximos valores de isopacas de sedimentos sin consolidar en la plataforma. Esta relación con sedimentos litorales poco retrabajados por el mar apoya la génesis reciente de estos grandes movimientos.

Durante el inventario de movimientos de ladera se han identificado algunas roturas en cuña de menores dimensiones que los anteriores, con volúmenes comprendidos entre 2 y 200 m<sup>3</sup>.

b) Deslizamientos planares. Son movimientos que se producen a lo largo de una superficie de rotura planar u ondulada. Estos deslizamientos son más superficiales que los anteriores y en la zona presentan un importante condicionamiento litoestratigráfico, ya que el plano de rotura suele coincidir con el contacto entre materiales de diferente naturaleza, frecuentemente los materiales carbonatados del Lías e infralías (éstos últimos, de naturaleza más margosa) y los sedimentos del Keuper. Este tipo de movimientos se observa a lo largo de la franja costera comprendida entre Sóller y Sa Calobra y da lugar a unas morfologías muy características denominadas «Cavall» en la toponimia local. La génesis de estos deslizamientos es la siguiente: los frentes de calizas liásicas están afectados por una familia de fracturas paralelas al talud, cuyo espaciado (en torno a 5 m), determina la independización de grandes bloques con forma de paralelepípedo. La base de éstos bloques está en contacto directo con los materiales blandos del

Keuper y su plano de contacto buza hacia el talud. Se produce de esta forma, un lento deslizamiento de estos bloques a lo largo de la ladera (Fig. 7) hasta que se produce un vuelco de los mismos. El funcionamiento sería similar al frente de un glaciar y la formación de icebergs que posteriormente navegan lentamente por el mar.

La existencia de numerosos bloques de roca «navegando» en el margen costero de la Sierra de Tramuntana, algunos de ellos de varios miles de metros cúbicos de volumen, hace pensar que se trate de un movimiento a mayor escala. Numerosos autores (Hutchinson, 1991; McGill and Stromquist, 1979; Baars, 1989), describen morfologías similares asociadas a expansiones laterales de bloques «*block spreads*». Estos movimientos afectarían al conjunto de la formación carbonatada del Lías cuando se dispone directamente sobre los materiales blandos del keuper, sin que se identifiquen zonas basales de cizalla o flujo plástico. El desplazamiento lateral provoca la fracturación de los niveles más competentes del Lías, separándose en grandes bloques que se desplazan con un movimiento extremadamente lento (Fig. 8). Se han observado desplazamientos de bloques superiores a los 300 m, respecto al eje de los principales escarpes.

Los deslizamientos de grandes dimensiones en cuña y rotacionales son movimientos antiguos, sobre los que no se tiene constancia de su formación en tiempos históricos. No obstante, el buen estado de preservación de las superficies de rotura y la relación de estos movimientos con importantes acumulaciones de sedimentos no retrabajados por el mar en la costa (Mateos, 2001), indican que se trata de movimientos recientes de edad cuaternaria. Quizás su génesis pudo estar ligada a episodios climáticos más húmedos que el actual o a eventos sísmicos prehistóricos durante el Cuaternario, puestos de manifiesto en estudios de paleosismicidad llevados a cabo en el sector central de la Isla de Mallorca (Silva *et al.*, 2001).



**Figura 7.-** Deslizamiento planar sobre los materiales del Keuper de un fragmento del frente rocoso de calizas liásicas. Bàltx, costa de Sóller.

#### *Movimientos en suelos*

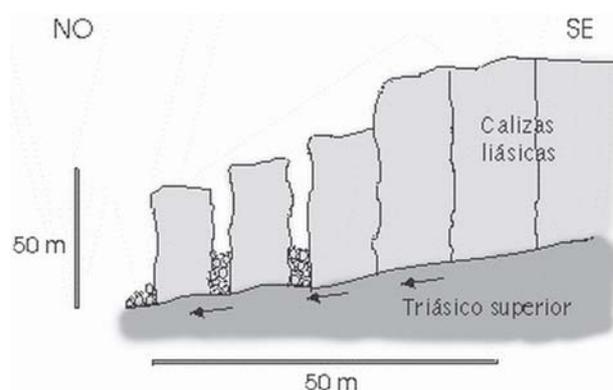
Son movimientos muy superficiales que afectan a materiales con comportamiento de suelos incluyendo rocas blandas muy meteorizadas. Predominan en la mitad SO de la Sierra de Tramuntana. Se pueden diferenciar dos tipos principales de movimientos:

