



*El factor exposición  
en el análisis del*  
**RIESGO GEOLÓGICO**

APLICACIÓN A LOS DESPRENDIMIENTOS DE ROCA EN LA MONTAÑA DE MONTSERRAT



La ONU estima que el gran aumento del riesgo de desastres se debe, sobre todo, al rápido incremento de la exposición. Teniendo en cuenta el interés de la realidad territorial, resulta imprescindible avanzar en el conocimiento y la cuantificación de la exposición a los fenómenos naturales potencialmente peligrosos con el fin de minimizar los daños en las personas y los bienes. La elevada vulnerabilidad humana de determinados escenarios territoriales hace indispensable un buen análisis del factor exposición para poder evaluar el riesgo geológico y así decidir las acciones de mitigación más apropiadas.

Por **SARA FONTQUERNI**. Máster en Geología, especialidad en Riesgos Geológicos (UB-UAB). e-mail: sarafontquerni@ub.edu. **JOAN M.**

**VILAPLANA**. Profesor de la Universitat de Barcelona (UB). Doctor en Ciencias Geológicas (UB). e-mail: nue.vilaplana@ub.edu. **MARTA GUINAU**. Profesora de la Universitat de Barcelona. Doctora en Ciencias de la Tierra (UB). **MANUEL J. ROYAN**. Máster en Geología, especialidad en Riesgos Geológicos (UB-UAB). **GRUPO DE INVESTIGACIÓN RISKMAT**. Dept. de Geodinàmica i Geofísica (UB), Facultat de Geologia, Barcelona.

La montaña de Montserrat está situada a 50 kilómetros al noroeste de Barcelona entre las comarcas de Anoia, Baix Llobregat y Bages. En esta montaña se sitúa el santuario y monasterio benedictino dedicado a la Virgen de Montserrat (figura 1). El acceso al monasterio y a las distintas instalaciones del recinto se puede realizar por carretera, tren-cremallera, teleférico o caminando.

La montaña de Montserrat es una unidad geográfica única en el medio natural de Cataluña. Constituye una estructura perfectamente individualizada por la singularidad de sus rasgos geológicos y geomorfológicos. Estos rasgos la convierten en un macizo único en el mundo especialmente por sus formas tan singulares y espectaculares. La montaña fue declarada oficialmente parque natural en 1987 para garantizar su conservación, y es el Patronato de la Montaña de Montserrat (PMM) quien lo gestiona. Peregrinos, excursionistas, escaladores y gran cantidad de turistas concentran un gran número de visitantes tanto en el monasterio como en el conjunto del Parque Natural de la Montaña de Montserrat (PNMM).

Geológicamente, el macizo de Montserrat forma parte de la cuenca del Ebro, y está situado en su extremo SE, adosado a la cordillera prelitoral de las Cadenas Costeras Catalanas (figura 2). Las ro-



Figura 1. Vista panorámica de la vertiente este de la montaña de Montserrat, donde se ubican el monasterio de Montserrat y la población de Monistrol de Montserrat.



Figura 2. Situación geográfica y geológica de la montaña de Montserrat. Modificado de Gibert, J.M. et al. (2007)<sup>11</sup>.

cas que constituyen la montaña son conglomerados, intercalados con lutitas y areniscas, con una estratificación subhorizontal. Estos materiales se encuentran afectados por una red subvertical de tres familias principales de fracturas que mayoritariamente son diaclasas.

Las laderas del Parque Natural de la Montaña de Montserrat se encuentran afectadas por caídas de rocas, cuyo volumen suele superar los 1.000 m<sup>3</sup> por desprendimiento. Este fenómeno constituye un riesgo geológico importante para las infraestructuras existentes y

Las laderas de la montaña de Montserrat se encuentran afectadas por caídas de rocas. Este fenómeno constituye un riesgo geológico importante para las infraestructuras existentes y para todos los visitantes de la montaña

para todos los visitantes de la montaña barcelonesa. En el año 2011 más de dos millones de personas visitaron el recinto del monasterio de Montserrat, y en días de máxima afluencia solo en el tren-cremallera se pueden registrar hasta 4.000 usuarios, descendiendo a unos 400 en las jornadas de menor concurrencia.

En los últimos cinco años se han producido desprendimientos de rocas en zonas muy frecuentadas por los visitantes. El propio monasterio (ver figura 3), la principal carretera de acceso (ver figura 4), el aparcamiento de vehículos y el tren-cremallera se han visto seriamente afectados por este fenómeno geológico. En consecuencia, y de cara a la caracterización del problema y a la búsqueda de soluciones, el Institut Geològic de Catalunya (IGC) y el grupo de investigación RISK NAT de la Universitat de Barcelona

## El origen de la montaña de Montserrat

### BREVE HISTORIA GEOLÓGICA

Según Gibert, J.M. *et al.* (2007)<sup>[1]</sup>, la formación del macizo de Montserrat empezó durante el Bartonianense-Priabonense (40-34 MA), debido al levantamiento de la Cadena Costero Catalana situada en el margen meridional de la cuenca del Ebro. En la zona actual de Montserrat se sedimentó un gran delta de dirección SE-NW, donde se identifican facies de abanico proximal de hasta 1.300 m de potencia de conglomerado que alternan con capas de areniscas y lutitas (abanico aluvial distal). Vilaplana d'Abadal y Busquets (2007)<sup>[2]</sup>.

En el Rupeliense (34-29 MA), según Alsaker *et al.* (1996)<sup>[3]</sup>, el propio peso de los sedimentos empezó a fracturar todo el conjunto, dando un sistema de diaclasas paralelas con orientación NNE-SSW. En el Oligoceno medio y superior (30-23 MA), el mismo autor identifica tres episodios de fracturación debidos a la tectónica y asociados a la fase compressiva de la cordillera prelitoral:

1. Reactivación del sistema de diaclasas NNE-SSW, comportándose algunas de ellas como fallas generalmente con poco desplazamiento.
2. Sistema de diaclasas conjugadas con orientación NE-SW y NW-SE, resultado de una compresión de dirección N-S.
3. Y finalmente, un tercer sistema de diaclasas de orientación WNW-ESE, y por tanto

perpendicular al primer sistema (NNE-SSW).

Entre el Oligoceno superior y el Mioceno inferior (25-20 MA) el macizo se elevó, coincidiendo con el inicio de una fase extensional de la península Ibérica. Con ello se produjo una segunda reactivación del primer sistema de diaclasas (NNE-SSW), que en algunos casos se comportaron como fallas, aunque con poco desplazamiento.

### EL MODELADO GEOMORFOLÓGICO

El levantamiento exhumó el macizo, quedando expuesto a los agentes meteorológicos, que lo han meteorizado y erosionado durante los últimos millones de años. Debido al conjunto de factores geológicos existentes (familias de diaclasas, litología, matriz carbonatada de los conglomerados, etc.), el agua tanto de escorrentía superficial como subterránea ha karstificado los conglomerados modelando un relieve muy peculiar, dando lugar a las características formas del relieve montserratino (grandes paredes, agujas, pináculos, canales y corredores). Este relieve hace de Montserrat un paisaje geológico de alto valor ambiental, reconocido internacionalmente (ver figura A).

El cemento carbonatado que cohesiona los cantos se disuelve lentamente por la escorrentía superficial y subterránea de las aguas. A diferencia de los macizos kársticos en rocas calizas,



**Figura A.** El singular modelado geomorfológico del macizo es conocido con la expresión relieve montserratino. A- Fotografía de paisaje de la montaña de Montserrat. B- Figura que ilustra la evolución del modelado. Fuente: modificado de Martínez, A. (2006)<sup>[4]</sup>.



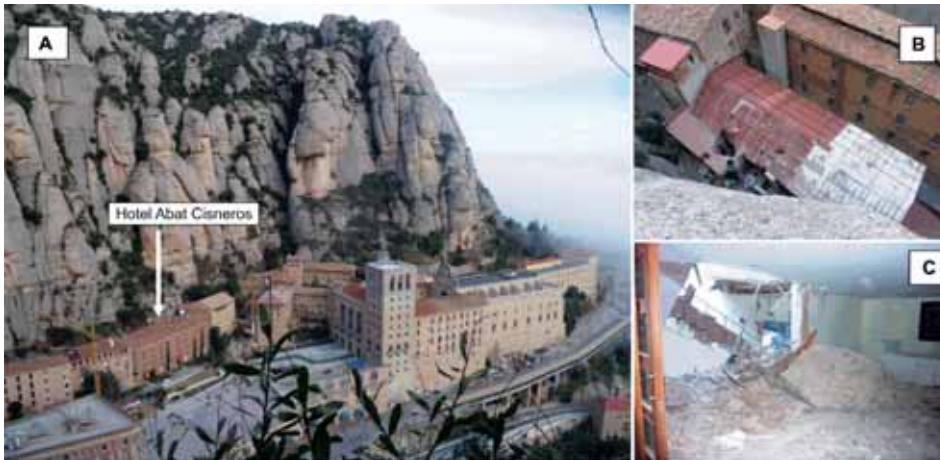
**Figura B.** Izquierda, aspecto que presentan los diferentes materiales en paisaje. Derecha, detalles de los mismos.

Montserrat no presenta grandes redes de circulación de agua subterránea (Vilaplana d'Abadal y Busquets (2007)<sup>[2]</sup>). La disolución del cemento tiene dos efectos morfológicos principales:

1. La circulación de agua por las diaclasas erosiona las fisuras, abriéndolas y separándolas, individualizando grandes ma-

sas de roca de geometría alargada y redondeada.

2. La escorrentía del agua por la superficie de las paredes libera los cantos de su matriz y desgaja grandes lascas de roca, originando así abundantes fragmentos de roca inestable susceptibles de provocar desprendimientos.



**Figura 3.** A-Vista de la pared del monasterio de Montserrat donde se ubica el hotel Abat Cisneros. B y C- Daños en el hotel como consecuencia del desprendimiento de diciembre de 2010; en B se observan los daños en la cubierta y en C el estado en el que quedó la sala de congresos del hotel. Fuente: B y C del IGC (2011) <sup>[5]</sup>.

(UB) empezaron a realizar diversos estudios sobre los desprendimientos de rocas que afectan a la montaña.

La gran mayoría de los trabajos técnicos realizados han ido encaminados a conocer el funcionamiento de estos fenómenos en las zonas donde se han producido accidentes para la posterior propuesta y ejecución de obras de defensa.

