

**Distribución espacio-temporal de los desprendimientos de rocas
en la montaña de Montserrat**

Spatio-temporal distribution of rockfalls in the Montserrat Mountain (Catalonia, Spain)

Royán, M.J.⁽¹⁾; Vilaplana, J.M.⁽¹⁾

(1) Grupo RISKMAT. Departamento de Geodinámica y Geofísica, Universitat de Barcelona, C/ Martí i Franqués, s/n, 08028 Barcelona.

Resumen

La montaña de Montserrat se encuentra afectada por desprendimientos de rocas. Estos desprendimientos conforman un peligro importante para todas las estructuras expuestas en la montaña. Entre ellas el Monasterio de Montserrat y sus accesos por carretera y ferrocarril. En el presente estudio se analiza la distribución espacial y temporal de los desprendimientos en la montaña a partir de la identificación de indicadores geomorfológicos de desprendimientos antecedentes (como canchales y conos de derrubios, bloques caídos de más de 3 m³ y trayectorias) en fotografías aéreas y ortofotos de diferentes años (1978, 1992, 2009). En cuanto al análisis espacial los resultados muestran que hay ciertos sectores de la montaña con un claro alto nivel de afección, mientras que existen otros con una afección casi nula, y que por lo tanto la distribución de la peligrosidad en la montaña es bastante heterogénea. Por otra parte, el análisis temporal muestra como el número de desprendimientos de rocas ha aumentado en las dos últimas décadas.

Palabras clave: desprendimiento de rocas, indicadores de desprendimientos, análisis espacio-temporal, Montaña de Montserrat.

Abstract

The Montserrat Mountain is affected by rockfalls. These rockfalls are an important danger for all the exposed structures on the mountain. Among them we find the Monserrat Monastery and its access road and railway. In this study the spatial and temporal distribution of the rockfalls in the mountain are analyzed from the identification of indicators of previous rockfalls (as scree slopes and talus cones, fallen blocks of more than 3 m³ and trajectories) in aerial photographs and orthophotos taken in different years (1978,



1992, 2009). On the one hand, the spatial analysis results show that there are certain sectors of the mountain with a clear high impact, while there are others with a nearly no impact, and therefore the distribution of danger on the mountain is quite heterogeneous. On the other hand, the temporal analysis results show that the number of rockfalls has increased over the past two decades.

Keywords: rockfall, rockfall indicators, spatio-temporal analysis, Montserrat Mountain.

1. Introducción

El presente estudio ha sido realizado en la montaña de Montserrat, que se encuentra situada al noreste de España, entre las comarcas catalanas de Bages, Anoia y Baix Llobregat y aproximadamente a 52 km de Barcelona (Fig. 1). La montaña de Montserrat es la más

emblemática de Catalunya, y en ella se sitúa uno de los lugares de peregrinación cristiana más importantes en España, el conocido Monasterio de Montserrat, que sólo en 2009 recibió más de 2 millones de visitantes. A estos 2 millones de visitantes del monasterio, hay que añadir otros centenares de miles que visitan la montaña para la realización de de-

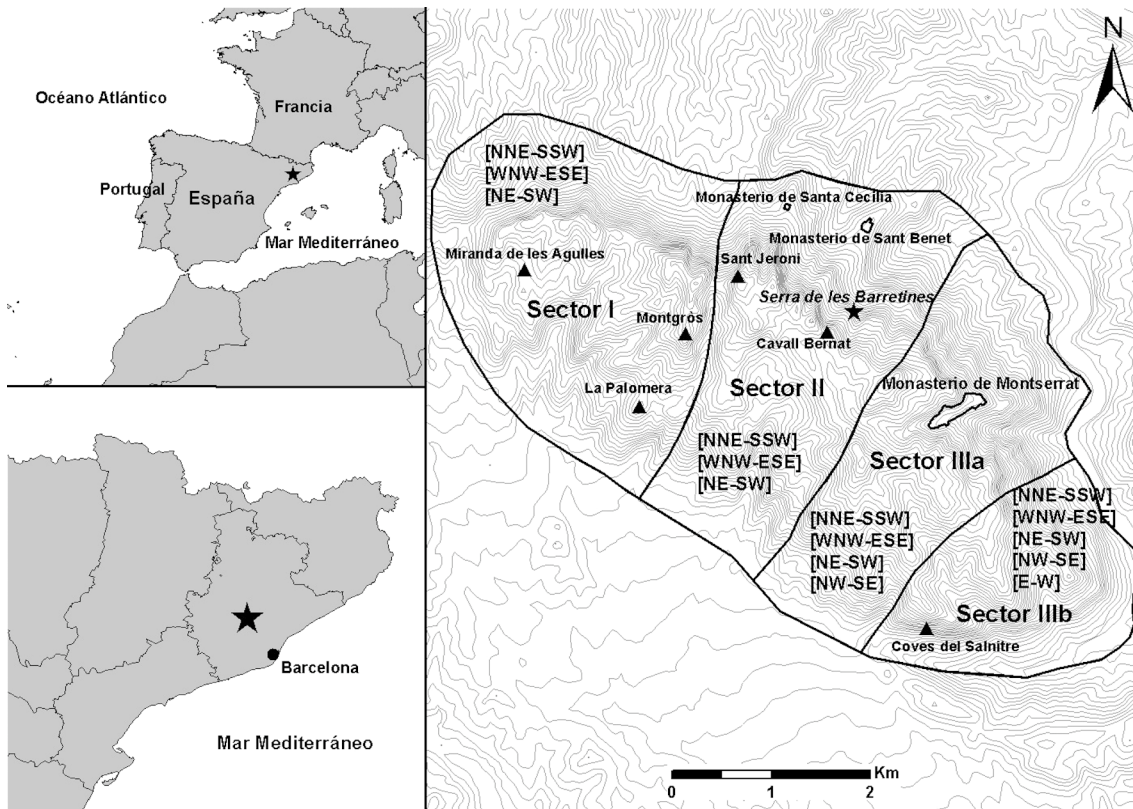


Figura 1. Localización de la montaña de Montserrat y área de estudio dividida en los 4 sectores de Alsaker *et al.* (1996), indicando las direcciones de las principales familias de discontinuidades en cada sector.

Figure 1. Location of Montserrat Mountain and study area divided into 4 sectors according to Alsaker *et al.* (1996), indicating the orientation of the main discontinuity families in each sector.

portes como senderismo o escalada en sus sinuosos senderos y sus verticales paredes de conglomerados.

Las laderas de la montaña de Montserrat se encuentran afectadas por fenómenos de desprendimientos que con cierta frecuencia superan los 1.000 m³ de material movilizado y que conllevan un peligro importante para los elementos antrópicos expuestos, como son el monasterio y las vías de comunicación, entre otros. Como ejemplo de desprendimiento reciente que ha afectado a las vías de comunicación del monasterio se puede citar el que ocurrió el 28 de Diciembre de 2008 en el "Camí dels Degotalls", que movilizó más de 1.000 m³ de roca y obligó a cortar la carretera y el tren cremallera que llegan al monasterio.

1.1. Antecedentes y objetivos

Los trabajos relacionados con los desprendimientos recientes en la Montaña de Montserrat han sido sobre todo de carácter técnico, hechos por el Institut Geològic de Catalunya (IGC) y la empresa Geocat Gestió de Projectes S.A., y en zonas con infraestructuras expuestas. El IGC colabora con los Ferrocarriles de la Generalitat de Catalunya realizando un seguimiento de las laderas por las que transcurre el tren cremallera de Montserrat. A causa de las lluvias de Junio del 2000 se realizó en la montaña de Montserrat y por encargo del IGC un inventario de los efectos de estos aguaceros (Marquès, 2001), los cuales fueron sobre todo movimientos de masa superficiales, de tipo corriente de derrubios, canalizados por los torrentes y canales. Sólo se inventarió un desprendimiento importante, el que se produjo en la "Canal de Sant Jeroni". Dentro de este proyecto se realizó un mapa de susceptibilidad de movimientos de masa superficiales en la montaña (Martín, 2002).

Aparte de estos documentos, que de una u otra manera tienen relación con el IGC y que se describen en el apartado 2, existen dos trabajos de investigación anteriores y que han

facilitado importante información para el presente estudio. Uno de los trabajos (Gabarró, 1996) aplica métodos analíticos y empíricos para el cálculo de los ángulos de alcance y la influencia de los obstáculos a partir de algunos desprendimientos inventariados en la montaña de Montserrat. Además Gabarró (1996) estudió la influencia de los incendios en la ocurrencia de los desprendimientos llegando a la conclusión de que los incendios no generan un aumento del número y tamaño de los desprendimientos a corto plazo, pero sí que favorecen la propagación de los bloques debido a la eliminación de obstáculos (vegetación). Grau (2003) realiza cálculos sobre los ángulos de alcance de los desprendimientos en varios lugares de Cataluña, entre ellos la montaña de Montserrat, por lo que también realizó un inventario de desprendimientos. El objetivo de este trabajo de investigación fue el de mejorar la metodología empleada para el cálculo de ángulos de alcance a partir de desprendimientos en laderas con litologías diferentes, y de comprobar el efecto de los obstáculos en las trayectorias.

El principal objetivo del presente trabajo es tomar una visión más general de los desprendimientos de rocas en la montaña de Montserrat, definiendo las zonas más afectadas y la evolución de estos desde 1978 hasta 2009. Para ello se ha realizado un análisis espacio-temporal a partir de la identificación de indicadores geomorfológicos de desprendimientos antecedentes en fotografías aéreas y ortofotos de tres años diferentes (1978, 1992 y 2009).

1.2. Contexto geológico

La montaña de Montserrat se emplaza en el margen sureste de la cuenca del Ebro. Está constituida por facies de abanico aluvial, principalmente conglomerados, formados en el Eoceno Medio como producto del levantamiento tectónico de la Cordillera Prelitoral en relación con la actividad de la falla del Vallés-Penedés. Hacia el Oeste los conglomerados

se intercalan con margas de origen marino de la cuenca Eocena del Ebro (Vilaplana y Busquets-Buezo, 2000).