**Flujos.** Son movimientos en los que el material experimenta una deformación continua y en los que la superficie de rotura generalmente no se preserva. El comportamiento es similar al de un líquido viscoso y la masa movilizada no conserva su forma al descender, adoptando a menudo morfologías lobuladas que dan lugar a un relieve positivo sobre la superficie original del terreno (Cruden y Varnes, 1996). El límite inferior de la masa desplazada puede ser una superficie bien definida a lo largo de la cual se produce un movimiento diferencial o una amplia zona de cizalla. Los materiales de la Sierra de Tramuntana que pueden verse afectados por este tipo de movimientos son aquellos con comportamiento de suelos, predominantes en mitad SO de la Sierra, entre las localidades de Sóller y Andratx (Fig. 1).

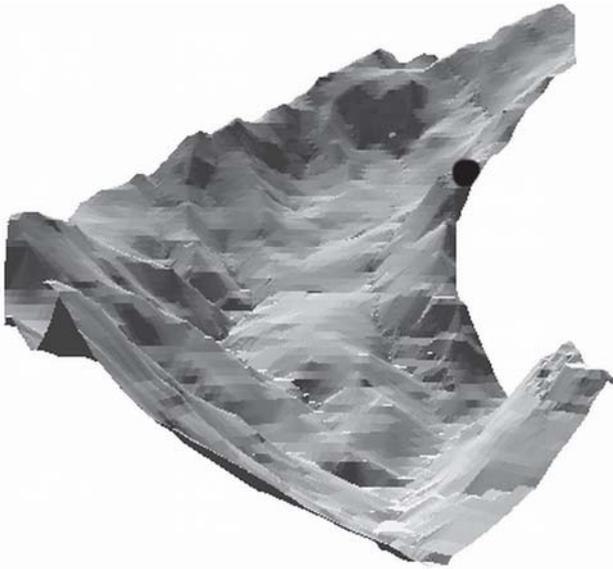
En el registro histórico de movimientos hay referencia de un evento relevante, que causó importantes daños, y que ha sido clasificado como un flujo de tierras o «earth flow» (Mateos, 2001; Giménez y Mateos, 2002). Se trata del deslizamiento de Biniarroi (Fig. 9), situado en un pequeño valle al Norte de Mancor del Valle, y que ha sufrido diversas reactivaciones durante los años 1721, 1813 y 1943 (Giménez y Mateos, 2002). El más importante tuvo lugar en 1721, con una extensión de 0,5 Km<sup>2</sup>, movilizand

10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> de material no consolidado, constituido por limos arcillosos del Pliocuatnario, de naturaleza aluvial (Ramos Guerrero, 1988). La caída de lluvias intensas en días anteriores y el carácter poco permeable de estos materiales, determinó un incremento de las presiones efectivas en el material y el desencadenamiento de un flujo viscoso que arrastró cultivos y viviendas, algunas de ellas desplazadas 250 m de su posición original (Fiol Mateu, 2002).

Se han identificado también flujos en los materiales cuaternarios correspondientes a derrubios de ladera, donde la fracción arcillosa es predominante y soporta los bloques que contiene el material. En varias ocasiones, estos flujos de menores dimensiones, han taponado la carretera C-710, en el tramo comprendido entre las localidades de Banyalbufar y Estellencs.



**Figura 8.-** Esquema que representa la expansión lateral de las calizas liásicas sobre los materiales blandos del Triásico superior. Área de Bàltx, costa de Sóller.



**Figura 9.-** Modelo digital del terreno de la ladera de Biniarroi, donde se observa las formas lobuladas de los diferentes flujos que ha sufrido la ladera (Giménez y Mateos, 2002).

*Movimientos complejos.* En la Sierra de Tramuntana son movimientos en los que la rotura se inicia como un deslizamiento rotacional y posteriormente, la masa deslizada se desintegra pasando a comportarse como un flujo. Este comportamiento es común en sedimentos finos y material muy alterado, predominantes en la mitad SO de la Sierra.