Hasta el presente no se había abordado ningún análisis en profundidad del riesgo geológico que representan las caídas de rocas en todo el ámbito del parque natural.

## Los desprendimientos: un riesgo geológico a considerar

Los desprendimientos rocosos son uno de los fenómenos geomorfológicos más comunes en escarpes montañosos (Coppens y Vilaplana, 2008) <sup>[6]</sup>. Es un fenómeno muy frecuente y se considera el movimiento de ladera que alcanza mayores velocidades (Varnes, 1978) <sup>[7]</sup>, llegando a registrar energías de impacto muy elevadas (Agliardi y Crosta, 2003 y 2009) <sup>[8 y 9]</sup>.

La peligrosidad natural se considera como la probabilidad o la posibilidad de que pueda ocurrir un fenómeno natural, potencialmente peligroso, de determinada magnitud en un lugar concreto y en un periodo de tiempo determinado. El riesgo natural (en este caso el riesgo geológico) se evalúa de acuerdo a la probabilidad de daños debidos a un fenómeno natural en un lugar concreto y en un periodo de tiempo determinado (Vilaplana y Payàs 2008) <sup>[10]</sup>.

Hay un gran número de estudios sobre caídas de bloques (Frattini *et al.* 2008 <sup>[11]</sup> y Stoffel *et al.* 2005 <sup>[12]</sup>), pero pocos son los autores que abordan el estudio de la exposición y la vulnerabilidad a este fenómeno (Ferlisi *et al.* 2012 <sup>[13]</sup>).

MARTES, 30 DICIEMBRE 2008

VIVIR

### LOS EFECTOS DEL TEMPORAL



Vista del desprendimiento de rocas que ha cortado el acceso por carretera y cremallera

## Montserrat no tendrá tren ni carretera en dos semanas

Las previsiones apuntan a que, una vez cese el mal tiempo, se tarde unos ocho días en recuperar los coches aparcados

ALBA FELIP  
Matarra

El desprendimiento de rocas que se produjo el domingo en Montserrat obligará a mantener cerrados los accesos al santuario por carretera y tren como mínimo quince días, siempre y cuando las condiciones meteorológicas den una tregua y se puedan iniciar los trabajos de limpieza.

Responsables de la Generalitat y del patronato de la Muntanya de Montserrat acordaron ayer los trabajos que se deberán realizar para restablecer el acceso por carretera y cremallera al monas-

terio, para volver a disponer de su vehículo. Este es el caso de la familia Montilla, de Mallorca, cuyos miembros, que se encontraban entre las casi 2.000 personas que el domingo tuvieron que ser evacuadas con el teleférico, debían de regresar a la isla aquella misma noche.

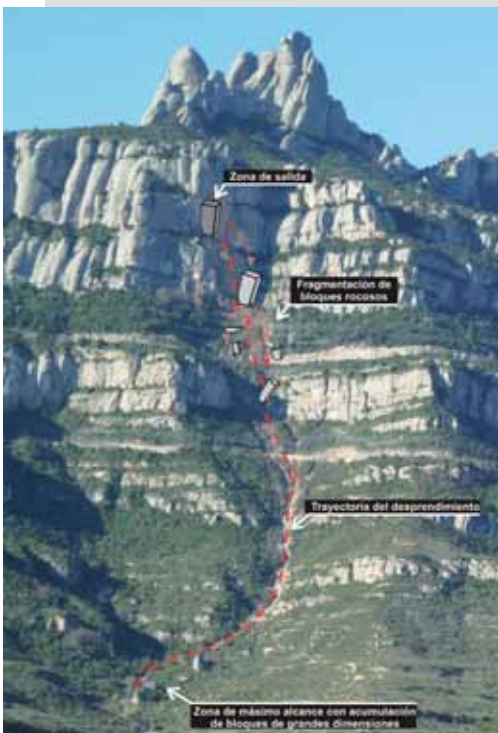
De momento, la fecha para que Montserrat retome la normalidad no está garantizada. El secretario de Mobilitat, Mansel Nadal, explicó ayer que primero se actuará sobre la zona de rocas en la cima de la montaña, más tarde en la calzada y, finalmente, en el tren cremallera, ya que los trabajos en la carretera, que se encuentra a mayor altitud, podrían provocar nuevos deslizamientos. También la lluvia puede ocasionar nuevos movimientos. Más adelante, el patronato deberá realizar un plan global de seguridad para toda la montaña y analizar todos los puntos vulnerables a nuevos desprendimientos. El plan será financiado por el Gobierno catalán. "Montserrat es una prioridad para el pueblo de Catalunya", concluyó Nadal, que añadió que la naturaleza del macizo, formado por "conglomerados", impide una seguridad absoluta.

Con el de domingo, son tres ya los desprendimientos de roca en sólo dos meses. Estos incidentes, sumado a que la escalada está de vacaciones, han contribuido a disminuir considerablemente el número de turistas en la montaña agredida, según han confirmado desde Montserrat.

**Figura 4.** Los desprendimientos de roca aíslan la montaña de Montserrat. Desprendimiento del día 28 de diciembre de 2008. Fuente: *La Vanguardia*, 30 de diciembre de 2008, página 5, Vivir.

## Los desprendimientos

Un desprendimiento de rocas es toda masa rocosa que se separa de una ladera o escarpe, desplazándose y fragmentándose ladera abajo mediante caída libre y/o rebotando y/o rodando. En las áreas afectadas por desprendimientos se distinguen tres zonas: la zona de salida (en el escarpe rocoso); la zona de trayecto que es por donde la roca circula, impacta,



**Figura C.** Ladera afectada por un desprendimiento rocoso donde se identifican sus zonas principales.

rebota y se fragmenta; y la zona de llegada donde los fragmentos de roca se paran y se acumulan formando un depósito de derrubios (Figura C).

Básicamente existen tres conjuntos de factores que intervienen directamente en la movilización de los bloques en las laderas rocosas:

- Factores intrínsecos del macizo rocoso que condicionan los volúmenes y los puntos de salida de los desprendimientos, como es el caso de la presencia, disposición y geometría de los planos de discontinuidad.
- Factores degradantes de la roca, correspondientes a los factores externos a la ladera que preparan la roca para su futura inestabilización y rotura. Intervienen en la degradación de los planos de discontinuidades y en la alteración de la superficie de la ladera, como pueden ser la presencia y la circulación de agua, la existencia de heladas, los cambios de temperatura por la insolación o por incendios forestales.
- Factores desencadenantes que inicializan la rotura e inestabilizan finalmente las masas rocosas, como pueden ser determinados episodios de lluvia que provocan la infiltración abundante de agua en las discontinuidades, la acción del hielo en las fisuras, la sismicidad, los temporales de viento, el paso de animales, etc.

En la bibliografía existente la mayoría de trabajos se centran en la evaluación del factor peligrosidad y solo en algunos casos se evalúa el riesgo asignando valores de exposición y vulnerabilidad (Corominas *et al.* (2005) <sup>[14]</sup>), siendo escasos los estudios que desarrollan la evaluación de la exposición. Sin embargo, algunos autores abordan su definición y cuantificación, como es el caso de Peduzzi *et al.* (2002) <sup>[15]</sup>, que definen el término exposición física como la combi-

nación de la frecuencia de un peligro y la población expuesta. Otros autores como Bell y Glade (2004) <sup>[16]</sup> agrupan vulnerabilidad y exposición, definiéndolos como elementos en riesgo.

La vulnerabilidad es el grado de pérdida de un elemento en la zona afectada por el fenómeno (Fell *et al.* (2008) <sup>[17]</sup>). Los principales daños pueden ser estructurales, funcionales y sociales. Los procedimientos para evaluar la vulnerabilidad en el caso de caída de rocas aún

se encuentran en desarrollo (Mavrouli y Corominas (2010) <sup>[18]</sup>). Aun así, dos factores principales controlan la cantidad de daños producidos por un desprendimiento de rocas: la intensidad de impacto y la naturaleza del elemento afectado (Corominas *et al.* (2005)) <sup>[14]</sup>.

La frecuencia de ocurrencia de un fenómeno peligroso puede expresarse cartográficamente mediante mapas de zonificación de frecuencia, de manera que se delimitan zonas geográficas y se clasifican en clases según la frecuencia de ocurrencia del fenómeno. Diferentes grupos de trabajo suizos han redactado normas para el análisis y la clasificación de la frecuencia de ocurrencia de los movimientos de ladera (Heinimann *et al.*, 1998 <sup>[19]</sup>; Lateltin, 1997 <sup>[20]</sup>; Raetzo *et al.*, 2002 <sup>[21]</sup>). Los últimos prefieren utilizar el término de probabilidad de ocurrencia en lugar de frecuencia o periodo de retorno. En Corominas *et al.* (2003) <sup>[22]</sup> se utiliza el concepto de periodo de retorno en años y se define como el tiempo medio esperado entre dos acontecimientos consecutivos de magnitud similar.

## Objetivos del estudio

El objetivo principal del trabajo es evaluar y cartografiar la exposición a los desprendimientos de roca de los elementos vulnerables en el Parque Natural de la Montaña de Montserrat. Este objetivo principal conlleva los siguientes objetivos específicos. En primer lugar, consideramos fundamental, por la aportación innovadora que representa, la realización de una propuesta metodológica para evaluar el factor exposición a los desprendimientos dentro del análisis del riesgo geológico. En segundo lugar, se pretende aplicar la metodología creada a la realidad de la montaña de Montserrat, abarcando gran parte del parque

**Este proyecto propone una metodología para evaluar la exposición a los desprendimientos de acuerdo al producto de la frecuencia de ocurrencia del fenómeno por una función de exposición del elemento vulnerable**

natural y centrando el ámbito territorial del estudio en las zonas con los principales elementos vulnerables expuestos. Este segundo objetivo específico requiere un tratamiento del estudio a tres niveles. Primero es necesario identificar, inventariar y clasificar por tipologías los diferentes elementos vulnerables (permanentes / temporales, estructurales / socioculturales / humanos/ etc.). Luego se debe realizar el análisis del factor exposición. Y, finalmente, para visualizar territorialmente los resultados, es necesario realizar una cartografía del grado de exposición de los elementos vulnerables.