Más en detalle, la montaña, y sobre todo la ladera sur de ésta, está constituida por 1.000 m de potencia de conglomerados de carácter masivo con cantos calcáreos en su mayoría, con cemento calcáreo y con intercalaciones de pequeños niveles discontinuos de limolitas (Marquès, 2001). En la ladera norte se pierde el carácter masivo y se pasa a un conjunto de 8 niveles de conglomerados de entre 75 y 250 m de potencia con intercalaciones de areniscas y lutitas rojas con continuidad lateral (Marquès, 2001), pertenecientes a 8 episodios sucesivos de progradación-retrogradación.

1.2.1. Estructura tectónica

Uno de los condicionantes más importantes en la ocurrencia de caídas de rocas en las laderas de cualquier montaña son las discontinuidades. Estas son las que definen los bloques susceptibles de caer y por tanto controlan el tamaño de estos y la magnitud del desprendimiento. La montaña de Montserrat se encuentra afectada por cinco sistemas de diaclasas según Alsaker et al. (1996): set A (NNE-SSW), set B_{NE} (NE-SW), set B_{NW} (NW-SE), set C (WNW-ESE) y set E (E-W). De estos sistemas los principales son los sets A y C. Dependiendo de los sistemas que están presentes y de la densidad de estos, Alsaker et al. (1996) diferencian tres subáreas dentro de la montaña:

Subárea I (parte noroeste de la montaña): con densidad alta de discontinuidades y afectada por los sets de diaclasas A, C y B_{NE} (Fig. 2). La densidad dentro de esta subárea es mayor en las partes W y E, y disminuye en la parte central.

Subárea II (parte central de la montaña): con densidad media de discontinuidades y afectada por los sets de diaclasas A, C y B_{NE} (Fig.

2). La densidad dentro de la subárea varía de mayor a menor desde la parte noroeste a la sureste.

Subárea III (parte sureste de la montaña): esta subárea a su vez se puede dividir en dos debido a la diferencia de densidad de discontinuidades. La subárea IIIa, que corresponde con la parte más noroeste y que tiene una densidad alta pero más baja que la parte más sureste. Se encuentra afectada por los sets A, C, B_{NE} y B_{NW}. La subárea IIIb, que corresponde con la parte más sureste, posee una densidad muy alta de discontinuidades y se encuentra afectada por todos los sistemas de diaclasas (A, C, B_{NE}, B_{NW} y E que solo se observa en esta subárea) (Fig. 1).

1.2.2. Características morfológicas y dinámica del macizo

Los sedimentos de la montaña de Montserrat actualmente se observan con un modelado muy característico que recibe el nombre de *montserratí*. Esta morfología fruto de la karsificación se caracteriza por agujas y paredes verticales de conglomerados, producto de la meteorización y erosión condicionada por la existencia de las discontinuidades (diaclasado descrito en el apartado 1.2.1).

Según Marquès (2001) la dinámica del macizo de Montserrat se puede interpretar como una evolución que se produce a “*dos velocidades*”. Por una parte la dinámica a “*cámara lenta*” en la que se incluyen los procesos de efectos poco visibles o poco espectaculares, y que por tanto son de magnitud más baja pero frecuencia más alta. En ella se podrían incluir los procesos de meteorización como la karsificación, y los desprendimientos, que son procesos relativamente frecuentes. Por otra parte estaría la dinámica a “*cámara rápida*” en la que se incluyen los procesos con efectos visibles y muy espectaculares, y que por tanto poseen magnitud más elevada que los anteriores pero frecuencias más bajas. En ella se podrían incluir la erosión y el transporte que

se da bajo determinadas condiciones en los canales y torrentes que atraviesan el macizo. Como ejemplo de esta dinámica “rápida” se pueden citar los flujos que se dieron en junio del año 2000 en toda la montaña debidos a lluvias torrenciales.

1.3. Características climáticas de la montaña de Montserrat

Actualmente diversos estudios apuntan a que los principales desencadenantes de las caídas de rocas en las laderas montañosas son ciertos factores meteorológicos. Entre ellos se encuentran los ciclos hielo-deshielo (Matsuoka y Sakai, 1999; Fernández y Vilaplana, 2004), las precipitaciones (Fernández y Vilaplana, 2004), el aumento de la humedad en la roca (Sass, 2005) y el aumento en la temperatura media anual (Davies et al., 2001). El clima de la montaña de Montserrat se puede considerar un clima mediterráneo de media montaña (Gabarró, 1996), caracterizado por escasas lluvias en verano y temperaturas suaves en invierno.

A partir de los datos del observatorio del Monasterio de Montserrat desde 1961 hasta 1990, Ribera (1992) obtuvo una temperatura media anual de 12,2°C, dándose la máxima temperatura media mensual en Julio (20,5°C) y la mínima en Enero (5,2°C). A partir de estos datos de temperatura, Ribera (1992) obtuvo una media de 23 días de heladas al año en la montaña, siendo enero el mes más afectado por estas. La media anual de precipitaciones en forma de lluvia es de 690 mm en la zona del monasterio, pudiendo llegar a 800 mm en zonas con mayor altitud (Ribera, 1992). La máxima media mensual se da en el mes de septiembre (81 mm) y la mínima en el mes de julio (28 mm). Puntualmente pueden darse eventos mayores de lluvias, como el del 10 de junio del año 2000, en el que en un tiempo inferior a cinco horas, en la estación del Monasterio de Montserrat, se llegaron a registrar 170 mm, y en la cercana localidad de Collbató, 257 mm (Marquès, 2001). Por úl-

timo, las precipitaciones en forma de nieve generalmente no son importantes aunque en algunos casos pueden llegar a ser destacables (Ribera, 1992).

1.4. Los incendios forestales en la montaña de Montserrat

El fenómeno de los incendios forestales es un fenómeno periódico muy común en los bosques de todo el mundo, y entre ellos en los del clima mediterráneo, por lo tanto, la montaña de Montserrat no es una excepción. Los incendios en su gran mayoría suelen darse en los meses de verano, cuando la vegetación seca, las temperaturas altas, la humedad baja y el viento los favorece (Abril et al., 1987).

Según Gabarró (1996) en los últimos 40 años se tiene constancia de tres grandes incendios en la montaña de Montserrat (1973, 1986 y 1994) aparte de otros de menor entidad, y también afirma que el número de incendios ha aumentado en estos últimos años.

1.5. Los desprendimientos de rocas

Los desprendimientos de rocas son uno de los procesos geomorfológicos más comunes en las regiones de montaña (Whalley, 1984; Erisman y Abele, 2001). Es un fenómeno de gran frecuencia, independientemente de la magnitud, y en los lugares en los que la ocurrencia de éstos es continua se forman acumulaciones de fragmentos de rocas en la base de los taludes (Rapp, 1960; Church et al., 1979; Evans y Hungr, 1993). Están considerados como uno de los tipos de movimientos de ladera, término que incluye también otro tipo de procesos como por ejemplo deslizamientos de suelo, deslizamientos de rocas y corrientes de derrubios (Varnes, 1978; Cruden y Varnes, 1996; Hungr et al., 2001).

Copons (2007) define los desprendimientos como toda masa rocosa que se separa de una ladera rocosa y que se fragmenta en cuerpos

rocosos más pequeños que se propagan ladera abajo mediante una caída libre y/o rebotando y/o rodando. Los depósitos resultantes de este tipo de eventos son un conjunto de bloques rocosos caóticos, sin orden ni disposición en relación a su volumetría (Copons, 2007). Dentro de un área afectada por este tipo de fenómeno se pueden distinguir tres zonas, la zona de salida, la zona de trayecto y la zona de llegada (Fig. 2):

La **zona de salida** se sitúa en la ladera rocosa y es el lugar de donde caen las rocas implicadas, es decir, el lugar donde se situaban éstas antes de caer. Por tanto dejan una cicatriz que suele ser equivalente al molde del volumen



Figura 2. Desprendimiento de la “Serra de les Barretines” (montaña de Montserrat) el día 4 de Noviembre de 2008 (cedida por Geocat) (localización en figura 1).

Figure 2. Rockfall at “Serra de les Barretines” (Montserrat mountain) on November 4th 2008 (courtesy of Geocat) (location in Figure 1).

de salida de las rocas caídas. Se pueden dar fundamentalmente tres tipos de mecanismos de salida según la distribución en el espacio de las discontinuidades existentes según Hoek y Bray (1981), el deslizamiento, la cuña y el vuelco.

La **zona de trayecto** es la zona de recorrido, por la que se han movido las rocas hasta llegar a la zona en la que se paran y se acumulan. A lo largo de esta zona las rocas pueden presentar diferentes tipos de movimientos como son caída libre (en laderas muy cercanas a la vertical), rebotes (sobre la misma pared rocosa cuando ésta es muy inclinada o con otros bloques), rodadura (en laderas con pendientes bajas) y deslizamiento (en laderas con pendientes bajas) (Copons, 2007). A lo largo de un evento pueden darse más de un movimiento de los descritos. También hay que apuntar que durante el trayecto la tendencia de los bloques es la de fragmentarse e ir formando cada vez bloques individuales de menos volumen.

La **zona de llegada** o zona donde se paran y acumulan los bloques rocosos caídos. Las acumulaciones sucesivas de diferentes eventos al pie de la ladera produce depósitos que reciben el nombre de canchal, o si es en la salida de un torrente o canal, la acumulación tiene forma de abanico y recibe el nombre de cono de derrubios.

Los desprendimientos de rocas, junto con las corrientes de derrubios, están dentro de los considerados procesos de alta velocidad (Varnes, 1978; Cruden y Varnes, 1996; Guzzetti, 2004). Por tanto, la energía de impacto implicada es muy alta, considerándose fenómenos muy destructivos y, en consecuencia, de elevada peligrosidad.