Como ejemplo cabe destacar los movimientos que tuvieron lugar en la ladera del margen izquierdo del Torrente de Fornalutx en los años 1924 (Darder, 1924) y 1974 (Mateos, 2001, 2002), tras la caída de lluvias intensas. Estos movimientos afectaron a sedimentos cuaternarios de naturaleza coluvial, con gran proporción de matriz fina que envuelve cantos heterométricos de rocas carbonatadas y que, con varios metros de espesor, se superponen a los materiales blandos e impermeables del Keuper, y a través de cuyo contacto se inició la superfi-

cie de rotura (Fig. 10). Este hecho se repite en otras laderas de la Sierra con las mismas condiciones geológicas.

### Conclusiones

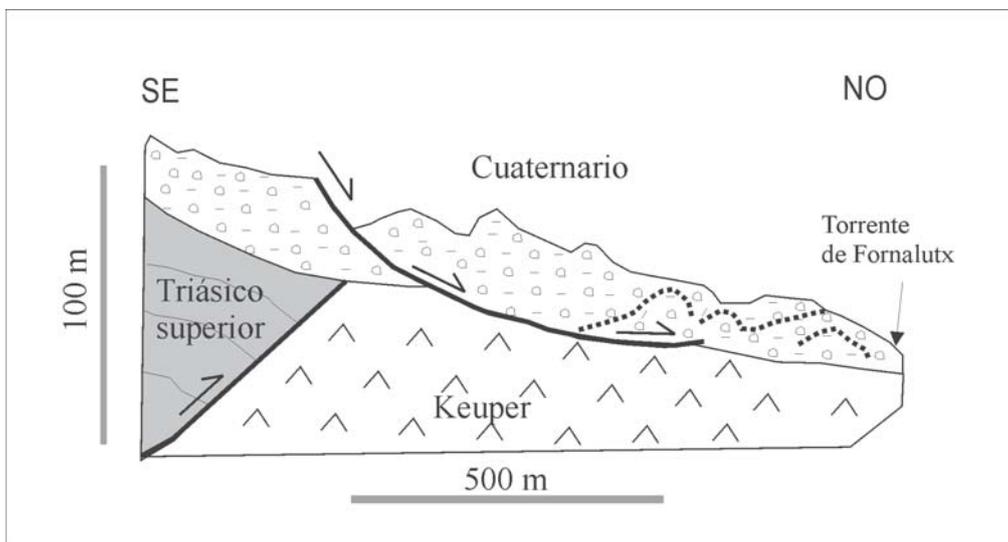
Los fenómenos de inestabilidad de laderas en la Sierra de Tramuntana han sido muy intensos en tiempos geológicos recientes y han jugado un papel determinante en la morfogénesis de esta cadena montañosa. Numerosos movimientos han sido registrados en los dos últimos siglos, destacando por su envergadura y daños causados los de Biniarroy (1721) y Fornalutx (1924).

El principal factor desencadenante de los movimientos de ladera registrados en la Sierra de Tramuntana es la ocurrencia de lluvias intensas, características de un clima mediterráneo.

Los movimientos más frecuentes son los desprendimientos rocosos, de dimensiones muy diversas, observándose bloques con volúmenes de hasta 300 m<sup>3</sup>. Los frentes de desprendimientos suelen estar relacionados con escarpes formados por rocas duras, correspondientes principalmente a calizas y dolomías liásicas. En la franja litoral los desprendimientos rocosos se producen fundamentalmente por erosión diferencial así como por socavación de la base.

En la vertiente septentrional de la Sierra se han identificado los grandes deslizamientos en roca, de tipo rotacional y traslacional, que afectan principalmente a las rocas carbonatadas liásicas y cuyo plano de rotura suele estar relacionado con el contacto geológico de éstas y los materiales blandos del Triásico superior. No se tiene constancia histórica de la ocurrencia de estos movimientos, pero las características geomorfológicas de los mismos y la existencia de potentes depósitos de sedimentos no retrabajados por el mar en la costa asociados a éstos indican que se trata de movimientos recientes cuaternarios.

Deslizamientos que, de forma puntual, han sido descritos como planares pueden ser parte de movimientos



**Figura 10.-** Corte del movimiento complejo en suelos desarrollado en la ladera del margen izquierdo del Torrente de Fornalutx.

actualmente activos de mayores dimensiones, de tipo «extensión lateral». Estos movimientos afectan al conjunto de la formación carbonatada del Lías cuando se dispone directamente sobre los materiales blandos del Triásico superior. El desplazamiento lateral provoca la fracturación de los niveles más competentes del Lías, separándose en grandes bloques que se desplazan con un movimiento extremadamente lento, hasta varios centenares de metros de su escarpe original.