**Metodología desarrollada**

El riesgo se puede estimar como el producto de la peligrosidad por la exposición y por la vulnerabilidad en un determinado periodo de tiempo. Para los desprendimientos de roca, Varnes (1978) [7] ya propuso la siguiente ecuación:

$$R = H \times E \times V \times C \quad (1)$$

Donde:

**H:** peligrosidad o probabilidad potencial de una caída de roca de magnitud determinada.

**E:** exposición de un elemento o un conjunto de elementos en riesgo por caída de rocas.

**V:** vulnerabilidad de los elementos expuestos.

**C:** valor de los elementos expuestos.

La peligrosidad del fenómeno se define a partir de la frecuencia de ocurrencia y de su intensidad o magnitud (energía). Para el diseño de la metodología se

ha asumido que la vulnerabilidad (capacidad de ser dañado) va directamente ligada a la energía del fenómeno y que la exposición de los elementos vulnerables tiene relación directa con la frecuencia de ocurrencia (posibilidad de encuentro entre el fenómeno y el elemento).

Este proyecto tiene como objetivo principal evaluar el grado de exposición a los desprendimientos y se propone una metodología para evaluar la exposición según el producto de la frecuencia de ocurrencia del fenómeno por una función de exposición del elemento vulnerable.

$$E = F \times f(e_v) \quad (2)$$

Donde:

**E:** exposición para una tipología de elemento vulnerable.

**F:** frecuencia de ocurrencia de un fenómeno potencialmente peligroso.

**f(e<sub>v</sub>):** función de exposición, específica para cada tipología de elemento vulnerable.

La frecuencia de ocurrencia de un fenómeno peligroso en este trabajo se expresa cartográficamente mediante mapas de zonificación de frecuencia, de manera que se delimitan zonas geográficas y se clasifican en clases (alta, media, baja, muy baja).

La función de exposición, f(e<sub>v</sub>), tiene en cuenta las características propias del elemento que se quiere estudiar, como puede ser la velocidad a la que el elemento puede cruzar la zona afectada por un fenómeno peligroso o el número de vehículos que circulan por una vía.

La metodología que se propone para la cuantificación de la exposición a escala 1:25000 tiene en cuenta la distribución espacial de la frecuencia de ocurrencia del fenómeno y las características propias del elemento vulnerable, dando el mismo peso a los dos términos. Así, la propuesta realizada se asemeja conceptualmente a la de Peduzzi *et al.* (2002) [15], que define el término exposición física como la combinación de la frecuencia de un peligro y la población expuesta.

El cálculo del grado de exposición se basa en el flujo metodológico esquematizado en la figura 5, que consta de seis fases:

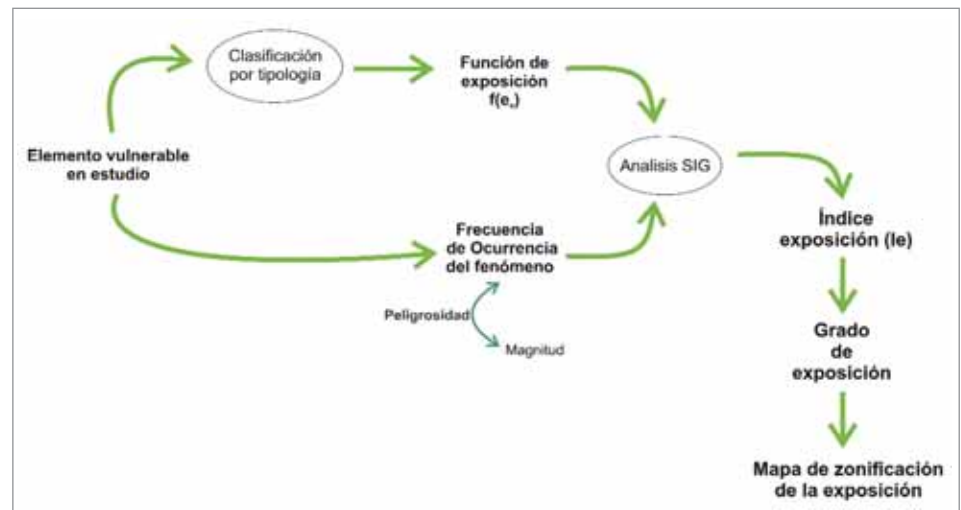


Figura 5. Flujo metodológico para el análisis del grado de exposición de los elementos vulnerables.

**Tabla 1.** Clasificación por tipologías de los elementos vulnerables existentes que se evalúan en este proyecto según las características comunes que comparten.

Tipología elemento	Elementos específicos que se consideran
Vehículo en movimiento	– Coches, autocares y motos que circulan por una carretera. – Tren-cremallera, funiculares y ferrocarriles que circulan por una vía.
Personas en vehículos en movimiento	– Personas en coches, autocares y motos que circulan por una carretera. – Personas en tren-cremallera y funicular que circulan por una vía.
Personas en caminos	– Personas usuarias de un camino (excursionistas).
Elementos permanentes	– Edificios permanentes (monasterios, edificios residenciales, ermitas, estaciones de tren y de funicular, edificios industriales, equipamientos, depósitos de agua, etc.).
Personas en edificios	– Personas que ocupan edificios permanentes.

1. Identificación del elemento potencialmente afectado que se quiere estudiar.
2. Zonificación de la frecuencia de ocurrencia del fenómeno en la zona de estudio.
3. Diseño de la función de exposición específica para el elemento en estudio.
4. Obtención del índice de exposición, que es el producto de la frecuencia de ocurrencia del fenómeno por la función de exposición del elemento vulnerable mediante análisis SIG con el programa ArcGis de ESRI.
5. Obtención del grado de exposición agrupando en categorías los valores numéricos del índice de exposición obtenidos para el conjunto de elementos analizados.
6. Realización del mapa de zonificación de la exposición.

En los siguientes subapartados de este capítulo se explica sintéticamente cómo se desarrolla cada uno de estos pasos.

#### **a. Tipología de elementos vulnerables**

Una vez identificados los elementos vulnerables existentes en la zona de estudio, se clasifican teniendo en cuenta su

morfología espacial y su presencia temporal. A partir de esta primera clasificación se identifican las particularidades de los elementos vulnerables y se reagrupan aquellos que comparten características similares (tabla 1). Para el cálculo de la exposición se ha considerado separadamente el conjunto de elementos sin personas y en una fase posterior estos elementos con personas.

#### **b. Zonificación de la frecuencia de ocurrencia del fenómeno**

En la fase de desarrollo de la metodología, y teniendo en cuenta la escala 1:25.000 del trabajo, se ha decidido utilizar e incorporar al proceso de análisis la información existente del Mapa para la Prevención de Riesgos Geológicos a escala 1:25:000 (MPRG25M), realizado por el IGC, donde la peligrosidad se define como una relación según la magnitud y frecuencia/actividad del fenómeno.

**La función de exposición del elemento vulnerable,  $f(e_v)$ , tiene en cuenta las características del elemento en estudio que afectan a la exposición y es única para cada tipología de elemento**

En la elaboración del MPRG25M del IGC, además de la frecuencia de salida (de rotura y caída del bloque), también se ha considerado la de alcance. La probabilidad de llegada de un bloque desprendido a determinado punto de la zona de trayecto disminuye a medida que nos alejamos del área fuente. En la zona de salida y próxima al escarpe, el porcentaje de trayectorias será más elevado para todos los volúmenes de bloques y la frecuencia de alcance será alta y se asemejará a la de salida. En cambio, cuando más nos alejamos del pie del escarpe solo es posible la llegada de los bloques más grandes y la frecuencia de alcance será menor.

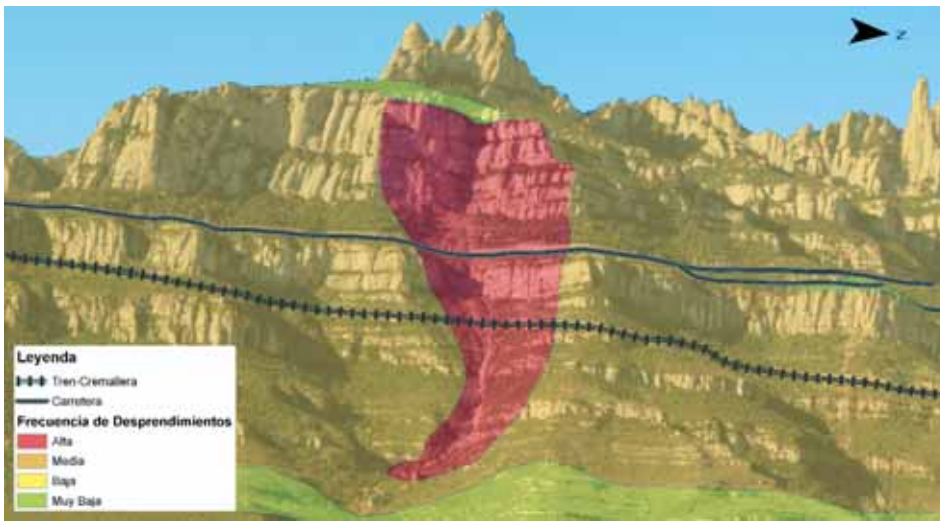
Se han asignado los grados de frecuencia de ocurrencia a los polígonos creados en el MPRG25M por el IGC según la metodología aplicada para su confección, la información de campo recopilada por Geocat, los conocimientos de la zona y las observaciones *in situ*. Así, se definen cuatro grados de frecuencia de ocurrencia relativa del fenómeno: alta, media, baja y muy baja (ver figura 6).

Adoptar la zonificación de frecuencias a partir de un trabajo previo ha condicionado la aplicación de la metodología desarrollada. También ha definido los límites de grado de exposición de los elementos evaluados ya que asumen unas condiciones de partida preestablecidas: la zonificación de peligrosidad definida en el MPRG25M.

#### **c. Función de exposición del elemento vulnerable $f(e_v)$**

La función de exposición del elemento vulnerable,  $f(e_v)$ , tiene en cuenta las características del elemento en estudio





**Figura 6.** Fotografía de la ladera oriental de la montaña de Montserrat donde se ha superpuesto la zonificación de frecuencia de desprendimientos y se ubica el trazado de la carretera que da acceso al monasterio y del tren-cremallera.

que afectan a la exposición y es única para cada tipología de elemento. En la figura 7 se exponen las  $f(e_v)$  que se han elaborado para el cálculo del índice de exposición a escala 1:25.000.