2. Material y métodos

La metodología empleada en este trabajo ha estado basada en el análisis espacio-temporal mediante fotointerpretación de los despren-

dimientos en la montaña de Montserrat a partir de fotografías aéreas de distintos años. Este método permite la obtención de rasgos específicos producidos por los desprendimientos en el conjunto de elementos que forman la montaña, entre ellos las laderas y la vegetación. También permite localizar restos de desprendimientos antiguos de los que no haya constancia, e incluso de desprendimientos recientes que no se hayan descrito por no tener afección en los elementos antrópicos de la montaña. Por lo tanto permite tener una visión más real de los desprendimientos de rocas en toda la montaña y a lo largo de un amplio rango de tiempo, y en consecuencia poder distinguir zonas que han sido más propensas al fenómeno, o más peligrosas, que otras.

Como factores limitantes de este método se pueden describir la falta de aportación de datos cuantitativos, como los volúmenes de rocas implicados y las fechas exactas de cada evento; y cualitativos, como los mecanismos de salida. Otros factores limitantes son las inadecuadas escalas de las fotografías aéreas y el enmascaramiento por parte de la cobertura vegetal con el paso del tiempo de las cicatrices dejadas por los desprendimientos. Por último, uno de los problemas más importantes encontrados en la realización de la fotointerpretación viene relacionado con la morfología característica del relieve *montserratí*. Las paredes verticales características producen sombras dependiendo de la orientación del vuelo que realiza la fotografía aérea, y por tanto deja zonas que no se llegan a ver bien. Otro problema relacionado con las paredes verticales y con las sombras es que para trabajar con estereoscopio y poder ver en 3D se utilizan pares de fotos, pues bien, en determinados pares estas zonas verticales y zonas con sombras no se observaban igual, y por lo tanto hace muy difícil la observación de determinadas zonas con profundidad. Aun con estas dificultades ya descritas los resultados de la fotointerpretación se pueden considerar aceptables y arrojan resultados muy interesantes.

A continuación se describirán los elementos característicos de los desprendimientos que se han detectado y cartografiado mediante fotointerpretación para la realización del análisis espacio-temporal (Fig. 3), además se describirá el porqué de cada uno de ellos y las aportaciones positivas y negativas. Estos elementos son considerados indicadores geomorfológicos de desprendimientos antecedentes, localizados en las zonas de trayecto y de llegada. No se han podido localizar las zonas de salida ya que estas se encuentran en las paredes verticales o subverticales, y estas paredes no se observan con fotografías aéreas.

Trayectorias: Los desprendimientos cuando se producen suelen provocar daños en la vegetación que se encuentra en su recorrido ladera abajo y por tanto producen erosión en el terreno en forma de cicatrices que vienen representadas como un camino abierto, una lineación en la vegetación y que si el desprendimiento es de un tamaño considerable, son fotointerpretables con fotografía aérea o con ortofoto. Por lo tanto estas lineaciones indican el recorrido del desprendimiento. Además, estas trayectorias son señal inequívoca de actividad reciente, es decir, de desprendimientos no muy antiguos, de no más de aproximadamente 20 años atrás de la fecha de toma de la fotografía que se esté observando, ya que por la propia naturaleza de la vegetación, ésta se regenera y borra por completo las cicatrices dejadas por los desprendimientos. Estas trayectorias en ocasiones van asociadas a zonas con bloques caídos o de acumulación de derrubios. Pero no siempre, ya que hay veces que en las fotos no se diferencia ninguna acumulación en la parte final de la trayectoria, bien porque los bloques son demasiado pequeños como para verlos, o bien porque parte de la trayectoria haya sido borrada por la vegetación.

Canchales y conos de derrubios: En las laderas, y como producto de desprendimientos menores se produce la acumulación de pequeños bloques de roca o derrubios y que re-

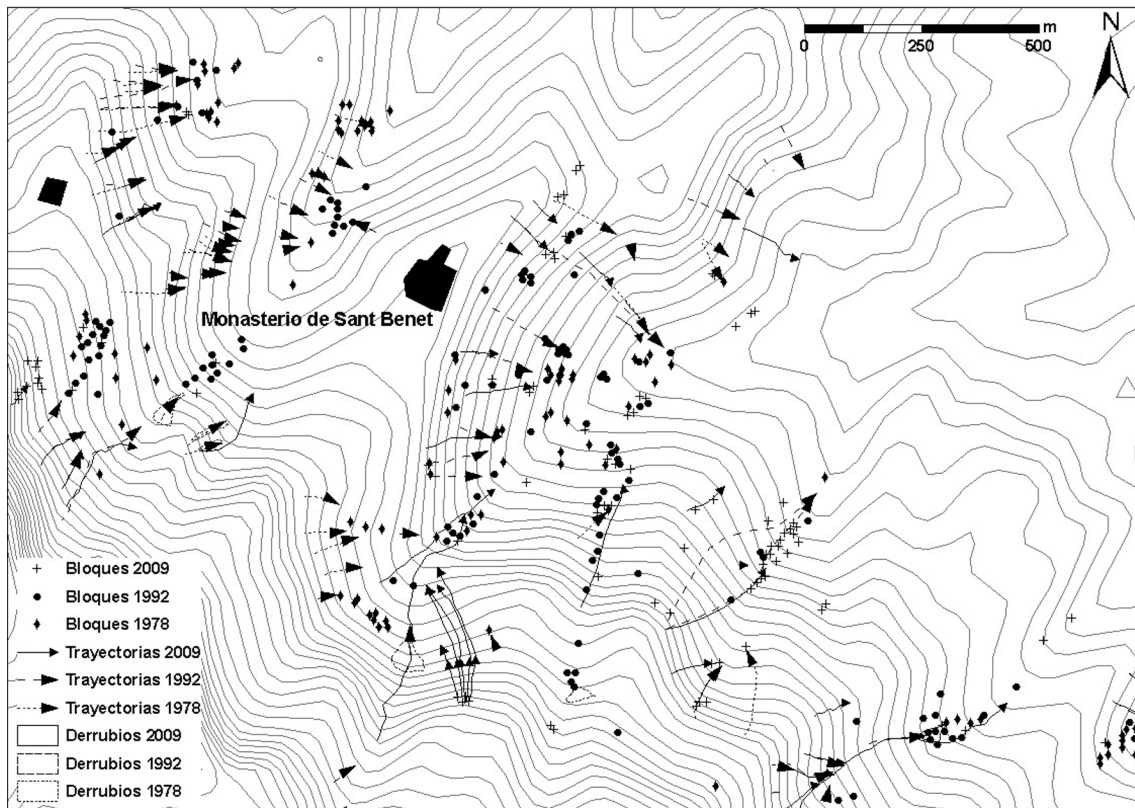


Figura 3. Detalle del mapa con los indicadores geomorfológicos de desprendimientos antecedentes observados en las fotointerpretaciones de los años 1978, 1992 y 2009.

Figure 3. Detail of the map with geomorphological indicators of old rockfalls observed by photointerpretation of the years 1978, 1992 and 2009.

ciben el nombre de canchales (cuando no se encuentran en la salida de un torrente o canal, sino que tapizan el pie de las laderas sin poseer forma característica) y conos de derrubios (cuando se encuentra en la salida de torrentes o canales y poseen forma de cono o abanico). En las diferentes fotos se han señalado áreas con acumulación de pequeños bloques ($< 3 \text{ m}^3$) que corresponden a canchales o a conos de derrubios. Estas acumulaciones hacen referencia a zonas de llegada y propensas a sufrir desprendimientos de entidad menor y cuyo alcance no suele sobrepasar el propio pie del talud afectado. Estos derrubios fotointerpretados se observan igual en las tres series fotográficas por lo

que no proporcionan referencias temporales ni de actividad reciente.

Bloques caídos: Los bloques son el producto de los desprendimientos ya ocurridos e indican zonas de llegada de éstos. Se han señalado en las diferentes fotos los bloques individuales de tamaño mayores a 3 m^3 aproximadamente, pudiendo estar localizados dentro de los canchales o conos de derrubios y que serían resultado de desprendimientos de una entidad importante. Un apunte que se tiene que hacer respecto a los bloques caídos fotointerpretados es que tampoco proporcionan referencias temporales ni de actividad reciente, por lo que estos bloques pueden ser

de desprendimientos recientes, como de desprendimientos muy antiguos, y por lo tanto solo se podrán observar zonas con acumulación de ellos pero sin saber el tiempo exacto que esta misma lleva siendo afectada por los fenómenos de los desprendimientos.

Todos estos indicadores de los desprendimientos antecedentes han sido fotointerpretados en tres series fotográficas de la montaña de Montserrat, correspondientes a los años 1978, 1992, y 2009. Han sido elegidas tres series de fotos que representaran aproximadamente tres décadas diferentes para la realización del análisis temporal de los desprendimientos en la montaña de Montserrat:

Serie de fotografías aéreas de 1978: El trabajo se ha realizado mediante estereoscopio sobre una serie de fotografías aéreas constituida por 13 fotos de Marzo de 1978 a escala 1:18.000 (Igalada-391, P-C y Sabadell-392, P-C/D) tomadas por la Compañía Española de Trabajos Fotogramétricos Aéreos S.A. (CETFA), por ser la de mayor detalle que cubría toda la zona de estudio encontrada para ésta época. Posteriormente dicha fotointerpretación fue digitalizada mediante un Sistema de Información Geográfico, utilizando el programa ArcGIS 9.2 de ESRI.

Serie de fotografías aéreas de 1992: El trabajo ha sido realizado mediante estereoscopio sobre una serie de fotografías aéreas constituidas por 12 fotos de Agosto de 1992 a escala 1:22.000 (392, P-3/4/5) tomadas por el Institut Cartogràfic de Catalunya, también las de mayor detalle que cubrían toda la zona de estudio encontradas para ésta época. Y también, como en el caso anterior, posteriormente dicha fotointerpretación se digitalizó con el programa ArcGIS 9.2 de ESRI.