En la mitad SO de la Sierra de Tramuntana predominan los movimientos en suelos y rocas blandas muy alteradas, movimientos más superficiales que los anteriores. Se pueden diferenciar a su vez dos tipos: flujos y movimientos complejos, y son frecuentes en laderas formadas por sedimentos coluviales recientes sobre los materiales blandos e impermeables del Keuper. Dentro de este grupo de movimientos de ladera se encuentran aquellos que han causado mayores daños: los deslizamientos en Biniarroi (1721, 1813 y 1943) y los que afectaron al margen izquierdo del Torrente de Fornalutx (1924, 1974).

### Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología y FEDER, con el Proyecto de I+D+I del Plan Nacional REN2001-3378. Los autores agradecen a los Doctores J. Giménez y B. Gelabert la aportación y mejora de alguna de las figuras.

### Referencias

- Baars, D. (1989): *Canyonlands Country: Geology of Canyonlands and Arches National Parks*. Canon Publishers Ltd., Lawrence, Kans, 140 p.
- Corominas, J. (1989): Clasificación y reconocimiento de los movimientos de ladera. *Monografías Sociedad Española de Geomorfología*, 3, 1-30.
- Cruden, D.M. y Varnes, D.J. (1996): Landslides Types and Processes. En Transportation Research Board, National Research Council. Special Report 247: *Landslides: investigation and mitigation* (Turner y Schuster, Eds.). Washintong, D.C., 36-71.
- Darder, B. (1924): Desprendimiento de tierras en Fornalutx. *Majorica, Vida, Arte*, 13: 3-6.
- Ferrer, M., López, J.M., Mateos, R.M., Morales, R. y Rodríguez Perea, A. (1997): Análisis de los desprendimientos rocosos que afectan a la Cala de Banyalbufar (Mallorca). *Boletín Geológico y Minero*, 108 (2), 147-158.
- Fiol Mateu, G. (2002): *Notícies històriques 1601-1800*. Ajuntament de Mancor del Vall, 349 p.
- Gelabert, B. (1998): *La Estructura Geológica de la Mitad Occidental de la Isla de Mallorca*. Colección Memorias del I.T.G.E, 129 p.
- Giménez, J. y Mateos, R.M. (2002): Analysis of the Biniarroi (Mallorca) complex landslide. En: *4<sup>th</sup> EGS Plinius Conference on Mediterranean Storms* (A. Jansà y R. Romeo, Eds.), 10-17
- Hutchinson, J.N. (1991): Periglacial and slope processes. *Engineering Geology Special Publication 7*, Geological Society of London, 283-331.
- McGill, G.E. y Stromquist, A.W. (1979): The Grabens of Canyonlands National Park, Utah: Geometry, Mechanics and Kinematics. *Journal of Geophysical Research*, 84 (B9): 4547-4563.
- Mateos, R.M. (2001): *Los movimientos de ladera en la Serra de Tramuntana (Mallorca). Caracterización geomecánica y análisis de la peligrosidad*. Tesis doctoral, Univ. Complutense de Madrid, 299 p.
- Mateos, R.M. (2002): Slope movements in the Majorca Island (Spain). En: *International Conference on Instability-Planning and Management*, Ventnor, UK, 339-346.
- Ramos Guerrero, E. (1988): *El Paleógeno de las Baleares. Estratigrafía y sedimentología*. Tesis doctoral, Univ. de les Illes Balears-Univ. de Barcelona, 219 p.
- Rodríguez-Perea, A. (1984): *El Mioceno de la Serra Nord de Mallorca. Estratigrafía, sedimentología e implicaciones estructurales*. Tesis doctoral, Univ. de les Illes Balears y Barcelona, 532 p.
- Rodríguez Perea, A. (1998): La geología de la Serra de Tramuntana. La Serra de Tramuntana, aportacions per a un debat. *Papers de Medi Ambient*, 11-22. Ed. Sa Nostra.
- 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 Geológica Hispánica*, 36 (3-4): 245-266.
- Varnes, D.J. (1978): Slope movements. Types and processes. En: *Landslides: Analysis and control* (Schuster and Krizeck, Eds). Special Report 176, National Research Council, Washintong D.C., 11-33.

Manuscrito recibido el 7 de junio de 2004

Aceptado el manuscrito revisado el 22 de marzo de 2005