**d. Índice de exposición: cálculo con SIG**

El índice de exposición es un valor numérico resultado de multiplicar la frecuencia de ocurrencia de un fenómeno por la función de exposición del elemento vulnerable que se está considerando. Este valor se obtiene mediante el análisis con sistemas de información geográfica (SIG), asignando a cada categoría de frecuencia un valor numérico y el valor de la función de exposición del elemento.

$$IE = F \times f(e_v) \quad (3)$$

Donde:

**IE:** índice de exposición para una tipología de elemento vulnerable.

**F:** frecuencia de ocurrencia de un fenómeno.

**$f(e_v)$ :** función de exposición para una tipología dada de elemento vulnerable.

La asignación numérica de la frecuencia de ocurrencia de desprendimientos se basa en una progresión geométrica con razón igual a 2 con la siguiente relación (muy baja, baja, media y alta): 1, 2, 4 y 8.

**e. Grado de exposición y representación de los resultados**

Se define el grado de exposición para poder representar cartográficamente (zonificar) el factor exposición. El grado de exposición se obtiene clasificando en

categorías los índices de exposición, de manera que una vez se ha calculado el índice de exposición (IE), los valores se agrupan en cuatro categorías que corresponderán al grado de exposición bajo, medio, alto y muy alto. Cada categoría corresponde a un grado de magnitud del índice de exposición. Así, el orden de magnitud menor del IE equivale al grado de exposición bajo, y aumenta de grado por cada orden de magnitud. A partir de la consistencia de los resultados obtenidos de aplicar la metodología a la zona de estudio, se ha aceptado como adecuada esta asignación entre los valores de índice de exposición y los grados de exposición.

Una vez definidos los límites de los grados de exposición, se clasifican los polígonos obtenidos del análisis SIG en estas clases. Este paso permite obtener la cartografía de zonificación del grado de exposición.

Elemento vulnerable considerado	Función de exposición $f(e_v)$	
Vehículos en movimiento	$f(e_v)v = \frac{(IMD/24) \times L}{V_L}$	IMD: intensidad media diaria [veh/d] V <sub>L</sub> : velocidad de la vía [km/h] L: longitud del tramo [km]
Personas en vehículos	$f(e_v)pv = \sum_{i=a}^{j=z} \frac{(IMD/24) \times Ov \times L}{V_L}$	IMD: intensidad media diaria [veh/d] V <sub>L</sub> : velocidad de la vía [km/h] O <sub>v</sub> : ocupación media del vehículo [pers/veh] L: longitud del tramo [km]
Personas en caminos	$f(e_v)pc = \frac{(U/24) \times L}{V_a}$	U: número de personas usuarias de un camino [pers/d] V <sub>a</sub> : velocidad de andar [km/h] L: longitud del tramo [km]
Elementos permanentes	$f(e_v)pr = le \times p$	le: longitud expuesta del objeto [m] p: altura según el número de plantas
Personas dentro de edificios	$f(e_v)ppe = \frac{Oe}{le \times p}$	O <sub>e</sub> : ocupación media del edificio le: longitud expuesta del edificio p: altura según el número de plantas

**Figura 7.** Relación de funciones de exposición  $f(e_v)$  que se proponen para el cálculo del índice de exposición de los elementos vulnerables considerados a escala 1:25.000.

El impacto de los desprendimientos

En la prensa escrita se recogen diversas noticias sobre el problema de los desprendimientos en Montserrat. A continuación se presenta una selección de algunas informaciones publicadas en el diario *La Vanguardia* (Figura D).

Un desprendimiento afecta al aparcamiento del monasterio de Montserrat

JORDI FINESTRES | MANRESA

La naturaleza volvió ayer la vida contemplativa de Montserrat. A las 7.30 de la madrugada de ayer un enorme terremoto despertó a los monjes benedictinos. A pocas centenas de metros de la iglesia se produjo un deslizamiento de tierra que provocó el hundimiento de una zona de 270 metros. El terremoto natural se produjo a medio camino entre la carretera que conduce al monasterio y el estanco de los Doglats, en una zona situada en el kilómetro 12 de la RP 1121.



Las operaciones en estos días de post-desprendimiento refuerzan la carretera de acceso al monasterio.

Los operarios de este tipo de maquinaria se enfrentan a las labores de limpieza y reparación de la zona afectada por el deslizamiento. Los trabajos se realizan en ambas direcciones en la RP 1121 y a partir del punto de convergencia de esta vía con la carretera de acceso al monasterio.

El deslizamiento de las rocas más pesadas, de entre tres y cinco metros de grosor, afectó a la zona de aparcamiento del monasterio, pero por fortuna en aquella momento no había nadie en ningún vehículo público, debido sin duda a las intriguillas del teatro.

—La última tormenta ha causado grandes desprendimientos en Montserrat. Las aguas se han llevado las lavanderas de piedra del pueblo que hay sobre la roca que descubre en el Llibrejat y ha producido el desprendimiento de varias rocas en la montaña, algunas de ellas de grandes dimensiones.

—A fines del mes de agosto último la población de Montserrat, en la Italia me-

Fuente: La Vanguardia 16-09-1887 pág. 5812



El cremallera reabre mañana

MONTSERRAT. El cremallera de Montserrat reabrirá el día 2 de agosto, se reanuda el servicio de transporte debido a un desprendimiento. Después de meses de trabajos se ha podido recuperar la estabilidad de la vía y preparar la carretera para el tráfico normal.

Fuente: La Vanguardia 09-03-2007 pág. 4 VIVIR



Montserrat recupera su cremallera

MONTSERRAT. — Perseguir de la Generalitat ha vuelto a poner un servicio al funicular de la Santa Cova, volviendo así la Generalitat de la Vinya de Montserrat, propiedad de Cataluña. El funicular, que opera desde el mes de 1971 a través de un desprendimiento de rocas, se reanuda el día 2 de agosto. Durante este tiempo se han efectuado trabajos de limpieza de la vía y reparación de los elementos afectados. Los trabajos se han realizado a más de 200 metros de altura. Se ha instalado un nuevo sistema de cables, dotado de un sistema tipo de protección por cascadas, se ha reparado la maquinaria y se han cambiado los cables.

El funicular de la Santa Cova y el de Sant Joan son uno de los primeros sistemas teleféricos del mundo. El primer funicular se inauguró en 1902 y el actual en 1971. El funicular de la Santa Cova fue inaugurado en 1979 y tiene un recorrido de 287 metros al final del cual aparece el castaño que lleva a los peregrinos hasta la "santa", situada a unos veinte metros de altura.

Fuente: La Vanguardia 28-04-1993 pág. 24



Un desprendimiento restringe el acceso a Montserrat

Los flujos de los últimos días provocaron un desprendimiento en la montaña de Montserrat, lo que restringe el acceso a la zona de estudio y de los cuales hemos podido obtener la información mínima necesaria para poder evaluar su grado de exposición (ver figura 8). Los elementos territoriales que se han considerado en el estudio son: el tren cremallera, los funiculares, los vehículos que circulan por carreteras, los usuarios de caminos y los elementos permanentes no móviles (monasterios, edificios industriales, equipamientos, depósitos de agua, etc.).

Fuente: La Vanguardia 5-11-2008 pág. 5 VIVIR

Un nuevo desprendimiento corta el acceso a Montserrat

Solo hubo daños materiales, pero la funicular está parada por carretera desde ayer. Es el tercer incidente en un año.

El nuevo deslizamiento se produjo en la zona de estudio y de los cuales hemos podido obtener la información mínima necesaria para poder evaluar su grado de exposición (ver figura 8). Los elementos territoriales que se han considerado en el estudio son: el tren cremallera, los funiculares, los vehículos que circulan por carreteras, los usuarios de caminos y los elementos permanentes no móviles (monasterios, edificios industriales, equipamientos, depósitos de agua, etc.).

Fuente: La Vanguardia 29-12-2008 pág. 4 VIVIR

A pesar que el índice de exposición es numérico, el grado de exposición obtenido de aplicar la metodología desarrollada se tiene que considerar cualitativo y relativo.

Elementos vulnerables considerados y materiales utilizados

En el informe de evaluación global sobre la reducción del riesgo de desastres de la UNISDR – ONU (2009) [23] se estima que el gran aumento del riesgo de desastres se debe, sobre todo, al rápido incremento de la exposición. Teniendo en cuenta el interés de la realidad territorial, resulta imprescindible avanzar en el conocimiento y la cuantificación de la exposición a los fenómenos naturales con el fin de minimizar los daños en las personas y los bienes.

El número de elementos vulnerables presentes en el territorio es muy diverso. La metodología se ha desarrollado teniendo en cuenta la sensibilidad y la vulnerabilidad de los elementos presentes en la zona de estudio y de los cuales hemos podido obtener la información mínima necesaria para poder evaluar su grado de exposición (ver figura 8). Los elementos territoriales que se han considerado en el estudio son: el tren cremallera, los funiculares, los vehículos que circulan por carreteras, los usuarios de caminos y los elementos permanentes no móviles (monasterios, edificios industriales, equipamientos, depósitos de agua, etc.).

En el proyecto desarrollado se propone una metodología para evaluar el grado de exposición de los elementos territoriales del PNMM (tabla 1) y de las personas que los utilizan. Así pues, los distintos procedimientos de análisis diseñados se han aplicado en la evaluación del grado

Figura D. Fragmentos de periódico de La Vanguardia que reflejan la problemática existente en Montserrat.



**Figura 8.** Vista del recinto del monasterio de Montserrat y del tramo final del tren-cremallera desde el mirador de Els Apòstols, localizado en su extremo este.

de exposición a los desprendimientos de rocas teniendo en cuenta, por un lado, los principales caminos, el tren-cremallera, los funiculares, los vehículos circulando por carreteras, los recintos y edificios asociados o aislados y, por otro, las personas que ocupan o utilizan estos elementos. Sin embargo, en el presente artículo únicamente se muestran los resultados de aplicar la metodología propuesta en las carreteras que dan acceso al monasterio de Montserrat (BP-1121 y BP-1103) y en las dos vías principales del eje del Llobregat (C-55 y C-58).

Las carreteras BP-1121 y BP-1103 son vías de montaña con un carril por sentido, con elevada sinuosidad y dan acceso al monasterio desde ejes principales de comunicación (ver figura 9): la BP-1121 desde la carretera C-55 en la vertiente oriental de la montaña, y la BP-1103 desde el Bruc (A-2) en la vertiente occidental o desde Sant Salvador de Guardiola (C-37) en la vertiente septentrional y NE.