Serie de ortofotos de 2009: En este caso el trabajo ha sido realizado directamente con el Sistema de Información Geográfico (ArcGIS 9.2) y con la herramienta "OrtoXpress" del Institut Cartogràfic de Catalunya

(<http://www.ortoxpres.cat/client/icc/>) sobre 12 ortofotos de 2009 de escala 1:5.000 (279115-Sant Pau de la Guàrdia, 279116-Cal Soteres, 279117-Mas d'en Martí, 280115-Cal Martorell, 280116-El Bruc de Dalt, 280117-El Bruc, 281115-Monistrol de Montserrat, 281116-Monestir de Montserrat, 281117-Collbató, 282115-Les Comelles, 282116-L'Hospici, 282117-La Puda de Montserrat). La utilización de fotos con esta escala tan diferente se explica porque se ha priorizado en la utilización de fotografías aéreas lo más recientes posible antes que otras con escalas parecidas pero más antiguas.

Por último hay que señalar que se ha realizado una discriminación de los indicadores que se repetían en varias de las fotografías de los distintos años, es decir, se han descartado aquellos indicadores que aparecían varias veces en las fotointerpretaciones, dejando solo el que aparecía en la fotografía más antigua. Por las características de los indicadores, ésta discriminación ha sido realizada en los bloques caídos y en las trayectorias, ya que la posición de los canchales y conos de derrubios suele permanecer casi inalterada en el tiempo.

Por otra parte se ha tenido acceso a una serie de documentos técnicos sobre eventos de desprendimientos de rocas en la montaña de Montserrat y realizados por IGC y/o Geocat Gestió de Projectes S.A. (Anexo 1). Estos documentos aportan al estudio datos cuantitativos y cualitativos concretos de cada uno de los desprendimientos caracterizados por cada uno de ellos. Estos datos en concreto son: fechas de los eventos, zonas de salida, mecanismos de salida, volúmenes implicados, trayectorias exactas y alcance.

2.1 Análisis de densidad

A partir de la digitalización mediante SIG de los indicadores geomorfológicos de desprendimientos antecedentes se ha realizado un análisis de densidad. Este se ha llevado a cabo

con las trayectorias, en representación de las zonas de trayecto, y con los bloques caídos de más de 3 m³, en representación de las zonas de llegada.

El análisis de densidad de trayectorias se ha realizado mediante la herramienta de cálculo de densidad de líneas (line density) del programa ArcGIS 9.2 (Density calculations, 2007). Esta otorga un valor de densidad a cada píxel (celda unidad) dividiendo a) el sumatorio de la longitud de los segmentos de líneas que se encuentran dentro de una zona circular definida por un radio dado alrededor de una celda unidad definida (píxel), entre b) el área del círculo (A) (Fig. 4a). El análisis de densidad de bloques caídos se ha realizado mediante la herramienta de cálculo de densidad de puntos (point density) del programa ArcGIS 9.2 (Density calculations, 2007). Esta de igual manera otorga un valor de densidad a cada píxel (celda unidad) dividiendo a) el número de puntos que se encuentran dentro de una zona circular definida por un radio dado y con centro en una celda unidad definida (píxel), entre b) el área del círculo (A) (Fig. 4b).

3. Resultados y discusión

A continuación se van a describir por separado los resultados obtenidos para el análisis espacial y para el temporal.

3.1. Análisis espacial

Para la realización de las observaciones espaciales de los indicadores fotointerpretados en la montaña de Montserrat se ha dividido ésta en 4 sectores diferentes correspondientes a las subáreas I, II, IIIa y IIIb (Fig. 1) en las que la dividió Alsaker et al. (1996) según las familias de discontinuidades que están presentes y la densidad de ellas (*ver apartado 1.2.1*). Esta división es de origen estructural y ha sido escogida porque las discontinuidades son uno de los condicionantes más determinantes para que existan los desprendimientos.

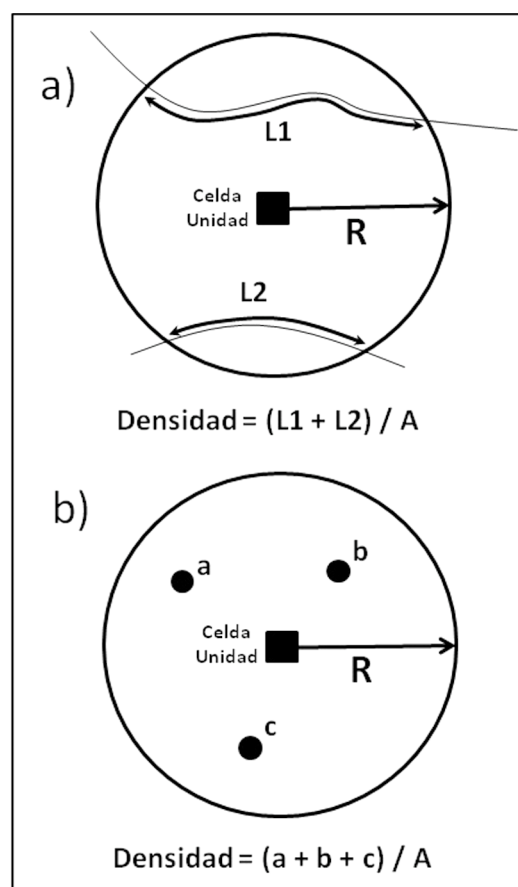


Figura 4. Esquemas de la metodología seguida en el análisis de densidad; a) análisis de densidad de líneas, b) análisis de densidad de puntos.

Figure 4. Diagrams of the methodology used in density analysis; a) analysis of line density, b) analysis of point density.

En la figura 5A se ha representado un diagrama con el número de indicadores geomorfológicos de desprendimientos fotointerpretados en cada uno de los sectores. Hay que diferenciar entre los elementos propios de las zonas de llegada como son los canchales y conos de derrubios y bloques caídos, de las trayectorias. En cuanto a los canchales y conos de derrubios y bloques caídos, el sector IIIb es el que más número de ellos posee, un total de 56 canchales o conos de derrubios y 736 bloques caídos identificados de más de 3 m³, algo esperable ya que éste sector es el

que más número y densidad de discontinuidades tiene según Alsaker et al. (1996). El que menos número tiene es el sector IIIa (3 canchales o conos de derrubios y 166 bloques caídos), mientras que los sectores I y II poseen un número similar de canchales y conos de derrubios y bloques caídos. En cuanto a trayectorias, que son indicativas de desprendimientos más recientes en cada foto aérea u ortofoto (1978, 1992 y 2009), es el sector II el que más número tiene, 142 en total, mientras que los otros 3 sectores poseen un número muy similar (90, 85 y 97). Es decir, según el número de trayectorias, el sector II es el más afectado por el fenómeno, y los sectores I, IIIa y IIIb tendrían una afección similar.

Para una mejor observación de la verdadera afección en cada sector por el fenómeno de los desprendimientos, se han realizado unos diagramas de densidad de indicadores fotointerpretados por área (km^2) (Figuras 5B, C, D y E). Estos diagramas dan una visión más adecuada de lo que un sector puede llegar a estar afectado por desprendimientos, ya que si hay un alto número de indicadores fotointerpretados en un sector muy extenso la densidad será pequeña, y este alto número no debe ser considerado como excepcionalmente alto. Mientras que si en un área pequeña existe también un alto número de indicadores la densidad será mayor y por lo tanto será este sector el que tenga un nú-

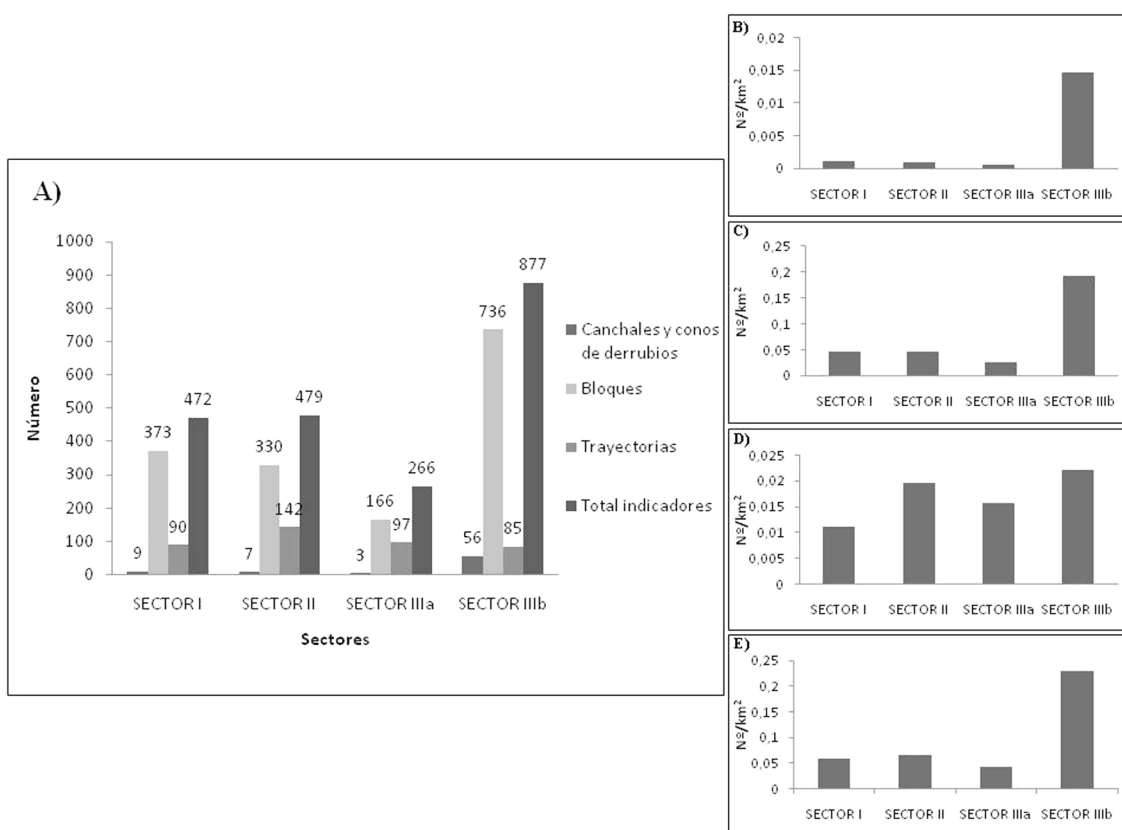


Figura 5. A) Número de indicadores fotointerpretados por cada sector; B) Densidad de canchales y conos de derrubios por sector; C) Densidad de bloques caídos de un volumen mayor a 3 m^3 por sector; D) Densidad de trayectorias por sector; E) Densidad del total de indicadores por sector.