La carretera BP-1121 tiene más circulación de vehículos que la BP-1103. La intensidad media diaria (IMD) es de 700 vehículos en la BP-1121 y de 300 en la BP-1103. Por el contrario, las carreteras C-55 y C-58, en su mayor parte de un solo carril por sentido, son vías de muy alta circulación que habitualmente superan los 15.000 vehículos diarios, la gran mayoría de los cuales no acceden finalmente al monasterio.

Los datos de IMD se han obtenido en cinco puntos de la red de carreteras de la zona de estudio de las cuatro vías consideradas. Las estaciones de aforo de las carreteras que dan acceso al monasterio de Montserrat son temporales y solo se recoge una medida al año, lo que no permite realizar escenarios y hace difícil valorar su representatividad. Debido a la limitación de datos existentes, se decidió asumir como datos



**Figura 9.** Tramos de las carreteras BP-1121 y BP-1103 que dan acceso al monasterio, con un trazado de gran sinuosidad que discurre a media ladera de la montaña. En la ladera se observan indicios de un desprendimiento en el escarpe y en la ladera inferior (D: zona de salida del desprendimiento; línea discontinua amarilla: límites de la zona afectada por el desprendimiento).

**Tabla 2.** Principales materiales utilizados para elaborar este estudio.

Documento	¿Qué es?	Organismo	Fuente
Mapa de Prevenció als Riscos Geològics a escala 1:25000 (MPRG25M).	Mapa de peligrosidad geológica del territorio	Institut Geològic de Catalunya (IGC) en colaboración con la empresa Geocat	IGC (2011a), IGC (2012), IGC (2011b) y web del IGC ( <a href="http://www.igc.cat">www.igc.cat</a> )
Espais Naturals de Protecció Especial (ENPE)	Cartografía base en formato digital	Departament de Territori i Sostenibilitat de la Generalitat de Catalunya ( <a href="http://www.gencat.cat/territori/">www.gencat.cat/territori/</a> )	Web de Nexus Geografics ( <a href="http://dmah.nexusgeografics.com/">http://dmah.nexusgeografics.com/</a> )
Mapa Geològic de Catalunya a escala 1:25.000.	Cartografía base en formato digital	IGC e ICC	Web del ICC mediante el visualizador de mapas Vissir3 ( <a href="http://www.icc.cat/vissir3/">www.icc.cat/vissir3/</a> ). Geoinformación utilizada en formato shape y con sistema de referencia ETRS89.
Base topográfica a escala 1:5000.			
Mapa topográfico a escala 1:10000.			
Ortofotografías a escala 1:5000.			
Modelo de elevaciones del terreno 2x2 (ASCII) del proyecto LIDARCAT		ICC	Cedido por el ICC a RISKNAT.
Estaciones IMD	Ubicación de las estaciones de aforo de IMD	Web del Departament de Territori i Sostenibilitat de la Generalitat de Catalunya, pero la información referente a los datos diarios registrados ha sido facilitada por la DGC.	
Entrada de vehículos al aparcamiento del monasterio	El Patronat de la Muntanya de Montserrat (PMM) ha cedido datos relativos al recuento diario de vehículos que han entrado en el aparcamiento del monasterio de Montserrat.		

de circulación de vehículos las entradas al aparcamiento del monasterio de Montserrat. Con esta decisión se obtiene un valor aproximado de la circulación de vehículos en diferentes escenarios pero se asume que el número real sería mayor, porque no todos los vehículos que circulan por el macizo barcelonés acceden finalmente al recinto del monasterio. A partir de una estimación realizada por FGC (en FGC (2003) <sup>[24]</sup>), se ha atribuido el 70% de la entrada de vehículos a la carretera BP-1121 y el 30% restante a la BP-1103.

Cuando se calcula el número de personas que viajan en los vehículos que circulan por carreteras es conveniente estimar con precisión la cifra de ocu-

pantes por vehículo. En este sentido, según el PMM, la cifra media de ocupantes habituales de los vehículos que acceden al aparcamiento del monasterio es la siguiente: 1,8 personas las motos, 3,4 personas los coches y 43,9 los autocares. Los datos de ocupación reales o estimados de las carreteras C-55 y C-58 no están disponibles, de manera que se ha decidido centrar el estudio de las personas que circulan dentro de vehículos por carretera a la BP-1121 y la BP-1103.

Los principales materiales utilizados para este proyecto se detallan en la tabla 2.

### Aplicación de la metodología a la zona de estudio: resultados

Para la aplicación de la metodología a la zona de estudio se han considerado tres escenarios comunes para las categorías de vehículos en carreteras y per-

**Considerando los valores obtenidos con la  $f(ev)$  y la frecuencia se ha obtenido el índice de exposición IE, el cual se utiliza para definir cuatro categorías de grado de exposición: bajo, medio, alto y muy alto.**

sonas en vehículos que circulan por carreteras. Los escenarios seleccionados pretenden mostrar distintas casuísticas de afluencia de usuarios del PNMM y se basan en los datos recopilados para días concretos, entendiendo que reflejan características de un día-tipo.

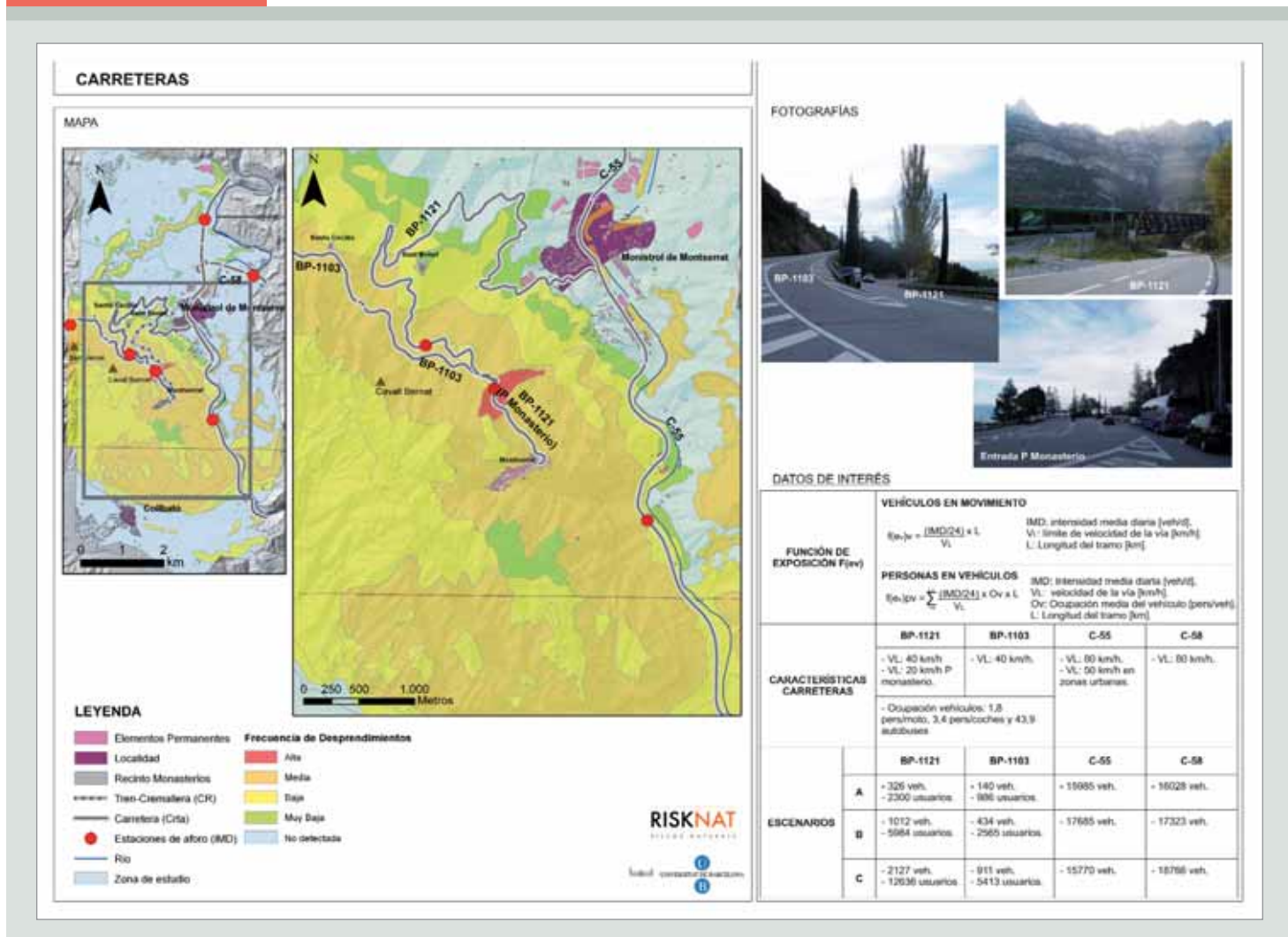
La ventaja de definir un escenario reside en que los mapas que nos muestran el grado de exposición nos aportan fotografías instantáneas de la realidad del uso del territorio. Al comparar escenarios diferentes vemos cómo estos elementos vulnerables pueden presentar diferente grado de exposición en cada uno de ellos.

Los tres escenarios considerados –A, B y C– representan, en relación a la afluencia de visitantes, un día-tipo de mínimos, uno habitual y otro de máximos, respectivamente. El escenario A (31 de enero de 2011) suele darse entre semana durante la temporada baja turística; el B (27 de julio de 2011) es habitual en fines de semana de temporada baja o media y entre semana de temporada alta; y el C (12 de octubre de 2011) refleja un escenario de máximos donde se da una gran afluencia de personas y los operadores que dan acceso al recinto del monasterio de Montserrat baten récords de usuarios.

La elección de los días asignados a este día-tipo ha sido realizada a partir del análisis de los datos recopilados para los últimos cinco años (2008-2011). Los datos de los días-tipo se pueden utilizar para el cálculo de escenarios predecibles.