Figure 5. A) Number of photointerpreted indicators for each sector; B) Density of scree and talus cones by sector; C) Density of fallen blocks of a volume greater than 3 m^3 by sector; D) Density of trajectories by sector; E) Density of all indicators by sector.

mero excepcional de desprendimientos y en consecuencia el más afectado por ellos.

En los diagramas (Figuras 5B, C, D y E) se observa cómo claramente el sector IIIb es el que mayor densidad tiene de todos los indicadores observados, tanto de los de las zonas de llegada (canchales y conos de derrubios y bloques caídos) como de las trayectorias. Llama mucho la atención la densidad de canchales y conos de derrubios y la de bloques caídos por km², lo que indica que este sector está muy afectado por los desprendimientos y esto coincide con que sea el sector con mayor densidad de discontinuidades (Alsaker et al., 1996). En la densidad de trayectorias también hay que resaltar el sector II, que aunque posea mayor número de trayectorias de desprendimientos que el sector IIIb, posee menor densidad que éste.

Además, para poder realizar una observación visual de las densidades de los indicadores por sector de la montaña, y así poder observar si se concentran en determinadas partes en cada sector, se ha realizado un análisis de densidades con el programa ArcGIS 9.2 de ESRI. Según la metodología descrita para la realización de este análisis de densidad (apartado 2.1), el aumento o disminución del radio de búsqueda no modifica en exceso los valores de densidad de indicadores. Esto es debido a que al aumentar el radio aumentará el sumatorio de indicadores pero también aumentará el área del círculo por el que los divide. A partir de los datos estadísticos (Tablas 1 y 2) se puede observar, tanto para la densidad de líneas como para la de puntos, que a medida que se aumenta el valor del radio (desde 50 a 200 m.) se produce una disminución de los valores máximos pero se mantienen los valores medios de densidad. Además, la desviación estándar disminuye más bruscamente con el cambio de radio de 50 a 100 m. pero después prácticamente no varía. Esto lo que indica es que con un radio de búsqueda bajo se produce una dispersión de los valores de densidad, mientras que cuando lo aumentamos los valores se concentran y la

Tabla 1. Datos estadísticos para el análisis de densidad de líneas (trayectorias). (r: radio de búsqueda; ρ : densidad; σ : desviación estándar).

Table 1. Statistical data for the line density analysis (trajectories). (r: search radius, ρ : density, σ : standard deviation).

r (m)	ρ Máxima	ρ Media	σ
50	0,072387	0,001084	0,004041
100	0,038097	0,001081	0,002963
150	0,023441	0,001078	0,002441
200	0,016801	0,001075	0,002134

Tabla 2. Datos estadísticos para el análisis de densidad de puntos (bloques caídos). (r: radio de búsqueda; ρ : densidad; σ : desviación estándar).

Table 2. Statistical data for the point density analysis (fallen blocks). (r: search radius, ρ : density, σ : standard deviation).

r (m)	ρ Máxima	ρ Media	σ
50	0,004202	0,000042	0,000181
100	0,002451	0,000042	0,000140
150	0,001811	0,000042	0,000121
200	0,001416	0,000041	0,000108

dispersión es menor. También se puede observar como esta concentración ya no sufre grandes cambios a partir de los 100 m. de radio de búsqueda.

Con este análisis lo que se pretende es la visualización de las laderas que puedan estar más afectadas por los desprendimientos, por lo que no sería válido un radio de búsqueda que produjera dispersión y sí uno que concentrara los valores. Una dispersión de los valores produciría en las zonas afectadas en el mapa áreas con muy alta densidad y otras contiguas con densidad casi nula, y en consecuencia a nuestra escala de trabajo no permitiría ver las laderas más afectadas. Mientras que una concentración de los valores permite en el mapa una mejor visualización de la densidad en las laderas afectadas. Por tanto, a partir de los valores estadísticos, el valor de radio de búsqueda elegido tanto para líneas como para puntos es de 100 m. (Figuras 6A y B). Para la visualización conjunta

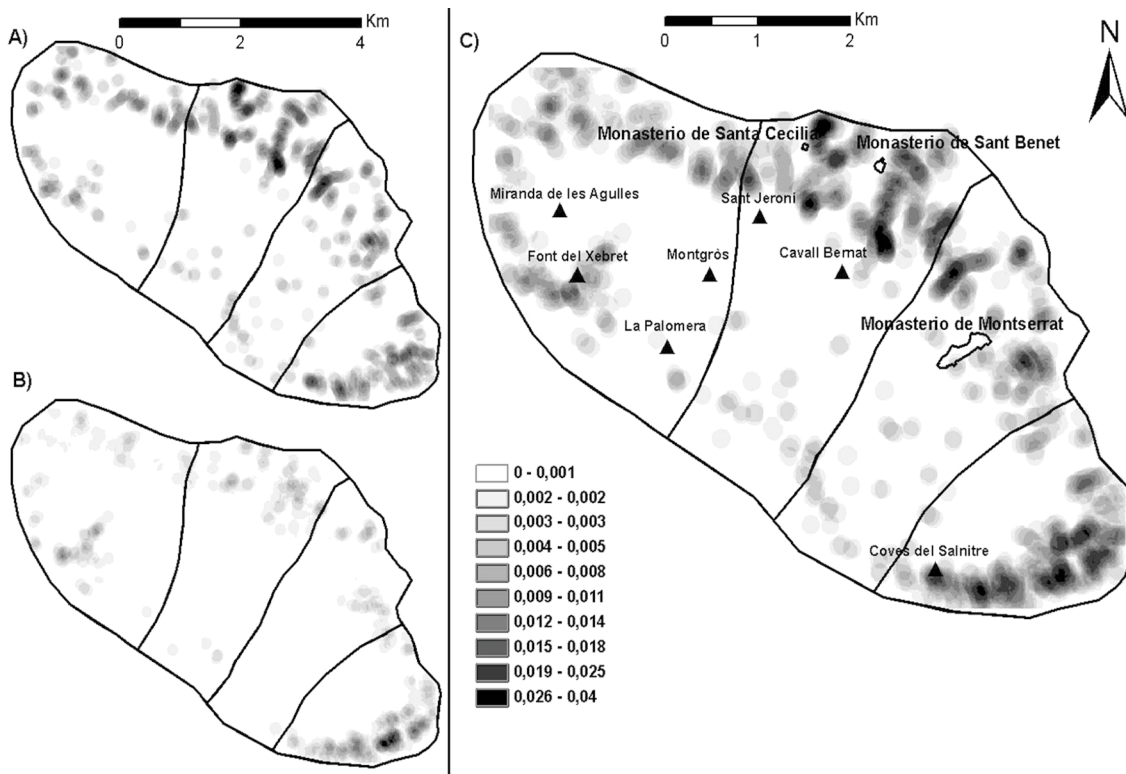


Figura 6. Mapas de densidades: A) Densidad de trayectorias; B) Densidad de bloques caídos; C) Suma de la densidad de bloques y de la densidad de trayectorias.

Figure 6. Density maps: A) Density of trajectories; B) Density of fallen blocks, C) Sum of density of blocks and density of trajectories.

de las densidades de trayectorias (zonas de trayecto) y de bloques caídos (zonas de llegada) se ha convenido realizar la suma de los dos mapas obtenidos mediante el análisis anterior (Fig. 6C). Debido a que la densidad máxima de los bloques caídos es un orden de magnitud menor que la densidad máxima de trayectorias la suma no se vería reflejada en el mapa y éste sería prácticamente igual que el de densidad de trayectorias. Este problema se ha corregido multiplicando los valores de densidad de bloques por 10 para así poder visualizar realmente la suma de las densidades (Fig. 6C).

A continuación se van a describir las observaciones más importantes de este análisis en cada sector:

Sector I: En este sector se observa como los bloques caídos se concentran en las partes externas de las laderas noreste, oeste y suroeste quedando las internas y una franja de la suroeste casi sin bloques. La mayor densidad de bloques se observa alrededor de la "Font del Xebret". En cuanto a densidades de trayectorias se observa cómo se concentran en las mismas partes del sector que las de los bloques, quedando las partes internas de la montaña nuevamente casi sin trayectorias de desprendimientos.

Sector II: En este caso la densidad de bloques se observa muy concentrada en la ladera noreste, resultando casi nula en las partes internas y en la ladera suroeste. La mayor densidad de bloques se observa en la ladera

este del “Monasterio de Sant Benet”. En cuanto a la densidad de trayectorias se concentran también en la ladera noreste, siendo esta parte una de las de mayor densidad de trayectorias de toda la montaña. Además, como las trayectorias dan información de actividad reciente, se puede considerar esta parte del sector II como una de las más activas.

Sector IIIa: En cuanto a los bloques caídos, nuevamente las mayores densidades se concentran en la ladera noreste, y nuevamente quedan con densidades casi nulas las partes internas de la montaña y la ladera suroeste. Las densidades de trayectorias también se concentran en la ladera noreste, y como en el sector II, ésta parte sería de las más activas si observamos la densidad de trayectorias.

Sector IIIb: En este sector se dan las mayores densidades en cuanto bloques caídos de toda la montaña. Las densidades se concentran en la ladera externa a la montaña, quedando las partes internas con densidades nulas. En cuanto a las densidades de las trayectorias se concentran también en las laderas externas de la montaña, siendo ésta parte una de las de mayor densidad de trayectorias de la montaña, y por tanto de mayor actividad reciente.