La información del número de usuarios de los diferentes elementos evaluados tiene confianzas diferentes. Los datos de entradas al aparcamiento del recinto del monasterio son de alta confianza porque sus gestores realizan un seguimiento exhaustivo y riguroso. En cambio, como se adelantó, para el cálculo de los vehículos que circulan por las carreteras BP-1121 y BP-1103 se ha realizado

## Ficha de carreteras



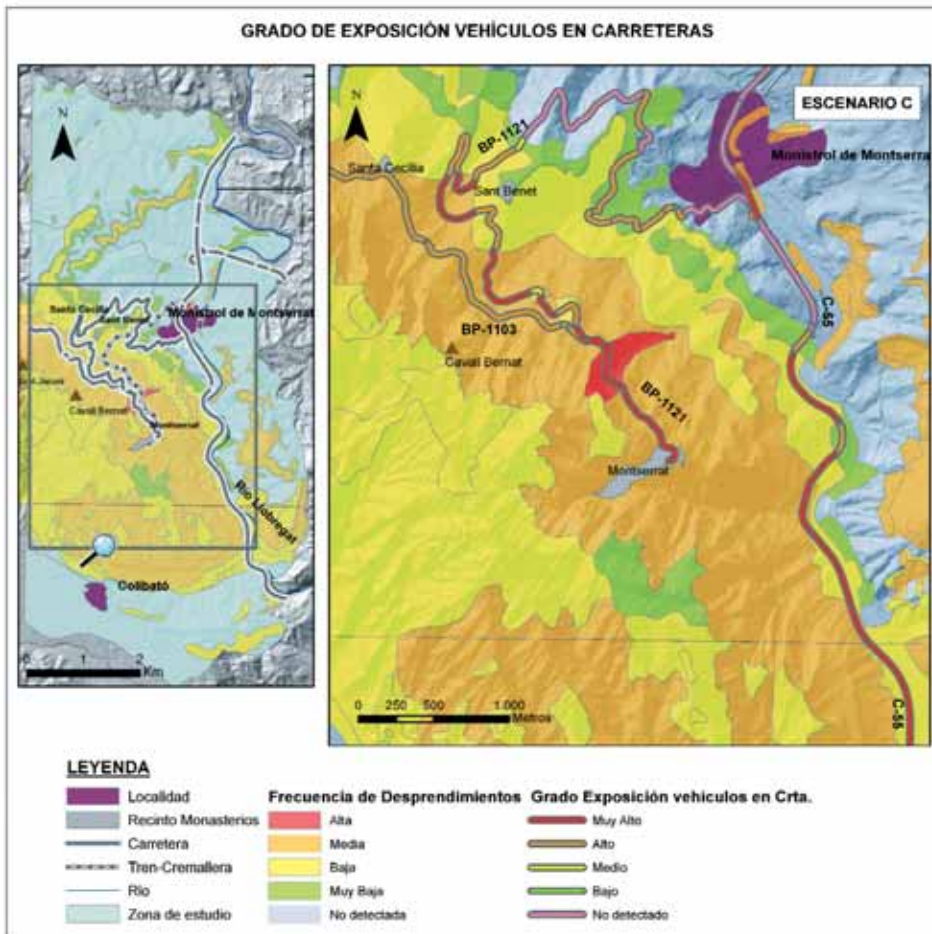


Figura 10. Cartografía del grado de exposición de los vehículos en carretera para el escenario C.

una estimación a partir de las entradas al aparcamiento del monasterio. De esta forma, se ha infravalorado el número de vehículos, ya que no se computan los coches que aparcan fuera del recinto, o todos aquellos vehículos que acceden al parque natural pero que no visitan el recinto del monasterio. Por otro lado, manejar los datos del aparcamiento ha permitido poder distinguir entre clases de vehículos (motos, coches y autocares) y así realizar una aproximación más realista para el cálculo de personas en vehículos en carreteras.

En los escenarios evaluados no se ha tenido en cuenta que en los días de gran afluencia de personas a la montaña, las carreteras de acceso al monasterio de Montserrat quedan colapsadas y los vehículos pueden estar parados tiempos

importantes. En este caso, los índices de exposición de vehículos y personas en vehículos serían máximos, porque la velocidad de circulación se aproximaría a 0 km/h.

#### **Grado de exposición al riesgo de desprendimientos de vehículos en carreteras**

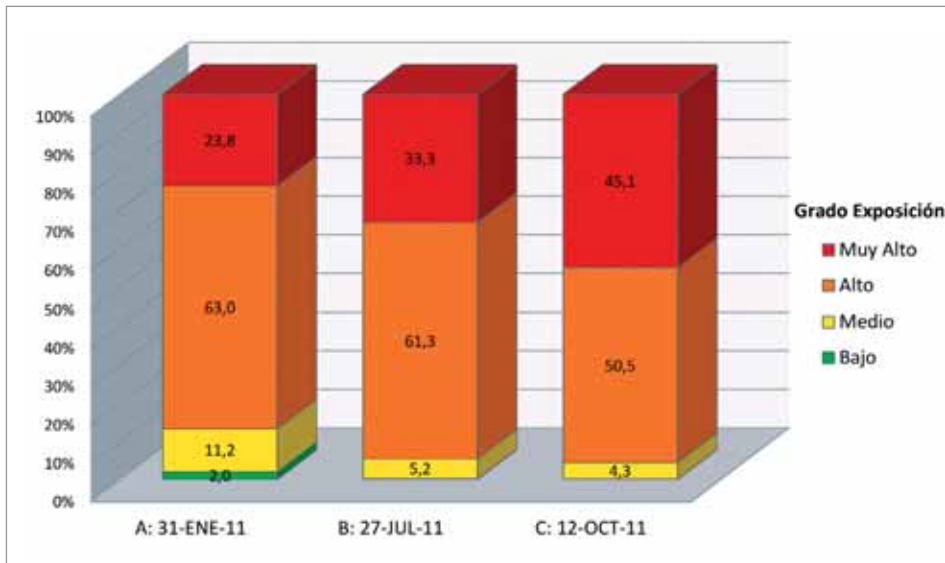
El análisis del grado de exposición de vehículos en carreteras se presenta cartográficamente por tramos de carreteras. Se distinguen 26 tramos potencialmente afectados por desprendimientos,

con una longitud total de 13,91 kilómetros en su proyección horizontal. En la figura 10 se puede observar la zonificación de grado de exposición de este elemento vulnerable para el escenario C.

De la lectura de los mapas del grado de exposición se desprenden dos tipos de informaciones fundamentales (una areal y una lineal) para visualizar el problema de los desprendimientos rocosos. Por un lado, la coloración general de base del mapa nos informa sobre las zonas clasificadas con distintos grado de frecuencia de ocurrencia de los desprendimientos; esto se puede considerar como una aproximación a la peligrosidad. Y por otro lado, la coloración de los distintos segmento o tramos de carretera analizados nos informa sobre el grado de exposición a los desprendimientos. En este caso estamos aproximándonos a la estimación del riesgo geológico. El grado de exposición se expresa en la cartografía clasificando cromáticamente el tramo evaluado mediante una escala semafórica. De manera que los vehículos que circulan por un segmento de carretera, al que se le atribuye el color naranja, están potencialmente expuestos por el peligro de desprendimientos con un grado alto. La misma consideración se aplica en el análisis del grado de exposición de los ocupantes de los vehículos.

En la figura 11 se presentan los resultados obtenidos en porcentaje del grado de exposición de los vehículos en carretera en función de la longitud de tramos presentes de cada categoría. En el escenario C se observa que el grado bajo se reduce a un 0,1%, el grado medio prácticamente se mantiene igual al escenario B con un 4,3%, y los grados alto

**Una de las aplicaciones de la metodología desarrollada consiste en evaluar la exposición de vehículos y de sus ocupantes en las carreteras de acceso al Parque Natural de la Montaña de Montserrat**



**Figura 11.** Relación en porcentaje del grado de exposición de los vehículos en carretera en función de la longitud de los tramos para cada escenario.

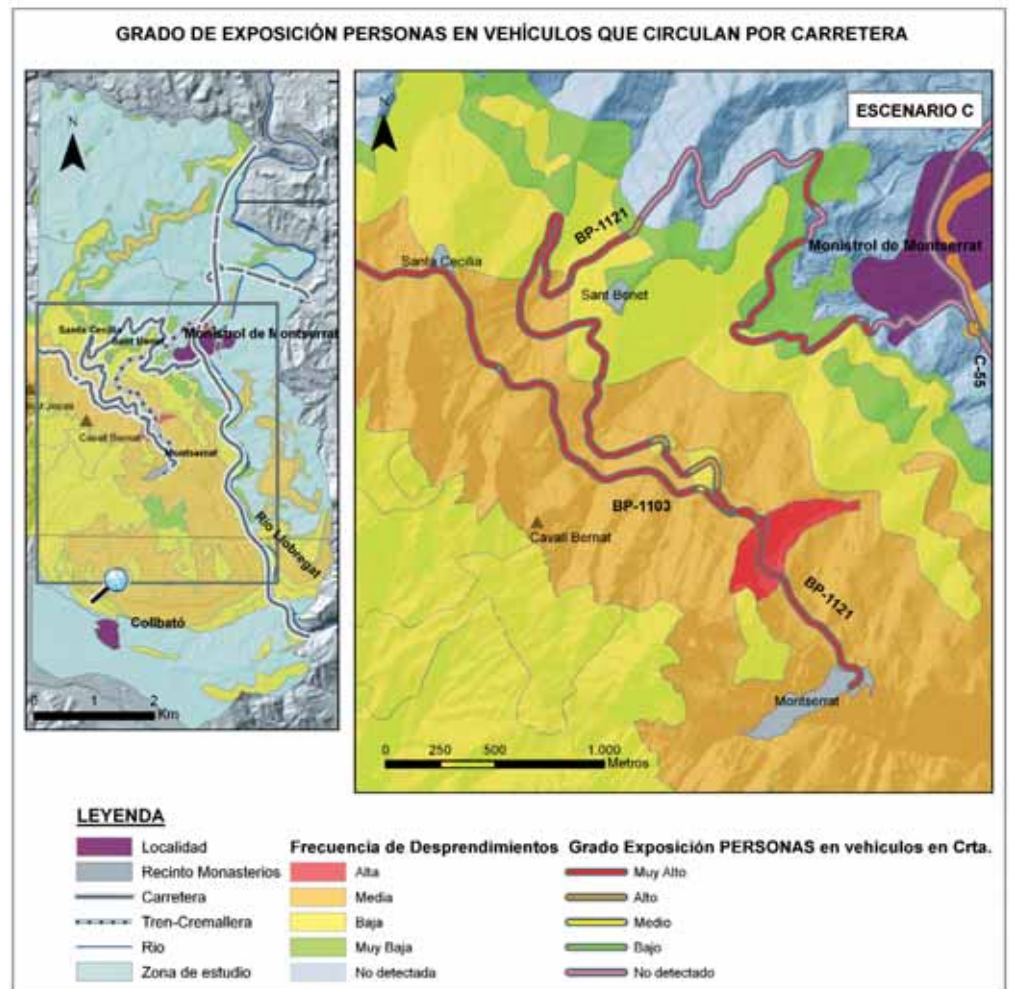
y muy alto pasan a un 50,5% y 45,1% respectivamente. En la gráfica se constata que los grados alto y muy alto representan más del 85% de la longitud en los tres escenarios, porcentajes elevados que indican que la mayor parte de trazado de las carreteras de acceso a la montaña tiene un alto nivel de exposición.

En los resultados obtenidos para este elemento vulnerable es importante destacar que el grado de exposición muy alto en los escenarios A y B se observa exclusivamente en la carretera C-55, ubicada en el fondo de valle del Llobregat, debido a la elevada circulación de la vía, mientras que en la carretera BP-1121 de acceso al monasterio de Montserrat desde Monistrol y para el escenario C se obtienen tramos de grado de exposición muy alto. Estos se ubican donde los desprendimientos tienen frecuencia de ocurrencia del fenómeno media o alta y en condiciones de tráfico abundante. Mientras que en la carretera que da acceso al monasterio desde el Bruc (BP-1103) el máximo grado de exposición que presenta es alto. La carretera BP-1103 no cruza la zona de frecuencia alta de desprendimientos y la circulación de vehí-

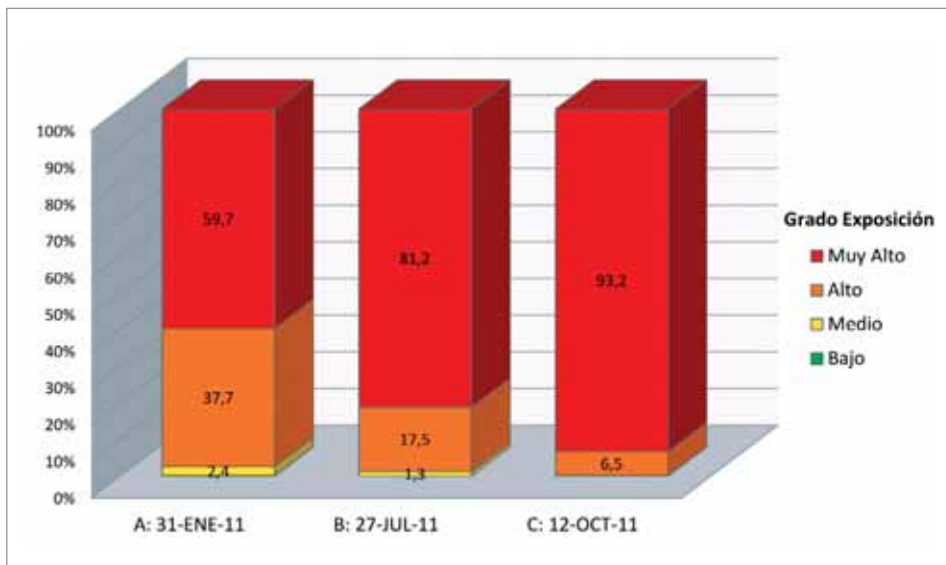
culos es menor que en la BP-1121 y muchísimo menor que en la C-55.

**Grado de exposición al riesgo de desprendimientos de personas en vehículos en carreteras**

Esta parte del análisis de la exposición es esencial para tener una buena instantánea del riesgo geológico debido a la elevada vulnerabilidad humana que integran los elementos analizados. Los resultados del análisis del grado de exposición de personas en vehículos en carreteras se pueden observar en las figuras 12 y 13. En este caso se han obtenido 11 tramos de carretera con una longitud total de 9,03 kilómetros en proyección



**Figura 12.** Detalle de la zona de estudio donde se observa el grado de exposición de personas en los vehículos en carretera para el escenario C.



**Figura 13.** Relación en porcentaje del grado de exposición de personas en los vehículos en carretera en función de la longitud de los tramos para cada escenario.

horizontal de las carreteras BP-1103 y BP-1121, las cuales dan acceso al monasterio de Montserrat desde Monistrol y El Bruc respectivamente.

De los tres escenarios evaluados, solo en el escenario A se identifican tramos que presentan todos los grados de exposición. En el escenario B, donde no se observa grado bajo, el peso principal en longitud expuesta lo tiene el grado muy alto en un 81,2%, y el grado medio y alto tienen un 18,2% y un 36,4% respectivamente. El grado de exposición de personas en vehículos que circulan por carreteras ofrece unos resultados a tener muy en cuenta, ya que la suma del grado alto y muy alto en todos los escenarios representa como mínimo el 97,3% de la longitud total de carretera expuesta. Estos resultados dan una aproximación de la estimación al riesgo de desprendimientos en las carreteras estudiadas.

## Conclusiones

En este artículo se presenta la metodología desarrollada para el análisis del grado de exposición a escala 1:25.000 y

los resultados obtenidos de aplicar esta propuesta a una parte importante del Parque Natural de la Montaña de Montserrat para los vehículos que circulan por carretera considerando o no los ocupantes. El desarrollo de esta propuesta forma parte de un estudio en curso de mayor calado que se centra en el análisis de la exposición al riesgo por desprendimientos de roca a diferentes escalas y en diferentes contextos naturales y sociales.

En esta investigación se hace una propuesta metodológica para cuantificar la exposición según el producto de la frecuencia de ocurrencia del fenómeno por una función de exposición del elemento vulnerable a escala 1:25.000 a pesar que la escala de trabajo ha sido 1:10.000.

La metodología que se propone para el cálculo del grado de exposición se basa en seis fases:

1. Identificación, clasificación e inventario de los elementos potencialmente amenazados.
2. Zonificación de la frecuencia de ocurrencia del fenómeno en la zona de estudio.
3. Diseño de la función de exposición,

**El análisis de la exposición es esencial para tener una aproximación al riesgo geológico debido a la elevada vulnerabilidad humana que integran los elementos analizados**

$f(e_v)$ , específica para el elemento en estudio.

4. Obtención del índice de exposición (IE), que es el producto de la frecuencia de ocurrencia del fenómeno por la función de exposición del elemento vulnerable mediante análisis SIG con el programa ArcGis 10.0 de ESRI.
5. Obtención del grado de exposición agrupando en categorías los valores numéricos del índice de exposición.
6. Realización del mapa de zonificación de la exposición.

Las tipologías de elementos vulnerables considerados en la globalidad del estudio son: vehículos en movimiento, personas en vehículos en movimiento, personas en caminos, elementos permanentes y personas en edificios. Cada tipología definida agrupa todos aquellos elementos que reúnen las mismas características y se ha diseñado una función de exposición para cada una de ellas. Para el cálculo de la exposición se ha considerado separadamente el conjunto de elementos, inicialmente sin tener en cuenta las personas que los ocupan o utilizan y en una fase posterior estos mismos elementos con personas.

La frecuencia de ocurrencia de un fenómeno peligroso puede expresarse cartográficamente mediante mapas de zonificación de frecuencia, de manera que se delimitan zonas geográficas y se clasifican en grados según la frecuencia de ocurrencia del fenómeno. La asignación de las frecuencias de ocurrencia se ha realizado de acuerdo a la metodología



### Junto a las obras estructurales, la implementación de estrategias de defensa no estructural es la mejor política para mitigar el riesgo de desprendimiento en esta zona

aplicada en la confección del MPRG25M, la información de campo recopilada por Geocat, los conocimientos de la zona y las observaciones *in situ*. De acuerdo a esta asignación se obtiene un mapa de zonificación de frecuencia de ocurrencia donde se definen cuatro grados: bajo, medio, alto y muy alto. Estos grados son relativos entre sí y no están cuantificados. Para el cálculo del índice de exposición se ha asignado a cada categoría de frecuencia un valor numérico (frecuencia muy baja: 1, baja: 2, media: 4 y alta: 8). Adoptar la zonificación de frecuencias a partir de un trabajo previo ha condicionado la aplicación de la metodología desarrollada. También ha definido los límites del grado de exposición de los elementos evaluados ya que asumen unas condiciones de partida preestablecidas: la zonificación de peligrosidad definida en el MPRG25M.

La función de exposición es única para cada tipología de elemento. Esta función tiene en cuenta las características propias del elemento que se quiere estudiar, como pueden ser la velocidad a la que el elemento puede cruzar la zona afectada por un fenómeno peligroso o el número de vehículos que circulan por una vía. En este proyecto se ha propuesto una función de exposición para cada elemento vulnerable evaluado.

Considerando los valores obtenidos con la  $f(e_i)$  y la frecuencia se ha obtenido el IE, el cual permite definir cuatro categorías de grado de exposición: bajo, medio, alto y muy alto. Cada una de ellas equivale a un orden de magnitud del índice de exposición. Estos resultados se presentan en forma de cartografías a escala 1:25.000.

La lectura de los mapas de zonificación del grado de exposición a los des-

prendimientos permite visualizar el problema según dos tipos de información fundamentales (areal y lineal). Por un lado, la coloración general de base del mapa nos informa sobre las zonas clasificadas con distintos grado de frecuencia de ocurrencia de los desprendimientos, lo que se puede considerar como una aproximación a la peligrosidad. Por otro lado, la coloración de los distintos segmentos o tramos de las carreteras analizadas nos indica el grado de exposición a los desprendimientos. En este caso estamos aproximándonos a la estimación del riesgo geológico.

En este artículo se ha presentado el resultado de aplicar la metodología desarrollada para los vehículos en movimiento con o sin personas en tres escenarios del PNMM (A-mínimos, B-habitual y C-máximos).

De los resultados obtenidos de la aplicación de la metodología a la zona de estudio destaca el elevado porcentaje de longitud de carretera expuesta a los grados alto y muy alto para la exposición de los vehículos en carretera con o sin ocupantes. Este análisis de la exposición es esencial para tener una aproximación al riesgo geológico debido a la elevada vulnerabilidad humana que integran los elementos analizados.