En conjunto se observa cómo las partes internas de la montaña y la parte de la ladera suroeste que va desde El Bruc de Dalt hasta Collbató poseen muy bajas o nulas densidades tanto de bloques caídos como de trayectorias, por lo que esta zona está muy poco afectada por los desprendimientos. Mientras que las partes externas de la montaña de las

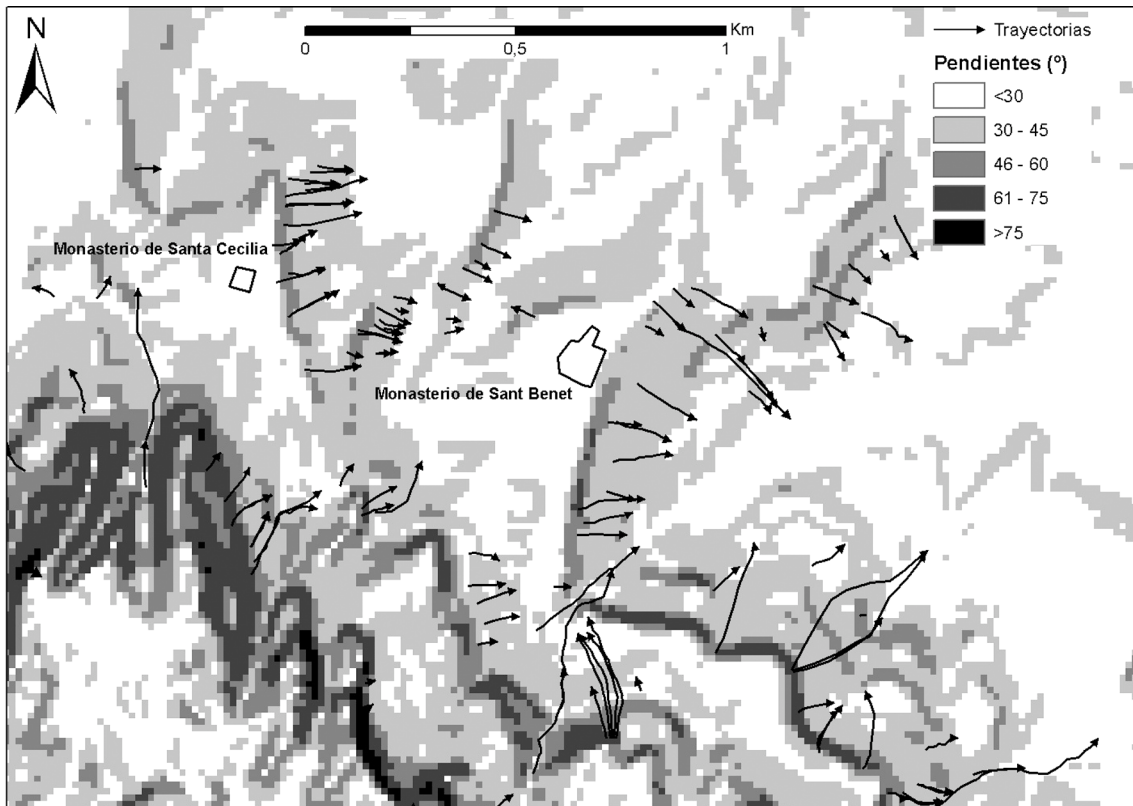


Figura 7. Detalle del mapa de pendientes y trayectorias observadas.
Figure 7. Detail of slope map and observed trajectories.

laderas sureste, noreste y noroeste se encuentran muy afectadas por los desprendimientos debido a la alta densidad de indicadores que se observan. Se podrían destacar los sectores II y IIIb como los más afectados por los desprendimientos.

Otro de los condicionantes indispensables para que se produzcan los desprendimientos son las pendientes. Se ha realizado un mapa de pendientes (Fig. 7) en el que se ha tomado como ángulo mínimo de pendiente para que se produzcan desprendimientos 45° (Corominas et al, 2003; Rendón, 2004; E. Asensio, 2006). Las limitaciones del mapa de pendientes vienen relacionadas con la poca resolución del Modelo Digital del Terreno, que es de $15\text{m} \times 15\text{m}$, y por tanto no representa fielmente la realidad, ya que laderas que deberían resultar verticales o subverticales, resultan con pendientes menores.

En este mapa de pendientes se ha realizado el análisis con el inicio de las trayectorias fotointerpretadas, ya que son éstas las que pueden indicar la posición de las zonas de salida. No se ha convenido hacer con los bloques caídos y con los canchales y conos de derrubios porque éstos solo indican zonas de llegada. Hay que tener en cuenta que las trayectorias a veces no se observan completas, es decir, que no comienzan en la zona de salida o que no terminan en la de llegada. Teniendo en cuenta esto, se observa cómo el 78 % de las trayectorias comienzan en laderas con pendientes de más de 45° , es decir, que el umbral de 45° parece el óptimo y coincide con el comportamiento en cuanto a los desprendimientos en otros tipos de litologías.

Como el umbral de 45° es el óptimo, se ha realizado un mapa con las zonas de pendientes

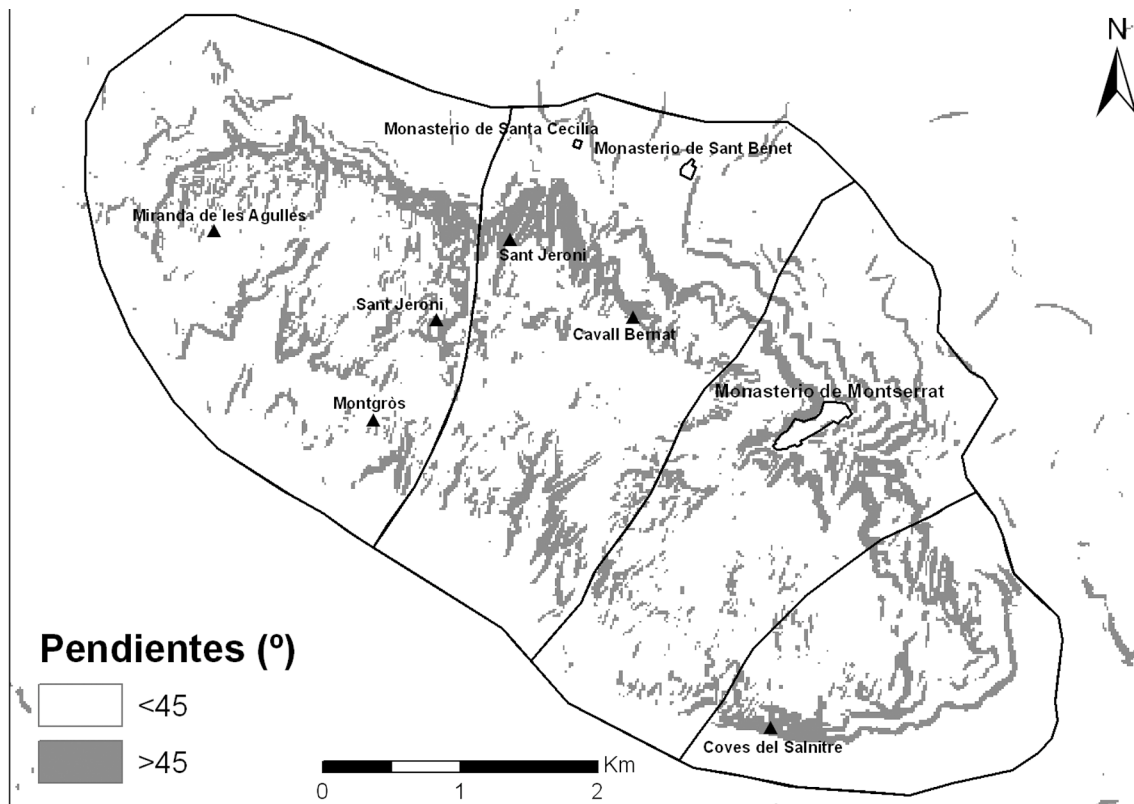


Figura 8. Mapa de pendientes mayores a 45° .
Figure 8. Map of slopes greater than 45° .

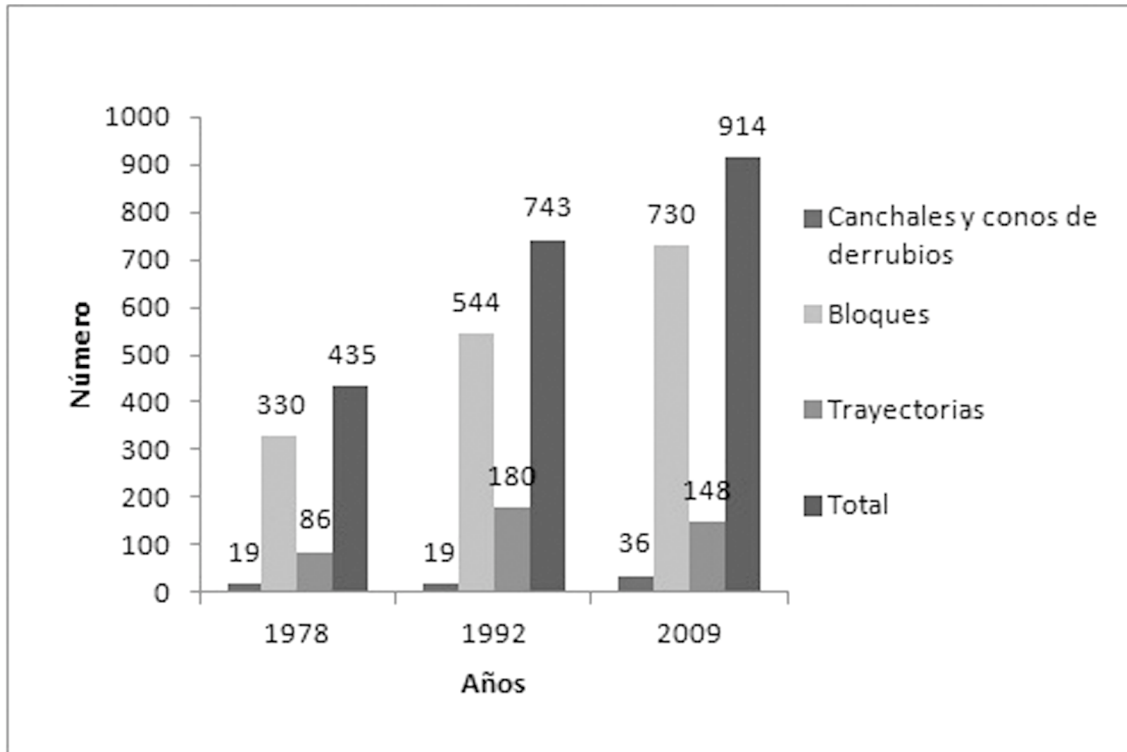


Figura 9. Diagrama con el número de indicadores fotointerpretados por cada año analizado.
 Figure 9. Diagram showing the number of photointerpreted indicators for each analyzed year.

mayores a 45° coloreadas para poder comprobar si coinciden éstas con las de mayor densidad de indicadores en cada sector de la montaña (Fig. 8). Se puede observar como en general las mayores densidades de indicadores se concentran en las laderas externas de las partes NW, NE y SE de la montaña al igual que las pendientes. Pero sin embargo existen zonas importantes de las partes internas de la montaña y de las laderas de la parte SW que aún teniendo pendientes mayores a 45° apenas tienen indicadores. Todo esto señala que la interacción estructura-pendiente es un condicionante importante en las caídas de rocas en la montaña, pero se podría remarcar que con un más alto nivel de control estructural que de relieve. Así se pueden observar zonas con alta pendiente y baja densidad de discontinuidades en las que no existen indicadores como las laderas del Montgròs (Fig. 8); y otras con poca pen-

diente y alta densidad de discontinuidades que poseen valores muy altos de densidad de indicadores como las laderas del sector IIIb (Fig. 8).

3.2. Análisis temporal

Para la realización del análisis temporal de los desprendimientos a partir de los indicadores encontrados en la fotointerpretación se ha confeccionado un diagrama (Fig. 9). Este diagrama representa el número total de cada indicador fotointerpretado (canchales y conos de derrubios, bloques caídos y trayectorias) para cada año correspondiente a una foto aérea u ortofoto (1978, 1992 y 2009). De esta manera se puede realizar una estimación sobre la evolución de los eventos de desprendimientos en las laderas de la montaña

de Montserrat. En cuanto a los canchales y conos de derrubios, se observa un aumento de ellos en la ortofoto de 2009, pero esto es debido al aumento de la calidad y escala de esta foto respecto a las de 1978 y 1992. Ya que este tipo de depósitos de laderas son producto de la dinámica geomorfológica de las laderas a lo largo de miles de años, es muy improbable que en estos cortos intervalos de tiempo analizados aparezcan nuevos depósitos de derrubios. Hay que señalar que el aumento de la escala de la ortofoto de 2009 sólo afecta a este caso, debido al pequeño tamaño de los bloques en los canchales. Realizando el análisis de la cantidad de bloques caídos de más de 3 m³ observados se deduce un aumento considerable en la ortofoto de 2009. En éste caso el aumento del número de bloques es consecuencia directa de la falta de vegetación en las laderas del sector IIIb, es decir, en las fotos de 1978 y 1992 las laderas estaban densamente pobladas por vegetación y ésta cubría la mayoría de los bloques. Mientras que en la foto de 2009, y como consecuencia del incendio que afectó a este sector en 1994 (Apartado 1.4), no se observa una alta densidad de vegetación y por tanto se pueden identificar todos los bloques que en las anteriores estaban cubiertos. También se observa un aumento considerable de bloques caídos realizando la comparación entre las fotos aéreas de 1978 y 1992 el cuál sí que podría ser debido a un cambio en la dinámica geomorfológica de las laderas de la montaña. Por último, la mayor cantidad de trayectorias se observan en la foto aérea de 1992 y en la ortofoto de 2009, en las que se observa un gran aumento respecto a las encontradas en la foto aérea de 1978. Este incremento también puede ser considerado como evidencia de que la actividad de desprendimientos ha aumentado desde 1978 hasta 2009.

En general, a partir de las observaciones de los bloques caídos y de las trayectorias, se desprende un aumento en el número de indicadores respecto a la fotointerpretación de 1978. Es decir, entre la fotointerpretación de 1978 y las de 1992 y 2009 se observa un cam-

bio en el comportamiento de las laderas de la montaña, dando como resultado un aumento en el número de desprendimientos. Mientras que entre las fotointerpretaciones de 1992 y 2009 el comportamiento de las laderas habría sido bastante parecido, dado que no se observa ningún aumento excepcional en el número de indicadores observados.

Para obtener una mejor visión de la actividad de desprendimientos en cada intervalo de tiempo se ha realizado la tasa de desprendimientos por año. Esta tasa se obtiene de dividir el número de trayectorias entre el número de años en los intervalos 1978-1992 y 1992-2009. Se utilizan las trayectorias porque es el indicador que aporta información de la actividad reciente en cada foto y además se asume que una trayectoria corresponde a un solo evento de caída de rocas, sabiendo que por una trayectoria puede haber pasado más de un evento en el tiempo de cada intervalo. El número de trayectorias utilizado para el intervalo 1978-1992 es el de la fotointerpretación de 1992 ya que indica los desprendimientos ocurridos en este intervalo. De la misma manera, para el intervalo 1992-2009 el número de trayectorias utilizado es el correspondiente a la fotointerpretación de 2009. Para el intervalo 1978-1992 (14 años) la tasa es 12,8 desprendimientos/año; y para el intervalo 1992-2009 (17 años) la tasa es 8,7 desprendimientos/año.

Estas tasas pueden ser consideradas también como una aproximación a la frecuencia de caídas de rocas en la montaña de Montserrat, independientemente de la magnitud aunque sí lo suficientemente importantes como para producir cicatrices en la ladera y en la vegetación. Esta frecuencia sería del orden de la decena de desprendimientos por año como se puede desprender del párrafo anterior. Aunque hay que tener en cuenta que habría que profundizar más en futuras investigaciones, ya que habría que conocer también aspectos tan importantes como la magnitud o si en algún año se han dado condiciones espe-

ciales para la ocurrencia de estos como pueden ser temporales extraordinarios de lluvias.

4. Conclusiones

Se puede concluir que de todos los indicadores interpretados los que dan información más valiosa para la realización del análisis son los bloques caídos de más de 3 m³ y las trayectorias. Esto es debido a que en general en la montaña de Montserrat no es común encontrar depósitos del tipo canchal y además estos depósitos en un análisis de este tipo no proporcionan información especialmente relevante. Mientras que los bloques caídos de más de 3 m³ proporcionan información en cuanto al nivel de afección de una ladera por caídas de rocas de una magnitud importante, y las trayectorias son indicadores inequívocos de la actividad reciente en las diferentes laderas afectadas y en los diferentes intervalos temporales analizados.

De todo lo expuesto anteriormente se puede desprender que la montaña en todas sus partes no se encuentra igualmente afectada por el fenómeno de los desprendimientos. A partir de la distribución espacial de los indicadores de desprendimientos antecedentes observados se puede concluir que de manera muy clara las laderas NE y SE son las más afectadas por los desprendimientos, seguida de la ladera NW. Mientras que las zonas internas de la montaña de Montserrat y la ladera SW apenas sufren estos fenómenos ya que casi no se han podido identificar indicadores antecedentes.

También se podría definir a la interacción estructura-pendiente como el principal condicionante para las caídas de rocas. Pero con una mayor influencia de las discontinuidades que de las pendientes, ya que existen zonas de laderas de alta pendiente y baja densidad de discontinuidades en las que no se han identificado indicadores de desprendimientos.

En cuanto a la distribución temporal de los indicadores antecedentes se puede concluir que desde 1978 hasta 2009 el número de desprendimientos de rocas ha aumentado. Si se compara el número de indicadores interpretados en las fotos de 1978 y 1992 se observa un claro aumento de éstos en la interpretación de 1992. Si ahora se compara el número de indicadores interpretados en las fotos de 1992 y 2009 se observa también un aumento de éstos en la interpretación de 2009 pero en menor medida respecto a la comparación de 1978-1992. Además este aumento en el total de indicadores de la ortofoto de 2009 se podría considerar anómalo ya que es debido al gran número de nuevos bloques caídos interpretados en el sector IIIb y que son debidos a la falta de vegetación ocasionada por el incendio de 1994 (apartados 1.4 y 3.2). Por lo que se puede concluir que en la comparación 1978-1992 el número de indicadores aumenta drásticamente, mientras que en la comparación 1992-2009 el número de indicadores se mantiene. Lo que indica que ha habido algún cambio en las condiciones de la montaña que ha dado como resultado un aumento en el número de desprendimientos de rocas desde 1978.

Partiendo de la hipótesis de que los desprendimientos de rocas son fenómenos recurrentes en el tiempo y en el espacio, los mapas de densidad de indicadores antecedentes tienen cierta utilidad como indicadores de zonas que pueden ser afectadas por las caídas de rocas en el futuro. Por tanto señalan las zonas con mayor peligrosidad y que teniendo en cuenta los daños ocasionados en las infraestructuras por los desprendimientos registrados en los documentos técnicos de la Anexo 1, deben ser estudiadas más en detalle con el fin de determinar la susceptibilidad en las laderas y la vulnerabilidad y exposición de las infraestructuras, con el fin último de elaborar un mapa de riesgo a las caídas de rocas en la montaña que permita prevenir esta serie de daños.

Agradecimientos

En primer lugar, mostrar agradecimiento tanto al Institut Geològic de Catalunya como a la empresa Geocat Gestió de Projectes S.A. por facilitar los documentos técnicos utilizados en el presente estudio, y en concreto a Marc Janeras de la empresa Geocat Gestió de Projectes S.A. Este trabajo se ha realizado en el marco del financiamiento de los proyectos del MEC: CGL2010-18609 y del IGC: 2010/OC/319.

Bibliografía

- Abril, M.; Ferran, A.; Sabaté, S.; Sala, A.; Serrasolsas, I. (1987). *Efectes dels incendis forestals en el bosc mediterrani: recuperació del sòl i de la vegetació*. Departament d'Ecologia-Departament de Biologia Vegetal. Facultat de Biologia. Universitat de Barcelona. Parte I, 3-14.
- Alsaker, E.; Gabrielsen, R.H.; Roca, E. (1996). The significance of the fracture pattern of the Late-Eocene Montserrat fan-delta, Catalan Coastal Ranges (NE Spain). *Tectonophysics*, 266, 465-491.
- Asensio, E. (2006). *Anàlisi detallada de la susceptibilitat als desprendiments a la cinglera de Castellfolit de la Roca. Trabajo Final de Carrera*. Dept. de Geodinàmica i Geofísica. Facultat de Geologia. Universitat de Barcelona.
- Church, M.; Stock, R. F.; Ryder, J. M. (1979). Contemporary sedimentary environments on Baffin Island, N.W.T. Canada: debris slope accumulations. *Arctic and Alpine Research*, 11, 371-402.
- Copons, R. (2007). *Avaluació de la perillositat de caigudes de blocs rocósos al Solà d'Andorra la Vella*. Monografies del CENMA, Institut d'Estudis Andorrans, 213 pp.
- Corominas, J.; Copons, R.; Vilaplana, J. M.; Altimir, J.; Amigó, J. (2003). Integrated landslide susceptibility analysis and hazard assessment in the Principality of Andorra. *Natural Hazards*, 30, 421-435.
- Cruden, D. M. ; Varnes, D. J. (1996). Landslide types and processes. En: *Landslides, investigation and mitigation* (A.K. Turner; R.L. Schuster, eds.). Special Report 247. Transportation Research Board, National Research Council, Washington D.C., 36-75.
- Davies, M.C.R.; Hamza, O.; Harris, C. (2001). The effect of rise in mean annual temperature on the stability of rock slopes containing ice-filled discontinuities. *Permafrost and Periglacial Processes*, 12, 137-144.
- Density calculations (2007). ArcGIS 9.2 Desktop Help. [en: http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.2/index.cfm?id=4743&pid=4742&topicname=Density_calculations], última consulta: 02/05/2011.
- Eismann, H.T.; Abele, G. (2001). *Dynamics of rockslides and rockfalls*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg and New York, 316.
- Evans, S.G.; Hungr, O. (1993). The assessment of rockfall hazards at the base of talus slopes. *Canadian Geotechnical Journal*, 30, 620-636.
- Fernández, M.; Vilaplana, J.M. (2004). Factores meteorológicos que desencadenan desprendimientos de rocas en Vall de Núria. En: *Riesgos naturales y antrópicos en geomorfología* (G. Benito; A. Díez Herrero, eds.). Actas de la VIII Reunión Nacional de Geomorfología, Toledo, vol. 2, 389-401.
- Gabarró, X. (1996). *Propagació de desprendiments en roca. Influència de les característiques del vessant i dels incendis. Aplicació a Montserrat*. Proyecto de especialidad. Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Grau, F. (2003). *Efecte dels obstacles i característiques dels vessants sobre l'abast dels desprendiments. Aplicació al mètode de l'angle d'abast*. Proyecto de especialidad. Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona. Universitat Politècnica de Catalunya, 55 pp.
- Guzzetti, F.; Reichenbach, P.; Ghigi, S. (2004). Rockfall hazard and risk assessment along a transportation corridor in the Nera Valley, Central Italy. *Environmental Management*, 34(2), 191-208.
- Hoek, E.; Bray, J. (1981). *Rock slope engineering*. Third edition. Institution of Mining and Metallurgi. Chapman&Hall, London.
- Hungr, O.; Evans, S.G.; Bovis, M.J.; Hutchinson, N. J. (2001). A review of the classification of landslides of the flow type. *Environmental and Engineering Geoscience*, 7, 221-238.
- Marquès, M. A. (2001). Impacto en el medio físico de unas lluvias extremas en el macizo de Montserrat. *Tecnología del agua*, 213, 42-50.
- Martín, E. (2002). *Anàlisi de susceptibilitat a fluxos al Parc Natural de Montserrat*. Trabajo de investigación de Master. Departament de Geodinàmica i Geofísica. Facultat de Geologia. Universitat de Barcelona.
- Matsuoka, N.; Sakai, H. (1999). Rockfall activity from an alpine cliff during thawing periods. *Geomorphology*, 28, 309-328.
- Rapp, A. (1960). Recent development of mountain slopes in Kärkevagge and surroundings, Northern Scandinavia. *Geografiska Annaler*, 42A, 65-200.
- Rendón, A. (2004). *Evaluación y zonificación de la peligrosidad geológica por desprendimiento de rocas en Vall de Nuria, Pirineos Orientales, España*. Tesis doctoral. RISK-NAT-Departament de Geodinàmica i Geofísica. Facultat de Geologia. Universitat de Barcelona, 249.
- Ribera, R. (1992). *Caminant a Montserrat*. El Massis. Publicacions de l'Abadia de Montserrat, 206 pp.
- Sass, O. (2005). Temporal of rockfall in the Bavarian Alps, Germany. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 37, 564-573.
- Varnes, D.J. (1978). Slope movements types and processes. In: *Landslides: Analysis and control* (R.L.

- Schuster; R.J. Krizek, ed). Special Report 176. Transportation Research Board. National Research Council, Washington D.C., 11-33.
- Vilaplana, M.; Busquets-Buezo, P. (2000). Geozona 224 Montserrat. Departament de Medi Ambient i Habitatge, Generalitat de Catalunya. [en: http://mediambient.gencat.cat/cat/el_medi/natura/sistema_informacio/inventari_interes_geologic/descriptiva/224_descrip.pdf] última consulta: 08/12/2010.
- Whalley, W.B. (1984). Rockfalls. En: *Slope Instability* (D. Brundsen; D.B. Prior, eds.). Wiley, Chichester, 217-256.
- Anexo 1. Lista de documentos técnicos cedidos por el Institut Geològic de Catalunya (IGC) y la empresa Geocat Gestió de Projectes S.A.**
- Dictamen sobre el risc de desprendiments a la zona de Cap de Bou del terme municipal de Monistrol de Montserrat.; Servei Geològic de Catalunya (actualmente IGC); 19/07/1994.
- Dictamen sobre el risc de caiguda de pedres al llarg del camí de la Santa Cova de Montserrat.; Servei Geològic de Catalunya (actualmente IGC); 13/09/1994.
- Nota sobre el risc de desprendiments d'una gran pedra situada al Pla de les Bruixes a la muntanya de Montserrat.; Servei Geològic de Catalunya (actualmente IGC); -/01/1995.
- Avanç de l'informe sobre els desprendiments de pedres produïts a Monistrol de Montserrat el dia 9 de Febrer de 1996.; Servei Geològic de Catalunya (actualmente IGC); 13/02/1996.
- Els desprendiments de pedres de Monistrol de Montserrat.; Servei Geològic de Catalunya (actualmente IGC); 22/04/1996.
- Nota sobre el risc de caiguda de pedres en el camí de la Santa Cova de Montserrat.; Servei Geològic de Catalunya (actualmente IGC); 28/02/1997.
- Informe sobre l'estabilitat global de la Canal de Sant Jeroni de Montserrat. Bages.; Servei Geològic de Catalunya (actualmente IGC); 31/07/2000.
- Anàlisi de la perillositat geològica al Parc Natural de Montserrat associada als aiguats del 10 de Juny del 2000.; Servei Geològic de Catalunya (actualmente IGC) y M. A. Marquès (Universitat de Barcelona); -/2001.
- Nota tècnica sobre l'actual estat d'estabilització del massís rocós origen dels desprendiments que van afectar al camí vell de Sant Miquel l'any 1991 (Montserrat).; Servei Geològic de Catalunya (actualmente IGC); 26/02/2001.
- Informe sobre l'estat actual d'estabilitat dels vessants de la carretera BP-1103 (Can Massana - Montserrat).; Servei Geològic de Catalunya (actualmente IGC); 04/05/2001.
- Projecte d'estabilització del massís rocós origen dels desprendiments de l'any 1991 sobre el Camí de Sant Miquel i el Viacrucis de Montserrat; Servei Geològic de Catalunya (actualmente IGC) y RSE (actualmente Geocat Gestió de Projectes S.A.); -/03/2003.
- Estudi geotècnic del masís rocós origen dels desprendiments que ven afectar al Camí Vell de Sant Miquel (Montserrat); Servei Geològic de Catalunya (actualmente IGC); 12/12/2003.
- Nota sobre el desprendiment esdevingut el 29/01/06. Cremallera de Montserrat. Treballs urgents; RSE (actualmente Geocat Gestió de Projectes S.A.); 31/01/2006.
- Nota sobre el vol de reconeixament efectuat al funicular de Sant Joan i al desprendiment del camí dels Degotalls a Montserrat (Collbató i Monistrol de Montserrat).; Servei Geològic de Catalunya (actualmente IGC) y RSE (actualmente Geocat Gestió de Projectes S.A.); 16/02/2006.
- Nota sobre el vol de reconeixament efectuat als desprendiments del camí de Sant Miquel i el camí dels Degotalls a Montserrat (Collbató i Monistrol de Montserrat). Inspecció per incidència; Servei Geològic de Catalunya (actualmente IGC) y RSE (actualmente Geocat Gestió de Projectes S.A.); 16/02/2006.
- Nota sobre el desprendiment de la paret dels Degotalls del dia 2 de gener de 2007.; IGC y Geocat Gestió de Projectes S.A.; 02/01/2007.
- Actuació d'urgència a la paret dels Degotalls a la muntanya de Montserrat arrel del desprendiment del 2 de gener de 2007; IGC y Geocat Gestió de Projectes S.A.; -/2007.