La propuesta metodológica desarrollada es capaz de reflejar la realidad del territorio frente a la exposición a los desprendimientos en escenarios definidos, pero es necesario ser crítico con los resultados obtenidos para mejorar su aplicación y aumentar el grado de confianza.

En el transcurso de la aplicación de la metodología se han confirmado las diferentes hipótesis de partida realizadas, constatando que el grado de exposición varía en un territorio según los elemen-

tos expuestos y los escenarios que se plantean, y se ha ratificado que los datos de partida y la escala de trabajo condicionan y limitan los resultados.

Este es un primer trabajo general y sintético de la exposición a los desprendimientos en la montaña de Montserrat. Es importante recordar que los cálculos del grado de exposición se han realizado a partir de los datos de peligrosidad natural no protegida por obras de defensa. Así pues, en las zonas donde se han realizado actuaciones para la mitigación de los desprendimientos se debería esperar que la exposición actual fuera menor que la calculada. La cuantificación de lo que podríamos llamar «exposición protegida» necesitaría de un estudio específico a la escala adecuada, donde se partiera de la peligrosidad residual existente en las zonas con obras de defensa.

Los resultados de este trabajo nos llevan a reflexionar sobre cuáles serían las mejores estrategias para mitigar el riesgo de desprendimientos de roca en el PNMM. Está claro que, aparte de las necesarias obras estructurales de defensa que en algunos casos ya se han ejecutado, la implementación de estrategias de defensa no estructural es, a medio y largo plazo, la mejor política de mitigación del riesgo. En el caso del PNMM, replantearse la gestión de la movilidad en el acceso a la montaña y, en especial, al monasterio ayudaría a alcanzar, sin lugar a dudas, una minimización del riesgo geológico. ♦

#### AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado gracias a una ayuda a la investigación concedida por FUNDACIÓN MAPFRE.

RISK NAT y los autores de este proyecto quieren agradecer la ayuda obtenida de las siguientes instituciones y personas: Geocat: Marc Janeras y Judit Pons; FGC: Ferran Gallego, Iván Pascual y Francesc Ludeña; Parc Natural de la Muntanya de Montserrat: Jordi Calaf y un recuerdo especial a la memoria de Lluís Baciero; Abadía de Montserrat: Ramon Oranies; DGC: Eugenia Álvarez; PMM: Jesús Alcantarilla; IGC: Pere Martínez; e ICC: Armand Güell; MAPFRE RE: María Teresa Piserra.

## A MODO DE GLOSARIO

Extraído de Vilaplana y Payàs (2008) <sup>[10]</sup>:

**Desastre natural / catástrofe natural.** Suceso generado por algún peligro natural que causa alteraciones intensas a las personas, a los bienes, a los servicios y al medio ambiente, excediendo la capacidad de respuesta de la comunidad afectada.

**Exposición.** Indica la ubicación del conjunto de elementos que ocupan y/o utilizan el territorio potencialmente afectado o amenazado por un determinado peligro natural (cuando hablamos de elementos territoriales nos referimos a personas, edificaciones, redes de comunicaciones, infraestructuras diversas y, en general, a diferentes usos del suelo).

**Peligro o amenaza natural.** Fenómeno natural potencialmente destructivo: sismos, erupciones volcánicas, deslizamientos, avenidas, temporales, etc.

**Peligrosidad natural.** Probabilidad de que pueda ocurrir un peligro natural de determinada magnitud en un lugar concreto y en un periodo de tiempo determinado.

**Riesgo natural.** Probabilidad de daños debidos a un fenómeno natural en un lugar concreto y en un periodo de tiempo determinado. El riesgo natural se entiende como el producto de la peligrosidad por la vulnerabilidad de los elementos expuestos.

**Vulnerabilidad.** La vulnerabilidad expresa el porcentaje del valor económico y/o social de los elementos expuestos que se pueden perder en un determinado fenómeno natural (también se conoce como grado de pérdidas potenciales, expresado entre 0 y 1).

## ABREVIATURAS

**DGC:** Direcció General de Carreteres del Departament de Territori i Sostenibilitat de la Generalitat de Catalunya.

**Diba:** Diputació de Barcelona.

**FGC:** Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya.

**Geocat:** Geocat Gestió de Projectes S.A.

**ICC:** Institut Cartogràfic de Catalunya.

**IGC:** Institut Geològic de Catalunya.

**MPRG25M:** Mapa per a la Prevenció dels Riscos Geològics (Mapa para la Prevención de los Riesgos Geológicos) a escala 1:25000.

**PMM:** Patronat Muntanya de Montserrat.

**PNMM:** Parc Natural de la Muntanya de Montserrat.

**RISK NAT:** Grupo de investigación consolidado de Riesgos Naturales.

**SIG:** Sistemas de Información Geográfica.

**UB:** Universitat de Barcelona.

**UNDRO:** Oficina de United Nations Disaster Relief Co-ordinator.

**UNISDR:** Oficina de United Nations International Strategy for Disaster Reduction.

## PARA SABER MÁS

- [1] Gibert, JM; López-Blanco, M; Ramos, E. (2007) Presencia de la incoespecie *Dactyloides otto* en el complejo de abanico costero de Sant Llorenç del Munt (Eoceno, Cuenca del Ebro, NE de España). *Geogaceta*, 2007 (41).
- [2] Vilaplana d'Abadal, M; Busquets, P. Itineraris d'interès geològic de Catalunya. Fitxa 224, Montserrat. Generalitat de Catalunya. Departament de Medi Ambient i Habitatge, 2007.
- [3] Alsaker, E; Gabrielsen, H; Roca, E. The significance of the fracture pattern of the Late-Eocene Montserrat fan-delta, Catalan Coastal Ranges (NE Spain). *Tectonophysics*, 1996 (266), 465-491.
- [4] Martínez, A. Aproximació a la geologia de Montserrat. CEC, Barcelona. Muntanya, 2006 (864).
- [5] IGC (2011). Reconeixement preliminar de la paret rocosa que domina el recinte del Monestir de Montserrat. Institut Geològic de Catalunya, Codi AP-040/11, Barcelona.
- [6] Copons, R.; Joan M. Vilaplana, J.M. Rockfall susceptibility zoning at a large scale: From geomorphological inventory to preliminary land use planning. *Engineering Geology*, 2008 (102 (3-4)): 142-151.
- [7] Varnes, D.J. (1978): Slope movement types and processes. In Schuster R.L. & Krisek R.L. & Krizek R.J Ed. *Landslides, analysis and control* Transportation Research Board Sp. Rep, 176, Nat. Acad. of Sciences.
- [8] Agliardi, F; Crosta, G. B. High resolution three-dimensional numerical modelling of rockfalls. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2003 (40) 455-471.
- [9] Agliardi, F., Crosta, G.B. i Frattini, P. Integrating rockfall risk assessment and countermeasure design by 3D modeling techniques. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2009 (9) 1059-1073.
- [10] Vilaplana, J.M.; Payàs, B. RiskCat. Els riscos naturals a Catalunya. Informe executiu / Los riesgos naturales en Cataluña / Natural Risks in Catalonia. Informes del CADS nº6, Dept. de la Presidència, 2008, 228 pp.
- [11] Frattini, P; Crosta, G; Carrara, A; Agliardi, F. Assessment of rockfall susceptibility by integrating statistical and physically-based approaches. *Geomorphology*, 2008 (94) 419-437.
- [12] Stoffel, M; Schneuwly, D; Bollschweiler, M; Lièvre, I; Delaloye, R; Myint, M; Monbaron, M. Analyzing rockfall activity (1600-2002) in a protection forest – a case study using dendrogeomorphology. *Geomorphology*, 2005 (68) 224-241.
- [13] Ferlisi, S; Cascini, I; Corominas, J; Matano, F. Rockfall risk assessment to persons travelling in vehicles along a road: the case study of the Amalfi coastal road (southern Italy). *Natural Hazard*, 2012, (2 -col. 62) 691-721.
- [14] Corominas, J; Copons, R; Moya, J; Vilaplana, J.M; Altimir, J; Amigó, J. Quantitative assessment of the residual risk in a rockfall protected area. *Landslides Springer-Verlag GMBH*, 2005 (2) nº 4: 343 – 357.
- [15] Peduzzi, P; Dao, H; Herold, C. (2002). Global Risk And Vulnerability Index Trends per Year (GRAVITY). Phase II: Development, analysis and results. De «GRAVITY-Team» United Nations Environment Programme Global Resource Information Database – Geneva (UNEP/DEWA/GRID-Geneva) per United Nations Development Programme Bureau of Crisis Prevention & Recovery UNDP/BCPR (formerly ERD). 62 pp.
- [16] Bell, R; Glade, T. Multi-hazard analysis in natural risk assessments. Department of Geography, University of Bonn, Germany, 2004, 10 pp.
- [17] Fell, R; Corominas, J; Bonnard, C; Cascini, L; Leroi, E; Savage, W.Z. Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning. *Engineering Geology*, 2008 (102) 85-92.
- [18] Mavrouli, O; Corominas, J. Rockfall vulnerability assessment for reinforced concrete buildings, *Natural hazards and Earth System Sciences*, 2010 (10), pp. 2055-2066.
- [19] Heinemann, H; Hollesten, K.; Kienholz, H; Krummencacher, B; Mani, P. (1998). Methoden zur Analyse und Bewertung von Naturgefahren. *Bundersamt für Umwelt, Walt und Landschaft (BUWAL)*, Berna, 248pp.
- [20] Lateltin, O. (1997). *Recommandations: prise en compte des dangers dus aux mouvements de terrain Dans le cadre des activités de l'aménagement du territoire*. OFAT, OFEE y OFEFP. Berne, Switzerland, 42 pp.
- [21] Raetz, H; Lateltin, O; Bollinger, D; Tripet, J.P. Hazard assessment in Switzerland- Codes of practice for mass movements. *Bull. Eng. Geol. Env.*, 2002 (61) 263-268.
- [22] Corominas, J; Copons, R; Vilaplana, J.M; Altimir, J; Amigó, J. Integrated landslide susceptibility analysis and hazard assessment in the Principality of Andorra. *Natural Hazard*, 2003 (30) 421-435.
- [23] UNISDR – ONU (2009) Global assessment report on disaster risk reduction. United Nations International Strategy for Disaster Reduction Secretariat, 207 p.
- [24] FGC (2003). Dossier tren-cremallera. Juny 2003. Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya.