

---

# **Exposición y vulnerabilidad a los desprendimientos de roca en Montserrat**

---

**Joan Manuel Villaplana Fernández  
y col.**

**Ayudas a la investigación 2011**

## Investigador Principal

**Joan Manuel Vilaplana Fernández**

Doctor en Ciencias Geológicas (Universitat de Barcelona)  
Dpt. de Geodinàmica i Geofísica (UB)  
Responsable del grupo de investigación consolidado RISK NAT

## Equipo Investigador

**Sara Fontquerni Gorchs**

Licenciada en Geología  
Postgrado en Hidrología Subterránea (CIHS) por la UPC

**Marta Guinau Sellés**

Licenciada en Geología-UB. Máster en Geología Experimental  
Doctora en Ciencias de la Tierra-UB. Profesora colaboradora

**Marta Guinau Sellés**

Licenciada en Geología-UB. Máster en Geología Experimental  
Doctora en Ciencias de la Tierra-UB. Profesora colaboradora

**Manuel Jesús Royán Cordero**

Licenciado en geología (Universidad de Huelva)  
Máster en Geología, especialidad en Riesgos Geológicos - UB-UAB

## Índice

	Página
ABREVIATURAS	5
GLOSARIO BÁSICO	5
RESUMEN Y PALABRAS CLAVE	5
1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES	5
1.1. Situación geográfica	5
1.2. Contexto geológico	8
1.2.1. Zócalo Paleozoico y cobertera Mesozoica (Tm3)	10
1.2.2. Sucesión Paleógena (Terciaria) de Montserrat (EPcm, EBcm, EBlg, EBgm2)	11
1.2.3. Materiales Cuaternarios (Qgb, Qepg):	11
1.3. El fenómeno geológico: los desprendimientos	13
1.4. Antecedentes y problemática	14
1.4.1. Estudios específicos de la Montaña de Montserrat	17
1.4.2. Estudios metodológicos	18
2. OBJETIVOS	18
3. DISEÑO METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN Y MATERIALES	18
3.1. Diseño metodológico de la investigación	18
3.1.1. Problemática e interés de la investigación	18
3.1.2. Preguntas e hipótesis de trabajo	19
3.2. Elementos vulnerables considerados	19
3.2.1. Tren-Cremallera	20
3.2.2. Funiculares	21
3.2.3. Vehículos en carreteras	21
3.2.4. Usuarios de caminos	24
3.2.5. Elementos permanentes	24
3.3. Materiales	26
3.3.1. “Mapa de Prevenció als Riscos Geològics” (MPRG25M)	26
3.3.2. Cartografía base	27
3.3.3. Carreteras	27
3.3.4. Tren-cremallera y Funiculares (FGC)	27
3.3.5. Entradas al aparcamiento del Monasterio de Montserrat y datos eco-contadores	27
4. RESULTADOS	27
4.1. Metodología desarrollada	27
4.1.1. Definición de la metodología	27
4.1.2. Tipología elementos vulnerables	29

4.1.3.	Zonificación de la frecuencia de ocurrencia del fenómeno	29
4.1.4.	Función de exposición del elemento vulnerable $f$ (ev)	30
4.1.5.	Índice de exposición: cálculo con SIG	30
4.1.6.	Grado de exposición y representación de los resultados	31
4.2.	Resultados de aplicar la metodología a la zona de estudio	32
4.2.1.	Asignación de Escenarios	32
4.2.2.	Índice de exposición	35
4.2.2.1.	Vehículos en movimiento	35
4.2.2.2.	Personas en vehículos	36
4.2.2.3.	Personas en caminos	36
4.2.2.4.	Elementos permanentes	37
4.2.2.5.	Personas en edificios	37
4.2.3.	Grado de exposición / Zonificación exposición	37
5.	DISCUSIÓN	53
5.1.	Metodología desarrollada	53
5.1.1.	Definición de la metodología	53
5.1.2.	Tipología elementos vulnerables	54
5.1.3.	Zonificación de la frecuencia de ocurrencia del fenómeno	54
5.1.4.	Función de exposición del elemento vulnerable $f$ (ev)	54
5.1.5.	Índice de exposición: cálculo con SIG	54
5.1.6.	Grado de exposición y representación de los resultados	55
5.2.	Sobre la aplicación de la metodología a la zona de estudio	55
5.2.1.	Escenarios	55
5.2.2.	Índice de exposición (IE) y Grado de exposición	55
5.2.2.1.	Vehículos en movimiento	55
5.2.2.2.	Personas en vehículos	56
5.2.2.3.	Personas en caminos	56
5.2.2.4.	Elementos permanentes y Personas en edificios	56
6.	CONCLUSIONES	58
7.	PROPUESTAS DE DISMINUCIÓN DE LA EXPOSICIÓN	59
8.	PERSPECTIVAS DE FUTURO	60
9.	BIBLIOGRAFÍA	61
10.	ANEXOS	63
10.1.	Elementos vulnerables considerados	63
10.2.	Mapas de resultados	71
10.3.	Tareas / Actividades vinculadas al proyecto	83
10.4.	Póster: <i>VIII Congreso Geológico de España</i>	84



## ABREVIATURAS

<b>DGC:</b>	Direcció General de Carreteres del Departament de Territori i Sostenibilitat de la Generalitat de Catalunya.
<b>Diba:</b>	Diputació de Barcelona.
<b>FGC:</b>	Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya.
<b>Geocat:</b>	Geocat Gestió de Projectes S.A.
<b>ICC:</b>	Institut Cartogràfic de Catalunya.
<b>IGC:</b>	Institut Geològic de Catalunya.
<b>MPRG25M:</b>	<i>Mapa per a la Prevenció dels Riscos Geològics</i> (Mapa para la prevención de los Riesgos Geológicos) a escala 1:25000.
<b>PMM:</b>	Patronat Muntanya de Montserrat.
<b>PNMM:</b>	Parc Natural de la Muntanya de Montserrat.
<b>RISK NAT:</b>	Grupo de investigación consolidado de Riesgos Naturales.
<b>SIG:</b>	Sistemas de Información Geográfica.
<b>UB:</b>	Universitat de Barcelona.
<b>UNDRO:</b>	Oficina de United Nations Disaster Relief Coordinator.
<b>UNISDR:</b>	Oficina de United Nations International Strategy for Disaster Reduction.

## GLOSARIO BÁSICO

Extraído de [1]:

**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 período de tiempo determinado.

**Riesgo natural:** Probabilidad de daños debidos a un fenómeno natural en un lugar concreto y en un período 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).

## RESUMEN Y PALABRAS CLAVE

Se propone una metodología para la evaluación de la exposición de elementos vulnerables a los desprendimientos en la Montaña de Montserrat. A partir del cruce de la frecuencia de ocurrencia del fenómeno estudiado y de una función de exposición para cada elemento vulnerable, se aplica a la realidad del *Parc Natural de la Muntanya de Montserrat*, mediante un sistema de información geográfica (ArcGis 10.0 de Esri) y para una escala 1:25.000.

**PALABRAS CLAVE:** desprendimientos, riesgo geológico, frecuencia de ocurrencia, exposición, SIG, Montserrat.

## 1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

La montaña de Montserrat es uno de los parajes más emblemáticos de Cataluña, caracterizada por la singularidad de sus rasgos geomorfológicos (figura 1). En 1987 fue catalogada como Parque Natural por la Generalitat de Cataluña y representa una superficie de 3.630 ha de espacio protegido. En ella se ubica el conocido Monasterio de Montserrat (figura 2), uno de los lugares de peregrinación más importantes de España. Tan solo el Monasterio recibió más de dos millones doscientos mil visitantes en 2011, a los que hay que añadir otros centenares de miles de usuarios del Parque Natural, que realizan deportes como el senderismo o la escalada en sus verticales paredes de roca conglomerática.

En la tabla 1 se detallan algunos datos de interés que nos ayudan a cuantificar los elementos vulnerables inventariados en la zona de estudio con el fin de dimensionar el proyecto.

### 1.1. Situación geográfica

El macizo de Montserrat se halla a unos 35 km al noroeste de la ciudad de Barcelona, en la confluencia de las comarcas del Bages, el Anoia y el Baix Llobregat (ver figura 3). El eje principal de la cadena es de unos 9 km de longitud y se extiende SE-NW, su anchura máxima es de prácticamente 3 km.

La montaña de Montserrat presenta una vertiente muy escarpada que se alza al Oeste del río Llobregat y que alcanza su cota máxima de 1235.6m en el pico de Sant Jeroni. El macizo forma un importante relieve abrupto respecto al entorno con desniveles de casi 1000 m desde el valle del río Llobregat. Destaca su relieve dominado por

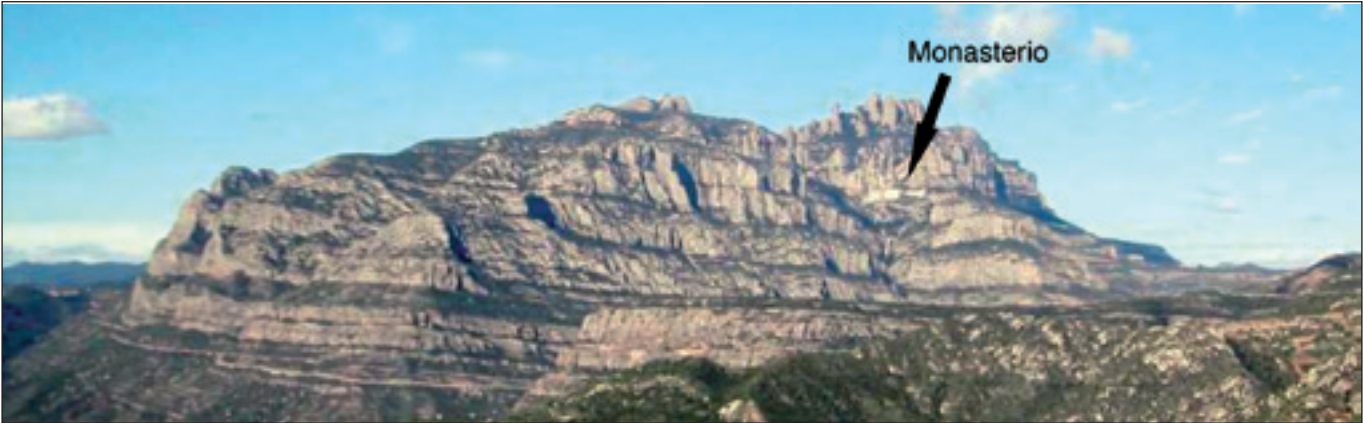


Figura 1. Fotografía del paisaje de la montaña de Montserrat donde se indica la ubicación del Monasterio en la ladera que da al valle del río Llobregat. Fuente: modificado de [http://ca.wikipedia.org/wiki/Fitxer:Muntanya\\_Montserrat.jpg](http://ca.wikipedia.org/wiki/Fitxer:Muntanya_Montserrat.jpg).



Figura 1. Fotografía del paisaje de la montaña de Montserrat donde se indica la ubicación del Monasterio en la ladera que da al valle del río Llobregat. Fuente: modificado de [http://ca.wikipedia.org/wiki/Fitxer:Muntanya\\_Montserrat.jpg](http://ca.wikipedia.org/wiki/Fitxer:Muntanya_Montserrat.jpg).

Tabla 1. Cuantificación de los elementos vulnerables de la zona de estudio. Las longitudes y superficies se han calculado en su proyección horizontal.

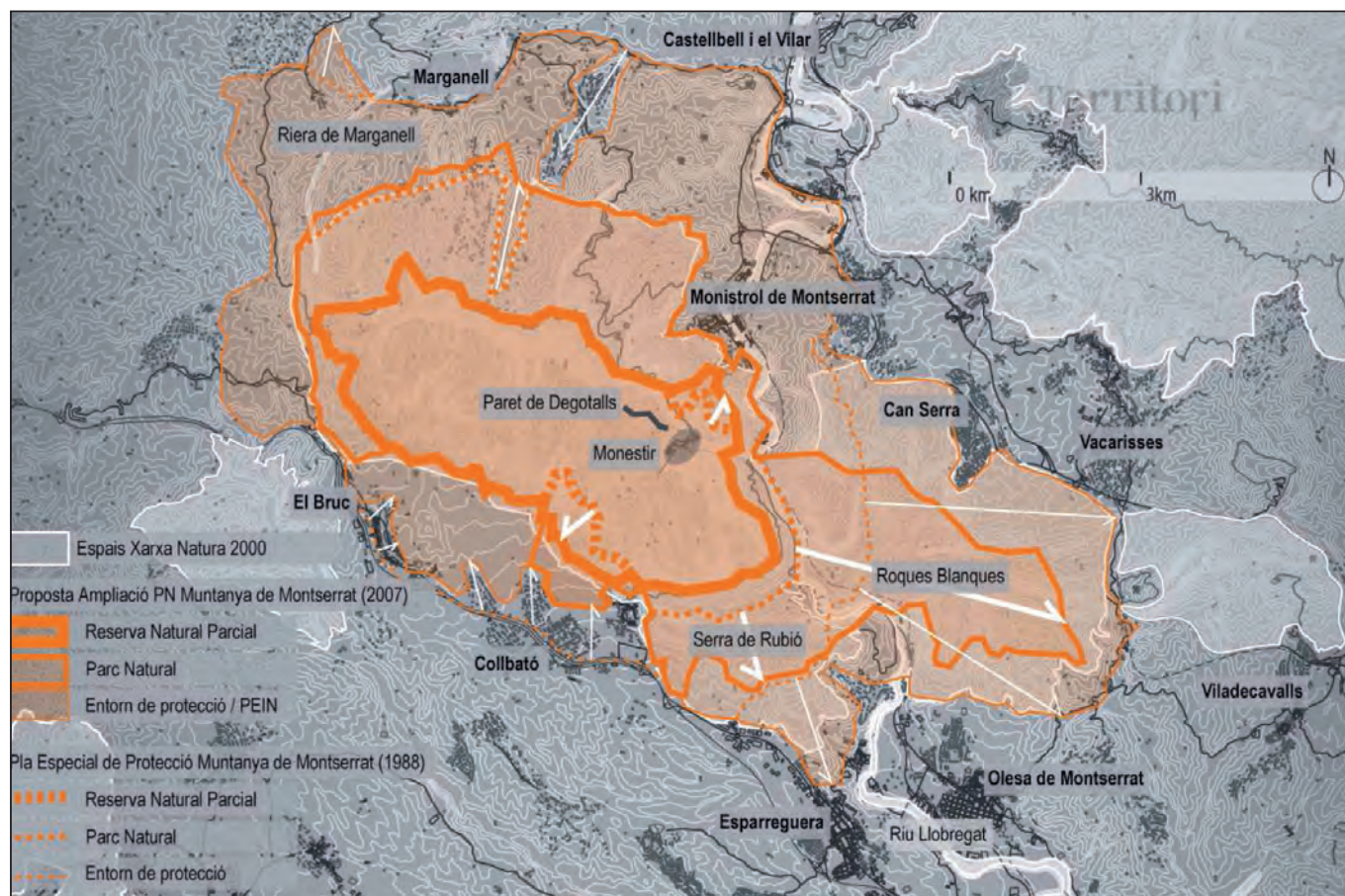
Tipología		Cuantificación
Superficie de estudio		41,92 km²
Elementos vulnerables considerados	Tren cremallera	5,32 km
	Funicular Sant Joan	408 m
	Funicular Santa Cova	205 m
	Teleférico	1.220 m
	Carreteras	181,64 km
	Caminos y senderos	155,95 km
	Recinto Monasterio de Montserrat	62.437 m²
	Recinto Monasterio de Sant Benet	10.484 m²
	Recinto Monasterio de Santa Cecília	9.918 m²
	Visitantes Monasterio de Montserrat*	2.282.686 personas
	Excursionistas por el camino de Sant Jeroni de enero a junio 2010 (eco-contador)	38.333 personas
	Motos*	4.118
	Coches*	217.172
	Autobuses*	17.473

\* Datos de 2011 del PMM.





**Figura 3.** Situación geográfica de la zona de estudio. *Fuente:* modificado de [w1 y w2].



**Figura 4.** Mapa de los límites del parque donde se identifican los diferentes grados de protección y los municipios que lo forman. *Fuente:* [w3].



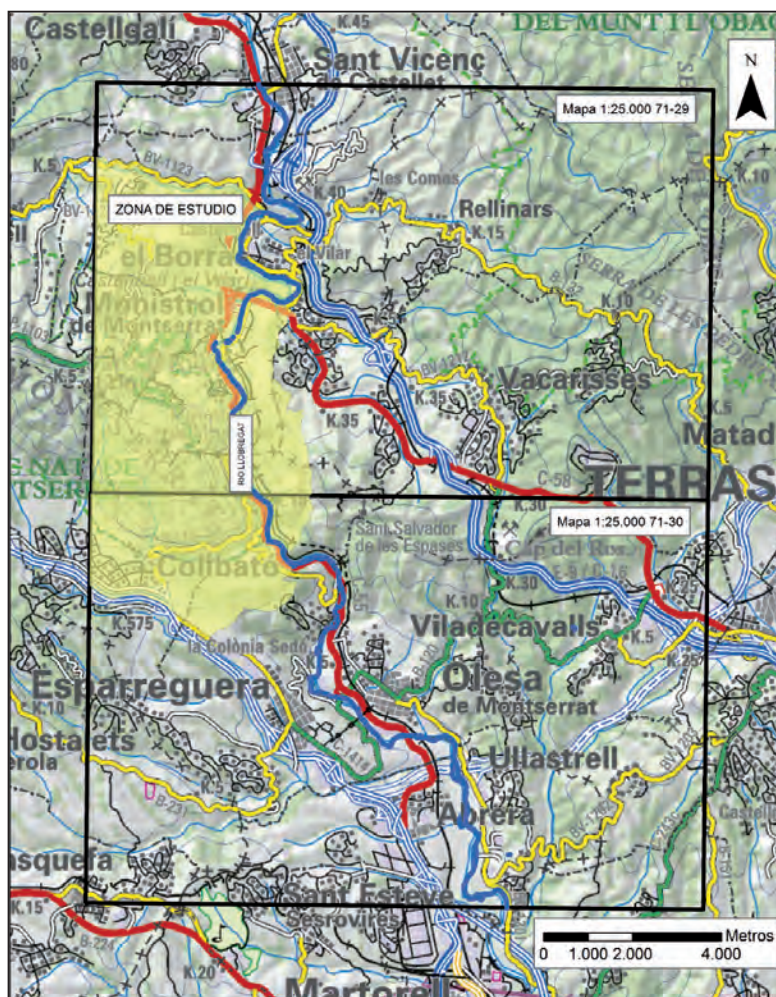


Figura 5. Mapa con la ubicación de la zona de estudio en referencia las hojas 71-29 y 71-30 de la serie 1:25.000 del ICC.

agujas más o menos individualizadas que pueden llegar a formar paredes de unos 400 m. El recinto del monasterio de Montserrat está situado a 725 m de altitud en el sector SE del macizo dentro de la Vall Mala, el valle más ancho y profundo.

El *Parc Natural de la Muntanya de Montserrat* extiende su superficie protegida por cuatro municipios (el Bruc, Marganell, Monistrol de Montserrat y Collbató) y está configurado por diferentes grados de protección (ver figura 4). En el *Pla Especial de Protecció de la Muntanya de Montserrat* de 1988 es donde se regula y concreta los aspectos de gestión del parque natural y de su entorno de protección. La institución que ejerce de órgano gestor y rector del parque es el *Patronat de la Muntanya de Montserrat* (PMM) y depende del *Departament de Presidència*, a diferencia del resto de parques naturales de Cataluña que dependen del *Departament de Territori i Sostenibilitat* o de las diputaciones provinciales.

En base a la información disponible se ha delimitado la zona de estudio a la zona de parque natural correspondiente a las hojas 1:25.000 de Monistrol de Montserrat nº 392-1-1 (71-29) y Olesa de Montserrat nº 392-1-2 (71-30) del *Institut Cartogràfic de Catalunya* (ICC), ver figura 5.

## 1.2. Contexto geológico

La montaña de Montserrat es un relieve formado íntegramente por rocas sedimentarias y forma parte del margen SE de la cuenca del Ebro, pero morfológicamente esta alineado con los relieves de las Cadenas Costeras Catalanas o Cadena Prelitoral (Figura 6). En esta zona la Cadena Prelitoral está formada por un zócalo de pizarras paleozoicas y una cobertera triásica. Durante el Terciario (Eoceno – Oligoceno) sedimentos marinos y continentales rellenaron la Cuenca del Ebro.

Según [2] la formación del macizo de Montserrat empezó durante el Bartonianense-Priabonense (40-34 MA), debido al levantamiento de la Cadena Costera Catalana situada en el margen SE de la Cuenca del Ebro. La red de ríos en dirección SE-NW que drenaban la cadena montañosa formó unos deltas al llegar a la Cuenca del Ebro donde se depositaban los materiales procedentes del desmantelamiento de los relieves por erosión (ver figura 7). De manera que en la zona actual de Montserrat se sedimentó un delta de dirección SE-NW donde se identifican facies de abanico proximal de hasta 1300 m de potencia con conglomerado que alternan con capas de areniscas (abanico aluvial distal) [3]. La existencia de esta alternancia nos indica diferentes secuencias de trasgresión-regresión.





Figura 6. Situación geológica de la Montaña de Montserrat. Modificado de [2].

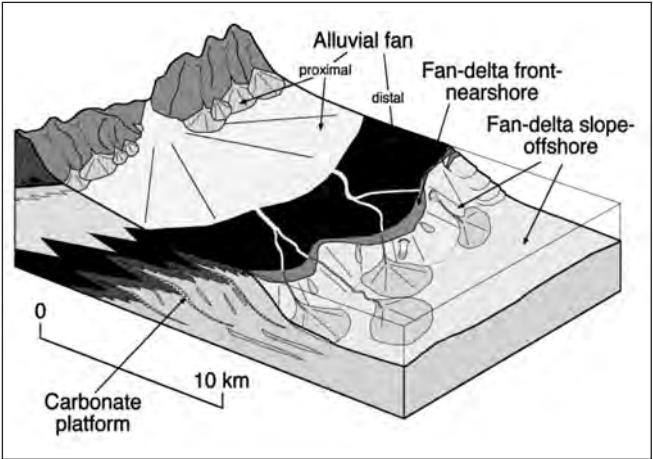


Figura 7. Reconstrucción 3D de las relaciones de facies entre un abanico aluvial como el de Montserrat, un abanico deltaico frontal en nearshore (costero) y un abanico deltaico de talud en offshore (alta mar). Fuente: [4].

En dirección al NE, N y NO los conglomerados pierden su carácter masivo y las intercalaciones de areniscas y lutitas rojas aumentan de potencia, a medida que nos alejamos de Montserrat estos últimos materiales pasan a margas y lutitas amarillas y grises, calcáreas con fósiles marinos y claros indicios de acción del oleaje de la Cuenca del Ebro; todos ellos depósitos de origen marino.

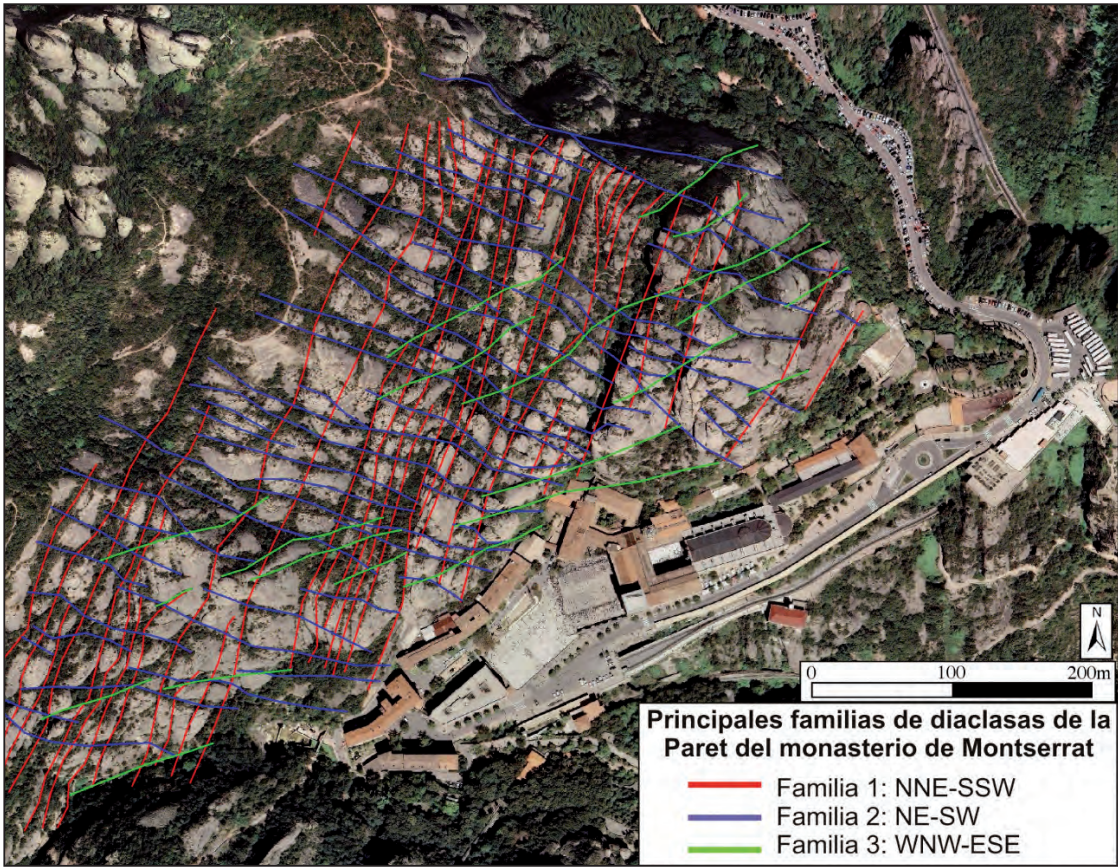


Figura 8. Ortofoto con las principales familias de diaclasas existentes en el macizo de Montserrat representadas en el sector del Monasterio. Fuente: modificado de [6].



En el Rupeliense (34-29 MA) según [5] el propio peso de los sedimentos empezó a fracturar estas potentes facies dando un sistema de diaclasas paralelas orientadas NNE-SSW. En el Oligoceno medio y superior (30-23 MA) el mismo autor identifica tres episodios de fracturación: 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 una 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 una fase extensional de la Península Ibérica, y con ello una segunda reactivación del primer sistema de diaclasas (NNE-SSW), que en algunos casos se comportaron como fallas, aunque con poco desplazamiento. Las diferentes familias de diaclasas descritas se identifican en la figura 8.

Este 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, cemento de los conglomerados carbonatados, etc.) el agua tanto de escorrentía superficial como subterránea ha karstificado los conglomerados modelando un relieve muy peculiar, tanto en las formas (agujas, pináculos y canales), como en las

dimensiones del relieve (figura 9). Este relieve hace de Montserrat un paisaje geológico y ambiental de valor internacional.

El cemento carbonatado que da cohesión al conglomerado de Montserrat sufre meteorización kárstica, que a diferencia de los macizos kársticos en rocas calizas no presenta grandes redes de circulación de agua subterránea [3]. La disolución de este cemento tiene dos efectos morfológicos principales: 1- la circulación de agua por las discontinuidades erosiona las fisuras abriéndolas y separándolas dando formas muy redondeadas; 2- la escorrentía del agua por la superficie de las paredes libera los cantos rodados del conglomerado y bloques y masas considerable, originando así abundantes fragmentos de roca inestables susceptible de provocar desprendimientos.

Desde un punto de vista estratigráfico, los materiales del área de Montserrat se pueden clasificar en tres grupos principales:

- Zócalo Paleozoico y cobertera Mesozoica ( $Tm_3$ ).
- Sucesión Paleógena (Terciaria) de Montserrat (EPcm, EBcm, EBlg, EBgm<sub>2</sub>).
- Materiales Cuaternarios (Qgb, Qepg).

#### 1.2.1. Zócalo Paleozoico y cobertera Mesozoica ( $Tm_3$ )

Encima del zócalo Paleozoico constituido por granitoides y filitas hay una cobertera de dos tramos de areniscas rojas y lutitas que alternan con dos tramos de calizas y dolomías Triásicas.



**Figura 9.** Pared del Monasterio donde se observa el relieve montserratino en los conglomerados. *Fuente:* Archivo RISK NAT.

### 1.2.2. Sucesión Paleógena (Terciaria) de Montserrat (EPcm, EBcm, EBlg, EBgm2)

Durante las fases de compresión de los abanicos costeros interactúan la progresión y la regresión en función de la evolución de la cuenca, de manera que los abanicos están formados por facies continentales, marinas y de transición. La repetición cíclica de estos episodios (transgresión-regresión) da lugar a la potente sucesión sedimentaria de la Formación Conglomerados de Montserrat. Estos materiales tienen continuidad a lo largo de todo el macizo pero se ven afectados por cambios laterales de facies. En dirección al NE, N y NO los conglomerados pierden su carácter masivo y las intercalaciones de areniscas y lutitas rojas aumentan de potencia con intercalaciones delgadas de niveles delgados de conglomerados. En estas mismas direcciones, estos últimos materiales pasan a conglomerados, areniscas y lutitas amarillas y grises, calcáreas con fósiles marinos y claros indicios de acción del oleaje de la Cuenca del Ebro. Según el Mapa geológico de Catalunya a escala 1:25.000 de la hoja 392-1-1 de Monistrol de Montserrat y de la hoja 392-1-2 de Olesa de Montserrat los materiales que afloran a la zona de estudio y su entrono son (ver figura 10):

- **EPcm:** Conglomerados polimícticos masivos. Los conglomerados son *clast-supported* con los clastos subredondeados a redondeados, heterométricos, de medida milimétrica a centimétrica, y ocasionalmente métrica. Los clastos son de carbonatos Triásicos, de calizas Cretácicas, areniscas Triásicas, de rocas metamórficas e ígneas Paleozoicas y de *cherts*. La matriz es de arena y lutita, y se encuentra muy bien cementada. El contacto basal con los conglomerados EBcm se interpreta como discordante. La potencia de la unidad en el ámbito de la Hoja 392-1-1 (Monistrol de Montserrat) del Mapa Geológico de Catalunya es de unos 400 m. Estos depósitos se interpretan como facies proximales de abanico aluvial. Corresponden al tramo superior de la Fm. Conglomerados de Montserrat, nivel de Sant Jeroni. Se atribuyen al Priabonense.
- **EBcm:** Conglomerados polimícticos masivos y en menor proporción areniscas y lutitas rojas. Los conglomerados son *clast-supported* con los clastos subredondeados a redondeados, heterométricos, de medida milimétrica a centimétrica, y ocasionalmente métrica. La matriz es de arenisca y lutita, y se encuentra muy bien cementada, la fábrica es bastante desorganizada. Los clastos predominantes son carbonatos mesozoicos. En Montserrat los conglomerados constituyen siete secuencias estratotrecientes y granotrecientes, que se manifiestan por un aumento hacia techo en la medida máxima de los clastos y en la disminución porcentual de arena y lutitas; están limitados por niveles arenosos y arcillosos rojos de la unidad EBlg. En la base de los niveles conglomeráticos hay cicatrices erosivas en surco, mientras que en techo son masivos y con

geometría tabular. En la hoja la unidad tiene una potencia aproximada de 1150 m y se interpreta como facies proximales de abanico costero. Corresponden al tramo inferior de la Fm Montserrat y se atribuye al Bartonense.

- **EBlg:** Lutitas rojas con intercalaciones de areniscas y conglomerados. Los niveles de areniscas y conglomerados tienen una potencia de decimétrica a métrica y una continuidad lateral entre decamétrica y hectométrica, con morfología acanalada. La granulometría de las areniscas va de muy fina a grosera. Los conglomerados son *clast-supported* y presentan base erosiva en surco, estratificaciones cruzadas de bajo ángulo y paralelas. Los clastos son de subangulosos a redondeados, y la composición litológica es la misma que la de los conglomerados EBcm. Estos depósitos se interdigitan con las unidades EBcm y EBcm<sub>2</sub> en sentido proximal, y con los niveles marinos EBgm y EBgm<sub>2</sub> hacia la cuenca. El grosor mínimo estimado es de 825 m. Se interpretan como facies medianas y distales de abanico costanero. Corresponden a la Fm. Vacarisses y se atribuyen al Bartoniano.
- **EBgm<sub>2</sub>:** Areniscos grises. Son de grano de muy fino a muy grosera, presentan estratificación horizontal y cruzada de bajo ángulo y bioturbación. Las areniscas presentan intercalaciones de niveles de potencia decimétrica a métrica, de microconglomerados y conglomerados y, en menos proporción, lutitas carbonatadas. Los conglomerados y microconglomerados son polimícticos, y están soportados tanto por los clastos como por la matriz. Constituyen secuencias tanto granotrecientes y estratotrecientes como granodecrescentes y estratotrecientes. Estos depósitos se pueden ver afectados por procesos de deformación sinsedimentaria. Se interdigitan con las unidades EBlg y EBcm y pasan con un contacto neto a calizas de la unidad EBcm<sub>2</sub>, y de una manera neta o gradual a las lutitas carbonatadas de la unidad EBlm<sub>2</sub>. Se interpretan como facies de frente deltaico correspondientes a la segunda transgresión bartoniense. Se atribuyen al Bartonense superior.

### 1.2.3. Materiales Cuaternarios (Qgb, Qepg)

Según el Mapa Geológico de Catalunya a escala 1:25.000 de la hoja 392-1-1 de Monistrol de Montserrat y de la hoja 392-1-2 de Olesa de Montserrat los materiales que afloran a la zona de estudio y su entrono son (ver figura 10):

- **Qgb:** Bloques aislados de orden métrico a decamétrico. Proviene de la disgregación de los conglomerados de Montserrat. En el ámbito de las hojas de estudio se reconocen en la vertiente norte de Montserrat, con una distribución irregular. Son bloques caídos que se atribuyen al Holoceno.



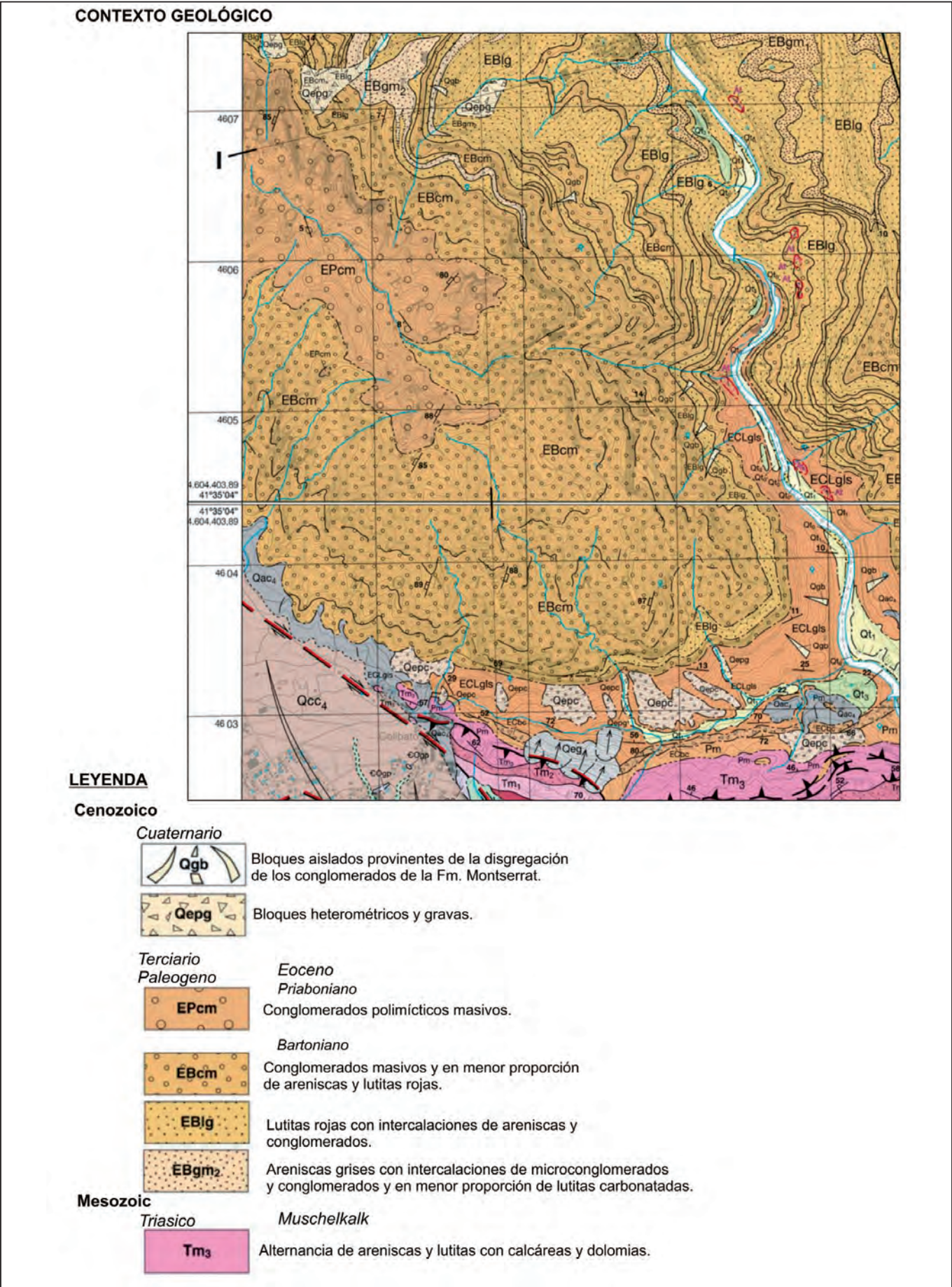


Figura 10. Mapa geológico de la zona de estudio. Extraído del *Mapa Geológico de Catalunya* a escala 1:25.000, hojas 392-1-1 de Monistrol de Montserrat y 392-1-2 de Olesa de Montserrat del IGC.



- **Qepg:** Bloques heterométricos y gravas. Los bloques son de orden métrico y las gravas son subangulosas y provienen de la disgregación de los conglomerados de Montserrat (EBcm). Estos depósitos no se hallan consolidados y, a diferencia de los identificados como Qgb, rellenan canales con fuerte pendiente al pie de los escarpes de Montserrat. Depósito de derrubios de grandes bloques. Se atribuyen al Holoceno reciente.

### 1.3. El fenómeno geológico: los desprendimientos

Los desprendimientos rocosos son uno de los fenómenos más comunes en escarpes montañosos [7]. Es un proceso geomorfológico de gran frecuencia y se considera el movimiento de ladera de mayor velocidad [8] llegando a energías de impacto muy elevadas [9 y 10].

Copons en [11] 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. En las áreas afectadas por desprendimientos se distinguen 3 zonas: la *zona de salida* (en el escarpe rocoso), la *zona de trayectoria* que es por donde la roca impacta, rebota y se fragmenta, y la *zona de llegada* donde las rocas se paran y se acumulan formando un depósito de derrubios (figura 11).

Según [11] existen 3 factores que intervienen directamente en la movilización de los cuerpos rocosos:

- Factores intrínsecos del macizo rocoso: como es el caso de la disposición y la geometría de los planos de discontinuidad.
- Factores degradantes: correspondientes a los factores externos que intervienen en la degradación de los planos de discontinuidades, como son la temperatura y la circulación de agua.

- Factores desencadenantes que inestabilizan finalmente las masas rocosas como son la lluvia, la infiltración abundante de agua en las discontinuidades, la sismicidad, los incendios forestales, etc.

Diferentes grupos de trabajo suizos han redactado normas para el análisis y la clasificación de la frecuencia de ocurrencia de los movimientos de ladera [13, 14 y 15]. En [15] prefieren utilizar el término de probabilidad de ocurrencia en lugar de frecuencia o periodo de retorno. Numéricamente, la probabilidad de ocurrencia es función del periodo de retorno si se le atribuye el mismo intervalo de tiempo de referencia:

$$P=1-(1-T)^n$$

Donde:

P: Probabilidad de ocurrencia de un movimiento de ladera.

T: Periodo de retorno del fenómeno.

n: Intervalo de tiempo de referencia.

Esta definición de probabilidad solo es aplicable para fenómenos recurrentes como es el caso de desprendimientos de relativo bajo volumen [14 y 15].

En [16] 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.

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.

Según [1] la peligrosidad natural es la probabilidad de que pueda ocurrir un peligro natural de determinada magnitud en un lugar concreto y en un periodo de tiempo determinado, y el riesgo natural es la probabilidad de daños debidos a un fenómeno natural en un lugar con-

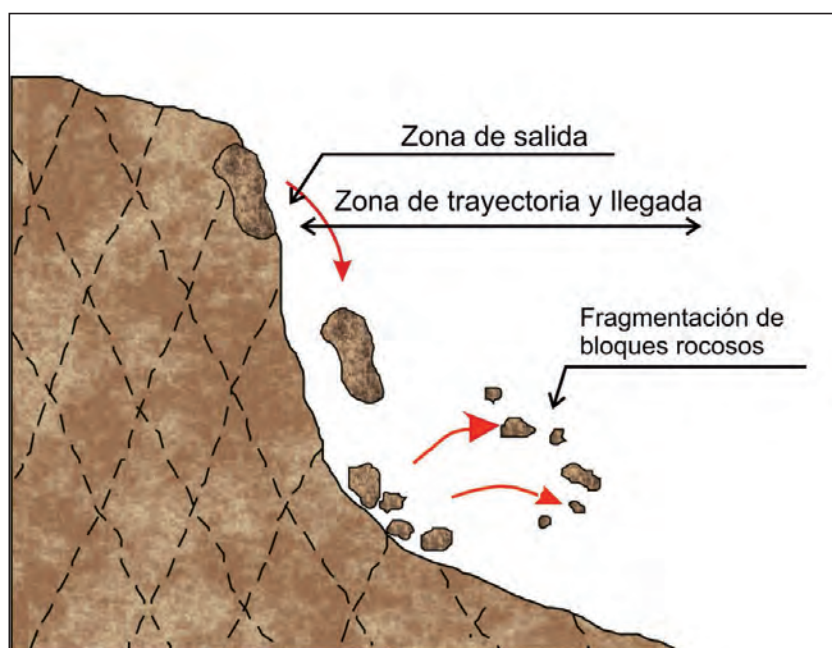


Figura 11. Esquema donde se detallan las zonas de un desprendimiento. Modificado de [12].

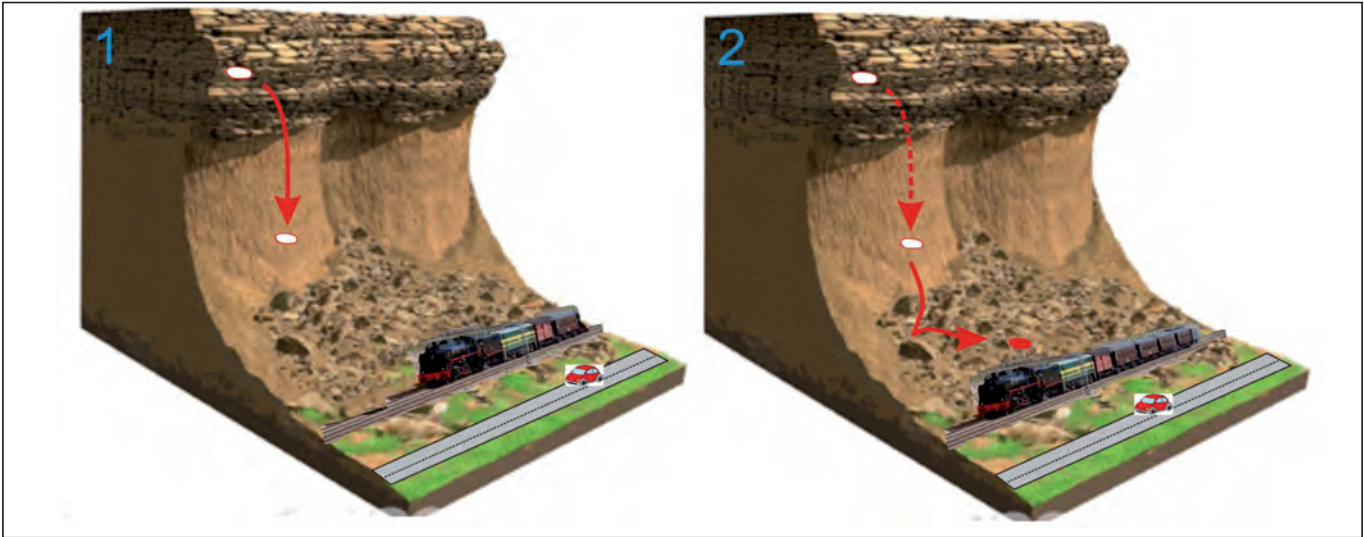


Figura 12. Ejemplo de dos elementos vulnerables como son los trenes y los vehículos al fenómeno de los desprendimientos. Modificado de [W4].

creto y en un período de tiempo determinado. Según el diccionario de la Real Academia Española exponer significa: arriesgar, aventurar, poner algo en contingencia de perderse o dañarse (figura 12).

Según [17] el riesgo se puede definir como la pérdida o daño anual esperado que puede medirse mediante criterios humanos (muertos, heridos o desalojados), económicos o estructurales, e incluso ecológicos.

1.4. Antecedentes y problemática

Las laderas del *Parc Natural de la Muntanya de Montserrat* se encuentran afectadas por desprendimientos de rocas, que fácilmente superan los 1000 m³ de roca movilizada. Estos constituyen un riesgo natural importante para todos los elementos expuestos, donde cabe destacar el monasterio con todas sus instalaciones de hospedaje y servicios

turístico-culturales, las infraestructuras viarias (carreteras de acceso al Parque y al Monasterio), las infraestructuras ferroviarias (destacando el tren cremallera), el teleférico de acceso al Monasterio y los usuarios del Parque Natural.

Durante los últimos 5 años se han producido desprendimientos de rocas en zonas muy frecuentadas por los visitantes. El propio Monasterio, la principal carretera de acceso (ver figuras 13 y 14). El aparcamiento de vehículos y el tren-cremallera se han visto seriamente afectados por este fenómeno geológico. En la tabla 2 se destacan algunos de los eventos de caídas de bloques que han afectado algún elemento vulnerable expuesto. En consecuencia, y de cara a la caracterización de la problemática y la búsqueda de soluciones, el Institut Geològic de Catalunya (IGC) y el Grupo de investigación RISKMAT de la Universitat de Barcelona (UB), empezaron a realizar diversos estudios sobre los desprendimientos de rocas.

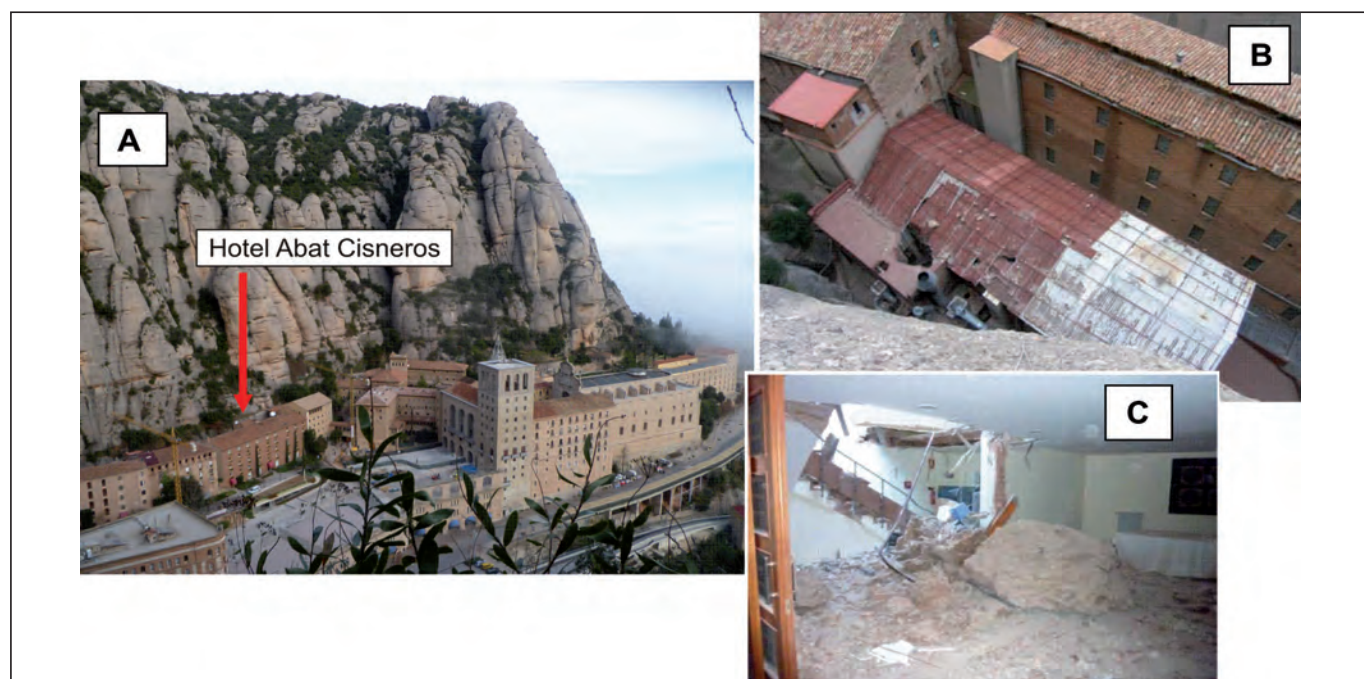
Tabla 2. Inventario de algunos desprendimientos sucedidos en el Parc Natural de la Muntanya de Montserrat donde se detallan las principales afectaciones a los elementos expuestos. Fuentes: [19 y 20].

FECHA	ZONA DE SALIDA	VOLUMEN APROXIMADO	AFECCIÓN	INFORMACIÓN ADICIONAL
Marzo 1546	El Sostre de la pared del Diable (encima el Monasterio)	10 – 100 m³	Destruyó la enfermería “Hospital” y murieron cuatro monjes.	
19/05/1927	Pared de los Jardines	1.5 m de diámetro	Impacto del bloque en una antigua cisterna y contra la pared del dormitorio de los monaguillos, el impacto desplazó las camas del orden de 1m.	
28/03/1991	Vía Crucis	Prisma de unos 250 m³, el bloque mayor de unos 90m³	Funicular de la Santa Cova, camino de acceso camping, y agujero de 15 m de ancho en el bosque.	
1991	Paret Seca	Columna de 50m de altura y unos 1275 m³	Pista del camino dels canals, zona donde actualmente hay el cremallera, pero en ese momento aun no era operativo.	

FECHA	ZONA DE SALIDA	VOLUMEN APROXIMADO	AFECCIÓN	INFORMACIÓN ADICIONAL
10/06/2000	Paret de encima las celdas de los monjes	0.5 m <sup>3</sup>	Destrozo el techo de chapa y la fachada de un almacén situado a la base del escarpe. El bloque se paró en la entrada del edificio de administración de las celdas del Monasterio.	Episodio importante de inundaciones.
10/06/2000	Sant Jeroni	Lastra de grandes dimensiones	Destrucción de algunas de las torres eléctricas del centro de telecomunicaciones de Sant Jeroni	Episodio de inundaciones
Abril 2004	Serrat del Moro	> 100 m <sup>3</sup>	Vía de escalada del Serrat del Moro.	Prisma de conglomerado en forma de lágrima
29/01/2006	Paret Degotalls	180 m <sup>3</sup>	Daños en carretera y cremallera.	
02/01/2007	Paret Degotalls	Entre los dos eventos se movilizaron 954m3 de roca	Carretera, cremallera y camino de Degotalls.	
28/12/2008	Paret Degotalls			
04/11/2008	Serrat de Barretines	Lastra 320 m <sup>3</sup>	Carretera de (desde el Bruc) y BP-1121 (desde Monistrol).	
24/09/2010		10-100 m <sup>3</sup>	Acceso al Monasterio BP-1103 (desde el Bruc) y muy puntual en la carretera BP-1121 (desde Monistrol)..	
15/12/2010	Pared encima hotel Abat Cisneros	Lastra de roca <1m <sup>3</sup>	Daños en cocina y sala La Vall del hotel Abat Cisneros.	

Las características físicas y sociales de la montaña de Montserrat y los eventos peligrosos vividos han puesto de manifiesto el interés en estudiar los diferentes fenómenos peligrosos que afectan la montaña.

La gran mayoría de los trabajos técnicos del IGC han ido encaminados al diseño y ejecución de obras de defensa, mientras que las investigaciones del Grupo RISKNAT se han centrado en la caracterización de los desprendimientos.



**Figura 13.** A-Vista de la pared del Monasterio de Montserrat donde se ubica el hotel Abat Cisneros. B y C- Daños en el hotel Abat Cisneros como consecuencia del desprendimiento de Diciembre de 2010, en B se observan los daños en la cubierta y en C el estado con el que quedo la sala de congresos del hotel. Fuente: A. Archivo RISKNAT, B y C de [18].



MARTES, 30 DICIEMBRE 2008

VIVIR

## LOS EFECTOS DEL TEMPORAL



CESAR ROMERO VACAS / EFE

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**  
Manresa

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. Se calcula que, una vez cese el mal tiempo, se necesitarán cuatro días para los trabajos de saneamiento y estabilización de la pared afectada y cuatro días más para la operación de limpieza de la vía de acceso al monasterio, donde quedaron depositadas 200 toneladas de roca.

Tras estas actuaciones, los propietarios de los doscientos vehículos que quedan en el aparcamiento de Montserrat deberían poder recuperar sus coches a través de un paso provisional y controlado. El presidente del patronato, Jordi López, aseguró ayer que todos los vehículos están en perfectas condiciones y anunció que se ha habilitado un teléfono (93-877-77-66) donde se explicará a los propietarios lo que pueden hacer hasta que se abra éste paso provisional. Pero no a todos los conductores les resultará tan fácil recuperar su coche. Hay quien deberá de recorrer muchos kilómetros, incluso tomar el

avión, 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, Manel 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 escolanía esté de vacaciones, han contribuido a disminuir considerablemente el número de turistas en la montaña sagrada, según han confirmado desde Montserrat.●

**Figura 14.** Noticia publicada en *La Vanguardia* el 30 de diciembre de 2008 con la reseña de uno de los desprendimientos ocurridos estos últimos años. En este evento casi 2000 personas tuvieron que ser evacuadas con el teleférico.

Hasta el presente no se había abordado ningún análisis en profundidad de los distintos factores del riesgo geológico que representan las caídas de rocas en todo el ámbito del Parque Natural.

1.4.1. Estudios específicos de la Montaña de Montserrat

Existen estudios académicos realizados en la montaña de Montserrat que son de gran interés para este proyecto y que se describen brevemente a continuación:

- Estudio de investigación de [21] donde se estudia la propagación de desprendimientos de rocas y la

influencia de las características de las laderas, en la montaña de Montserrat.

- [22] por encargo del IGC realiza un inventario de los efectos de los aguaceros de Junio del 2000 en la montaña de Montserrat. Mayoritariamente se observa movimientos de masa superficiales canalizados por los torrentes y canales, y solo se identificó un desprendimiento importante en el “Canal de Sant Jeroni”. Dentro de este proyecto se realizó un mapa de susceptibilidad a los flujos [23].
- [24] estudió los efectos de los obstáculos y las características de las laderas sobre el alcance de

TÍTULO	INSTITUCIÓN	FECHA
Dictamen sobre el risc de despreniments 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 despreniments 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 despreniments de pedres produïts a Monistrol de Montserrat el dia 9 de febrer de 1996.	Servei Geològic de Catalunya (actualmente IGC)	13/02/1996
Els despreniments 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
Nota tècnica sobre l'actual estat d'estabilització del massís rocós origen dels despreniments que van afectar al camí vell de Sant Miquel l'any 1991 (Montserrat).	Servei Geològic de Catalunya (actualmente IGC)	26/02/2001
Projecte d'estabilització del massís rocós origen dels despreniments de l'any 1991 sobre el Camí de Sant Miquel i el Viacrucis de Montserrat.	Servei Geològic de Catalunya (actualmente IGC)	04/05/2001
Estudi geotècnic del massís rocós origen dels despreniments que ven afectar el Camí Vell de Sant Miquel (Montserrat).	Servei Geològic de Catalunya (actualmente IGC) y RSE (actualmente GEOCAT)	-/03/2003
Nota sobre el despreniment esdevingut el 29/01/06. Cremallera de Montserrat. Treballs urgents.	Servei Geològic de Catalunya (actualmente IGC)	12/12/2003
Nota sobre el vol de reconeixament efectuat al funicular de Sant Joan i al despreniment del camí dels Degotalls a Montserrat (Colibató i Monistrol de Montserrat).	RSE (actualmente GEOCAT)	31/01/2006
Nota sobre el vol de reconeixament efectuat als despreniments del camí de Sant Miquel i el camí dels Degotalls a Montserrat (Collbató i Monistrol de Montserrat).	Servei Geològic de Catalunya (actualmente IGC) y RSE (actualmente GEOCAT)	16/02/2006
Nota sobre el vol de reconeixament efectuat als despreniments 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)	16/02/2006
Nota sobre el despreniment de la paret dels Degotalls del dia 2 de gener de 2007.	IGC y GEOCAT	02/01/2007
Actuació d'urgència a la paret dels Degotalls del dia 2 de gener de 2007	IGC y GEOCAT	-/-/2007

Figura 15. Relación de documentos realizados por el Institut Geològic de Catalunya y la empresa Geocat. Fuente: [20].



los desprendimientos en diferentes sitios de Cataluña, y entre ellos, la montaña de Montserrat.

- [20] y [25] definen las principales zonas de desprendimientos en la montaña de Montserrat a partir de fotografías aéreas y ortofotos de diferentes años, y de un inventario de desprendimientos recientes.
- [6] evalúa la susceptibilidad a la caída de bloques y masas rocosas en la pared del Monasterio.

Además de estos estudios científicos, distintos organismos de la Generalitat de Catalunya (el IGC, Geocat, Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya (FGC), PMM, Direcció General de Carreteres (DGC) del Departament de Territori i Sostenibilitat de la Generalitat de Catalunya) han realizado estudios técnicos, proyectos y obras para evaluar el grado de peligro e instalar defensas en las zonas con elementos vulnerables especialmente sensibles, como el Monasterio de Montserrat o el tren cremallera, funiculares y accesos a la montaña [26]. En la figura 15 se detalla la relación de informes realizados por el IGC y Geocat.

Es de gran interés destacar [27 y 28] donde se evalúa la peligrosidad de desprendimientos de roca a escala 1:25.000 con el *Mapa per a la Prevenció dels Riscos Geològics* (MPRG25M) como una herramienta de análisis y planificación territorial.

#### 1.4.2. Estudios metodológicos

Según la definición de la Oficina de *United Nations Disaster Relief Co-ordinator* (UNDRO) el término riesgo se refiere a las pérdidas esperadas de un peligro concreto para uno de los elementos especificados en riesgo en un tiempo futuro determinado [29 y 30].

El riesgo se puede estimar como el producto de la peligrosidad por la exposición y por la vulnerabilidad para un tiempo determinado. Para los desprendimientos de roca, [8] en 1978 ya propuso la siguiente ecuación:

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

Donde:

H: peligro o probabilidad potencial de una caída de rocas de una magnitud determinada.

E: exposición de un elemento o un grupo de elementos en riesgo (propiedades, personas) a la caída de rocas.

V: vulnerabilidad de los elementos expuestos.

C: Valor de los elementos expuestos.

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 [31], siendo muy poco el desarrollo de la evaluación de la exposición.

Sin embargo, algunos autores abordan su definición y cuantificación, como es el caso de [32], que define el término exposición física como la combinación de la frecuencia de un peligro y la población expuesta. Otros autores como [33], agrupan vulnerabilidad y exposición y lo definen como elementos en riesgo.

La vulnerabilidad es el grado de pérdida de un elemento en la zona afectada por el fenómeno [34]. Los principales daños pueden ser estructurales, funcionales y sociales. Los procedimientos para evaluar la vulnerabilidad en el caso de caída de rocas aun se encuentran en desarrollo [35]. 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 [31].

Existe un gran número de estudios de caída de bloques [36 y 37] pero pocos son los autores que abordan el estudio de la exposición y la vulnerabilidad a este fenómeno [38].

## 2. OBJETIVOS

### Objetivo principal

- Evaluación y cartografía de la exposición a los desprendimientos de roca de los elementos vulnerables en el *Parc Natural de la Muntanya de Montserrat*. Este objetivo principal conlleva los siguientes objetivos específicos.

### Objetivos específicos

- Proponer una metodología para evaluar la exposición.
- Identificar, inventariar y clasificar por tipologías los diferentes elementos vulnerables (permanentes / temporales, estructurales / socioculturales / humanos/ etc.).
- Realizar una cartografía del grado de exposición de los elementos vulnerables.

Aplicar la metodología desarrollada en el Parc Natural de la Muntanya de Montserrat, centrando el ámbito territorial del proyecto en las zonas con los principales elementos expuestos.

## 3. DISEÑO METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN Y MATERIALES

En el informe de evaluación global sobre la reducción del riesgo de desastres de la [39] 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.

### 3.1. Diseño metodológico de la investigación

#### 3.1.1. Problemática e interés de la investigación

El rápido desarrollo urbanístico y la limitación del espacio, especialmente en zonas montañosas, ha creado la nece-

sidad de construir en zonas potencialmente expuestas a peligros geológicos. En estas zonas es necesario evaluar el grado de exposición de los elementos expuestos para poder realizar un paso más en la cuantificación del riesgo.

Frente a esta situación y la problemática existente en la zona de estudio descrita en el apartado 1D consideramos que el interés del proyecto reside en dos aspectos fundamentales:

- a) en las aportaciones que se pretenden realizar en el proceso de análisis y evaluación del riesgo por desprendimientos de rocas. Especialmente en el estudio y cuantificación del grado de exposición de los elementos vulnerables.
- b) seguir avanzando en la resolución de la problemática causada por los desprendimientos en la montaña de Montserrat para la mitigación del riesgo.

Por estas razones estructuramos la presente investigación en una primera parte donde se desarrolla y propone una metodología para la evaluación de la exposición de los elementos vulnerables a los desprendimientos; y en una segunda parte se aplica la metodología desarrollada para ver su aplicabilidad y analizar su utilidad en una zona piloto: el *Parc Natural de la Muntanya de Montserrat*.

Con esta investigación se busca el desarrollo de una metodología a escala 1:25.000 del grado de exposición a los desprendimientos que de a los gestores del territorio el conocimiento del estado actual del área y las herramientas necesarias para la mitigación de los riesgos naturales, y en particular del riesgo de desprendimientos.

El problema que aborda la investigación tiene en cuenta los siguientes aspectos fundamentales:

- Existencia de eventos de desprendimientos con consecuencias en los bienes existentes. Se pone de manifiesto la importancia de su conocimiento y la necesidad de tener en cuenta su existencia en la planificación de los espacios y la gestión del territorio.
- La complejidad de actores que trabajan en un mismo territorio y las necesidades propias de cada uno de ellos. Aunque se ha constatado el gran interés de cada uno de estos agentes para abordar la problemática de los desprendimientos.
- El conocimiento de la exposición a los desprendimientos como un medio para generar conciencia frente a la realidad.

### 3.1.2. Preguntas e hipótesis de trabajo

La complejidad de la cuantificación del riesgo a los desprendimientos y la necesidad de conocer la realidad de los elementos expuestos a estos han llevado a considerar las siguientes preguntas como ejes de la presente investigación:

- ¿Cómo construir una metodología que evalúe el grado de exposición de los elementos vulnerables frente a los desprendimientos, fácilmente aplicable al territorio?

- ¿Es posible utilizar la información existente?
- ¿Qué aspectos debe considerar esta metodología?
- ¿De qué manera se puede conocer y expresar la realidad del territorio frente a los desprendimientos? ¿Evaluando escenarios representativos?

Las hipótesis de trabajo realizadas para esta investigación son:

- Constatar la exposición de los elementos vulnerables existentes en una zona donde se producen desprendimientos.
- Constatar y aceptar la limitación de los resultados condicionados por la información de partida. De manera que los datos existentes nos condicionan el análisis y, en consecuencia, los resultados pero que es imprescindible adoptarlos para poder seguir avanzando en el conocimiento del riesgo.
- Constatar la variación del grado de exposición de los elementos según los diferentes escenarios que se producen en la zona de estudio.

### 3.2. Elementos vulnerables considerados

El número de elementos vulnerables presentes en el territorio es muy diverso. En esta investigación nos centraremos en los elementos de interés presentes en la zona de estudio y en particular en aquellos de los que hemos podido obtener la información mínima necesaria para poder evaluar su grado de exposición. De manera que los elementos estudiados son: el tren-cremallera, los funiculares, los vehículos que circulan por carreteras, los usuarios de caminos y los elementos permanentes no móviles (Monasterios, edificios residenciales, ermitas, estaciones de tren y funiculares, edificios industriales, equipamientos, depósitos de agua, etc.).

En este proyecto se propone la metodología para evaluar el grado de exposición de los elementos vulnerables numerados anteriormente y también el grado de exposición de las personas que ocupan o utilizan estos elementos, de manera que también se propone la metodología para evaluar: las personas en los caminos, en el tren-cremallera, en los funiculares, en los vehículos circulando por carreteras y las personas dentro de edificios.

No se considera directamente en el análisis de la exposición el Funicular aéreo (teleférico) de acceso al Monasterio desde Monistrol. Pero si se tiene en cuenta su aporte de personas al recinto del Monasterio.

La empresa que gestiona el tren-cremallera realizó un análisis estadístico de los visitantes al recinto del Monasterio de Montserrat con motivo de la proyección del nuevo tren-cremallera de Montserrat, a continuación se presenta una síntesis de los datos estadísticos [40]:

- Montserrat recibió 2.5 millones de visitantes en el 1998.
- El 84% de los visitantes acceden a Montserrat por carretera.
- De los visitantes que llegan por carretera con vehículo privado o autobús discrecional, el 69% lo

hacen desde Monistrol de Montserrat y el 31% desde Can Maçana (El Bruc).

- Las llegadas al Monasterio se concentran por la mañana, y la hora punta en un día de máxima afluencia se sitúa entre las 10 y las 11. La bajada, por el contrario, se efectúan de manera escalonada desde el mediodía y durante toda la tarde.
- En la mitad de los días del año hay más de 6000 visitantes y más del 10% de los días del año hay más de 9000 visitantes.
- El Monasterio dispone de un aparcamiento limitado a 550 coches y 22 autocares y el Funicular Aéreo de Montserrat tiene una capacidad para 140 viajeros/hora con salidas cada 15 minutos.

En el anexo A se presenta el mapa M1 donde se ubican geográficamente los elementos considerados y se presentan en forma de fichas las características principales de cada uno de ellos (ver fichas de la F1 a la F5 Anexo A). A continuación se hará una descripción de las características más relevantes de cada uno de los elementos considerados en este trabajo.

### 3.2.1. Tren-Cremallera

El tren-cremallera es una alternativa de transporte a los vehículos de acceso al Monasterio de Montserrat y al Parque Natural, ayudando a descongestionar sus accesos. Su infraestructura consta de una vía de más de cinco kilómetros de longitud con 3 estaciones: Monistrol de Montserrat, Monistrol-tila y Montserrat, y su explotación la lleva a cabo *Ferrocarrils de la Generalitat de Ca-*

*talunya* (FGC). En la figura 16 se puede ver un tren-cremallera momentos antes de entrar a la estación de Montserrat.

La estación de Monistrol de Montserrat es una estación de la línea Llobregat-Anoia de FGC que enlaza con el tren-cremallera. Dispone de una línea de conexión entre la vía general y la vía del tren-cremallera. De la estación salen dos vías independientes, una del tren-cremallera en dirección la estación de Monistrol-tila, y la otra de la línea Llobregat-Anoia dirección Manresa hacia el Norte y dirección Barcelona hacia el Sur. Estas vías comparten un primer túnel hacia el Norte de la estación y se separan justo antes del túnel de la Foradada. La estación de Monistrol-tila es la estación principal del tren-cremallera. Dispone de dos aparcamientos con 1000 plazas para coches y 70 para autocares y de varios servicios como punto de información, cafetería, etc. La estación de Montserrat se ubica debajo de la plaza de la Creu y se integra plenamente en su entorno paisajístico. De las tres estaciones que dispone el tren-cremallera solo la de Montserrat se ubica en zona de desprendimientos, de manera que solo esta se tendrá en cuenta en los elementos permanentes.

Entre las estaciones de Monistrol de Montserrat y de Monistrol-tila la vía es de un sistema convencional de adherencia, pero entre Monistrol-tila y Montserrat los más de cuatro kilómetros que separan las estaciones son con sistema de cremallera con un desnivel de casi 550m. El trazado no dispone de pasos a nivel y es en vía única en todo el recorrido menos en las estaciones y en un tramo intermedio de vía doble de 420 m de longitud donde se realiza el cruce de los trenes.



Figura 16. Tren-cremallera segundos antes de entrar a la estación de Montserrat. Fuente: RISK NAT.



El transporte máximo de pasajeros de 2011 se realizó el día del Pilar (12 de Octubre) con unos 12000 viajeros entre subidas y bajadas. La franja horaria de mayor afluencia en el tren-cremallera se concentra habitualmente de 10:15 a 12:15 por las mañanas y de 16:30 a 18:30 por las tardes.

Durante la construcción del nuevo tren-cremallera en el año 2003 se realizaron trabajos de acondicionamiento y sujeción de las zonas más inestables de los taludes y las laderas próximas al trazado del tren. Se instalaron barreras y dispositivos de protección homologados en gran parte del trazado. En esta investigación no se tendrán en cuenta ya que su objetivo es evaluar la exposición natural y no la exposición protegida. Gracias a estas medidas de protección realizadas por FGC se puede considerar que el grado de exposición actual del tren-cremallera es menor al calculado en este proyecto, aunque su cuantificación necesita de un estudio específico a la escala adecuada.

### 3.2.2. Funiculares

La zona de estudio cuenta con dos funiculares: Funicular de Sant Joan y Funicular de la Santa Cova. Estos se construyeron a principios del siglo XX con el fin de trasladar a los peregrinos y visitantes hasta los lugares más emblemáticos de la montaña. Los funiculares están dotados de una vía simple en todo su recorrido menos en un tramo central que es de vía doble con el fin de realizar el cruce de vehículos, y de dos estaciones (una superior y una inferior) situadas en los extremos de las líneas.

El año 1918 se construyó el funicular de Sant Joan para comunicar la zona del Monasterio con la ermita de Sant Joan (ver figura 17), ubicada en la parte alta del macizo donde también se localiza el mirador del mismo nombre. El recorrido del funicular es de 503 m y supera un desnivel de 248 m con una pendiente del 65.2%. El 1997 se modernizaron las instalaciones y se dotaron de vehículos panorámicos con los que se pueden observar las magníficas vistas durante los trayectos.

Desde el año 1929 está en funcionamiento el funicular de la Santa Cova que conecta el Monasterio con las proximidades de la emblemática Santa Cova (Cueva Santa), que según la tradición es el lugar donde se encontró la virgen de Montserrat. En la figura 18 se puede ver una vista del funicular de la Santa Cova y una foto de la Santa Cova. El funicular recorre un trazado de 262 m con un desnivel de 118 m (56.6% de pendiente). Este funicular ha sido renovado en diferentes ocasiones (1963 y 1991) la última de ellas en el 2000 debido a las graves inundaciones que sufrió la montaña en de aquel año, que afectaron profundamente las instalaciones destruyendo parcialmente la estación inferior y uno de los vehículos [w5].

El transporte máximo de viajeros durante 2011 en el funicular de Sant Joan se realizó la festividad del Pilar con unos 3500 viajeros, en cambio, en el funicular de la Santa Cova se produjo la festividad del Viernes Santo con unos 1500 viajeros. La franja horaria que habitualmente con-

centra la mayor afluencia en los funiculares es de 13:30 a 15:30, justo después de que la Escolanía de Montserrat cante la Salve y el *Vírolai* en la Basílica.

Las velocidades de circulación de los funiculares son diferentes, el funicular de Sant Joan se desplaza a 5.40 km/h mientras que el funicular de la Santa Cova se mueve a 7.2 km/h.



**Figura 17.** Fotografía donde se puede observar el trazado del funicular de Sant Joan que supera un desnivel de 248 m, con 503 m de recorrido. En los extremos de la línea se ubican sus estaciones.

### 3.2.3. Vehículos en carreteras

La red de carreteras y caminos de la zona de estudio es muy extensa y con gran variabilidad de características. En este trabajo nos centraremos 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 la C-55 y la C-58. En la figura 19 se presenta la ubicación de estas carreteras en referencia al *Parc Natural de la Muntanya de Montserrat* y a las poblaciones más cercanas.

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. La BP-1121 desde la carretera C-55 en la



Figura 18. A- Fotografía de gran parte del trazado del funicular de la Santa Cova de un total de 262 m y un desnivel de 118 m donde se ven los dos vehículos panorámicos y su estación inferior. B- Entrada a la Santa Cova que según la tradición es donde se encontró la virgen de Montserrat.



Figura 19. Mapa con la ubicación de las carreteras estudiadas (C-55, C-58, BP-1121 y BP-1103) respecto al Parc Natural de la Muntanya de Montserrat y a las poblaciones más cercanas. Fuente: modificado de [w6].



vertiente este de la montaña, y la BP-1103 o desde el Bruc (A-2) la vertiente oeste o desde Sant Salvador de Guardiola (C-37) en la vertiente norte y NE. La carretera BP-1121 tiene más circulación de vehículos que la BP-1103 siendo un valor habitual de intensidad media diaria (IMD) de 700 vehículos en la BP-1121 y 300 en la BP-1103. Por el contrario las carreteras C-55 y C-58 son vías de muy alta circulación de vehículos que habitualmente

supera los 15000 vehículos diarios, en su mayor parte de un solo carril por sentido. Los principales caminos se evaluarán en el apartado de usuarios en caminos.  
Se ha obtenido los datos IMD en 5 puntos de la red de carreteras de la zona de estudio de las cuatro vías consideradas, en la tabla 3 se presentan las estaciones de aforo y en el mapa incluido en la ficha F3 del anexo A se puede ver su ubicación.

Tabla 3. Relación y ubicación de las estaciones de aforo de IMD de las carreteras principales de la zona de estudio.

Estación de aforo de IMD	Carretera	PK	Población	Definición tramo	Tipo
1	BP-1121	12.000	Monistrol de Montserrat	Entrada aparcamiento monasterios.	Datos de entrada al aparcamiento del PMM.
2	BP-1121	11.275	Monistrol de Montserrat	Carretera de acceso al monasterio desde Monistrol de Montserrat.	Temporal
3	BP-1103	5.000	Marganell	Carretera de acceso al monasterio desde Can Maçana.	Temporal
4	C-55	11.300	Collbató	Límite comarcal del Baix Llobregat con el Bages.	Permanente
5	C-55	16.703	Castellbell i el Vilar	Enlace C-58	Permanente
6	C-58	37.077	Vacarisses	Enlace C-55	Permanente

Las estaciones de aforo de IMD 2 y 3 son temporales y solo se recoge una medida al año de manera que no permite realizar escenarios y se hace difícil valorar su representatividad. De manera que se ha tomado como datos las entradas al aparcamiento de Montserrat asumiendo que el número real sería mayor, por que no todos los vehículos entran en el recinto. A partir de la estimación realizada por FGC en [40] se ha atribuido el 70% de la entrada de vehículos a la carretera BP-1121 y el 30% restante a la BP-1103. En la figura 20 se puede observa una fotografía de las carreteras BP-1121 y BP-1103 cuando se juntan justo en la entrada del aparcamiento del Monasterio de Montserrat.

Cuando se calcula las personas dentro de vehículos que circulan por carreteras es conveniente estimar con precisión el número de ocupantes de estos vehículos. En este sentido el PMM nos ha facilitado el número medio de ocupantes habituales de los vehículos que acceden al aparcamiento del monasterio siendo 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 las carreteras BP-1121 y BP-1103.



Figura 20. A- Carretera BP-1121 (derecha) y BP-1103 (izquierda) donde se juntan pocos metros antes de la entrada del aparcamiento del Monasterio de Montserrat. B- Carretera BP-1121 en la entrada del aparcamiento de monasterio justo en la unión con la carretera BP-1103.

3.2.4. Usuarios de caminos

Desde hace años el PMM tiene interés en conocer el número de visitantes del parque natural para una mejor gestión. Los diferentes medios de transporte (tren-cremallera y aéreo) que dan acceso contabilizan los usuarios a partir de la venta de billetes y por carretera se estima con la entrada de vehículos del aparcamiento y una ocupación media de estos vehículos. Pero quedaba contabilizar el número de visitantes que acceden caminando al parque. Por este motivo en 2008 el PMM instaló 3 eco-contadores que toman datos de los usuarios de caminos en el parque natural llegando a tener hasta 6 puntos de registro en la actualidad.

Los eco-contadores son unos equipos diseñados expresamente para el recuento de personas y se utilizan para contar el número de personas que transita por un punto determinado. En los eco-contadores no se registra si estas personas recorren un camino entero o solo un tramo. Se instalan en puntos de paso estrecho para garantizar que se registren todos los excursionistas. En la figura 21 se puede ver el aspecto que presenta un eco-contador instalado en un camino. Los eco-contadores están pensados para registrar datos las 24h del día y diferenciar el sentido de circulación de los excursionistas.



Figura 21. Aspecto de un eco-contador instalado en un camino. Fuente: [41].

De los 6 eco-contadores existentes 5 se sitúan dentro de la zona de estudio, quedando fuera el del camino de Can Maçana. Aunque se ha utilizado otro punto de medida en el camino de la Santa Cova justo en la estación inferior del funicular de la Santa Cova, equiparando los datos proporcionados por el funicular a un eco-contador. De manera que se han evaluado 6 puntos diferentes de caminos.

En la tabla 4 se describe el camino donde se ubican los eco-contadores y su posicionamiento en coordenadas X y Y y, en la figura 22 se puede ver un croquis con su ubicación relativa dentro del parque (ver ficha F4 del anexo A). La toma de datos de estos 6 eco-contadores ha sido discontinua en el tiempo desde 2008 pero proporciona datos fiables del número de usuarios en estos puntos de los caminos.

Las velocidades al andar adoptadas para el cálculo de la exposición han sido de 2.2 km/h en los caminos de zonas de paseo, donde la familias de visitantes realizan pequeñas excursiones (eco-contadores 2 y 6), y 4.0 km/h donde los usuarios de estos caminos suelen ser excursionistas (eco-contadores 1, 3, 4 y 5).

3.2.5. Elementos permanentes

En la zona de estudio se han inventariado un total de 151 elementos permanentes entre Monasterios, edificios residenciales, ermitas, estaciones de tren y funiculares, edificios industriales, equipamientos, depósitos de agua, etc. Su distribución en el territorio es muy irregular, pero se agrupan principalmente en cuatro zonas:

- En el Monasterio de Montserrat y sus proximidades se concentran la mayoría de edificios de más de 5 plantas, la basílica y todas las estaciones de funicular, la estación superior del aéreo de Montserrat y la única del tren-cremallera que está dentro de la zona de desprendimientos (ver figura 23).
- En Monistrol de Montserrat, una pequeña parte del núcleo urbano de Monistrol queda dentro de la zona expuesta a desprendimientos y las casas que la forman son edificios plurifamiliares de alturas de dos o tres pisos mayoritariamente o casa unifamiliares. A pie de la carretera C-55 que cruza la po-

Tabla 4. Ubicación de los 6 eco-contadores instalados en el Parc Natural de la Muntanya de Montserrat.

Eco-contador	Coordenadas (X,Y)*	Camino	Observaciones
1	(403575, 4605504)	De les Aigües	GR-5 y GR-96
2	(402937, 4605368)	Vell de Sant Jeroni	
3	(402839, 4604988)	Nou de Sant Jeroni	
4	(404046, 4603460)	Collbató	GR- 5, GR-6 y GR-172
5	(401181, 4607742)	Santa Cecília	GR-4
–	(397499, 4607396)	Can Maçana	Merendero
“6”	(403292, 4605176)	Santa Cova	Datos de usuarios del funicular de la Santa Cova

\* Datos proporcionados por el PNMM.



Figura 22. Croquis de la ubicació de los 6 eco-contadores (indicados con círculos de color) existentes en el parque natural 5 de los cuales se ubican en la zona de estudio (1 a 5) y del punto de control en el camino de la Santa Cova (6). Fuente: modificado de [42].

blación se han identificado siete edificios plurifamiliares de alturas entre cuatro y cinco plantas. Se han identificado en esta zona algunos equipamientos y edificios industriales que representan aproximadamente el 5% del total de elementos permanentes.

- En las zonas residenciales de Monistrol de Montserrat: situadas al NW de la población prácticamente la totalidad de los elementos permanentes identificados son casas unifamiliares o edificios de cómo máximo dos plantas.
- En la zona urbana de Collbató, en la parte sur del macizo, se identifican aproximadamente un 10% de todos los elementos inventariados y se caracte-

rizan por ser casas unifamiliares de cómo máximo 2 plantas.

El resto de elementos permanentes inventariados se encuentran dispersos por la montaña y se trata principalmente de ermitas, los Monasterios de Santa Cecília y Sant Benet, depósitos de agua y algún edificio abandonado.

Debido a la carencia de información de las personas que ocupan cada uno de estos elementos permanentes cada día, y sin posibilidad que definir escenarios exhaustivos, se ha tomado la decisión de clasificar los elementos permanentes en 5 categorías que definen su grado de ocupación: Muy alta, Alta, Media, Baja y Baja y ocasional. En la tabla 5 se definen estas categorías y se detallan los edificios que las forman.

Tabla 5. Categorización de los elementos permanentes según su ocupación habitual.

CATEGORÍA OCUPACIÓN	OCUPACIÓN EDIFICIO	ELEMENTOS PERMANENTES
Muy Alta	> 200 pers/día	Basilica
Alta	50 – 200 pers/día	Hoteles, monasterios, edificios eclesiásticos de vivienda colectiva (dormitorio monjes y escolanía) estaciones de tren-cremallera, funiculares y aéreo, edificios plurifamiliar de más de 6 plantas y restaurantes grandes.
Media	5 – 50 pers/día	Edificios plurivivienda, edificios industriales, restaurantes pequeños a medianos y equipamientos.
Baja	1 – 5 pers/día	Viviendas unifamiliares, casas aisladas y parroquias.
Baja y ocasional	< 1 pers/día	Ermitas aisladas, depósitos de agua y edificios abandonados.





Figura 23. Aspecto que presentan los edificios presentes en el recinto del Monasterio de Montserrat.

### 3.3. Materiales

En este apartado se pretende presentar de manera sintética todos los materiales utilizados para el desarrollo de este proyecto y la procedencia de cada uno de ellos.

#### 3.3.1. “Mapa de Prevenció als Riscos Geològics” (MPRG25M)

El *Mapa de Prevenció als Riscos Geològics* (MPRG25M) es un documento generado por el *Institut Geològic de Catalunya* (IGC) en colaboración con la empresa GEO-CAT donde se representa la peligrosidad geológica del territorio a escala 1:25000. Se trata de un mapa multipeligro que zonifica el territorio para cada peligro clasificado en peligrosidad alta, media y baja, con una representación semafórica y una simbología que permite identificar que fenómeno es el causante de la peligrosidad. El MPRG25M tiene por objetivo dar apoyo en la planificación territorial.

El desarrollo del MPRG25M consta de tres fases [19]:

- *Cartografía de fenómenos y de indicios de actividad*: la cartografía e inventario de fenómenos y de indicios de actividad se realiza en base a la información obtenida a partir de la recopilación y análisis de documentación histórica, de análisis e interpretación de fotografías aéreas de vuelos (antiguos y modernos), del reconocimiento de campo y de encuestas realizadas a la población.
- *Determinación de la susceptibilidad*: se delimitan las áreas susceptibles del fenómeno, incluyendo

las zonas de generación del fenómeno (zona de salida) como las zonas que se pueden ver afectadas por este durante su recorrido (zona de trayectoria y zona de llegada). La delimitación de las zonas susceptibles tiene en cuenta el inventario de fenómenos, los indicios de actividad y geomorfológicos y la identificación de litologías y morfologías del terreno favorables. En esta fase se realizan modelizaciones numéricas de soporte para determinar las zonas de salida y de alcance.

- *Determinación de la peligrosidad*: una vez delimitadas las zonas susceptibles estas se clasifican según su peligrosidad en base a la intensidad y frecuencia de ocurrencia de los fenómenos observados o potenciales. Para cada fenómeno la determinación de la intensidad varía y se determina en base a las dimensiones y energías esperadas, por el contrario, la frecuencia se determina a partir del inventario de fenómenos y a los indicios de actividad. La peligrosidad se representa con 3 grados: bajo, medio y alto, representados con color amarillo, naranja y rojo respectivamente.

Los fenómenos considerados son los movimientos de laderas (desprendimientos, deslizamientos, flujos torrenciales, movimientos complejos, etc.), hundimientos (subsidiencias y colapsos), aludes de nieve, inundabilidad y sismicidad.

La serie del IGC del MPRG25M no se ha desarrollado para toda Catalunya, pero gran parte del *Parc Natural de la Muntanya de Montserrat* se encuentra cartografiado en

las hojas de Olesa de Montserrat (n.392-1-2) [27] y Monistrol de Montserrat (n. 392-1-1) [28]; El IGC ha facilitado el estudio de campo y el proyecto final de peligrosidad en formato *shape* para poder realizar el análisis SIG.

En el mapa M2 del anexo A se puede ver la peligrosidad por desprendimientos de la zona de estudio y la asociación de frecuencias de ocurrencia que se ha realizado y que se detalla en el apartado 4Ac.

### 3.3.2. Cartografía base

Para el desarrollo de este proyecto ha sido imprescindible el uso de información cartográfica en formato digital para diferentes fases de la investigación como son la identificación y ubicación de los elementos vulnerables, los cálculos en sistemas de información geográfica y la representación cartográfica de los resultados entre otros. La información utilizada procede de varias fuentes:

1. Página web de Nexus Geografics [w7], web del *Departament de Territori i Sostenibilitat* de la Generalitat de Catalunya [w8] que ofrece la posibilidad de descargarse gratuitamente información geoambiental en los formatos DXF/DBF y Miramon;
2. Página web del ICC mediante el visualizador de mapas Vissir3 [w9] que permite la descarga gratuita de cartografía, toda la cartografía de esta página se ha utilizado en formato *shape* y con sistema de referencia ETRS89.
3. El resto de información ha sido facilitada o cedida por diferentes organismos como el ICC, la DGC, el IGC o el PNMM.

A continuación se detalla la geoinformación utilizada en esta investigación y su procedencia:

- Zonificación de los espacios naturales de protección especial denominada *Espais naturals de protecció especial* (ENPE) actualizado el 01/12/2010 de la página web de Nexus [w7].
- Red de ríos de las cuencas principales de Catalunya actualizado el 31/12/2004 de Nexus [w7].
- *Mapa geológico de Catalunya* a escala 1:25.000 la hoja 392-1-1 de Monistrol de Montserrat y de la hoja 392-1-2 de Olesa de Montserrat.
- Base topográfica a escala 1:5000 del ICC las hojas 280-114 de Marganell, la 280-115 de Cal Martorell, la 280-116 de el Bruc de Dalt, la 280-117 de el Bruc, la 281-114 de Sant Cristòfol, la 281-115 de Monistrol de Montserrat, la 281-116 del Monestir de Montserrat y la 281-117 de Collbató, la 282-114 de el Borràs, la 282-115 de les Comelles, la 282-116 de el Hospici, la 282-117 de la Puda de Montserrat.
- Base topográfica a escala 1:25000 del ICC las hojas 392-1-1 (71-29) de Monistrol de Montserrat y la 392-1-2 (71-30) de Olesa de Montserrat.
- Mapa topográfico a escala 1:10000 del ICC las hojas 140-057 de Marganell, la 140-058 de Sant Pau de la Guàrdia, la 140-059 de el Bruc, la 141-057 de Sant Vicenç de Castellet, la 141-058 de Monistrol de Montserrat y la 141-059 de Olesa de Montserrat.

- Ortofoto a escala 1:5000 del ICC las hojas 280-114 de Marganell, la 280-115 de Cal Martorell, la 280-116 de el Bruc de Dalt, la 280-117 de el Bruc, la 281-114 de Sant Cristòfol, la 281-115 de Monistrol de Montserrat, la 281-116 del Monestir de Montserrat y la 281-117 de Collbató, la 282-114 de el Borràs, la 282-115 de les Comelles, la 282-116 de el Hospici, la 282-117 de la Puda de Montserrat.
- Ortofoto a escala 1:25000 del ICC las hojas 71-29 de Monistrol de Montserrat y la 71-30 de Olesa de Montserrat.
- Modelo de elevaciones del terreno 15x15 (ASCII) del ICC.
- *Mapa de prevenció als riscos geològics* (MPRG25M) las hojas de Olesa de Montserrat (n.392-1-2) y Monistrol de Montserrat (n. 392-1-1) facilitado por el IGC en formato original, junto con el inventario de indicadores de campo y la memoria del proyecto.
- Modelo de elevaciones del terreno 2x2 (ASCII) del proyecto LIDARCAT cedido por el ICC a RISK NAT.

### 3.3.3. Carreteras

La información relativa a la ubicación de las estaciones de aforo de IMD en carreteras es consultable en la página web del *Departament de Territori i Sostenibilitat de la Generalitat de Catalunya* [w10], pero la información referente a los datos diarios registrados ha sido facilitada por la DGC.

### 3.3.4. Tren-cremallera y Funiculares (FGC)

*Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya* (FGC) ha proporcionado los datos de explotación del tren-cremallera y de los funiculares de Sant Joan y de la Santa Cova, los recuentos de usuarios y el dossier del tren-cremallera que se elaboró durante la construcción del nuevo tren-cremallera en el 2003 [40].

### 3.3.5. Entradas al aparcamiento del Monasterio de Montserrat y datos eco-contadores

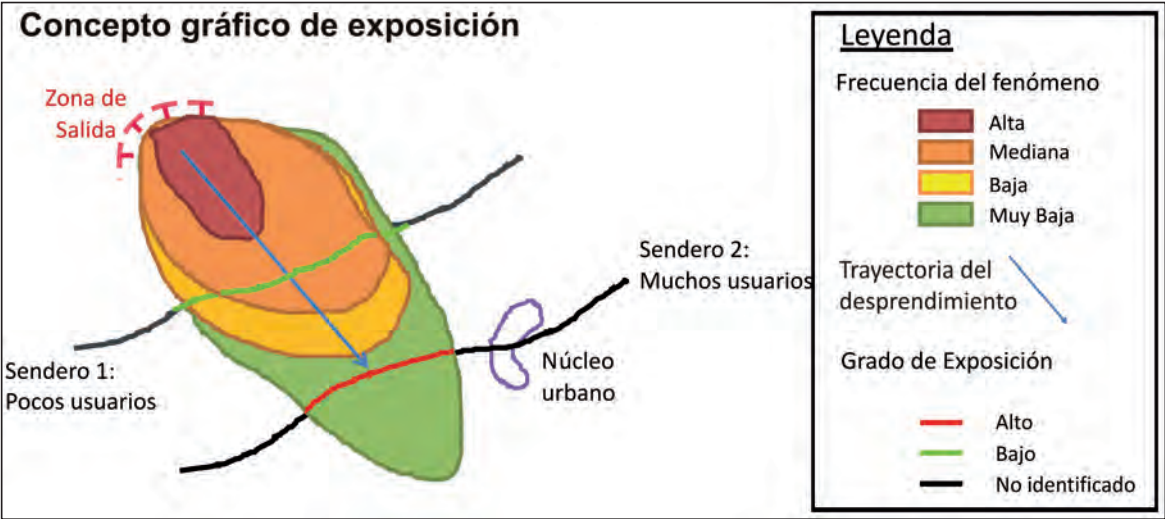
El *Patronat de la Muntanya de Montserrat* (PMM) y el *Parc Natural de la Muntanya de Montserrat* (PNMM) han cedido datos relativos al recuento diario de vehículos que han entrado el aparcamiento del Monasterio de Montserrat y los datos diarios detallados por franjas horarias de los eco-contadores respectivamente.

## 4. RESULTADOS

### 4.1. Metodología desarrollada

#### 4.1.1. Definición de la metodología

El riesgo se puede estimar como el producto de la peligrosidad por la exposición y por la vulnerabilidad en un de-



**Figura 24.** Esquema del escenario tipo para estimar la exposición. Donde se identifica una zona de actividad de desprendimientos en base a la frecuencia de ocurrencia y los elementos vulnerables expuestos que la cruzan.

**Tabla 6.** Clasificación de los elementos vulnerables identificados en la zona de estudio según su morfología espacial y su presencia temporal.

		Permanente	Temporal
Areal	Recinto Monasterio	- Edificio residencial, templo, hoteles, jardines, etc.	- Usuarios
	Estación	- Edificio	- Usuarios
	Aparcamiento	- Infraestructura asociada	- Usuarios - Vehículos
	Otros diversos	- Ermitas, refugios, edificios aislados, depósitos de agua etc.	- Usuarios
Lineal	Tren cremallera	- Vías - Catenaria - Infraestructura asociada	- Usuarios - Vagones
	Tren FGC	- Vías - Catenaria - Infraestructura asociada	- Usuarios - Vagones
	Teleférico	- Infraestructura (torres y cable)	- Usuarios - Cabina
	Funicular	- Vía	- Usuarios - Cabinas teleférico - Cabinas funicular
	Carretera	- Firme - Infraestructura asociada	- Usuarios (vehículos y personas)
	Senderos	- Sendero - Infraestructura asociada	- Usuarios
	Calle	- Calle - Infraestructura asociada	- Usuarios (vehículos y personas)
	Línea eléctrica	- Torres y cables	
Puntual	Persona		- Usuarios (habitantes, visitantes, excursionistas y escaladores)
	Vehículo		- Autocares - Coches - Motos
	Otros diversos	- Torres eléctricas - Infraestructuras puntuales (antenas, torres, pequeñas infraestructuras, etc.)	



terminado período de tiempo. Para los desprendimientos de roca, Varnes 1978 ya propuso la siguiente ecuación:

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

Donde:

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

E: exposición de un elemento o un grupo de elementos en riesgo a la caída de rocas.

V: vulnerabilidad de los elementos expuestos.

C: valor de los elementos expuestos.

En este proyecto se propone una metodología para evaluar la exposición en base al producto de la frecuencia de ocurrencia del fenómeno por una función de exposición del elemento vulnerable.

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

Donde:

E: Exposición para una tipología de elemento vulnerable.

F: Frecuencia de ocurrencia de un fenómeno potencialmente peligroso.

$f(e_v)$ : Función de exposición, específica para cada tipología de elemento vulnerable.

El término frecuencia de ocurrencia se ha presentado en el apartado 1C donde se introducen los desprendimientos como fenómeno geológico.

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,  $f(e_v)$ , 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.

De manera que para la cuantificación de la exposición se considera la zonificación de la frecuencia de desprendimientos y las características propias del elemento vulnerable que se quiere estudiar. En la figura 24 se ilustran gráficamente los conceptos que se tienen en cuenta en la evaluación de la exposición.

El cálculo del grado de exposición se basa en el flujo metodológico esquematizado en la figura 25 y el cual consta de seis fases:

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 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.

En los siguientes subapartados de este capítulo se explica con mayor detalle como se desarrolla cada uno de estos pasos.

#### 4.1.2. Tipología 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 (tabla 6).

A partir de esta primera clasificación se identifican las particularidades de los elementos vulnerables y se reagrupan aquellos que comparten características similares (tabla 7).

Para el cálculo de la exposición se considerará separadamente el conjunto de elementos sin personas y en una fase posterior estos elementos con personas.

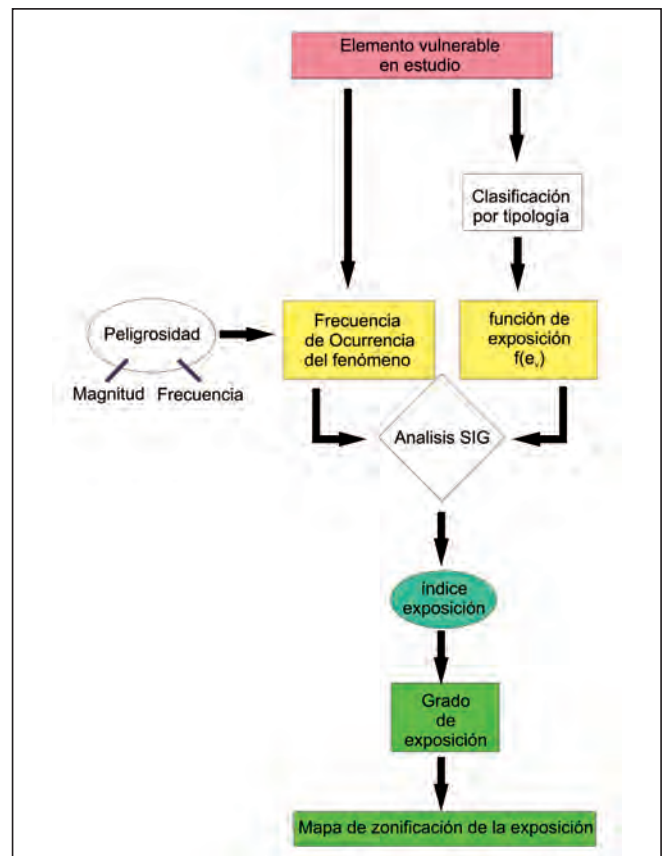


Figura 25. Flujo metodológico para el análisis del grado de exposición de un elemento vulnerable.

#### 4.1.3. Zonificación de la frecuencia de ocurrencia del fenómeno

En la zona de estudio la frecuencia de ocurrencia de desprendimientos se ha obtenido a partir del proyecto de evaluación de la peligrosidad a los desprendimientos realizado por el IGC en la serie del *Mapa per a la Prevenció dels Riscos Geològics* (MPRG25M) 1:25.000. Donde la peligrosidad se define como una relación en base a la Magnitud y Frecuencia/actividad del fenómeno (tabla 8).

**Tabla 7.** Clasificación por tipologías de los elementos vulnerables existentes que se evalúan en este proyecto según las características comunes que comparten. La exposición se considerará separadamente el conjunto de elementos sin personas y en una fase posterior estos elementos con personas.

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 funiculares 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 funiculares, edificios industriales, equipamientos, depósitos de agua, etc.).
Personas en edificios	Personas que ocupan edificios permanentes.

**Tabla 8.** Relación Magnitud-Frecuencia según la definición de la peligrosidad en el *Mapa per a la Prevenció dels Riscos Geològics* del Institut Geològic de Catalunya [27 y 28].

PELIGROSIDAD: PB-Baja, PM –Media, PA- Alta		Frecuencia/Actividad del fenómeno		
Magnitud		Baja	Media	Alta
	Baja	PB	PB	PB
	Media	PB	PM	PM
	Alta	PM	PA	PA

La magnitud viene determinada por la energía del fenómeno y la frecuencia de ocurrencia por su periodo de retorno. En el estudio de la frecuencia además de la frecuencia de salida (de rotura y caída del bloque) también se ha considerado la de alcance, ya que la frecuencia (la probabilidad de llegada de un bloque desprendido) 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 corresponderá 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 MPRG por el IGC en base a la metodología aplicada en la confección del MPRG25M, la información de campo recopilada por Geocat, los conocimientos de la zona y las observaciones “in situ”. Se definen cuatro grados de frecuencia de ocurrencia relativa del fenómeno: Alta, media, baja y muy baja. En la figura 26 se muestra la peligrosidad y la asignación de frecuencia para una zona en detalle. En el anexo se puede observar el mapa completo de peligrosidad y el de frecuencia de ocurrencia de desprendimientos.

La serie del IGC del MPRG no se ha desarrollado para toda Catalunya, pero gran parte del Parc Natural de la Muntanya de Montserrat (PNMM) se encuentra cartografiado en las hojas de Olesa de Montserrat (n.392-1-2) y Monistrol de Montserrat (n. 392-1-1); El IGC ha facilitado el estudio de campo y el proyecto final de peligrosidad en formato shape para poder realizar el análisis SIG.

**4.1.4. Función de exposición del elemento vulnerable f (ev)**

La función de exposición de un elemento vulnerable **f(ev)** tiene en cuenta las características del elemento en estudio que afectan a la exposición y es única para cada tipología de elemento. En la figura 27 se exponen las f(ev) que se han elaborado para el cálculo del índice de exposición a escala 1:25.000.

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

El índice de exposición es un valor numérico resultado de multiplicar la frecuencia de ocurrencia de un fenómeno con 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 (Frecuencia Alta: 8, Media: 4, Baja: 2 y Muy Baja: 1). En la figura 28 se grafican a modo de ejemplo los valores obtenidos al calcular el índice de exposición para los vehículos (tren-cremallera, vehículos en carretera y funiculares) que circulan en la zona de estudio.

$$IE = F \times f(ev)$$

- Donde:
- IE: índice de exposición para una tipología de elemento vulnerable.
  - F: Frecuencia de ocurrencia de un fenómeno.
  - f(ev): función de exposición para una tipología dada de elemento vulnerable.

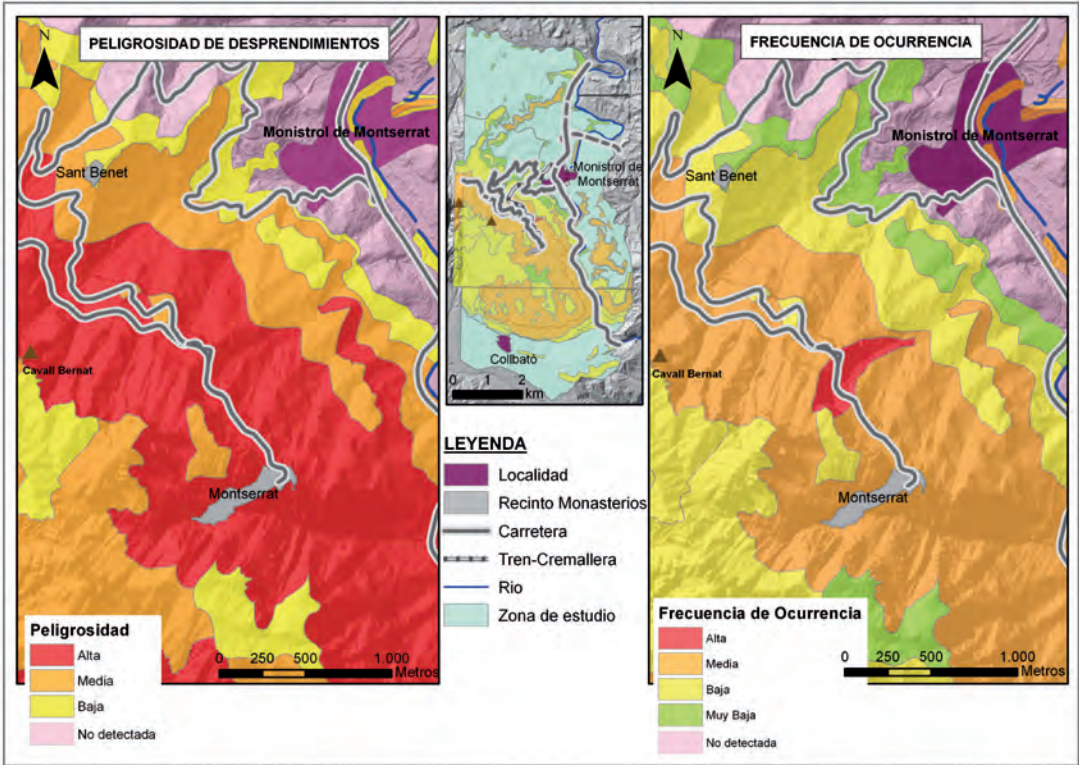


Figura 26. Detalle de la zonificación de la peligrosidad de desprendimientos del MPRG y de la asignación de frecuencias de ocurrencia del fenómeno realizada.

ELEMENTO VULNERABLE CONSIDERADO	FUNCIÓN DE EXPOSICIÓN f (ev)	
Vehículo en movimiento	$f(ev)v = \frac{(IMD/24)}{V_L} \times L$	IMD: intensidad media diaria [veh/d]. V <sub>L</sub> : velocidad de la vía [km/h]. L: Longitud del tramo [km].
Personas en vehículos	$f(ev)pv = \sum_{i=1}^{j=z} \frac{(IMD/24)}{V_L} \times Ov \times L$	IMD: Intensidad media diaria [veh/d]. V <sub>L</sub> : velocidad de la vía [km/h]. Ov: Ocupación media del vehículo [pers/veh].
Personas en caminos	$f(ev)pc = \frac{(U/24)}{Va} \times L$	U: número de personas usuarias de un camino [pers/d]. Va: Velocidad al andar [km/h] L: Longitud del tramo [km]
Elementos permanentes	$f(ev)pr = le \times p$	Le: longitud expuesta del objeto [m] p: altura en base al número de plantas.
Personas dentro de edificios	$f(ev)ppe = \frac{Oe}{le \times p}$	Oe: Ocupación media del edificio. le: longitud expuestas del edificio. p: altura en base al número de plantas.

Figura 27. Relación de funciones de exposición f(ev) que se proponen para el cálculo del índice de exposición de los elementos vulnerables considerados a escala 1:25.000.

4.1.6. Grado de exposición y representación de los resultados

Se propone crear el parámetro 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, los valores se agrupan en 4 categorías que corresponderán al

grado de exposición Bajo, Medio, Alto y Muy Alto. Tras realizar varias propuestas para la clasificación de los índices de exposición se han definido los intervalos de cada clase en base al orden de magnitud. De esta forma se va dando más peso a cada grado superior (siguiendo una escala logarítmica). Así, el orden de magnitud menor de los valores obtenidos en el cálculo del índice equivale al grado de exposición bajo, y aumenta de grado por cada



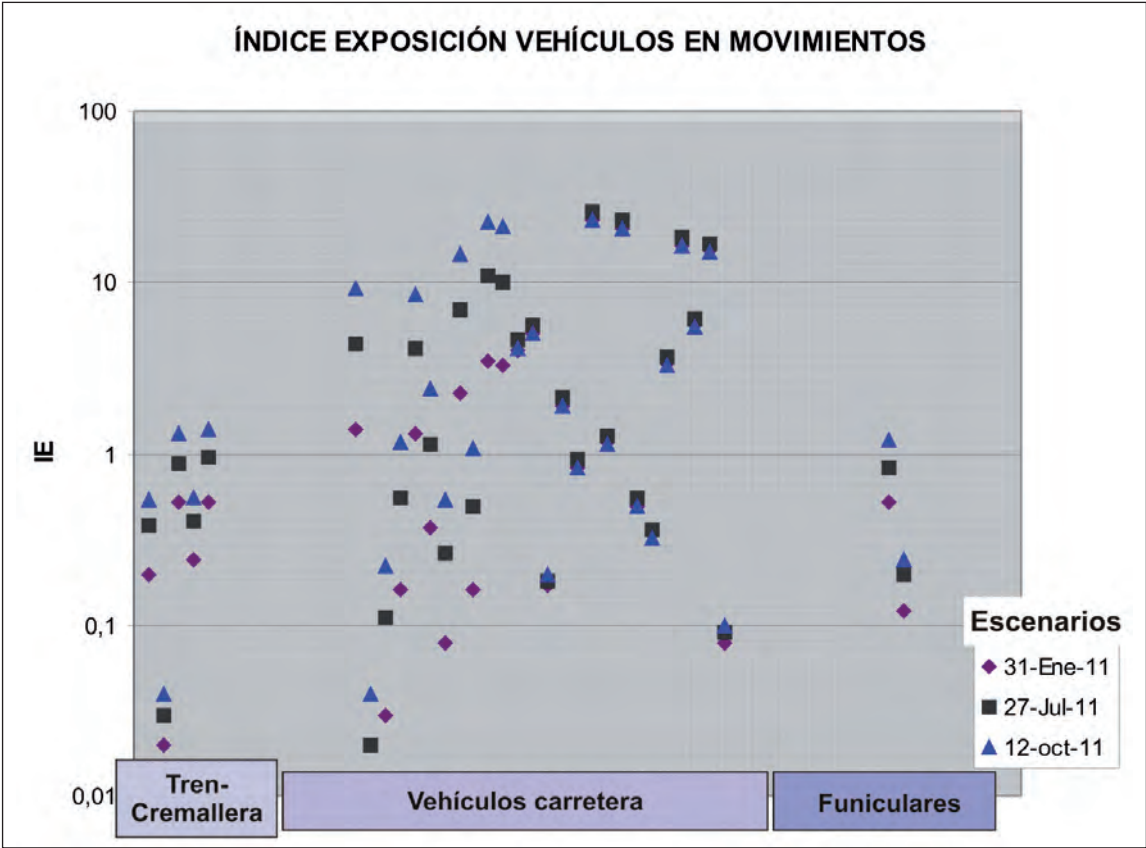


Figura 28. Representación del índice de exposición de los vehículo (vehículo en carretera, tren-cremallera y funiculares) de la zona de estudio en tres escenarios diferentes (31enero 2011, 27 julio 2011 y 12 octubre 2011).

orden de magnitud. En los índices donde se ha observado cinco grados de magnitud los dos grados de magnitud mayores corresponden al grado de exposición Muy Alto.

En la figura 29 se puede observar la correspondencia entre índices y grados de exposición en el caso del índice de exposición de los vehículo (vehículo en carretera, tren-cremallera y funiculares) de la zona de estudio en tres escenarios diferentes (31enero 2011, 27 julio 2011 y 12 octubre 2011).

Una vez definidos los límites de los grados de exposición se clasifican los polígonos obtenidos del análisis SIG en estas clases. La estimación del grado de exposición es un paso necesario para clasificar en categorías para luego zonificar y obtener el mapa de zonificación del grado de exposición. En la figura 30 se muestra a modo de ejemplo la zonificación del grado de exposición por desprendimientos de los vehículos (tren-cremallera, vehículos por carretera y funiculares) de la zona de estudio para el escenario del 27 de julio de 2011.

4.2. Resultados de aplicar la metodología a la zona de estudio

4.2.1. Asignación de Escenarios

Para la aplicación de la metodología a la zona de estudio se han considerado tres escenarios comunes

para las categorías de vehículos en movimiento, personas en vehículos y de personas en caminos. Los escenarios que se han seleccionado pretenden mostrar casuísticas de afluencia de usuarios del PNMM diferentes que se dan en la zona de estudio. Estos escenarios evaluados se basan en los datos recopilados para días concretos entendiendo que reflejan características de un día-tipo que se puede dar en situaciones futuras.

El escenario A define un contexto donde el número de usuarios presentes en la zona de estudio es mínimo y que por tanto los diferentes operadores que dan acceso a la zona turística planifican circulaciones de vehículos mínimas. Este escenario suele darse entre semana durante la temporada baja turística y se ha tomado como día-tipo el 31 de enero de 2011. El escenario B muestra una fotografía de la zona de estudio habitual que se suele dar en fines de semana de temporada baja o media y entre semana de temporada alta, se ha seleccionada como día-tipo el 27 de julio de 2011. El escenario C 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, el día-tipo es el 12 de octubre de 2011. En la tabla 9 se destacan las características de los escenarios evaluados y en la tabla 10 se resumen los datos que definen los escenarios.

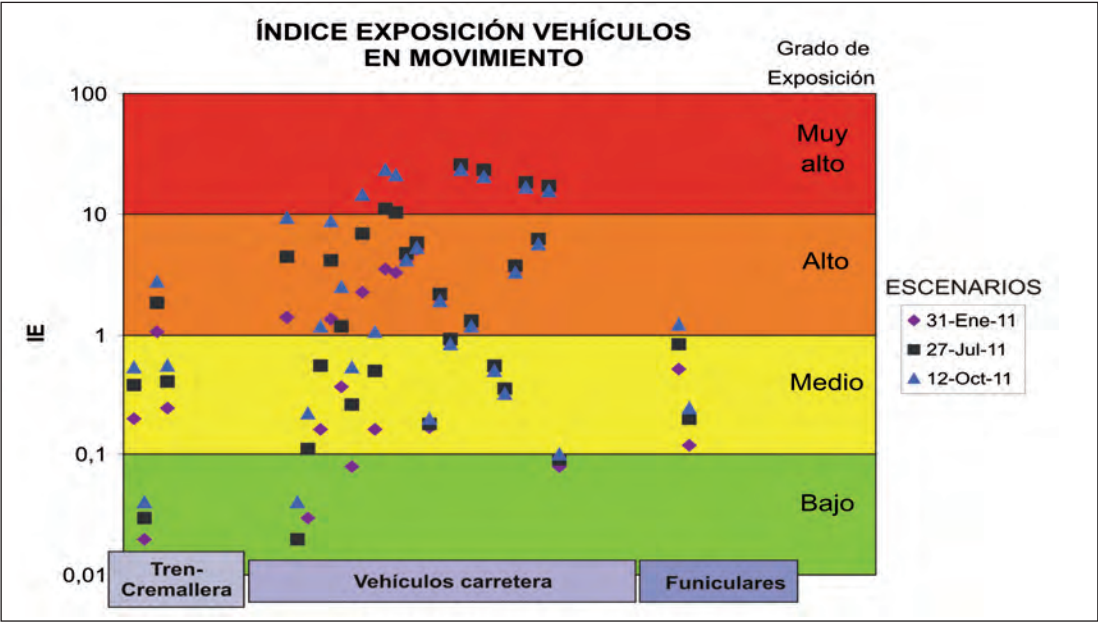


Figura 29. Clasificación de los índices de exposición en grados de exposición. En la columna de colores de la derecha se puede observar la correspondencia entre índices y grados de exposición en el caso del índice de exposición de los vehículo (tren-cremallera, vehículo en carretera y funiculares) de la zona de estudio en tres escenarios diferentes (31enero 2011, 27 julio 2011 y 12 octubre 2011).

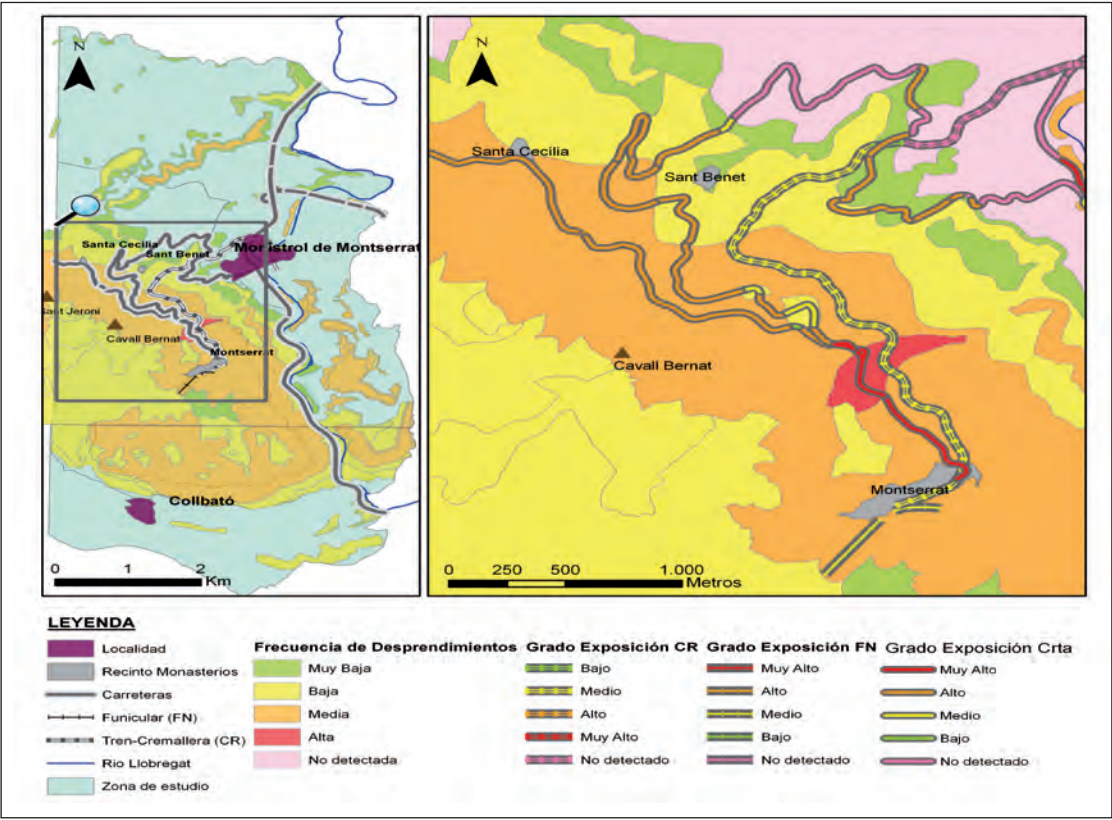


Figura 30. Detalle del Grado de exposición para vehículos en el escenario del 27 de julio de 2011.

Tabla 9. Datos característicos de los escenarios A, B y C.			
Escenario	Característica principal	Temporada turística	Día-Tipo
A	Escenario de mínimos	Baja	31 enero 2011 (lunes)
B	Escenario habitual	Alta	27 julio 2011 (miércoles de verano)
C	Escenario de máximos	Alta	12 octubre 2011 (festivo)

Tabla 10. Datos característicos de los escenarios del 31 de enero de 2011, 27 julio 2011 y 12 octubre de 2011.

Tipología elemento		Escenario A: 31 Enero 2011				Escenario B: 27 Julio 2011				Escenario C: 12 Octubre 2011			
Vehículos en movimiento	Tren cremallera <sup>1</sup>	44 viajes				78 viajes				92 viajes			
	Funiculares <sup>1</sup>	Sant Joan		Santa Cova		Sant Joan		Santa Cova		Sant Joan		Santa Cova	
		42 viajes		24 viajes		66 viajes		42 viajes		94 viajes		50 viajes	
	Vehículos en carreteras	CRTA.	C-55 <sup>2</sup>	C-58 <sup>2</sup>	BP-1103	CRTA.	C-55 <sup>2</sup>	C-58 <sup>2</sup>	BP-1121	BP-1103	CRTA.	C-55 <sup>2</sup>	C-58 <sup>2</sup>
		Vehículos	15985	16028	326	140	Vehículos	17685	17323	1012	434	Vehículos	15770
	Entradas aparca-miemento Monasterio de Montserrat <sup>3</sup>	total	motos	autocares	turismos	total	motos	autocares	turismos	total	motos	autocares	turismos
		233	0	21	212	723	4	45	674	1519	42	97	1380
Personas en vehículos en movimiento	Tren cremallera <sup>1</sup>	824 viajeros				3212 viajeros				11850 viajeros			
	Funiculares <sup>1</sup>	Sant Joan		Santa Cova		Sant Joan		Santa Cova		Sant Joan		Santa Cova	
		277 viajeros		68 viajeros		1688 viajeros		413 viajeros		3518 viajeros		1291 viajeros	
Personas en caminos	Personas en vehículos	CRTA.	BP-1121	BP-1103	CRTA.	BP-1121	BP-1103	CRTA.	BP-1121	BP-1103			
		Personas	2300	986	Personas	5984	2565	Personas	12636	5416			
	Camino (número eco contador)	Collbató (4)	Santa Cecilia (5)	Santa Cova	Collbató (4)	Santa Cecilia (5)	Santa Cova	Collbató (4)	Santa Cecilia (5)	Santa Cova			
	Usuarios	14	0	277	23	2	1693	339	78	3517			

Fuente de los datos:  
<sup>1</sup> FGC; <sup>2</sup> DGC; <sup>3</sup> PMM.

En el caso de personas en caminos se han considerado dos escenarios más ya que se disponía de más puntos de datos, y se ha realizado un análisis del grado de exposición más amplio. Se ha evaluado el escenario

D que considera un día-tipo habitual basado en los datos del 26 de marzo de 2010 y el escenario E que considera un contexto de alta afluencia de personas (tablas 11 y 12).

Tabla 11. Datos característicos de los escenarios D y E.

Escenario	Característica principal	Temporada Turística	Día-Tipo
D	Habitual	Baja	26 marzo 2010 (viernes)
E	Alta afluencia de personas – Domingo de Ramos	Media	28 marzo 2010 (domingo festivo)

Tabla 12. Datos característicos de todos los escenarios para la evaluación del grado de exposición de usuarios en caminos. Fuente de los datos: PNMM.

		Camino (número Eco-contador)					
Usuarios		Aigües (1)	Escales Pobles (2)	Nou de Sant Jeroni (3)	Collbató (4)	Santa Cecília (5)	Santa Cova
Escenario	D- 26 marzo 2010	127	439	309	16	1	119
	E- 28 marzo 2010	387	921	528	112	12	221
	A- 31 enero 2011	–	346	46	14	0	277
	B- 27 julio 2011	–	–	492	23	2	1693
	C- 12 octubre 2011	–	–	1525	339	78	3517

4.2.2. Índice de exposición

Como resultado de aplicar la metodología desarrollada en este proyecto se han obtenido los valores de índices de exposición de los elementos vulnerables considerados para cada escenario definido. A continuación se mostrarán los resultados de índice de exposición obtenidos para cada elemento vulnerable considerado junto con la función de exposición aplicada:

4.2.2.1. Vehículos en movimiento

El cálculo del índice de exposición de los vehículos en movimiento se ha realizado teniendo en cuenta las características propias de cada elemento vulnerable. De manera que se ha considerado por separado el tren-cremallera, los funiculares y los vehículos que circulan por la carretera. Tal como se ha presentado en el capítulo 4Ad de metodología, la función de exposición propuesta para la evaluación de la exposición de los vehículos en movimiento es:

f(ev)p<sub>v</sub> = (IMD/24) / V<sub>L</sub> x L

IMD: intensidad media diaria.  
V<sub>L</sub>: límite de velocidad de la vía.  
L: Longitud del tramo

Se han evaluado un total de 33 tramos de vía en cada uno de los tres escenarios definidos, de estos 5 pertenecen al tren-cremallera, 2 a los funiculares y 26 a carreteras.

Los valores obtenidos de índice de exposición para el tren-cremallera se distribuyen entre un mínimo de 0.02 para el escenario del 31 de enero de 2011 y un máximo de 1.40 para el escenario del 12 de octubre. El valor medio máximo de todos los tramos evaluados es de 0.77 y se observa para el escenario del 12 de octubre de 2011.

En el caso de las carreteras, el valor mínimo de índice de exposición obtenido es de 0.00001 referente a un tramo de vía del escenario del 31 de enero de 2011, en cambio el valor máximo de 25.98 se observa en el escenario del 27 de julio de 2011. El valor medio máximo de todos los tramos evaluados es de 6.92 y corresponde al escenario del 12 de octubre de 2011.

El índice de exposición para el caso de los funiculares tiene una muestra más pequeña de datos ya que tan solo existen dos tramos. En este caso el valor mínimo observado es de 0.12 para el 31 de enero de 2011 y el máximo de 1.20 para el 12 de octubre de 2011. El valor medio máximo de todos los tramos es de 0.72 y se da en el escenario del 12 de octubre de 2011.

En la figura 28 se grafican todos los valores de índice de exposición obtenidos para todos los tramos evaluados



de los vehículos en movimiento en los escenarios considerados.

4.2.2.2. **Personas en vehículos**

En el cálculo del índice de exposición de personas en vehículos se han considerado un total de 18 tramos de vía en 3 escenarios diferentes (A, B i C), de los cuales 5 son del tren-cremallera, 11 de las carreteras de acceso al Monasterio de Montserrat y 2 a los funiculares.

La función de exposición propuesta para la evaluación de la exposición de los vehículos en movimiento es:

$$f(ev)pv = \sum_{i=1}^{i=z} \frac{(IMD/24)}{VL} \times Ov \times L$$

- IMD: Intensidad media diaria.
- VL: límite de velocidad de la vía.
- Ov: Ocupación media del vehículo.
- L: Longitud del tramo.

Los valores obtenidos del índice de exposición para personas en vehículos varían de 0.04 a 135.40. Para el tren-cremallera se observa el mínimo de 0.27 para un tramo del escenario A y el máximo de 97.15 para el escenario C. El valor máximo de la media de todos los tramos del tren-cremallera se observa en el escenario C y es de 45.26.

En el caso de las carreteras, el valor mínimo de índice de exposición obtenido es de 0.04 de un tramo de vía del escenario A, en cambio el valor máximo de 135.40 se

observa en el escenario del C. El valor medio máximo de todos los tramos evaluados es de 44.20 y corresponde al escenario C.

El índice de exposición para el caso de los funiculares tiene una muestra más pequeña de datos ya que tan solo existen dos tramos. En este caso el valor mínimo observado es de 0.32 para el A y el máximo de 44.48 para el C. El valor medio máximo de todos los tramos es de 25.22 y se da en el escenario C.

En la figura 31 se grafican todos los valores de índice de exposición obtenidos para todos los tramos evaluados de los vehículos en movimiento en los escenarios considerados.

4.2.2.3. **Personas en caminos**

El cálculo del índice de exposición para persona en caminos se ha realizado para 6 ubicaciones diferentes en los 5 escenarios considerados (A, B, C, D y E). La función de exposición propuesta para la evaluación de la exposición de las personas en caminos es:

$$f(ev)pc = \frac{(U/24)}{Va} \times L$$

- U: número de personas usuarias de un camino diariamente.
- Va: velocidad al andar.

El valor mínimo obtenido de índice de exposición es de 0 y se observa en el camino de Santa Cecilia para el

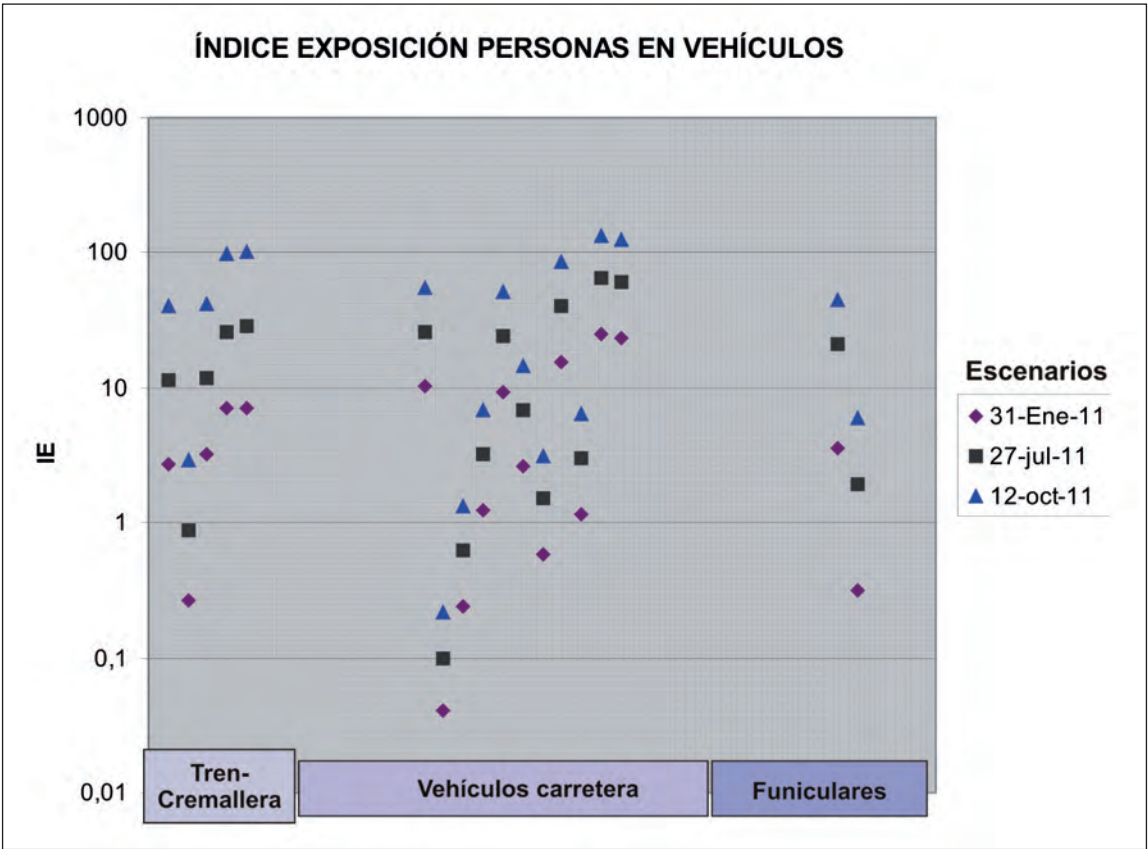


Figura 31. Valores del índice de exposición de personas en vehículos obtenidos para los tres escenarios considerados (A, B y C).



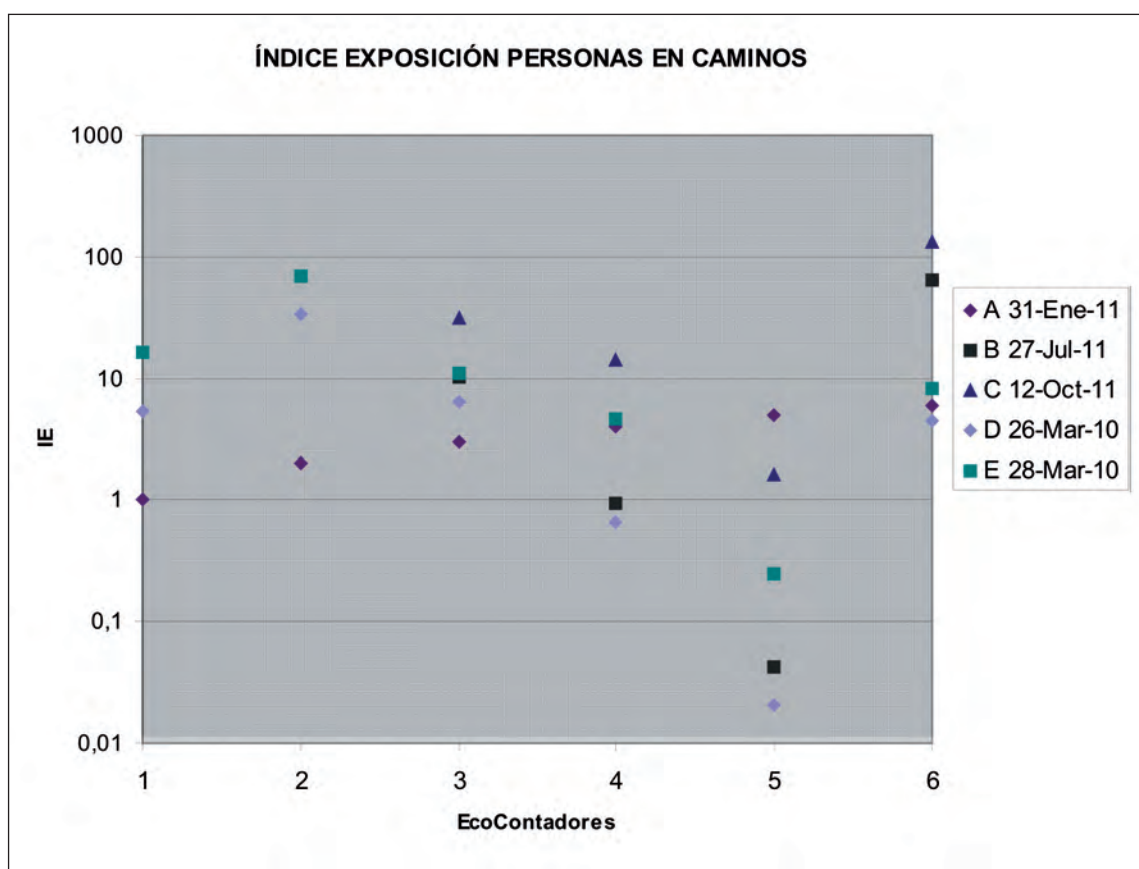


Figura 32. Valores del índice de exposición de personas en caminos obtenidos para los cinco escenarios considerados (A, B, C, D y E).

escenario A. En cambio, es en el camino de la Santa Cova en el escenario C donde se obtiene el valor máximo de 133.22. El valor medio máximo de los índices de exposición es de 45.19 dándose en el escenario C.

En la figura 32 se grafican todos los valores de índice de exposición obtenidos para cada camino y en cada uno de los escenarios considerados.

#### 4.2.2.4. Elementos permanentes

Para el cálculo del índice de exposición de elementos permanentes se han evaluado 151 elementos permanentes. La función de exposición utilizada para la evaluación de la exposición de los elementos permanentes es:

$$f(ev)_{pr} = le \times p$$

le: longitud expuesta de la edificación.

p: altura en base al número de plantas.

Los valores de índice de exposición de los elementos permanentes obtenidos van de 4.10 una parte muy pequeña de una casa unifamiliar a 1800.00 en los edificios del Monasterio de Montserrat. En la figura 33 se pueden observar todos los valores de índice de exposición obtenidos para los elementos permanentes. La mayoría se concentran entre 10 y 100 y corresponden a objetos del tipo: viviendas, casas aisladas, edificios pluriviviendas, equipamientos deportivos y restaurantes pequeños y medianos.

#### 4.2.2.5. Personas en edificios

En los 151 elementos permanentes identificados en la zona de estudio se ha evaluado la exposición de las personas en su interior. La función de exposición propuesta para la evaluación de la exposición de personas en edificios es:

$$f(ev)_{ppr} = \frac{Oe}{le \times p}$$

Oe: Ocupación media del edificio.

le: longitud expuesta del edificio.

p: altura en base al número de plantas.

Los valores de índice de exposición obtenidos van de 0.02 en el edificio del Hotel de la Colònia Puig actualmente abandonado a 17.84 en la estación inferior del Funicular de Sant Joan. En la figura 34 se pueden observar todos los valores de índice de exposición obtenidos para personas en edificios.

#### 4.2.3. Grado de exposición / Zonificación exposición

El grado de exposición es el resultado de agrupar en clases los valores de índice de exposición. Como se ha explicado en el apartado 4Af de resultados de metodología, cada clase equivale a un orden de magnitud. En este apartado se presentan los resultados de grado de exposición obtenidos y su expresión cartográfica, es decir, la zonificación de grado de exposición.

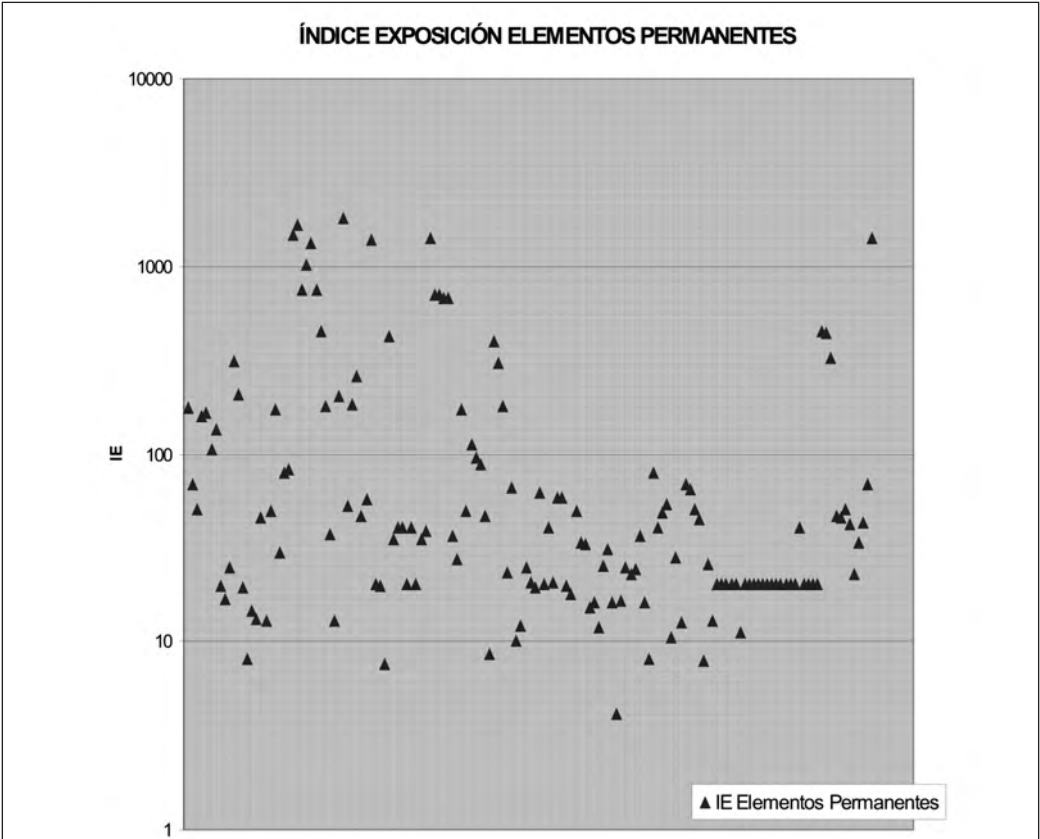


Figura 33. Valores del índice de exposición de elementos permanentes obtenidos en los 150 inmuebles evaluados. El eje X corresponde a cada elemento permanente.

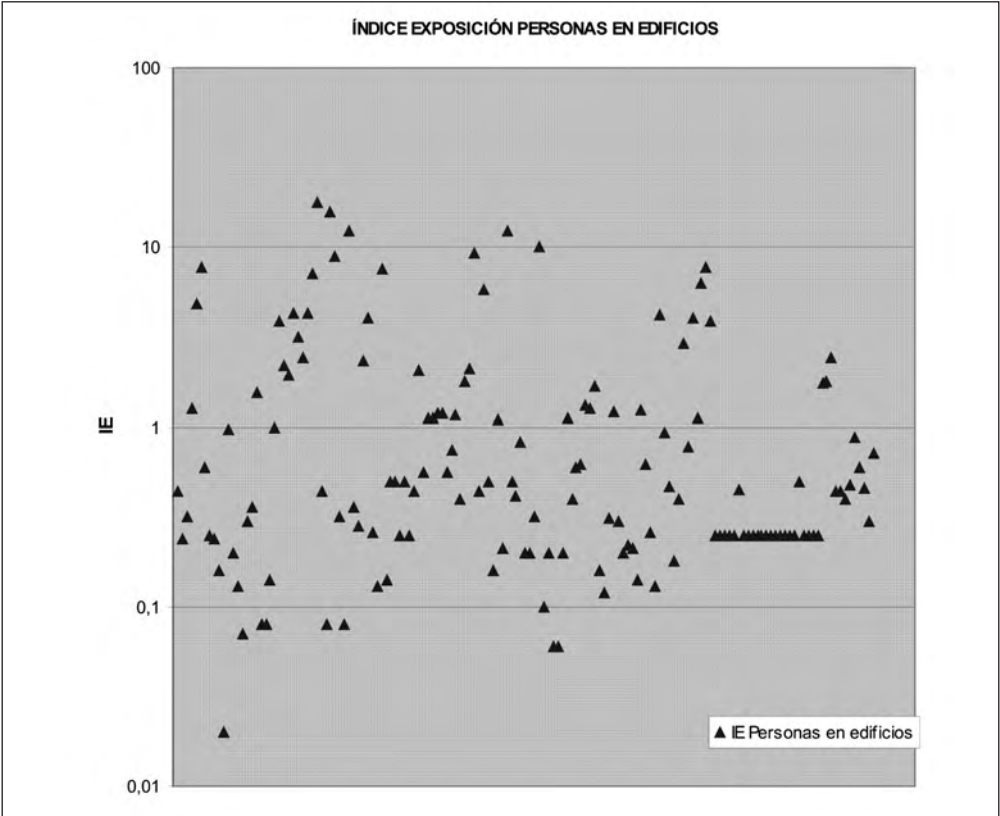


Figura 34. Valores del índice de exposición de personas en edificios obtenidos en los 151 inmuebles evaluados. El eje X corresponde a cada elemento permanente.

Como se ha definido en el apartado 4Ba, el escenario A define un contexto donde el número de usuarios presentes en la zona de estudio es mínimo y que por tanto los diferentes operadores que dan acceso a la zona turística planifican circulaciones de vehículos mínimas. Este escenario suele darse entre semana durante la temporada baja turística y se ha tomado como día-tipo el **31 de enero de 2011**. El escenario B muestra una fotografía de la zona de estudio habitual que se suele dar en fines de semana de temporada baja o media y entre semana de temporada alta, se ha seleccionada como día-tipo el **27 de julio de 2011**. El escenario C 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, el día-tipo es el **12 de octubre de 2011**. En la tabla 9 se destacan las características de los escenarios evaluados y en la tabla 10 se resumen los datos que definen los escenarios.

En el caso de personas en caminos se han considerado dos escenarios más de los que ya se disponía de más puntos de datos, y se ha realizado un análisis del grado de exposición más amplio. Se ha evaluado el escenario D que considera un día-tipo habitual basado en los datos del **26 de marzo de 2010** y el escenario E que considera un contexto de alta afluencia de personas (ver tabla 11 y 12).

4.2.3.1. Vehículos en movimiento

En este apartado se presentaran por separado los resultados de grado de exposición del tren-cremallera, los funiculares y los vehículos en carretera con el fin de profundizar en cada uno de ellos. Pero es interesante destacar que los tres elementos vulnerables siguen la misma tendencia en los diferentes escenarios siendo en el escenario A donde se observan los grados de exposición de menor nivel y los valores máximos en el escenario C.

**Tren-Cremallera.** En el tren-cremallera se han evaluado un total de 5 tramos en zona de desprendimientos (ver figura 35 y mapa M3 del anexo B). El trazado del tren-cremallera cruza todas las categorías de frecuencia de ocurrencia de desprendimientos quedando la estación de Monistrol-Vila (estación inferior del tren-cremallera) en una zona donde no se ha detectado el fenómeno.

En el escenario A un 20% de los tramos tienen un grado de exposición bajo, mientras que el 80% restante son de grado medio; no se ha detectado en este escenario ningún tramo de grado alto ni muy alto. En el escenario B la distribución sigue las mismas pautas que en el escenario A. en cambio en el escenario C un 20 % de los tramos siguen siendo de grado bajo, pero el 80% restante se distribuye en un 40 % de ellos de grado medio y otro 40 % de grado alto; en este escenario

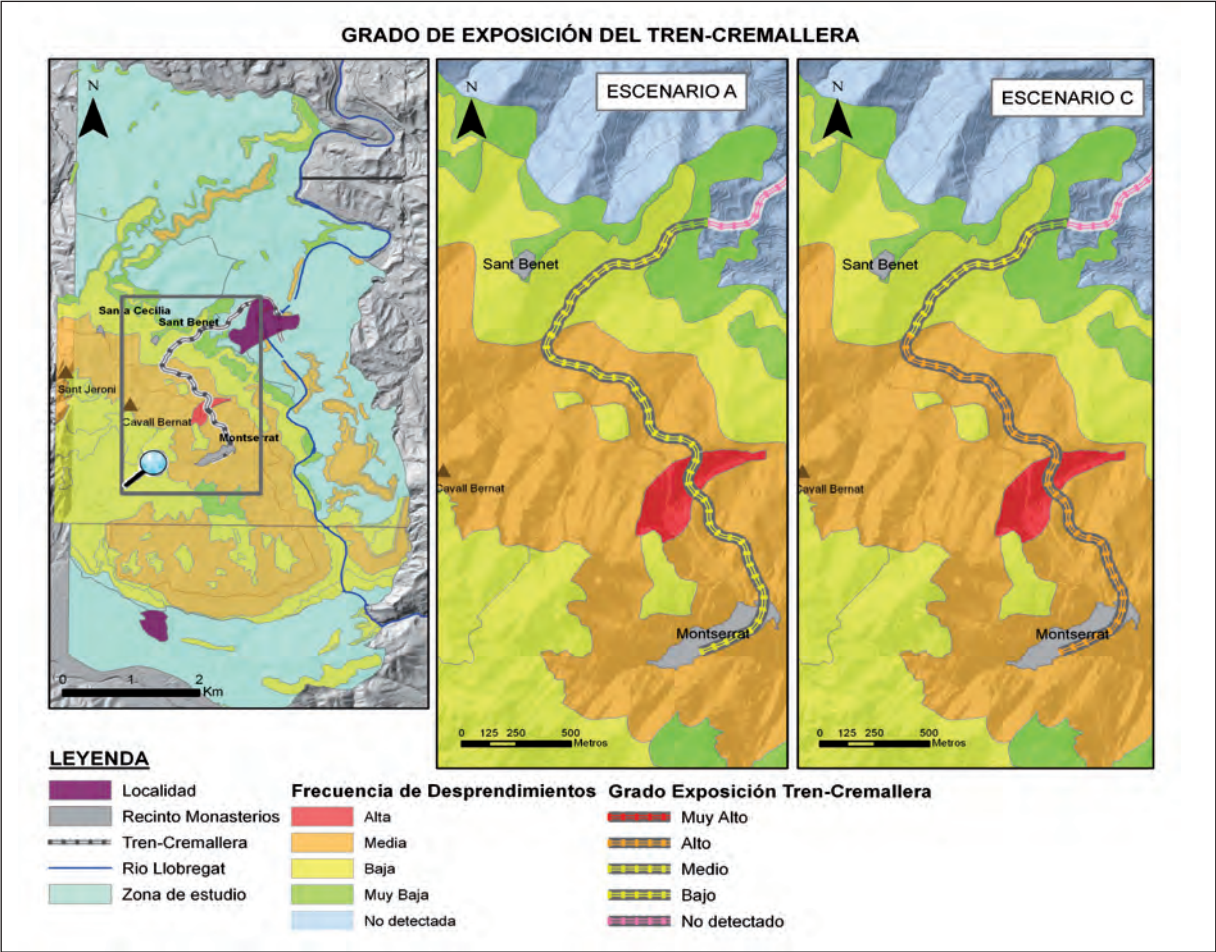


Figura 35. Detalle de la zona de estudio donde se observa el grado de exposición del tren-cremallera para los escenarios A y C.



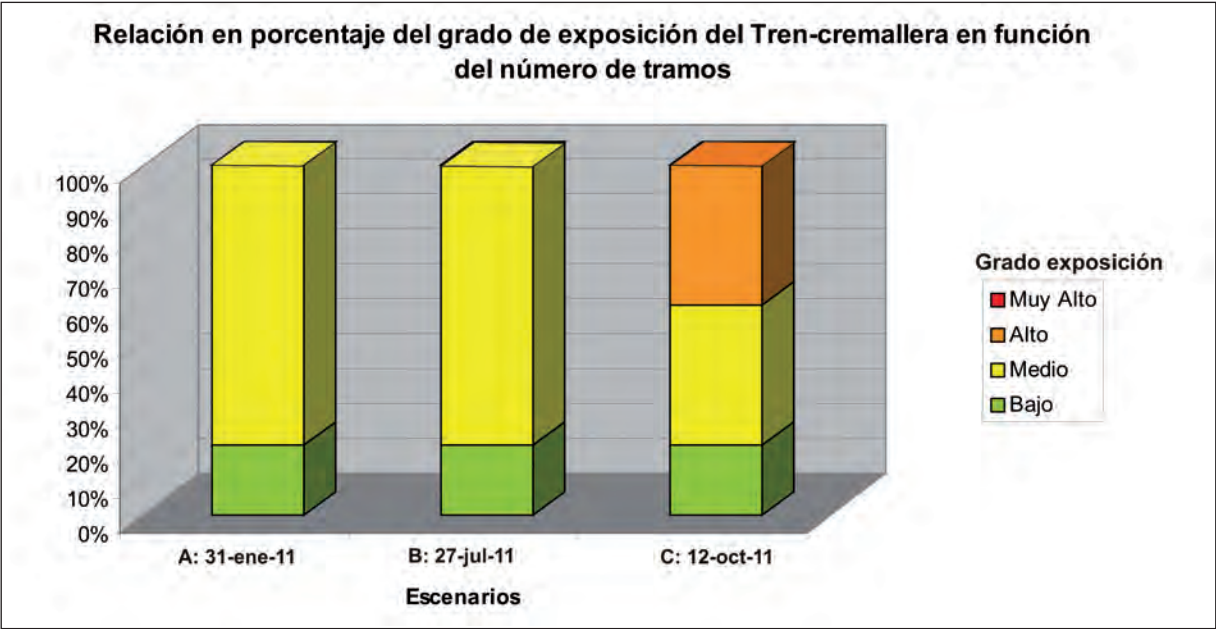


Figura 36. Relación en porcentaje del grado de exposición del tren-cremallera en función del número de tramos para cada escenario.

tampoco se ha detectado ningún tramo de grado muy alto. En la figura 36 se presenta una gráfica de la relación en porcentaje del grado de exposición del elemento vulnerable en función del número de tramos para cada escenario.

Si se expresa el grado de exposición con la longitud de los tramos del tren-cremallera, se observa que de los 3.36 km de vía en zona de desprendimientos el 4.2 % tiene grado de exposición bajo en los tres escenarios evaluados. En los escenarios A y B el 95.8 % restante tienen grado medio, y no se han identificado tramos de grado alto ni muy alto. En el escenario C un 32.4 % de longitud tiene grado medio y un 63.4 % grado alto; no se

han detectado tramos de grado muy alto en este escenario. En la figura 37 se presenta la relación en porcentaje del grado de exposición del tren-cremallera en función de la longitud de los tramos.

Comparando los tres escenarios se observa que en los escenarios A y B el grado de exposición predominante es el medio, mientras que en el escenario C es el grado medio y alto los que tienen mayor importancia, siendo el grado alto el 63.4% de la longitud total expuesta. Cabe destacar que en ningún escenario se ha detectado grado muy alto de exposición.

**Funiculares.** En el caso de los funiculares se han evaluado el funicular de Sant Joan y el de la Santa Cova

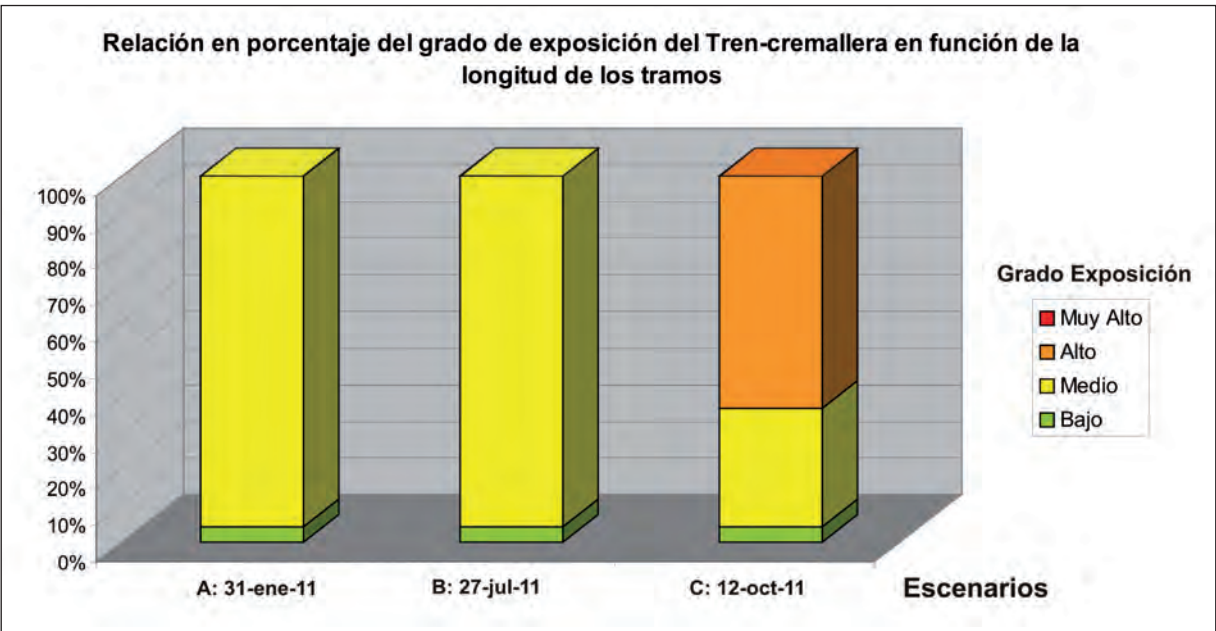
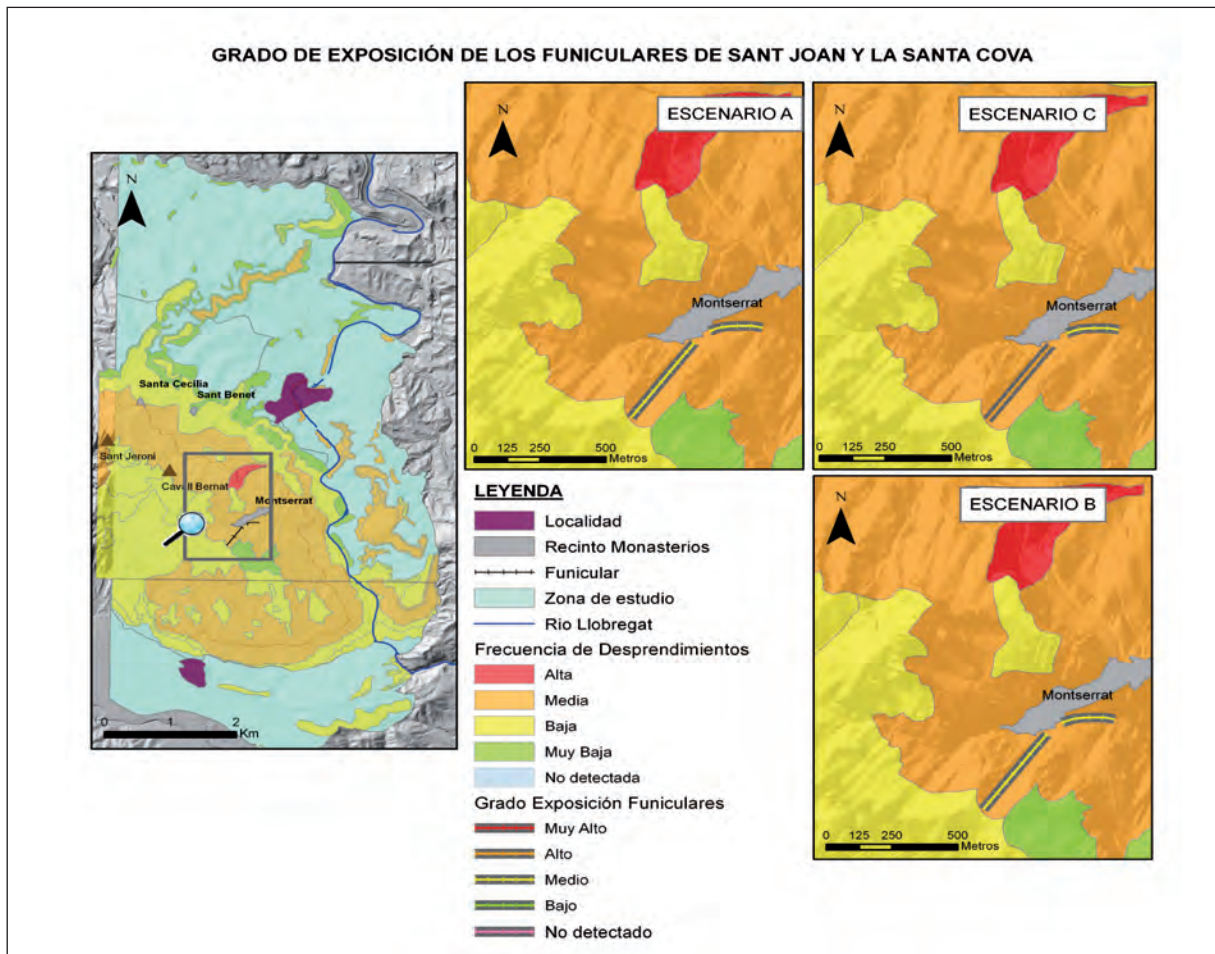


Figura 37. Relación en porcentaje del grado de exposición del tren-cremallera en función de la longitud de los tramos para cada escenario



**Figura 38.** Detalle de la zona de estudio donde se observa el grado de exposición de los funiculares de Sant Joan y de la Santa Cova para los escenarios A, B y C.

que corresponden cada uno de ellos a un tramo de vía (ver figura 38 y mapa M3 del anexo B) y representan en total una longitud de 0.61km en su proyección horizontal ubicado todo su trazado en zona de frecuencia de ocurrencia de desprendimientos media.

Para el grado de exposición de los Funiculares en los escenarios A y B el 100% de tramos y por lo tanto su longitud total tiene grado medio. En el escenario C el 50% de los tramos tiene grado medio y el otro 50% grado alto. Pero si pasamos este dato a longitud de vía se observa que 32.8 % de la longitud total de la vía de los funiculares tiene grado medio y el 67.2 % tiene grado alto (ver figuras 39 y 40).

Es importante destacar que en ningún escenario se ha detectado grado bajo ni grado muy alto y que en el escenario C el 67.2% de la longitud total expuesta tiene grado alto.

**Vehículos en carreteras.** El grado de exposición de vehículos en carreteras se ha realizado en 26 tramos en zona de desprendimientos con una longitud total de 13.91 km en su proyección horizontal. En la figura 41 y los mapas M4 y M5 del anexo B se puede observar la zonificación de grado de exposición de este elemento vulnerable.

De los 26 tramos evaluados de exposición de vehículos en carretera se ha observado que en el escenario A

se distribuyen en un 19.2% en grado bajo, un 23.1 % en grado medio, un 42.3 % en grado alto y un 15.4 % en grado muy alto. En el escenario B el 7.7 % tiene grado bajo, el 30.8 % grado medio, el 38.5 % grado alto y un 23.1 % grado muy alto. Para el escenario C si observa que el grado bajo disminuye a un 3.8 %, el grado medio y alto se mantienen respecto el escenario B y el grado muy alto aumenta a un 26.9 %. La relación de estos porcentajes se pueden observar en la figura 42.

Si se observa la longitud de los tramos de vía (ver figura 43) vemos como estos porcentajes varían significativamente. En el escenario A un 2.0% de la longitud tiene grado bajo, un 11.2% grado medio, un 63.0% grado alto y un 23.8 % grado muy alto. En el escenario B los porcentajes son de 0.2%, 5.2 %, 61.3% y 33.3% para el grado bajo, medio, alto y muy alto respectivamente. Para el escenario C 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 y muy alto pasan a un 50.5% y 45.1% respectivamente.

Si comparamos el número de tramos y su longitud para el escenario C (ver figura 44), se observa que el grado de exposición bajo referente al número de tramos representa un 3.8% del total de tramos pero que solo es

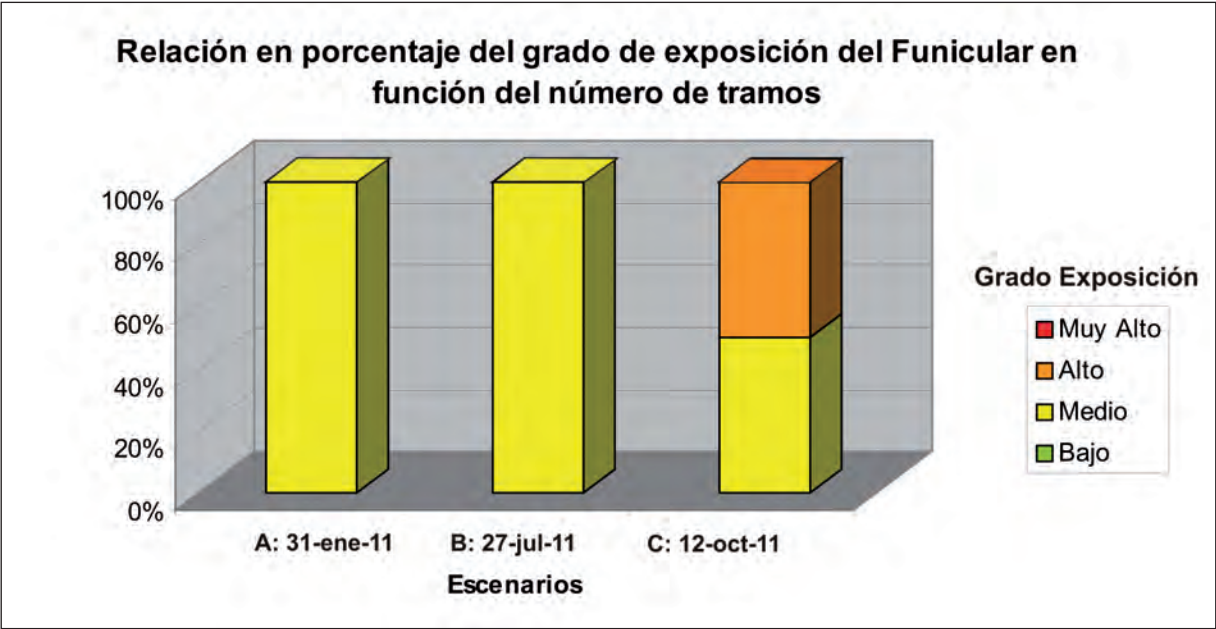


Figura 39. Relación en porcentaje del grado de exposición de los funiculares en función del número de tramos para cada escenario.

un 0.1% de la longitud total expuesta. Para el grado medio el porcentaje en función del número de tramos es del 30.8 % mientras que solo representa un 4.3% de la longitud zonificada. En el caso del grado alto el 38.5% de los tramos tiene este grado que equivalen a un significativo 50.5 % de longitud total. Para el grado alto del 26.9% de los 26 tramos evaluados corresponden a un 45.1% de la longitud total de carretera expuesta.

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 observa tramos de grado de exposición alto. Estos se ubican donde los desprendimientos tienen frecuencia de ocurrencia del fenómeno media o alta. Mientras que 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 vehículos es menor que en la BP-1121 y muchísimo menor que en la C-55.

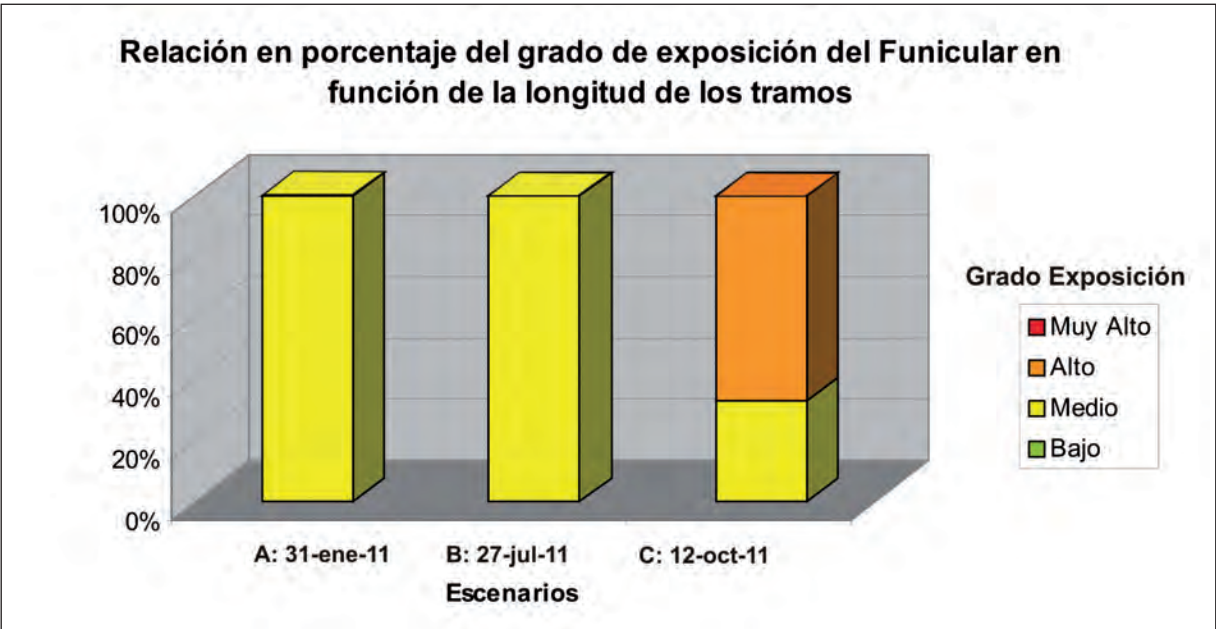


Figura 40. Relación en porcentaje del grado de exposición de los funiculares en función de la longitud de los tramos para cada escenario.



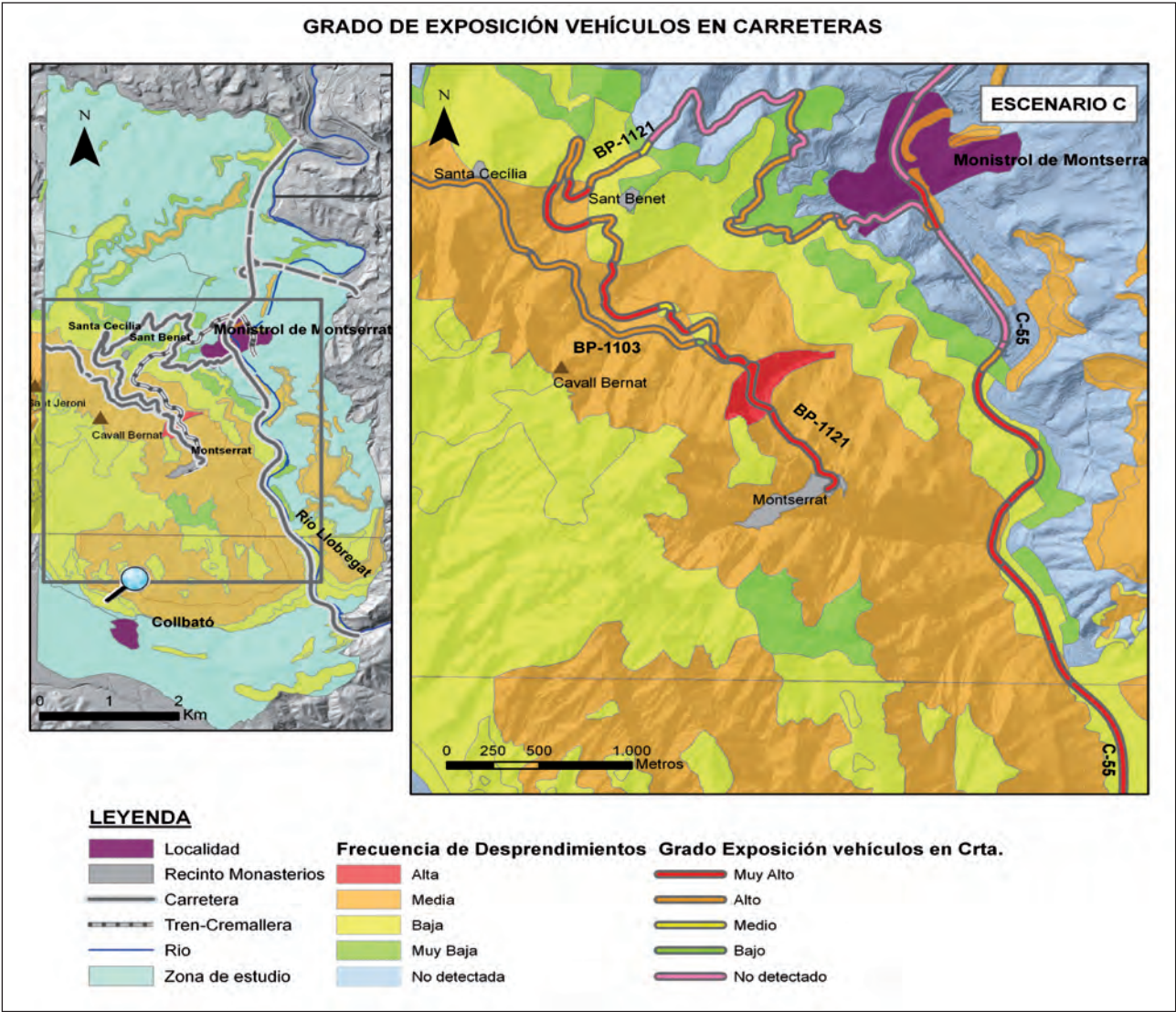


Figura 41. Detalle de la zona de estudio donde se observa el grado de exposición de los vehículos en carretera para el escenario C.

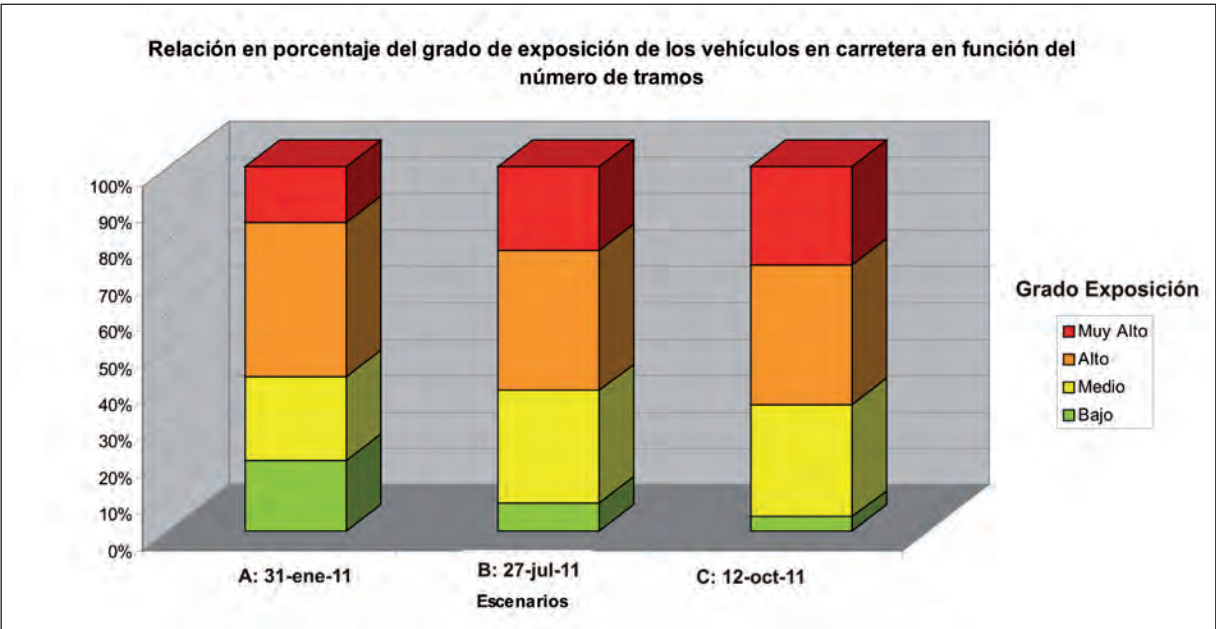
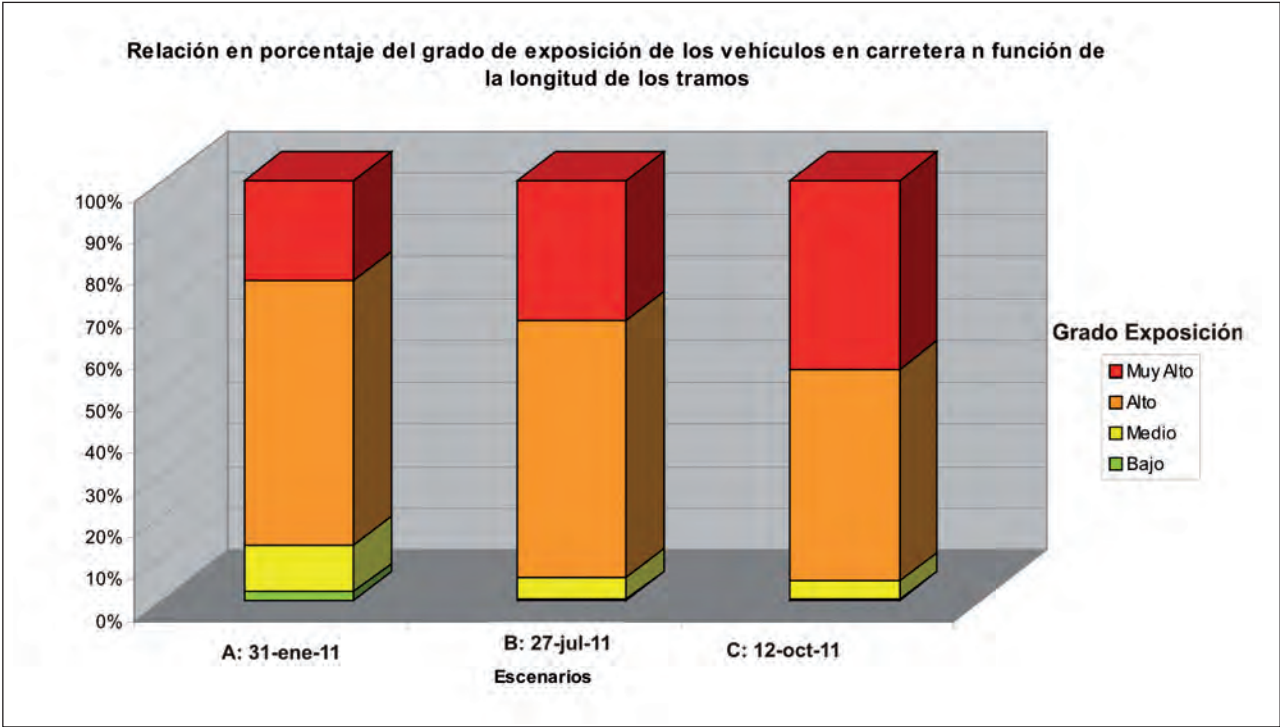


Figura 42. Relación en porcentaje del grado de exposición de los vehículos en carretera en función del número de tramos para cada escenario.



**Figura 43.** Relación en porcentaje del grado de exposición de los vehículos en carretera en función de la longitud de los tramos para cada escenario.

**4.2.3.2. Personas en vehículos**

Los resultados por escenarios del grado de exposición de personas en vehículos siguen la misma tendencia que cuando se ha considerado los vehículos sin las personas. De manera que en el escenario A se observan los grados de exposición de menor nivel y los valores máximos los presenta el escenario C.

**Personas en Tren-Cremallera.** La expresión cartográfica de los resultados obtenidos para el grado de exposición de personas en tren-cremallera se puede observar en la figura 45 y en el mapa M6 del anexo B.

En la evaluación del grado de exposición de personas en tren-cremallera no se ha detectado ningún tramo con grado bajo para ninguno de los escenarios considerados. En el escenario A se ha detectado un tramo con grado de exposición bajo que representa un 20% de todos los tramos y 4 tramos equivalentes al 80% de los tramos que tiene grado alto de exposición. En el escenario B el 20% de los tramos tienen grado medio y el 80% restante tiene grado muy alto; en este escenario no se ha detectado ningún tramo de grado alto. Es en el escenario C donde todos los tramos se ubican en grado alto y muy alto con un 20% y un 80% respectivamente (ver figura 46).

El 20% de tramos en grado medio de los escenarios A y B representan un 4,2 % de la longitud total de tramos, de manera que el 80 % de grado alto de estos escenarios es un 95,8 % de la longitud total. En el escenario C donde se ha observado un 20 % de los tramos en grado bajo, un 40 % en medio y otro 40 % en alto representando un 4.2, 32. 4 y 63,4 % de la longitud total de la vía en los mismos grados respectivamente (ver figura 47).

**Personas en funiculares.** Para el grado de exposición de personas en funiculares se han evaluado los mismos tramos que para el caso del grado de exposición de los funiculares. En la figura 48 y el mapa M6 del anexo B se puede observar la expresión cartográfica de los resultados obtenidos de la evaluación del grado de exposición para este elemento.

Los tramos evaluados tienen en el escenario A uno grado medio y el otro alto, y en cambio en los escenarios B y C los tramos tienen grado alto y muy alto. En ningún escenario se ha observado grado de exposición bajo. En las figuras 49 y 50 se puede constatar la relación entre escenarios en porcentaje del grado de exposición de personas en funiculares en función del número de tramos o de la longitud de estos.

**Personas en vehículos en carreteras.** Los resultados obtenidos del análisis del grado de exposición de personas en vehículos en carreteras se puede observar en la figura 51 y en el mapa M7 del anexo B. En este caso se han considerado 11 tramos de carretera con una longitud total de 9.03km en proyección 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 distribuyéndose: 1 en grado bajo, 2 en grado medio, 4 en grado alto y 4 en grado muy alto. En el escenario B los tramos se agrupan en 2, 4 y 5 y corresponden al grado medio, alto y muy alto respectivamente. En el escenario C 1 tramo tiene grado medio, 4 tienen grado alto y 6 grado muy alto (ver figura 52).



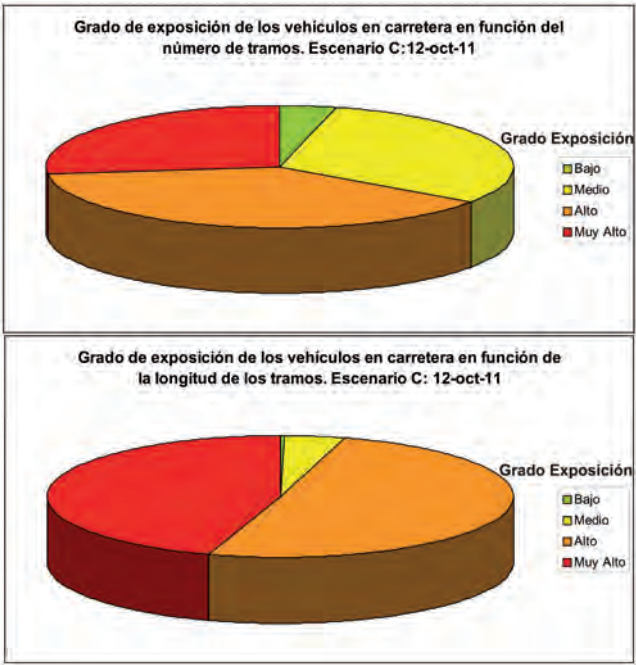


Figura 44. Relación en porcentaje del grado de exposición de los vehículos en carretera en función del número de tramos y su longitud para el escenario del 12 de octubre de 2011.

En este caso es muy importante expresar estos resultados en base a la longitud de estos tramos evaluados ya que los 6 tramos de grado muy alto del escenario C representan el 93.2 % de la longitud total de carretera expuesta; de manera que solo 6.7 % de longitud total esta expuesta a grado medio y alto. En el escenario A la longitud total se distribuye en un 0.2%, 2.4% 37.7% y 59.9% para los grados bajo, medio, alto y muy alto respectivamente. 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. En la figura 53 se puede observar la relación en porcentaje del grado de exposición de las personas en vehículo en carretera en función de la longitud total de carretera expuesta.

El grado de exposición de personas en vehículos que circulan por carreteras presenta unos resultados muy interesantes. 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. Este valor se observa en el escenario A donde el 37.7% es de grado alto y el 59.7 % de la longitud total expuesta es de grado muy alto. El grado muy alto alcanza el 93.2% en el escenario C.

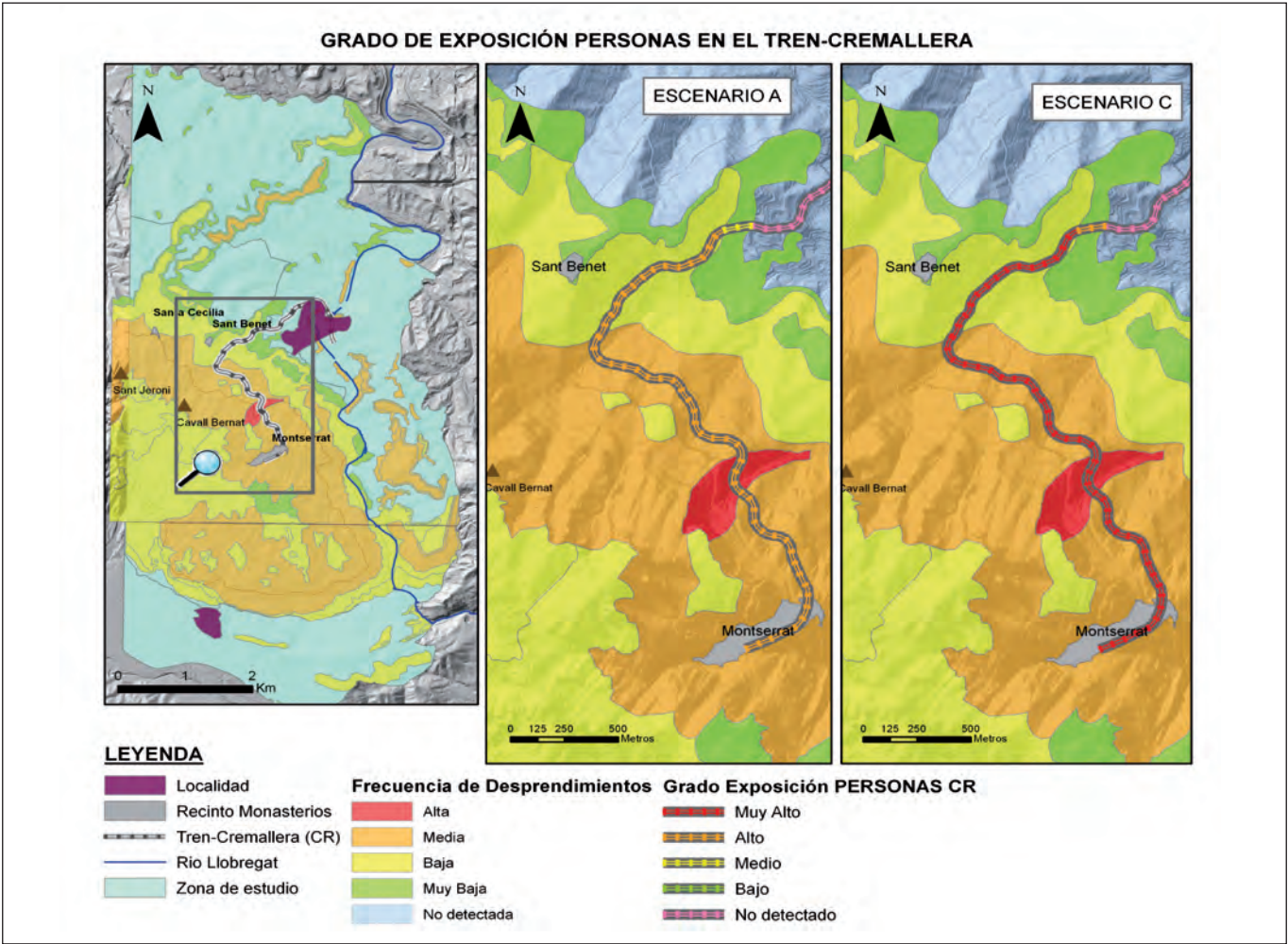


Figura 45. Detalle de la zona de estudio donde se observa el grado de exposición de personas en el tren-cremallera para los escenarios A y C.



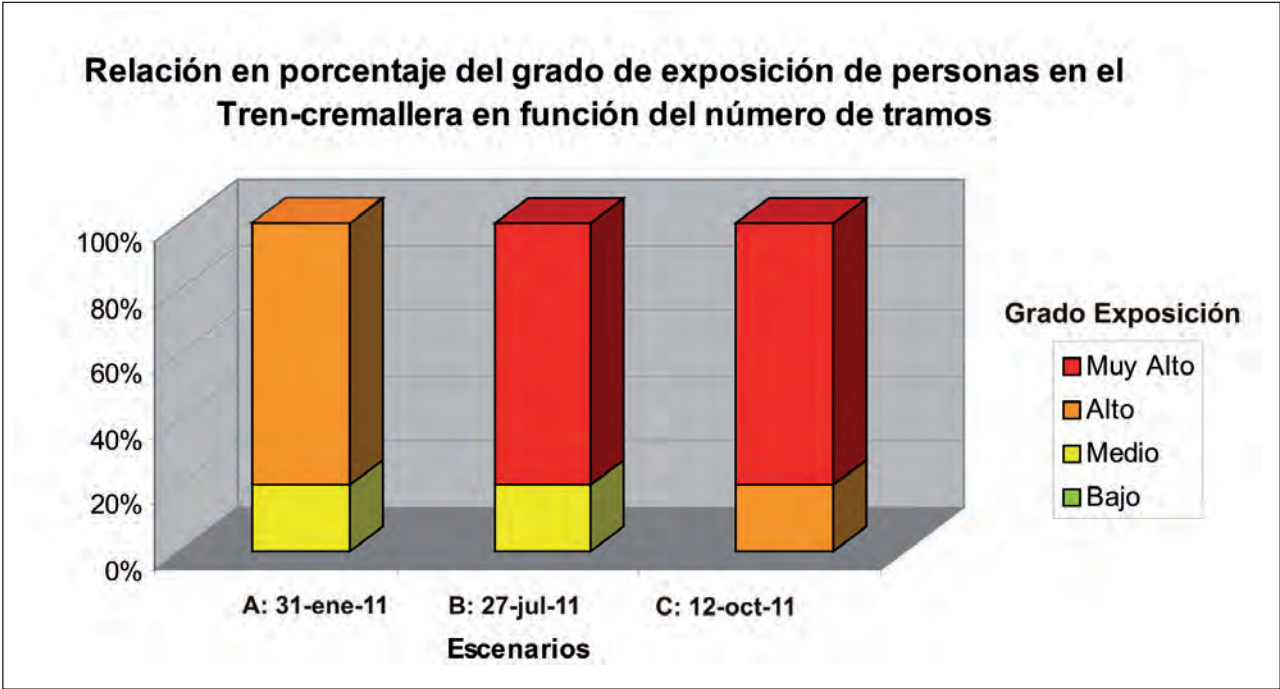


Figura 46. Relación en porcentaje del grado de exposición de personas en el tren-cremallera en función del número de tramos para cada escenario.

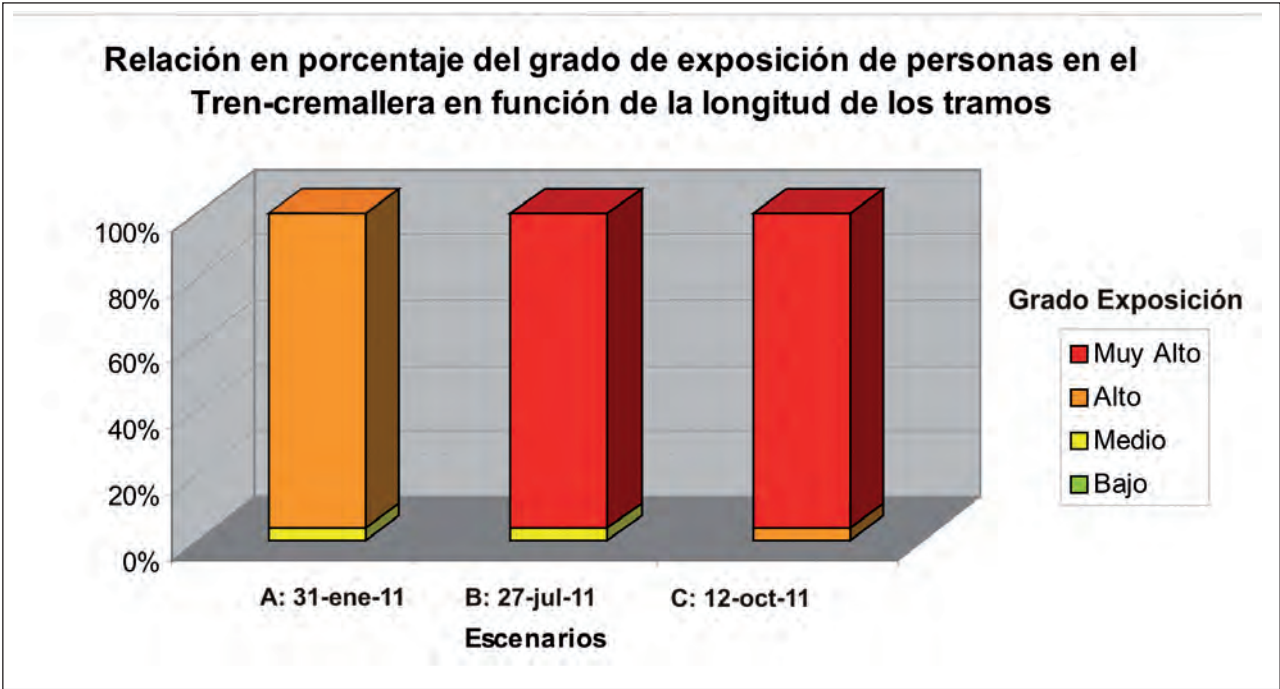
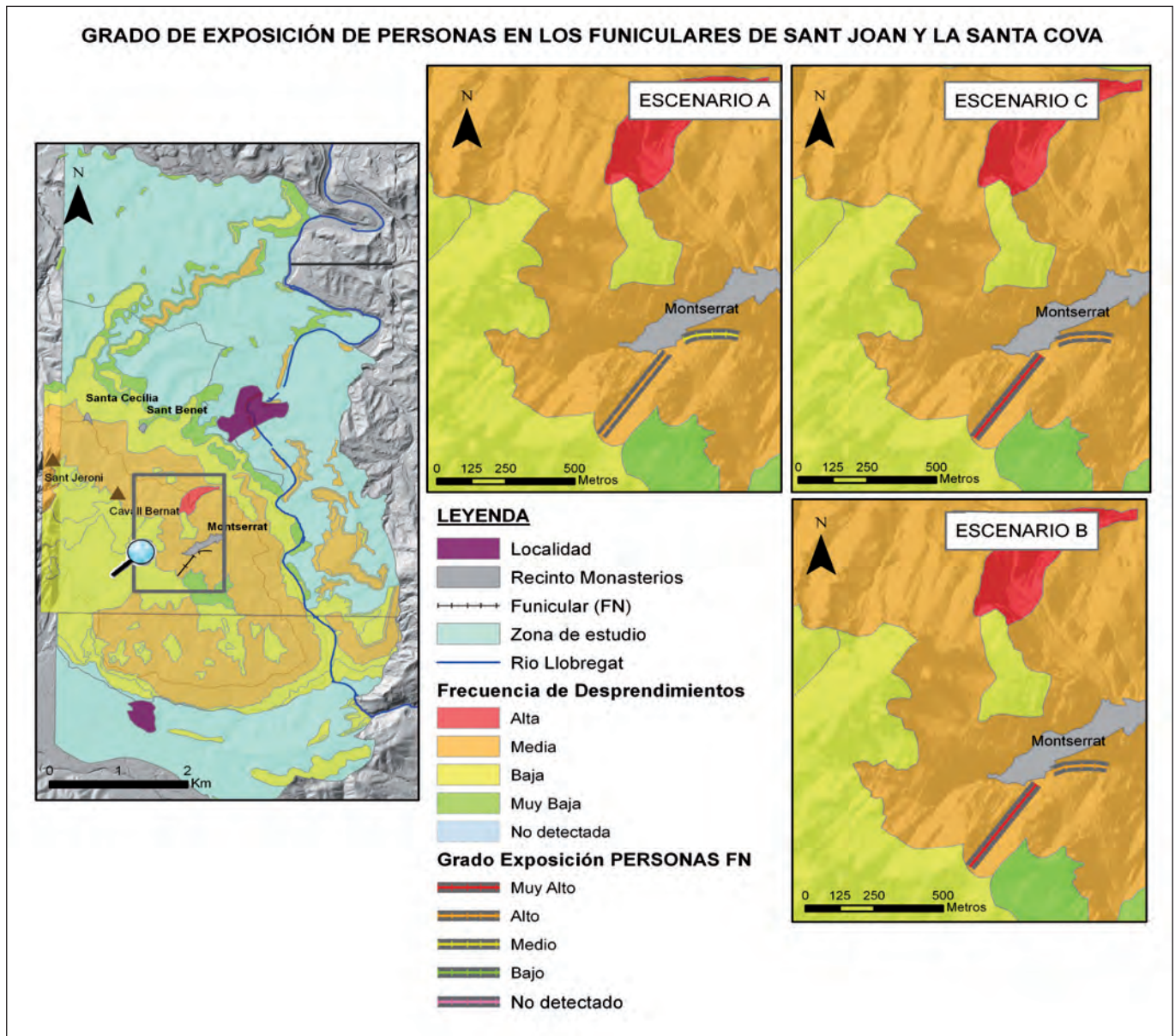


Figura 47. Relación en porcentaje del grado de exposición de personas en el tren-cremallera en función de la longitud de los tramos para cada escenario.

**4.2.3.3. Personas en caminos**

Excepcionalmente para el grado de exposición de personas en caminos se han considerado 5 escenarios diferentes. En la figura 54 se pueden observar la ubicación de los eco-contadores y se muestra el resultado de uno de los escenarios evaluado (ver mapa M8 anexo B).

En el escenario A se disponía de los datos de 5 eco-contadores de los cuales 1 tiene grado de exposición bajo, 2 medio y 2 muy alto. En el escenario B de los 4 eco-contadores evaluados 1 tiene grado bajo, 1 grado medio y 2 grado muy alto. En el escenario C no se ha detectado ningún eco-contador de grado bajo y medio,



**Figura 48.** Detalle de la zona de estudio donde se observa el grado de exposición de personas en los funiculares de Sant Joan y de la Santa Cova para los escenarios A, B y C.

mientras que solo 1 de los 4 eco-contadores evaluados tiene grado alto los 3 restantes tienen grado muy alto. En el escenario D es el único que se dan los cuatro grados de exposición, de los cuales 1 corresponde al grado bajo, 1 al grado medio, 3 al grado alto y uno al grado muy alto. En el escenario estos 6 eco-contadores se distribuyen en los grados medio, alto y muy alto en 1, 2 y 3 respectivamente. Estas relaciones se pueden observar en la figura 55.

#### 4.2.3.4. Elementos permanentes y personas en edificios

Se han estudiado 151 elementos permanentes de los cuales 6 tienen grado bajo de exposición, 109 grado medio, 28 grado alto y 8 grado muy alto que equivalen a un 4.0%, 72.2%, 18.5% y 5.3% respectivamente del total de elementos evaluados. Cuando se expresa el grado de

exposición en metros lineales expuestos se observa que un 1.3% tienen grado bajo, un 48.4% tienen grado medio, que el grado alto representa un 30.6%, y que el grado muy alto equivale al 19.7% de toda la longitud expuesta. Para la evaluación de la exposición en elementos permanentes y personas en edificios no se han considerado escenarios. En la figura 56 se muestra un detalle de la zona de estudio donde se observa el grado de exposición de algunos de los elementos permanentes expuestos (ver mapa M9 anexo B) y en la figura 57 el correspondiente a las personas en edificios (ver mapa M10 del anexo B).

Para el grado de exposición de personas en edificios de los 151 elementos permanentes evaluados se ha obtenido que 7 tienen grado bajo (4.6% del total), 95 grado medio (62.9% del total), 44 grado alto (29.1%) y tan solo 5 grado muy alto (3.3%). Cuando observamos el grado de



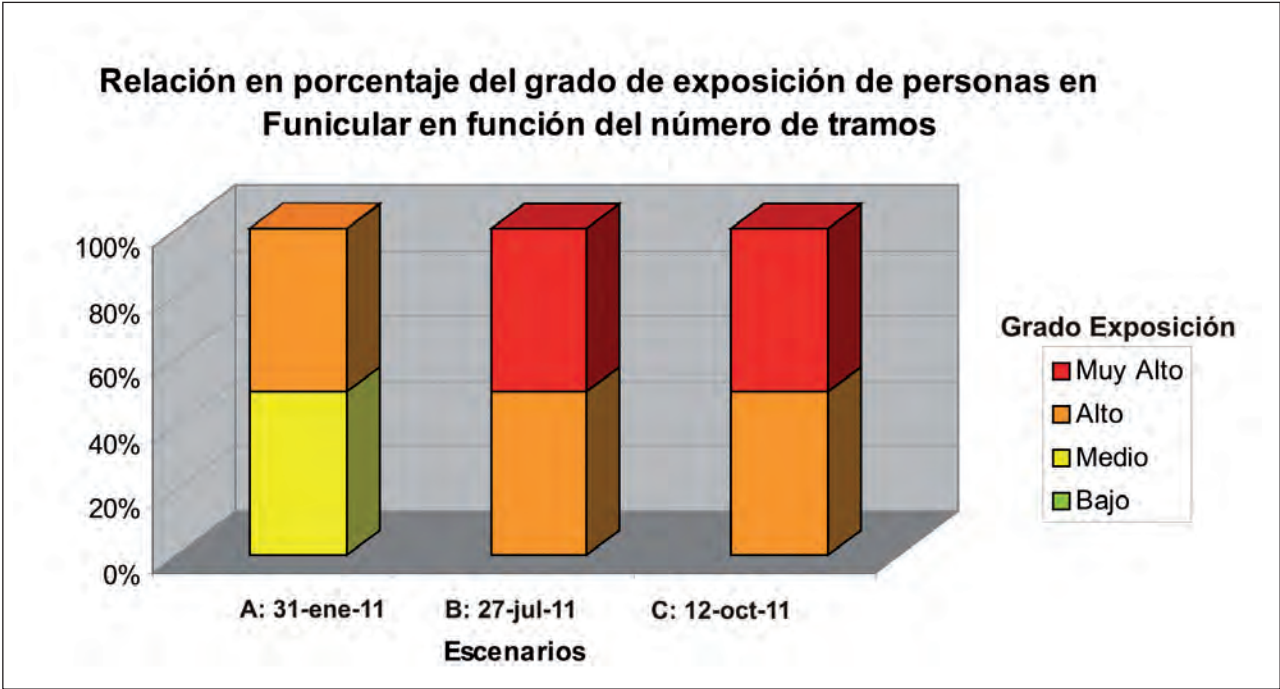


Figura 49. Relación en porcentaje del grado de exposición de personas en los funiculares en función del número de tramos para cada escenario.

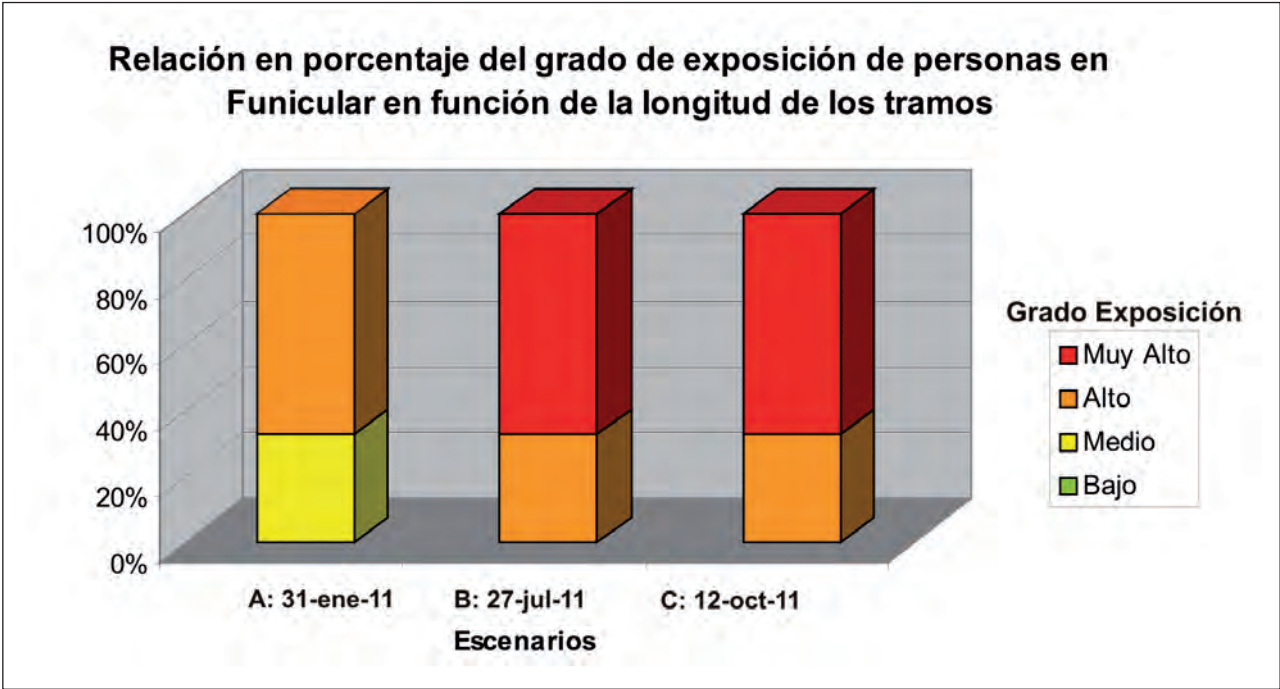


Figura 50. Relación en porcentaje del grado de exposición de personas en los funiculares en función de la longitud de los tramos para cada escenario.

exposición en relación a la longitud expuesta de estos elementos se observa que el 6.3% de toda la longitud expuesta tiene grado bajo, un 48.2% grado medio, un 29.1 % grado alto y un 4.0% grado muy alto.

En las figuras 58 y 59 se comparan los grados de exposición obtenidos al evaluar los elementos permanentes y las personas en los edificios. En estas figuras se

observa que cuando se expresan los grados de exposición en función del número de elementos la diferencia entre porcentaje entre el grado de exposición de elementos permanentes y personas en edificios principalmente en los grados medio y alto; En los dos el grado medio es el de mayor entidad, pero en el grado de exposición de personas en edificios el grado alto gana entidad.



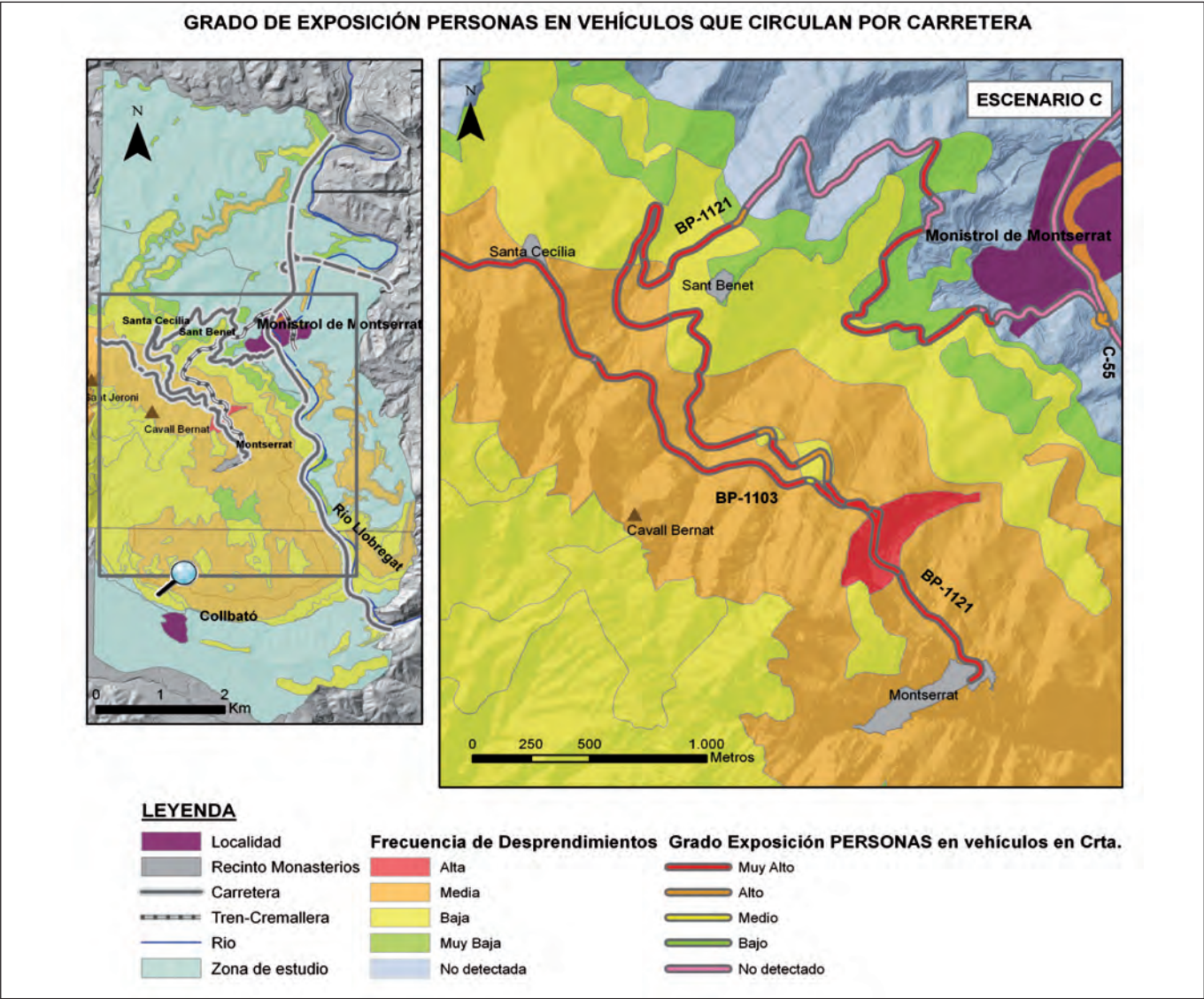


Figura 51. Detalle de la zona de estudio donde se observa el grado de exposición de personas en los vehículos en carretera para el escenario C.

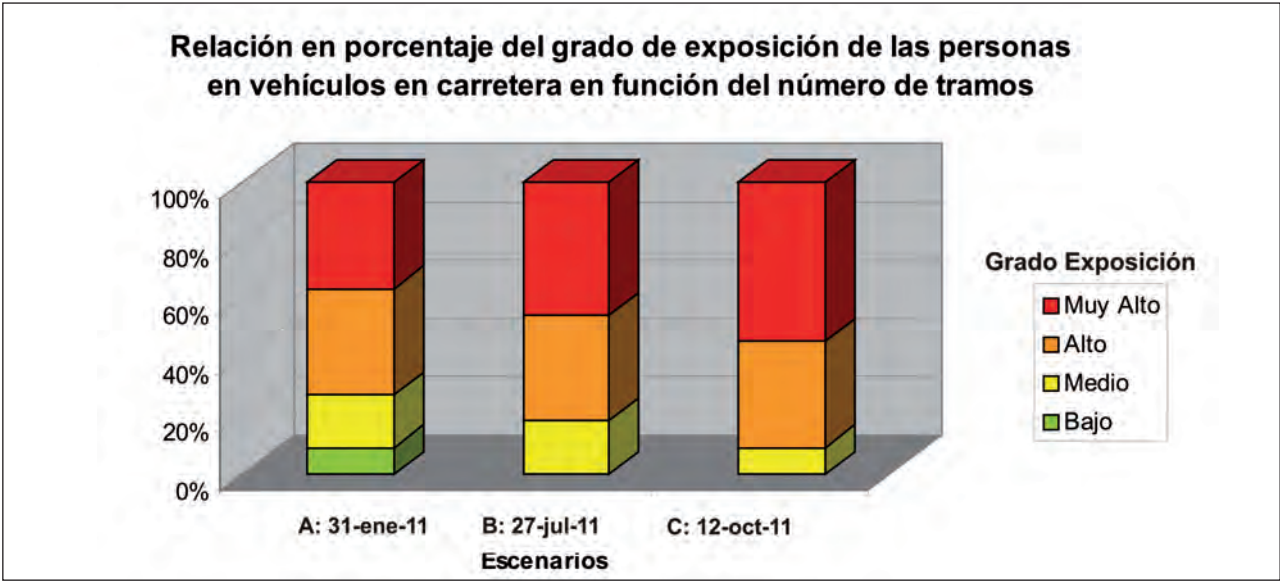


Figura 52. Relación en porcentaje del grado de exposición de personas en los vehículos en carretera en función del número de tramos para cada escenario.



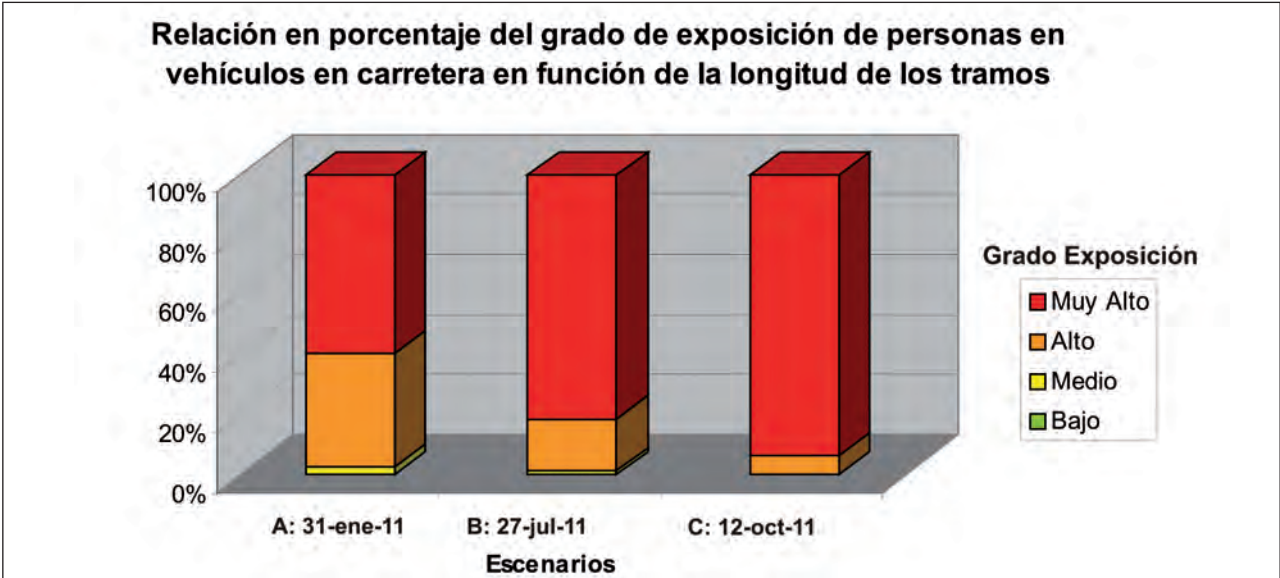


Figura 53. Relación en porcentaje del grado de exposición de personas en los vehículos en carretera en función de la longitud de los tramos para cada escenario.

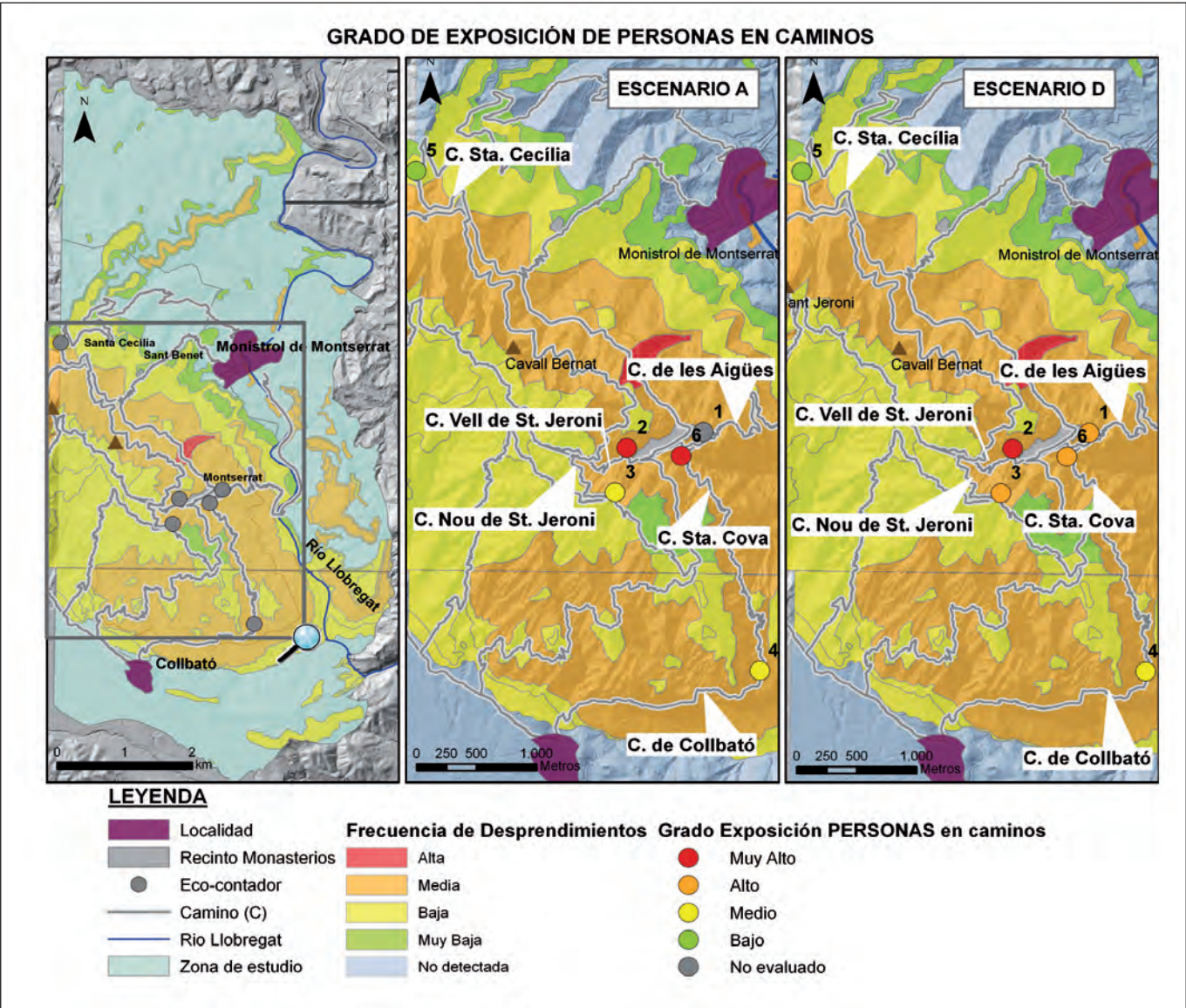


Figura 54. Detalle de la zona de estudio donde se observa el grado de exposición de personas en caminos para los escenarios A y D.



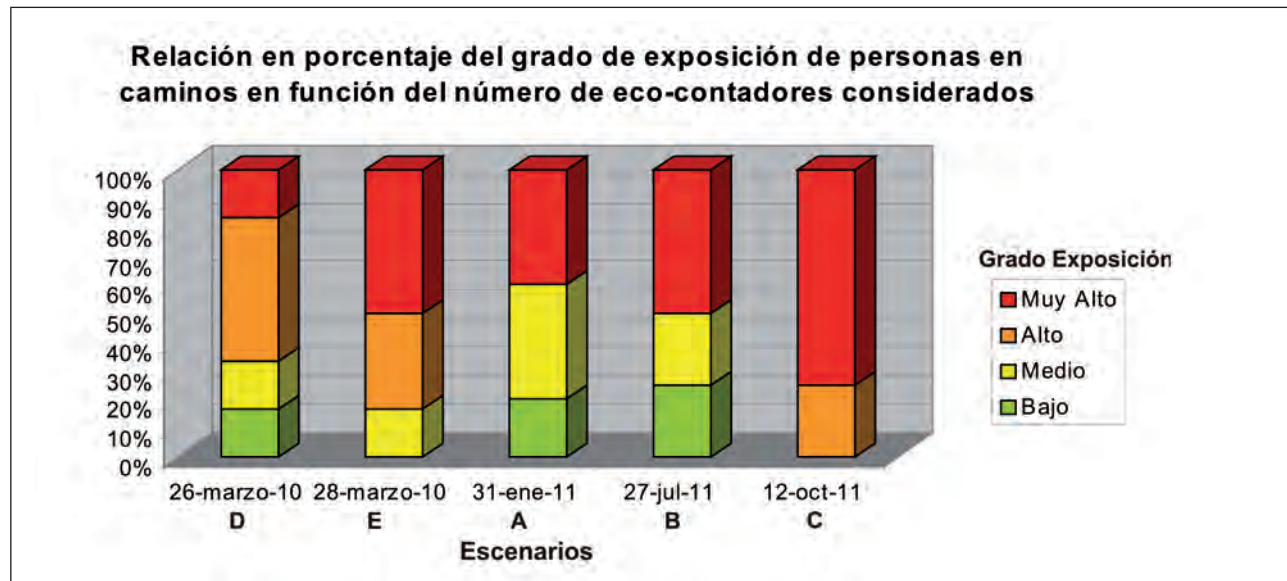


Figura 55. Relación en porcentaje del grado de exposición de personas en caminos en función del número de ecocontadores considerados para cada escenario.

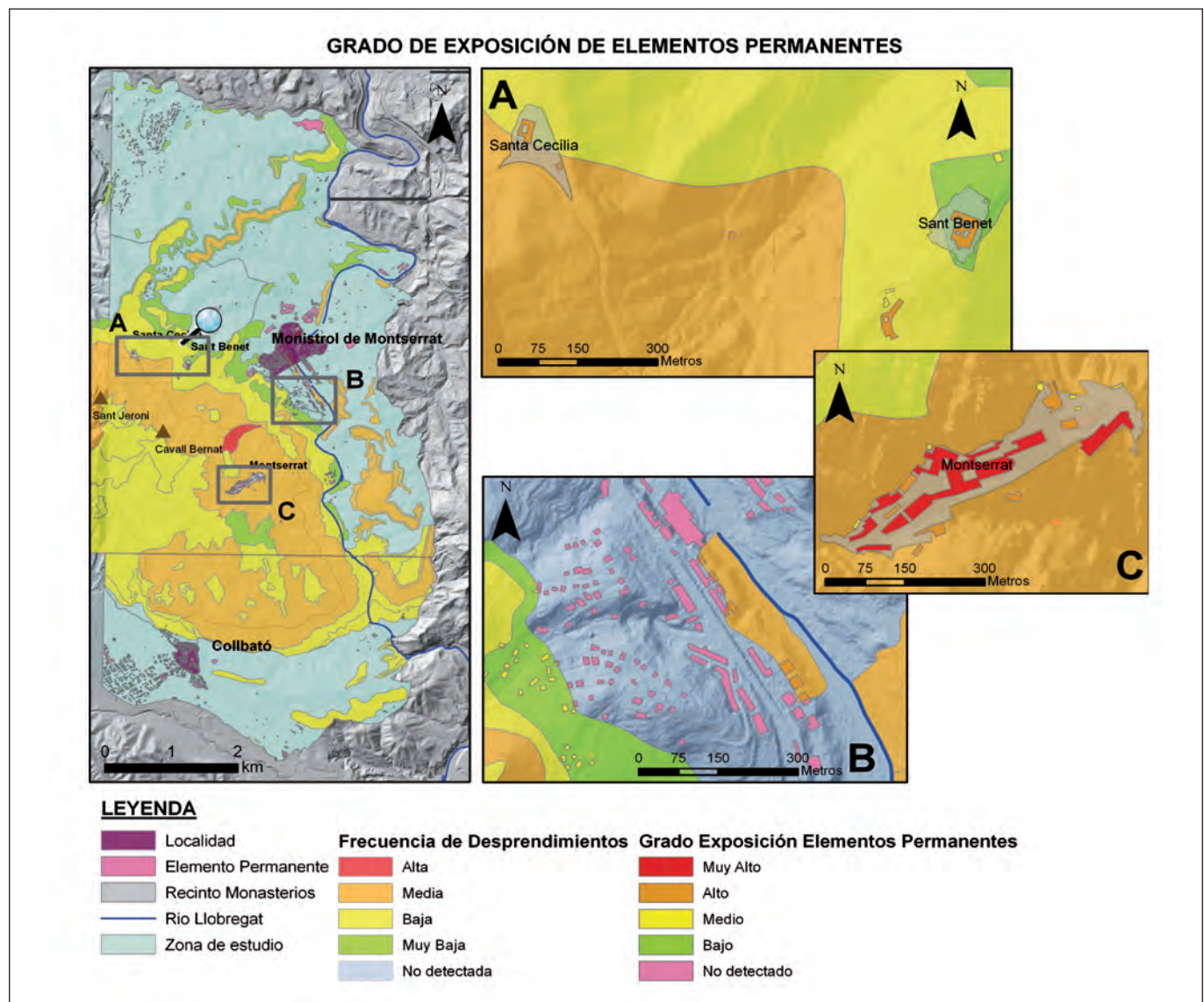


Figura 56. Detalle de la zona de estudio donde se observa el grado de exposición de elementos permanentes.



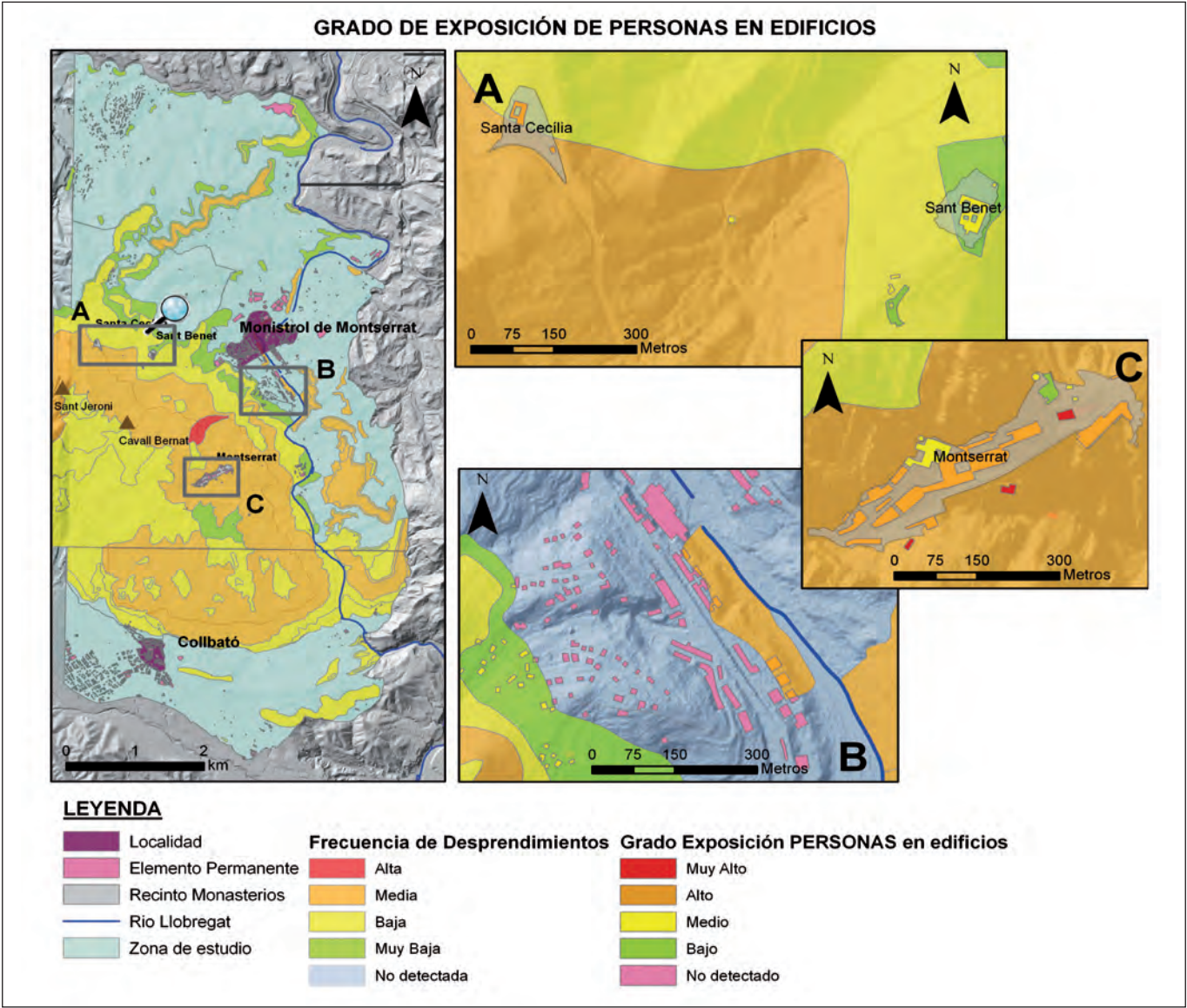


Figura 57. Detalle de la zona de estudio donde se observa el grado de exposición de personas en edificios.

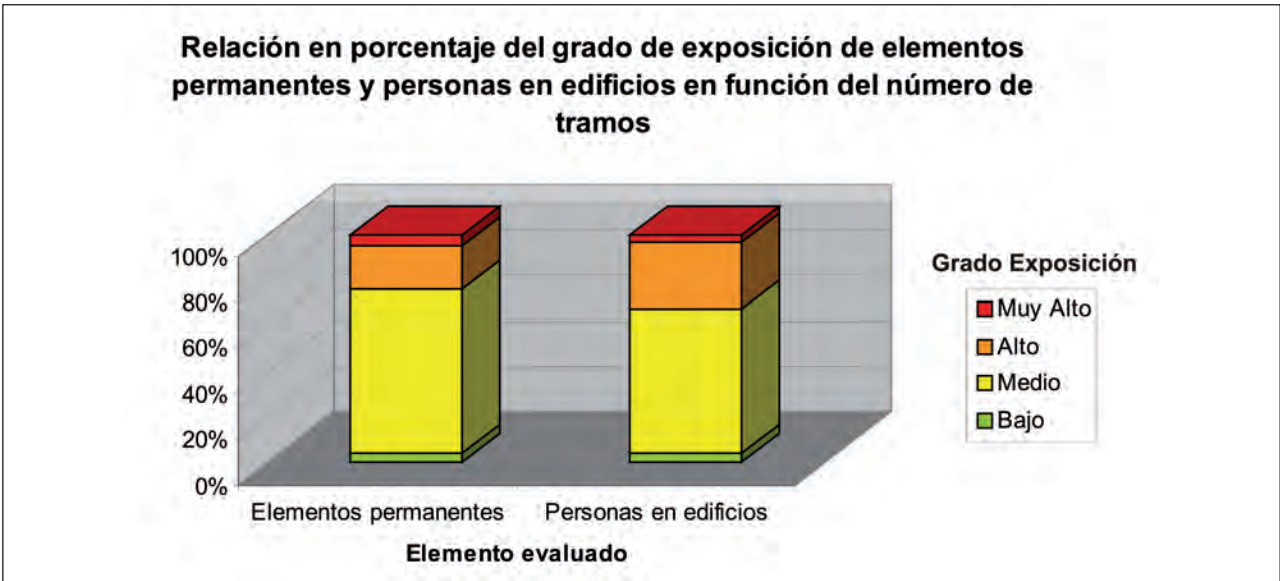
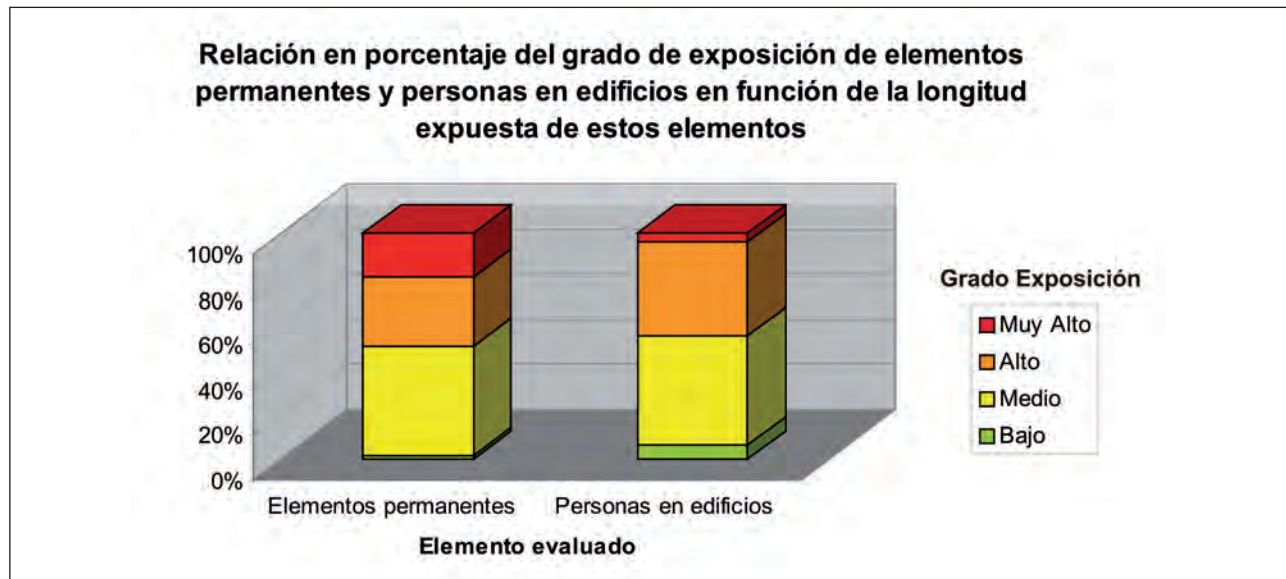


Figura 58. Relación en porcentaje del grado de exposición de elementos permanentes y personas en edificios en función del número de elementos.



**Figura 59.** Relación en porcentaje del grado de exposición de elementos permanentes y personas en edificios en función de la longitud expuesta de los elementos.

Cuando observamos el grado de exposición de los elementos permanentes y las personas en edificios en relación a la longitud expuesta de los elementos estudiados (ver figura 59), se identifica un peso mayor del grado de exposición muy alto de los elementos permanentes respecto las personas en edificios. El grado medio y bajo de exposición son comparables, pero el grado alto tiene mayor entidad cuando se evalúa el grado de exposición de personas en edificios.

En los mapas M11, M12 y M13 del anexo B se muestran el grado de exposición de los escenarios A, B y C respectivamente de manera sintética para los diferentes elementos vulnerables evaluados.

## 5. DISCUSIÓN

Este proyecto tiene como objetivo principal evaluar el grado de exposición a los desprendimientos diseñando una metodología aplicable en el territorio. Este objetivo ha llevado a responder las preguntas de investigación planteadas y presentadas en el apartado de diseño metodológico (3Ab):

- ¿Cómo construir una metodología que evalúe el grado de exposición de los elementos vulnerables frente a los desprendimientos, fácilmente aplicable al territorio?
- ¿Es posible utilizar la información existente?
- ¿Qué aspectos debe considerar esta metodología?
- ¿De qué manera se puede conocer y expresar la realidad del territorio frente a los desprendimientos? ¿Evaluando escenarios representativos?

En este informe se responde a estas preguntas proponiendo una metodología que tiene en cuenta la distri-

bución espacial de la frecuencia de ocurrencia del fenómeno y las características propias del elemento vulnerable; y se evalúan diferentes escenarios representativos de la realidad territorial expresando los resultados con una cartografía cualitativa de grado de exposición.

La propuesta metodológica desarrollada muestra la exposición del territorio a los desprendimientos para escenarios definidos pero es necesario ser crítico con los resultados obtenidos con el fin de mejorar su aplicación y aumentar la confianza de los resultados.

Durante el transcurso de la aplicación de la metodología se han confirmado las diferentes hipótesis de partida realizadas, constatando que: 1- los datos de partida condicionan y limitan los resultados ; y 2- que el grado de exposición varía en un territorio según las características de los elementos expuestos, pero sobretodo, según los escenarios que se plantean. .

En los siguientes subapartados se desarrollará la discusión de los resultados obtenidos siguiendo el mismo esquema de la presentación de resultados.

### 5.1. Metodología desarrollada

#### 5.1.1. Definición de la metodología

La metodología planteada para evaluar 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. De esta manera la propuesta realizada se asemeja conceptualmente a la de [32], que define el término exposición física como la combinación de la frecuencia de un peligro y la población expuesta.

### 5.1.2. Tipología elementos vulnerables

La gran cantidad de elementos presentes en el territorio y el tiempo restringido de la investigación han limitado el número de elementos considerados. De todos los elementos presentes en la zona de estudio se han elegido las cinco tipologías que tenían más interés y en las que los desprendimientos tienen una incidencia más directa, quedando sin evaluar algunos como son el teleférico o las torres eléctricas.

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. De esta manera los resultados de los diferentes elementos agrupados en una tipología dan mayor confianza al compararlos.

Para el cálculo de la exposición se ha considerado separadamente el conjunto de elementos físicos o estructurales sin personas y en una fase posterior estos elementos con personas.

### 5.1.3. Zonificación de la frecuencia de ocurrencia del fenómeno

El riesgo natural es la probabilidad de daños debidos a un fenómeno natural en un lugar concreto y en un período de tiempo determinado. 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).

En la fase de desarrollo de la metodología y teniendo en cuenta la escala 1:25.000 del trabajo, se ha visto conveniente no centrarse en el desarrollo de una metodología para evaluar la frecuencia de ocurrencia, ya que no es el objetivo de esta investigación, y se ha decidido asumir la información existente (MPRG25M).

En la zona de estudio no se disponía de la zonificación de frecuencias de ocurrencia de desprendimientos pero sí del mapa de peligrosidades (MPRG25M). La asignación de las frecuencias de ocurrencia se ha realizado en base a la metodología aplicada en la confección del MPRG25M, la información de campo recopilada por Geocat, los conocimientos de la zona y las observaciones “in situ”. En base a esta asignación se obtiene un mapa de zonificación de frecuencia de ocurrencia donde se definen 4 grados: bajo, medio, alto y muy alto. Estos grados son relativos entre sí y no están cuantificados. De manera que para el cálculo del índice de exposición se ha asignando a cada categoría de frecuencia un valor numérico. Inicialmente, se han realizado tres ensayos de atribución numérica a las frecuencias con las siguientes relaciones (muy baja, baja, media y alta): 1º ensayo 1, 2, 3 y 4; 2º ensayo 1, 3, 5 y 7; 3º ensayo 1, 2, 4 y 8.

Con el fin de poder decidir que asignación era más adecuada se ha calculado el grado de exposición para

todas las tipologías de elementos y todos los escenarios. Los resultados obtenidos de aplicar las tres posibles asignaciones fueron discutidos por los miembros que forman el grupo de investigación y se ha decidido adoptar la asignación del tercer ensayo que corresponde a una progresión geométrica con razón igual a 2 (Frecuencia Muy Baja: 1, Baja: 2, Media: 4 y Alta: 8). Dicha decisión se sustenta en:

- que los resultados obtenidos son confiables y adecuados según criterio de experto.
- que refleja y delimita con claridad los grados de frecuencia de ocurrencia del fenómeno dando más peso a los grados de mayor rango.

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. Es un factor importante a tener en cuenta al valorar los límites de grado de exposición.

### 5.1.4. Función de exposición del elemento vulnerable $f(ev)$

La función de exposición de un elemento vulnerable  $f(ev)$  tiene en cuenta las características del elemento en estudio que modifican su exposición a escala 1:25000 y es única para cada tipología de elemento.

De manera que todos aquellos términos presentes en la función tienen efecto directo sobre el valor obtenido de la función de exposición.

En el diseño de las funciones de exposición se ha buscado que los resultados obtenidos de grado de exposición fueran comparables entre tipologías de elementos.

En el caso de las tipologías de elementos permanentes y de personas en edificios, las dimensiones de los elementos han sido un factor limitante en el diseño de la función de exposición. Ya que la escala de representación de 1:25000 no da el detalle de la información obtenida y la escala de trabajo de 1:10000 da una precisión insuficiente para las características de estos elementos. A pesar de la limitación de las escalas de la metodología se ha constatado el interés de evaluar el grado de exposición de los elementos permanentes y las personas en edificios.

### 5.1.5. Índice de exposición: cálculo con SIG

El índice de exposición es un valor numérico resultado de multiplicar la frecuencia de ocurrencia de un fenómeno con la función de exposición del elemento vulnerable que se está considerando. Este valor se ha obtenido mediante el análisis con sistemas de información geográfica (SIG) a partir del valor de frecuencia de ocurrencia asignado a cada categoría (Frecuencia Alta: 8, Media: 4, Baja: 2 y Muy Baja: 1) y el valor de la función de exposición del elemento. De manera que se obtiene un índice de expo-



sición cuantitativo condicionado por la función de exposición diseñada y por los valores utilizados al calcularla.

#### 5.1.6. 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 los valores se agrupan en 4 categorías que corresponderán al grado de exposición Bajo, Medio, Alto y Muy Alto. Cada categoría corresponde a un grado de magnitud de índice de exposición, así, el orden de magnitud menor de índice equivale al grado de exposición bajo, y aumenta de grado por cada orden de magnitud. Con 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. Aun así debido a la muestra de valores de índice de exposición sería muy interesante validar esta asignación (y toda la metodología) con otra zona de estudio con una muestra de índices de exposición mayor.

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

## 5.2. Sobre la aplicación de la metodología a la zona de estudio

La metodología desarrollada se ha diseñado para evaluar la exposición a escala 1:25000 a pesar que la escala de trabajo ha sido 1:10000. El objetivo del uso de estas escalas es obtener una fotografía del estado del área a la exposición a los desprendimientos como herramienta de gestión del territorio. En los mapas de resultados presentados (M3 a M13 del anexo B) se constata su utilidad como herramienta de gestión. En base a esta característica de diseño es importante destacar que los mapas de grado de exposición resultantes no dan valores absolutos de grado de exposición; estos muestran al lector el grado de exposición relativo de elementos vulnerables y para distintos escenarios.

### 5.2.1. Escenarios

Los escenarios evaluados se basan en datos reales recopilados para días concretos, entendiendo que reflejan las características que presentan los elementos vulnerables en un día-tipo que se puede repetir en situaciones futuras. La ventaja de definir un escenario es que los mapas que nos muestran el grado de exposición nos dan fotografías instantáneas de la realidad del territorio. Resulta fundamental ver que grado de exposición tiene cada elemento en un mismo escenario. Al comparar escenarios diferentes vemos como estos elementos vulnerables pueden pre-

sentar diferente grado de exposición en cada uno de aquellos.. A partir de esta información es posible dar algunas propuestas de reducción de la exposición adaptándolas al posible escenario que se prevé.

Los tres escenarios descritos A, B y C representan un día-tipo de máximos, habitual y de mínimos respectivamente. La elección de los días asignados a este día-tipo ha sido realizada a partir del análisis de los datos recolectados para los últimos cinco años y con el apoyo del conocimiento de los gestores de los diferentes operadores presentes en la zona de estudio. Los datos de los días-tipo se utilizan para el cálculo de escenarios predecibles.

### 5.2.2. Índice de exposición (IE) y Grado de exposición

La información del número de usuarios de los diferentes elementos evaluados tiene confianzas diferentes. Los datos de usuarios del tren-cremallera, los funiculares, las entradas al aparcamiento del recinto del Monasterio y los datos de los eco-contadores son de alta confianza porque los gestores de estos elementos realizan un seguimiento exhaustivo y riguroso. En cambio, para el cálculo de los vehículos que circulan por carreteras en la BP-1121 y BP-1103 se ha hecho 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 aparcen 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 mejor para el cálculo de personas en vehículos en carreteras.

#### 5.2.2.1. Vehículos en movimiento

Los parámetros utilizados para el cálculo del IE de vehículos son: el número de vehículos de un día (IMD), la velocidad media del vehículo y la longitud del tramo evaluado. La longitud del tramo se ha definido a partir de cruzar los elementos vulnerables con el mapa de zonificación de frecuencia de ocurrencia. Con este cruce se ha obtenido la longitud de elemento, (vía, carretera), para cada grado de frecuencia del fenómeno.

En los valores de IE obtenidos para tren-cremallera y funiculares se aprecia el valor mínimo en el escenario A y el máximo en el escenario C. En cambio para los vehículos en carreteras, el máximo se observa en el escenario B manteniendo el mínimo en el escenario A.

Los valores mínimo (0.00001) y máximo (25.98) se han obtenido en los vehículos en carreteras. En este elemento la dispersión de datos es mayor por que hay más variaciones de datos de entrada de IMD y longitud. Si tenemos en cuenta los tres escenarios, el número total de datos del IE de vehículos en movimiento es de 99.

En el proceso de revisión, en el mapa de grado de exposición del tren-cremallera en el escenario C se ha

observado un tramo donde el grado obtenido no parece coherente a criterio de experto. El tramo en cuestión presenta un grado inferior al esperado. Este tramo cruza la zona de frecuencia muy alta y el modelo de cálculo le ha asignado grado bajo mientras que los tramos colindantes cruzan zona de frecuencia alta y tienen grado alto. En la figura 60 se muestra un detalle de este tramo aplicando la metodología estricta y el resultado final después de la modificación aplicada en base criterio de experto.

El conflicto observado en el tramo de vía del tren-cremallera que cruza la zona de frecuencia muy alta ha llevado a reflexionar sobre la metodología, su aplicación en este caso y en definir las posibles causas de este conflicto:

### 1. Peso específico de la frecuencia de ocurrencia:

la asignación de grado de frecuencia de ocurrencia a valor numérico para realizar el cálculo del índice de exposición ha sido 1, 2, 4 y 8 que equivale al grado muy bajo, bajo, medio y alto respectivamente. En este caso el valor asignado a este tramo es 8 porque se sitúa en zona de frecuencia alta. En este tramo alguno de los términos de la función de exposición parece tener mayor peso que la frecuencia de ocurrencia respecto los tramos colindantes. De esta reflexión se puede deducir que el valor asignado a la frecuencia alta (8) de desprendimientos podría tener más peso aún respecto el medio (4) con el fin de evitar estos valores incoherentes.

**2. La longitud de los tramos en la función de exposición:** En todos los tramos del tren-cremallera se ha aplicado la misma velocidad y la misma IMD de manera que el origen del conflicto no está en estos datos. La longitud de los mismos se ha realizado cruzando el trazado de la vía del tren-cremallera con el mapa de zonificación de frecuencias de desprendimientos. De manera que cada tramo de vía se inicia en el límite entre dos grados de frecuencia y tiene una longitud propia. En este tramo la longitud de exposición es menor que en los tramos vecinos y podría enmascarar el valor de la función de exposición. Una conclusión al observar este hecho es que sería interesante valorar la opción de calcular el valor de índice de exposición en tramos equidistantes, no dependientes de los límites entre grados de frecuencia, para disminuir la influencia de la longitud de los tramos.

**3. Valor de IE del límite de los rangos de grado de exposición:** la tercera reflexión se centra en los rangos de índice de exposición que se le han asignado a cada grado. En este caso (como se observa en la figura 60) el grado bajo va de [0.01 a 0.1), el medio de [0.1 a 1), el alto de [1 a 10) y el muy alto de [10 a 100]. En este caso el valor de IE del tramo conflictivo es de 0.56, mientras que los tramos colindantes el valor de IE es de 1.4 y 1.32. Los valores de IE de los tramos adyacentes son muy próximos al límite entre grados. Esto plantea dos posibilidades, o que los rangos deben tener límites diferentes, o que en los límites de los rangos debería tomarse una horquilla de entre un 2 y un 5% de incertidumbre, de manera que los

valores de esta franja se evaluarán a partir de criterio de experto.

Después de analizar detenidamente este conflicto y no detectarlo en ningún otro tramo evaluado de ningún elemento vulnerable ni escenario considerado, se cree que en este tramo se reúnen los tres condicionantes expuestos anteriormente pero que seguramente el peso principal del conflicto se produce por la corta longitud de este.

### 5.2.2.2. Personas en vehículos

En el IE de personas en vehículos se incorpora el término de ocupación del vehículos (personas/ vehículo) respecto al IE de vehículos en movimientos.

En este caso los tres elementos evaluados siguen la pauta de tener el mínimo en el escenario A y el máximo en el escenario C. En este caso el IE de personas en carreteras tiene el máximo en el escenario C por para este IE no se ha evaluado la carretera C-55 que es la que observa mayor afluencia de vehículos y que es la que daba el máximo en el IE de vehículos en movimiento.

El medio de transporte más utilizado para acceder al Monasterio de Montserrat son los vehículos por carretera y esto se constata al observar los escenarios donde se muestra el grado de exposición de personas en vehículos. Entre los escenarios del grado de exposición de vehículos en carreteras destaca la poca variación entre ellos y que la llegada de personas por esta vía es tan importante que en todos ellos el grado mayoritario es el muy alto. En cambio en el escenario de mínimos (A) del tren cremallera y el funicular el grado dominante es el alto.

En los escenarios evaluados no se ha tenido en cuenta que en los de gran afluencia de personas al Parque Natural 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 por que la velocidad de circulación se aproximaría a 0 km/h.

### 5.2.2.3. Personas en caminos

En el IE de personas en caminos se han evaluado dos escenarios más pero igualmente el mínimo se observa en el escenario A y el máximo se observa en el C.

Al aplicar la metodología a la zona de estudio no se ha calculado como tramo de camino sino como dato puntual ya que no se han podido verificar los flujos de usuarios por estos caminos. El entramado de caminos es grande y no ha sido posible definir la afluencia de personas en cada camino, pero sería interesante tener datos de varios eco-contadores (que de momento no existen) en un mismo camino para poder analizar grado de exposición de forma lineal y no puntual.

### 5.2.2.4. Elementos permanentes y Personas en edificios

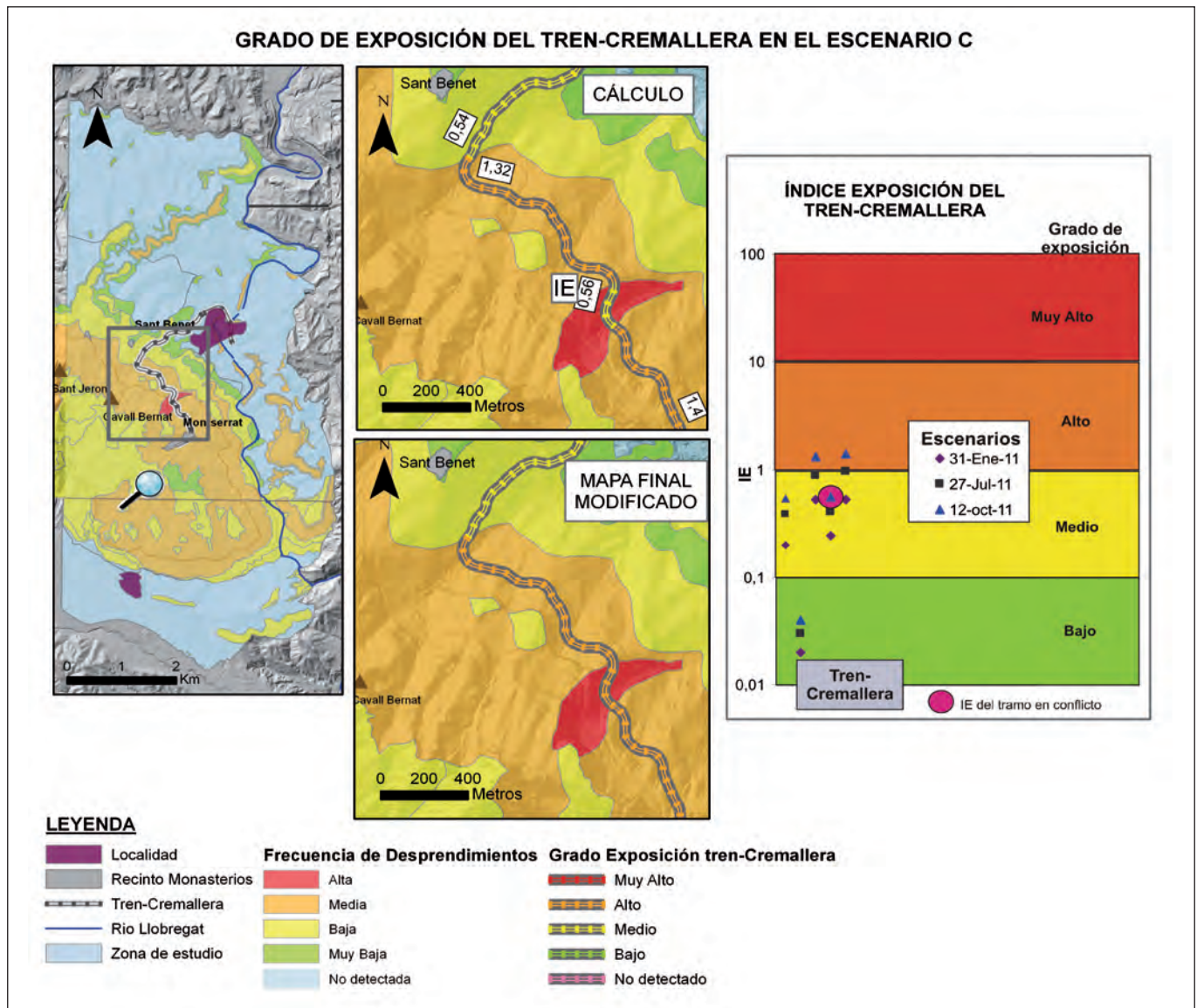
En el cálculo del IE de elementos permanentes y el IE de personas en edificios el factor limitante ha sido la escala

de trabajo y representación como se ha mencionado anteriormente. En este caso, a escala de detalle, también se necesitaría una reevaluación de la frecuencia de ocurrencia. En el caso del IE de personas en edificios tampoco ha sido posible obtener datos para realizar escenarios. En el caso del IE de elementos permanentes no se tiene que considerar escenarios por que no hay variación temporal del índice.

El índice de elementos permanentes es directamente proporcional a las medidas del edificio en relación a la longitud de la casa o fachada expuesta del mismo. Los valores máximos se observan en la zona del recinto del Monasterio de Montserrat porque es donde hay edificios más grandes en zona de frecuencia de ocurrencia del fenómeno alta. En cambio el IE de personas en edificios es directamente proporcional al número de usuarios del edificio e inversamente proporcional a la longitud ex-

puesta del edificio y el número de plantas. De manera que los valores máximos se observan en edificios de mucha afluencia de personas pero con dimensiones relativamente reducidas de edificio en zona de frecuencia de fenómeno alta.

Con datos detallados de los usuarios de los edificios y una escala adecuada de trabajo sería muy interesante también evaluar el tiempo que estos usuarios están dentro de los edificios. Seguramente tendría un peso importante en los resultados. En el caso de IE de personas en edificios los máximos se observan en edificios donde el tiempo de exposición de las personas puede variar entre 2 o 3 h en cambio hay edificios donde el tiempo de exposición podría ser de 8 – 10 h o más como es en el caso de viviendas u hoteles. Es una consideración a tener en cuenta en futuras investigaciones.



**Figura 60.** Detalle del mapa del grado de exposición del tren-cremallera en el escenario C obtenido de aplicar la metodología (arriba) y el mapa final de resultados modificado (abajo).



## 6. CONCLUSIONES

En este informe 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. 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.

Las laderas del Parque Natural de la montaña de Montserrat se encuentran afectadas por desprendimientos de rocas, que con cierta frecuencia superan los 1000 m<sup>3</sup>. Estos constituyen un riesgo natural importante para todos los elementos expuestos y han puesto de manifiesto el interés en estudiar los diferentes fenómenos peligrosos que afectan la montaña.

En esta investigación se propone una metodología para cuantificar la exposición en base al producto de la frecuencia de ocurrencia del fenómeno por una función de exposición del elemento vulnerable.

$$E = F \times f(ev)$$

Donde:

E: Exposición para una tipología de elemento vulnerable.

F: Frecuencia de ocurrencia de un fenómeno potencialmente peligroso.

f(ev): Función de exposición, específica para cada tipología de elemento vulnerable.

El cálculo del grado de exposición se basa en el flujo metodológico consta de 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 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 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.

La metodología desarrollada se ha diseñado para evaluar la exposición a escala 1:25000 a pesar que la escala de trabajo ha sido 1:10000.

Las tipologías de elementos vulnerables considerados 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. De esta manera los resulta-

dos de los diferentes elementos agrupados en una tipología dan gran confianza al compararlos. 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.

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 en base a la metodología aplicada en la confección del MPRG25M, la información de campo recopilada por Geocat, los conocimientos de la zona y las observaciones "in situ". En base a esta asignación se obtiene un mapa de zonificación de frecuencia de ocurrencia donde se definen 4 grados: bajo, medio, alto y muy alto. Estos grados son relativos entre sí y no están cuantificados. De manera que para el cálculo del índice de exposición se ha asignando 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.

La función de exposición, f(ev) es única para cada tipología de elemento. f(ev) tiene en cuenta las características propias del elemento que se quiere estudiar como puede ser las características del mismo (moto, coche, bus, tren) la velocidad en que el elemento puede cruzar la zona afectada por un fenómeno peligroso o el número de vehículos que circulan por una vía.

En el caso de las tipologías de elementos permanentes y de personas en edificios, las dimensiones de los elementos han sido un factor limitante en el diseño de la función de exposición. Ya que la escala de representación de 1:25000 no da el detalle de la información obtenida y la escala de trabajo de 1:10000 da una precisión insuficiente para las características de estos elementos. A pesar de la limitación de las escalas de la metodología se ha constatado el interés de evaluar el grado de exposición de los elementos permanentes y las personas en edificios.

La metodología desarrollada se ha aplicado a diferentes escenarios al *Parc Natrual de la Muntanya de Montserrat*: Concretamente en 3 escenarios (A-mínimos, B-habitual y C-máximos) para los vehículos en movimiento y Personas en vehículos en movimiento; estos 3 escenarios y dos más (D-habitual y E-alta afluencia) en personas en caminos. En elementos permanentes y personas en edificios no se han considerado escenarios diferentes.

Se han definido 4 categorías de grado de exposición Bajo, Medio, Alto y Muy Alto que cada una equivale a un orden de magnitud de índice de exposición.

Para la tipología de vehículos en movimiento se han evaluado un total de 33 tramos de vía en cada unos de los tres escenarios definidos, de estos 5 pertenecen al Tren-Cremallera, 2 a los funiculares y 26 a carreteras para los escenarios A, B y C. El índice de exposición de vehí-

culos en movimiento va de prácticamente 0 a 25.98. El grado de exposición de los tres elementos vulnerables (tren-cremallera, funiculares y vehículos en carreteras) siguen la misma tendencia en los diferentes escenarios siendo en el escenario A donde se observan los grados de exposición de menor nivel y los valores máximos en el escenario C.

El grado de exposición de vehículos en carreteras se ha realizado en 26 tramos en zona de desprendimientos con una longitud total de 13.91 km en su proyección horizontal. En el escenario A un 2.0% de la longitud tiene grado bajo, un 11.2% grado medio, un 63.0% grado alto y un 23.8 % grado muy alto. En el escenario B los porcentajes son de 0.2%, 5.2 %, 61.3% y 33.3% para el grado bajo, medio, alto y muy alto respectivamente. Para el escenario C 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 y muy alto pasan a un 50.5% y 45.1% respectivamente. 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, debido a la elevada circulación de la vía. Mientras que en el escenario C se observa en la carretera BP-1121 de acceso al Monasterio de Montserrat des de Monistrol de Montserrat tramos de grado de exposición alto.

Para el cálculo del índice de exposición de personas en vehículos se han considerado un total de 18 tramos de vía en 3 escenarios diferentes (A, B y C), de los cuales 5 son del tren-cremallera, 11 de las carreteras de acceso al Monasterio de Montserrat y 2 a los funiculares. Los valores obtenidos del índice de exposición para personas en vehículos varían de 0.04 a 135.40. Los resultados por escenarios del grado de exposición de personas en vehículos siguen a grandes rasgos la misma tendencia que cuando se ha considerado los vehículos sin las personas.

El grado de exposición de personas en carreteras se ha evaluado en aquellas dan acceso al Monasterio de Montserrat desde Monistrol y el Bruc por las carreteras BP-1103 y BP-1121 respectivamente. En el escenario A la longitud total se distribuye en un 0.2%, 2.4% 37.7% y 59.9% para los grados bajo, medio, alto y muy alto respectivamente. 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 tiene unos resultados muy destacables, 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.

El cálculo del índice de exposición para personas en caminos se ha realizado para 6 caminos diferentes en los 5 escenarios considerados (A, B, C, D y E). El valor mínimo obtenido de índice de exposición es de 0 y se observa en el camino de *Santa Cecília* para el escenario A. En cambio, es en el camino de la *Santa Cova* en el escenario C donde se obtiene el valor máximo de 133.22.

Los valores de índice de exposición de los elementos permanentes obtenidos van de 4.10 en una casa unifamiliar a 1800.00 en los edificios del Monasterio de Montserrat. Se han estudiado 151 elementos permanentes de los cuales 6 tienen grado bajo de exposición, 109 grado medio, 28 grado alto y 8 grado muy alto que equivalen a un 4.0%, 72.2%, 18.5% y 5.3% respectivamente del total de elementos evaluados.

Los valores de índice de exposición obtenidos para el índice de exposición de personas en edificios van del 0.02 en el edificio del Hotel de la Colònia Puig actualmente abandonado a 17.84 en la estación inferior del Funicular de *Sant Joan*. De los 151 elementos permanentes evaluados se ha obtenido que 7 tienen grado bajo (4.6% del total), 95 grado medio (62.9% del total), 44 grado alto (29.1%) y tan solo 5 grado muy alto (3.3%).

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 en los resultados obtenidos, y así, mejorar su aplicación y aumentar el grado de confianza.

Durante 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 elementos 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.

Cabe destacar que una pequeña parte del trabajo desarrollado en este proyecto se ha presentado con formato póster en el VIII Congreso Geológico de España 2012.

Este es un primer trabajo general y sintético de la exposición a los desprendimientos de 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.

## 7. PROPUESTAS DE DISMINUCIÓN DE LA EXPOSICIÓN

Aunque no era uno de los objetivos de partida del proyecto, es evidente que es necesario reflexionar sobre la mitigación del riesgo de desprendimientos en base al factor exposición.

Una vez realizada esta investigación la siguiente pregunta que se plantea es: ¿Qué actuaciones y estrategias de mitigación pueden aplicarse en el territorio que dismi-

nuyan la exposición de los elementos vulnerables existentes? En un contexto de crisis económica, ¿hay actuaciones viables de reducción de la exposición?

Según [11] la disminución del riesgo natural en los elementos vulnerables expuestos al peligro se puede lograr mediante la aplicación de dos estrategias de mitigación básicas:

- Disminución del nombre de elementos vulnerables expuestos mediante estrategias no estructurales o de prevención del fenómeno. Estas estrategias incluirían todos aquellos estudios que nos dan mayor conocimiento del riesgo como son la zonificación de la peligrosidad y de la exposición.
- Disminución de la vulnerabilidad de un elemento mediante medidas estructurales, básicamente de protección.

En base a los resultados obtenidos de aplicar la metodología a la zona de estudio se van a proponer únicamente estrategias de disminución del riesgo natural basadas en la disminución de la exposición de los elementos vulnerable:

- Limitar el acceso por carretera a todos los vehículos. Los días de gran afluencia de personas al Parque Natural las carreteras están colapsadas y la exposición de los vehículos y las personas de su interior es máxima. Si se usan medios alternativos como el tren-cremallera y el aéreo, la exposición se reduce por que solo están expuestos el tiempo de viaje que es fijo, y mientras esperan en las estaciones, o están en zona sin desprendimientos observados o están protegidos de los desprendimientos de menor magnitud por los edificios. Es importante destacar que en todos los escenarios se ha observado mayor exposición en las carreteras que en el tren-cremallera.
- Limitando el acceso de los autobuses al monasterio se reduce el tiempo de exposición del resto de vehículos de la carretera, al tratarse de una carretera de montaña los vehículos de grandes dimensiones necesitan circular a velocidades menores que los coches o las motos. La estación del tren cremallera en Monistrol tiene un gran aparcamiento para buses.

Limitando el acceso por carretera de todos los vehículos se pueden centrar los esfuerzos de inversión en investigación, prevención y mejora de infraestructuras en el acceso por tren-cremallera y aéreo.

## 8. PERSPECTIVAS DE FUTURO

En este proyecto se ha propuesto una metodología para evaluar la exposición natural de los elementos vulnerables a los desprendimientos de roca. Los eventos de desprendimientos observados en la zona de estudio justifican plenamente la labor que se viene realizando, y con especial intensidad los últimos 10 años, para la mitigación del riesgo por parte de los entes gestores del Parque, de las infraestructuras y de los equipamientos. Es importante destacar que debido a estas actuaciones realizadas la exposición actual de los elementos vulnerables es menor que la exposición natural y que sería de gran interés cuantificarla. Por consiguiente, y para una completa comprensión del riesgo, es muy necesario profundizar en el análisis de la exposición de las infraestructuras y de sus usuarios para poder abordar, en una etapa posterior, la evaluación de la vulnerabilidad.

A partir del proyecto realizado se abren dos posibles líneas de investigación para seguir abordando la cuantificación de la exposición a los desprendimientos:

- Aplicar la metodología propuesta a otra zona de estudio con el fin de comparar resultados y poder validarla y/o mejorarla.
- Evaluar el grado de exposición a una escala de trabajo de más detalle (1:1000 a 1:5000), centrándose en las zonas de mayor sensibilidad social y mayor vulnerabilidad humana, como podría ser, entre otras, el recinto del Monasterio de Montserrat, el tren-cremallera o la carretera de acceso. Si se optara por esta línea de investigación sería necesario realizar estudios a escala de detalle de la carretera de acceso y el tren-cremallera de peligrosidad y de mejora de la frecuencia de ocurrencia. En estos estudios se podría identificar con gran detalle las trayectorias de las caídas de rocas y así limitar las medidas de protección o la circulación de vehículos y personas a estas zonas. En las zonas de afluencia de personas como los recintos de monasterios, los caminos y las zonas de escalada sería interesante estudiar en detalle las trayectorias principales de los desprendimientos para minimizar la exposición en estas zonas.



## 9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

### Artículos

2. Gibert, JM; López-Blanco, M; Ramos, E. (2007) Presencia de la incoespecie *Dactyloidites ottoi* en el complejo de abanico costero de Sant Llorenç del Munt (Eoceno, Cuenca del Ebro, NE de España). *Geogaceta*, 2007 (41).
4. López-Blanco, M; Marzo, M; Piña, J. Transgressive-regressive sequence hierarchy of foreland fan-delta clastic Hedges (Montserrat and Sant Llorenç del Munt, Middle Eocene, Ebro Basin, NE Spain). *Sedimentary Geology*, 2000 (138) 41-69.
5. Alasaker, 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.
7. 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.
9. 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.
10. 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.
11. Raetzo, 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.
12. 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.
22. Marquès, M. A., 2001. Impacto en el medio físico de unas lluvias extremas en el macizo de Montserrat. *Tecnología del agua*, 2001 (213) 42-50.
25. Royán, M; Vilaplana, J.M. Distribución espacio-temporal de los desprendimientos de rocas en la montaña de Montserrat. *Revista Cuaternario y Geomorfología*, 2012 (26) 1-2.
26. Palau, J; Janeras, M; Prat, E; Pons, J; Ripoll, J.; Martínez, P; Comellas, J. Preliminary assessment of rockfall risk mitigation in access infrastructures to Montserrat. In proceedings: Second World Landslide Forum – 3 7 October 2011, Rome.
31. 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.
33. Bell, R; Glade, T. Multi-Hazard Analysis in Natural Risk Assessments. Department of Geography, University of Bonn, Germany, 2004, 10 pp.
34. 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.
35. Mavrouli, O; Corominas, J. Rockfall vulnerability assessment for reinforced concrete buildings, *Natural hazards and Earth System Sciences*, 2010 (10), pp. 2055-2066.
36. Frattini, P; Crosta, G; Carrara, A; Agliardi, F. Assessment of rockfall susceptibility by integrating statistical and physically-based approaches. *Geomorphology*, 2008 (94) 419-437.
37. 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.

38. 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.

### Libros

8. Varnes, D.J. (1978): Slope movement types and processes. In Schuster R.L. & Krizek R.L. & Krizek R.J Ed. *Landslides, analysis and control Transportation Research Board Sp. Rep.*, 176, Nat. Acad. of Sciences.
11. Copons, R. (2007): Avaluació de la perillositat de caigudes de blocs rocosos al Solà d'Andorra la Vella. *Monografies del CENMA*. Editor Institut d'Estudis Andorrans. St. Julià de Lòria. 211pp.+ 11 mapas.
12. Ayala-Carcedo, F.J. (2002). Introducción al análisis y gestión de riesgos. In: AYALA-CARCELO, F.J. y OLCINA, J. (Eds.): *Riesgos naturales*. Ed. Ariel, Barcelona, pp 133-144.
29. Cardona, O.D. (2005) Indicators for Disaster Risk and Risk Management. Program for Latin America and the Caribbean: Summary Report, Manizales, Columbia: Instituto de Estudios Ambientales, Universidad Nacional de Columbia. 10 pp.

### Otros

1. Vilaplana, J.M. Pallàs, 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.
3. 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.
6. Gallach, X. (2012) Estudi de susceptibilitat de caiguda de roques a la paret del Monestir de Montserrat a partir de la inspecció d'indicadors d'instabilitat i d'anàlisi SIG. Proyecto máster de Geología, Especialidad Riesgos geológicos UB-UAB. Inédito.
12. Guinau, M. (2002). Propuesta metodológica para la evaluación de la susceptibilidad a los movimientos de ladera: aplicación en cinco municipios del norte del Departamento de Chinandega – Nicaragua. Tesina del Master en Geología Experimental, especialidad en Geodinámica y Geofísica. Universitat de Barcelona.
13. Heinimann, H; Hollesten, K.; Kienholz, H; Krummencacher, B; Mani, P (1998). Methoden zur analyse und bewertung von natur-gefahren. Bundersamt für Umwelt, Walt und Landschaft (BUWAL), Berna, 248pp.
14. Lateltin, O. (1997). Recommendations: 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.
18. 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.
19. IGC (2012). Memòria del Mapa per la prevenció dels riscos geològics 1:25.000, hoja nº 392-1-1 (Monistrol de Montserrat). IGC, Barcelona.
20. Royán, M. (2010). Los desprendimientos de rocas en la montaña de Montserrat. Treball d'investigació del Màster de Geologia especialitat en Riscos Geològics UB/UAB.
21. Gabarró, X., 1996. Propagació de desprendiments en roca. Influència de les característiques del vessant i dels incendis. Aplicació a Montserrat. Projecte d'especialitat. Escola Técnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona.

23. Martín (2002). Mapa de susceptibilidad a los flujos. Impacto en el medio físico de unas lluvias extremas en el macizo de Montserrat. Tecnología del agua, 2001 (213) 42-50.
24. 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 Técnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona. Universitat Politècnica de Catalunya.
27. IGC (2011): Mapa per la prevenció dels riscos geològics 1:25.000, hoja nº 392-1-2 (Olesa de Montserrat). IGC, Barcelona.
28. IGC (2012): Mapa per la prevenció dels riscos geològics 1:25.000, hoja nº 392-1-1 (Monistrol de Montserrat). IGC, Barcelona.
30. Burton, I., Kates, R.W. y White, G.F. (1978) The environment as Hazard. Oxford University Press, New York, 240 pp.
32. 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.
39. UNISDR – ONU (2009) Global assessment report on disaster risk reduction. United Nations International Strategy for Disaster Reduction Secretariat, 207 p.
40. FGC (2003). Dossier Tren-cremallera. Juny 2003. Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya.
41. Bardolet S.M. A Montserrat a peu. Abadia de Montserrat. Butlletí del Santurai nº 84.
42. PNMM & PMM (2010). Butlletí del Patronat de la Muntanya de Montserrat. Editado por Parc Natural de la Muntanya de Montserrat y Patronat de la Muntanya de Montserrat. Número 7. Verano de 2010.

## Webs

- w1. <http://www.zonu.com/images/0X0/2010-07-26-11886/Mapa-Fisico-de-Cataluna.jpg> (fecha ultima consulta 16-01-2013).
- w2. <http://sociallessagradafamiliargel.files.wordpress.com/2010/09/mapa-fisico-espana.jpg> (fecha ultima consulta 16-01-2013).
- w3. [www.muntanyamontserrat.cat](http://www.muntanyamontserrat.cat) Web del Patronat de la Muntanya de Montserrat (PMM) (fecha ultima consulta 16-01-2013).
- w4. <http://www.ikonet.com/es/diccionariovisual/tierra/geologia/desprendimientos-de-tierras.php> (fecha última visualización 27/09/2012).
- w5. [www.cremallerademontserrat.cat](http://www.cremallerademontserrat.cat) o [http://www.cremallerademontserrat.cat/website\\_cremallera/media/downloads/funiculars/funiculars\\_historia.pdf](http://www.cremallerademontserrat.cat/website_cremallera/media/downloads/funiculars/funiculars_historia.pdf) Web del cremallera de Montserrat (fecha ultima consulta 16-01-2013).
- w6. <http://maps.google.es> (fecha ultima consulta 16-01-2013).
- w7. <http://dmah.nexusgeografics.com/> (fecha ultima visualización 19-01-2013).
- w8. [www.gencat.cat/territori/](http://www.gencat.cat/territori/) Web del Departament de Territori i Sostenibilitat de la Generalitat de Catalunya.
- w9. [www.icc.cat/vissir3/](http://www.icc.cat/vissir3/) web del ICC (Vissir 3) (fecha ultima visualización 19-01-2013).
- w10. <http://www20.gencat.cat/portal/site/territori/menuitem.c6e8d3be598ec9745f13ae92b0c0e1a0/?vgnextoid=8e359b926261c210VgnVCM1000008d0c1e0aRCRD&vgnnextchannel=8e359b926261c210VgnVCM1000008d0c1e0aRCRD&vgnnextfmt=default>

## Conflicto de intereses

Los autores hemos recibido ayuda económica de FUNDACIÓN MAPFRE para la realización de este proyecto. No hemos firmado ningún acuerdo por el que vayamos a recibir beneficios u honorarios por parte de alguna entidad comercial o de FUNDACIÓN MAPFRE.

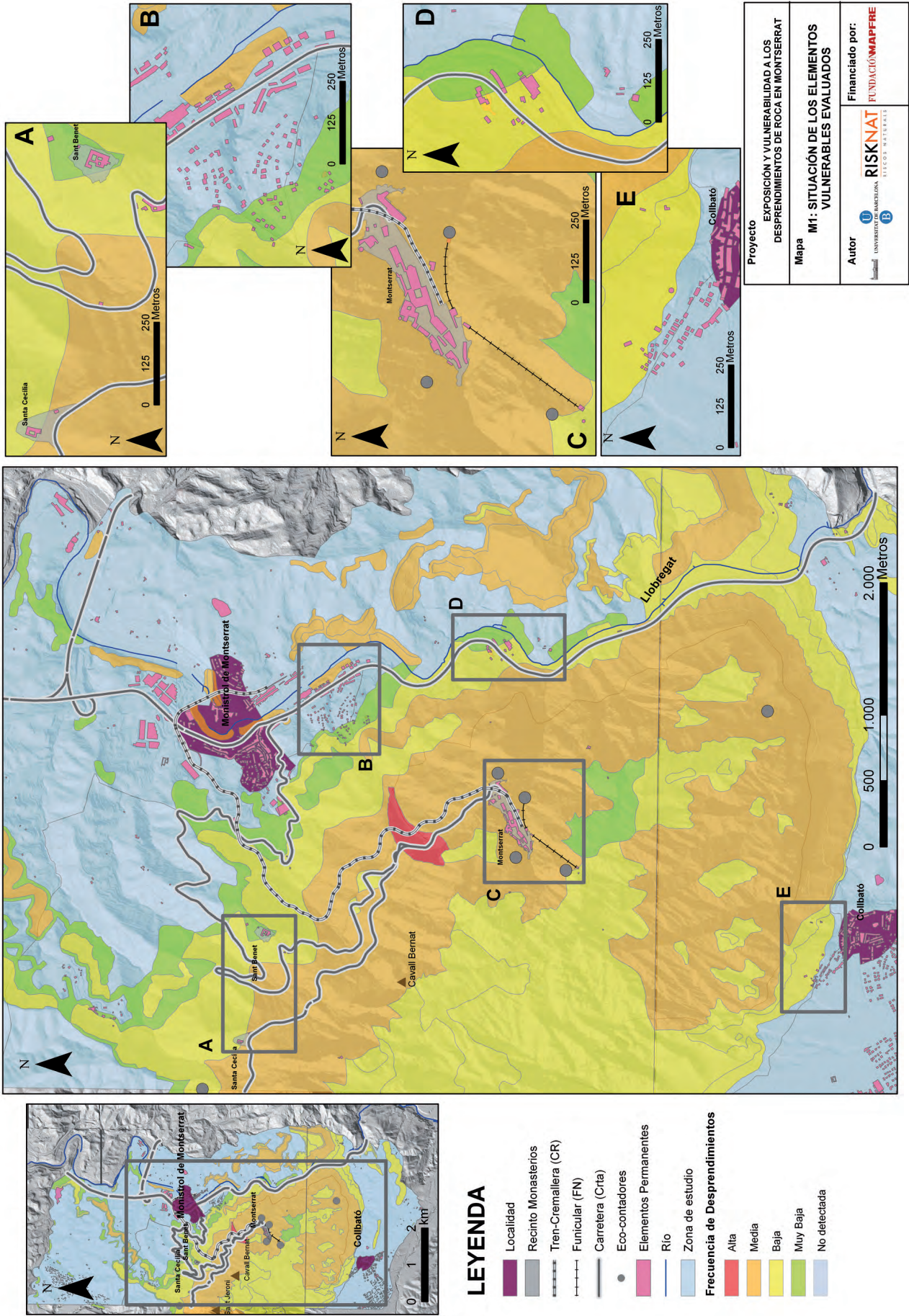
## 10. ANEXOS

### 10.1. ELEMENTOS VULNERABLES CONSIDERADOS

- **Mapa M1:** Situación de los elementos vulnerables considerados.
- **Mapa M2:** Zonificación de peligrosidad de desprendimiento (MPRG25M) y asignación de frecuencias de ocurrencia.
- **Ficha F1:** Tren-cremallera.
- **Ficha F2:** Funiculares: *Sant Joan* y *Santa Cova*.
- **Ficha F3:** Carreteras.
- **Ficha F4:** Personas en caminos.
- **Ficha F5:** Elementos permanentes.

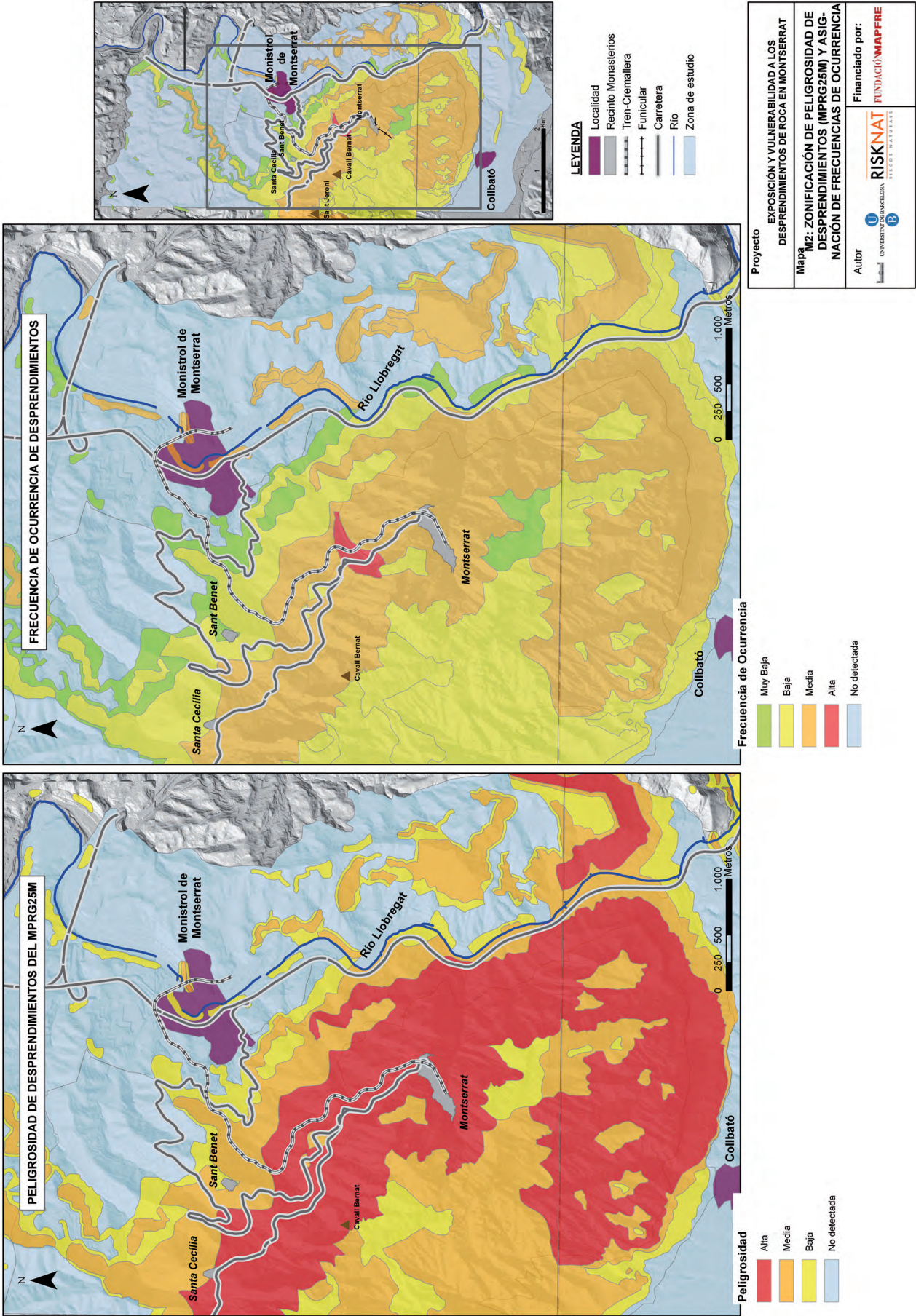


SITUACIÓN DE LOS ELEMENTOS VULNERABLES EVALUADOS





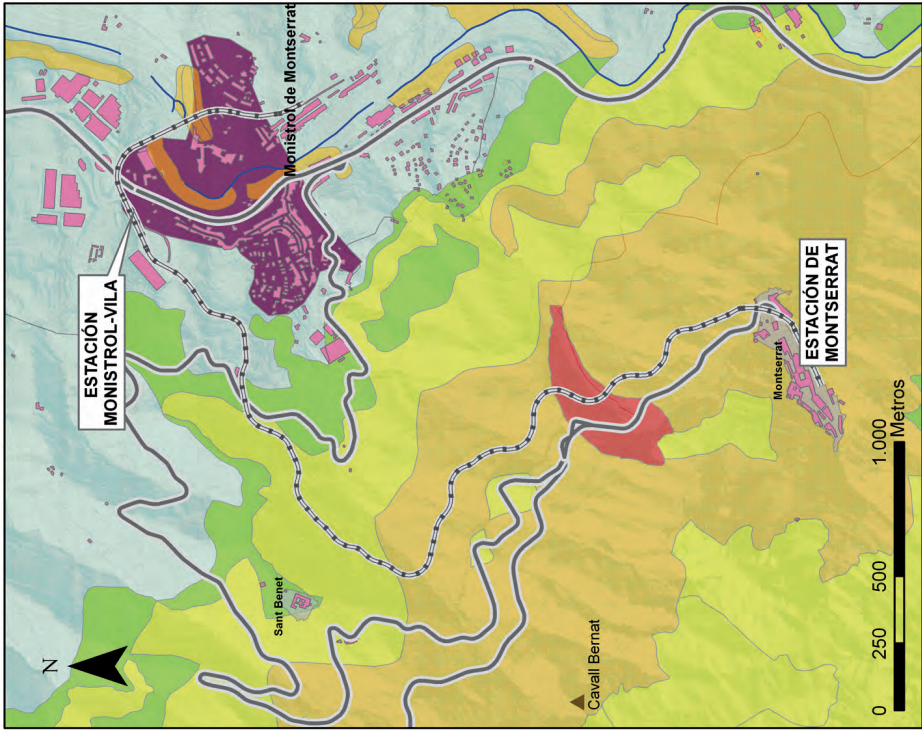
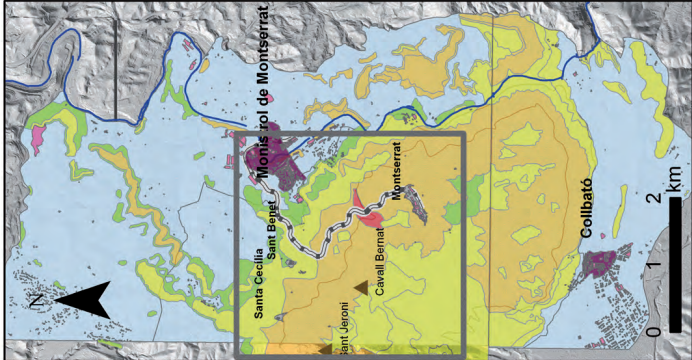
ZONIFICACIÓN DE PELIGROSIDAD DE DESPRENDIMIENTOS DEL MPRG25M Y ASIGNACIÓN DE FRECUENCIAS DE OCURRENCIA





Ficha F1. TREN-CREMALLERA

MAPA



LEYENDA

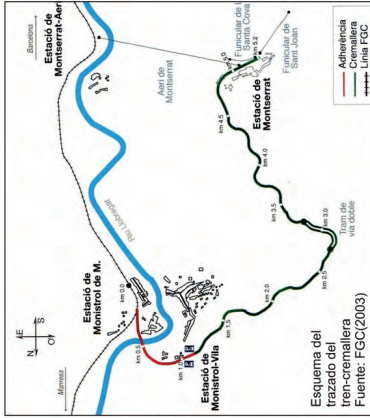
Elementos Permanentes Frecuencia de Desprendimientos

- Localidad
  - Recinto Monasterios
  - Tren-Cremallera (CR)
  - Carretera (Crta)
  - Río
  - Zona de estudio
- Alta  
Media  
Baja  
Muy Baja  
No detectada

RISK NAT  
RISCS NATURALS



FOTOGRAFÍAS



Esquema del trazado del tren-cremallera

Fuente: FGC(2003)



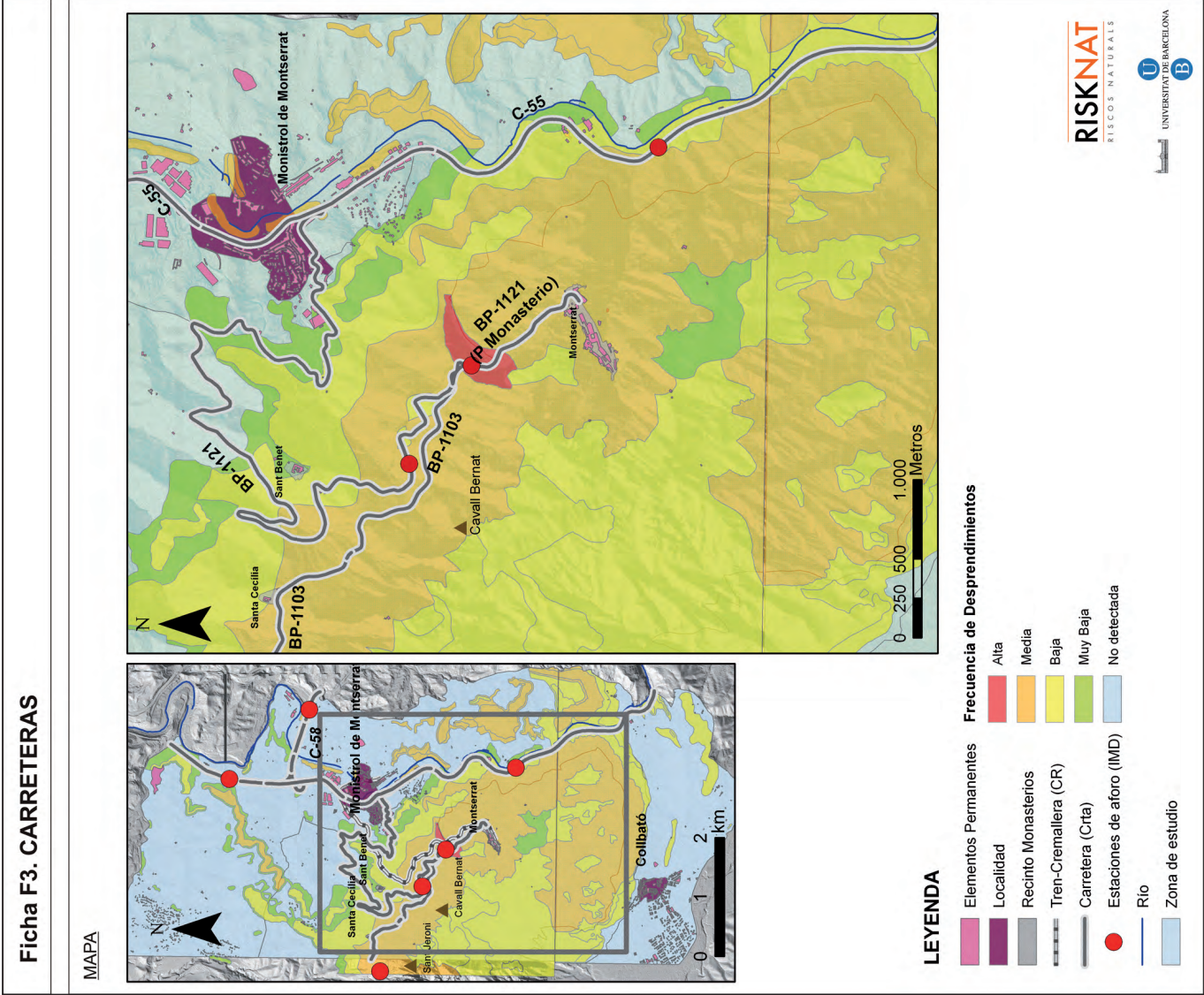
DATOS DE INTERÉS

FUNCIÓN DE EXPOSICIÓN F(ev)	VEHÍCULOS EN MOVIMIENTO
	$f(e_v)_{pv} = \frac{(IMD/24) \times L}{V_L}$ IMD: intensidad media diaria [veh/d]. V <sub>L</sub> : límite de velocidad de la vía [km/h]. L: Longitud del tramo [km].
CARACTERÍSTICAS DEL TREN-CREMALLERA	PERSONAS EN VEHÍCULOS
	$f(e_v)_{pv} = \sum_{i=1}^n \frac{(IMD_i/24) \times Ov \times L}{V_L}$ IMD: intensidad media diaria [veh/d]. V <sub>L</sub> : límite de velocidad de la vía [km/h]. Ov: Ocupación media del vehículo [pers/veh]. L: Longitud del tramo [km].
ESCENARIOS	- Longitud de línea: 5238 m. - Longitud del tramo de adherencia: 1128 m. - Longitud del tramo de cremallera: 4110 m. - Desnivel: 550 m. - Rampa normal: 15,0 %. - Velocidad en el trayecto de Monistrol-vila y Montserrat Monestir: 21 km/h. - La franja horaria de mayor afluencia de visitantes se concentra de 10:15 a 12:15 y de 16:30 a 18:30h.
	<b>A</b> - Vehículos: 27 ud. simples y 17 ud. dobles. - Usuarios: 824.
ESCENARIOS	<b>B</b> - Vehículos: 47 ud. simple y 31 ud. dobles. - Usuarios: 3212.
	<b>C</b> - Vehículos: 23 ud. simples y 69 ud. dobles. - Usuarios: 11850.









FOTOGRAFÍAS



DATOS DE INTERÉS

FUNCIÓN DE EXPOSICIÓN F(ev)	VEHÍCULOS EN MOVIMIENTO				
	$f(e_v)jv = \frac{(IMD/24) \times L}{VL}$ IMD: intensidad media diaria [veh/d]. VL: límite de velocidad de la vía [km/h]. L: Longitud del tramo [km].				
CARACTERÍSTICAS CARRETERAS	PERSONAS EN VEHÍCULOS				
	$f(e_v)pv = \sum_{i=1}^n \frac{(IMD/24) \times Ov \times L}{VL}$ IMD: Intensidad media diaria [veh/d]. VL: velocidad de la vía [km/h]. Ov: Ocupación media del vehículo [pers/veh]. L: Longitud del tramo [km].				
ESCENARIOS	BP-1121		BP-1103		C-58
	- VL: 40 km/h - VL: 20 km/h P monasterio.		- VL: 40 km/h.		- VL: 80 km/h. - VL: 50 km/h en zonas urbanas.
	- Ocupación vehículos: 1,8 pers/moto, 3,4 pers/coches y 43,9 autobuses				
	BP-1121		BP-1103		C-58
A	- 326 veh. - 2300 usuarios.		- 140 veh. - 986 usuarios.		- 15985 veh.
	B		C		
	- 1012 veh. - 5984 usuarios.		- 434 veh. - 2565 usuarios.		- 17323 veh.
C	- 2127 veh. - 12636 usuarios		- 911 veh. - 5413 usuarios.		- 15770 veh.
					- 18766 veh.

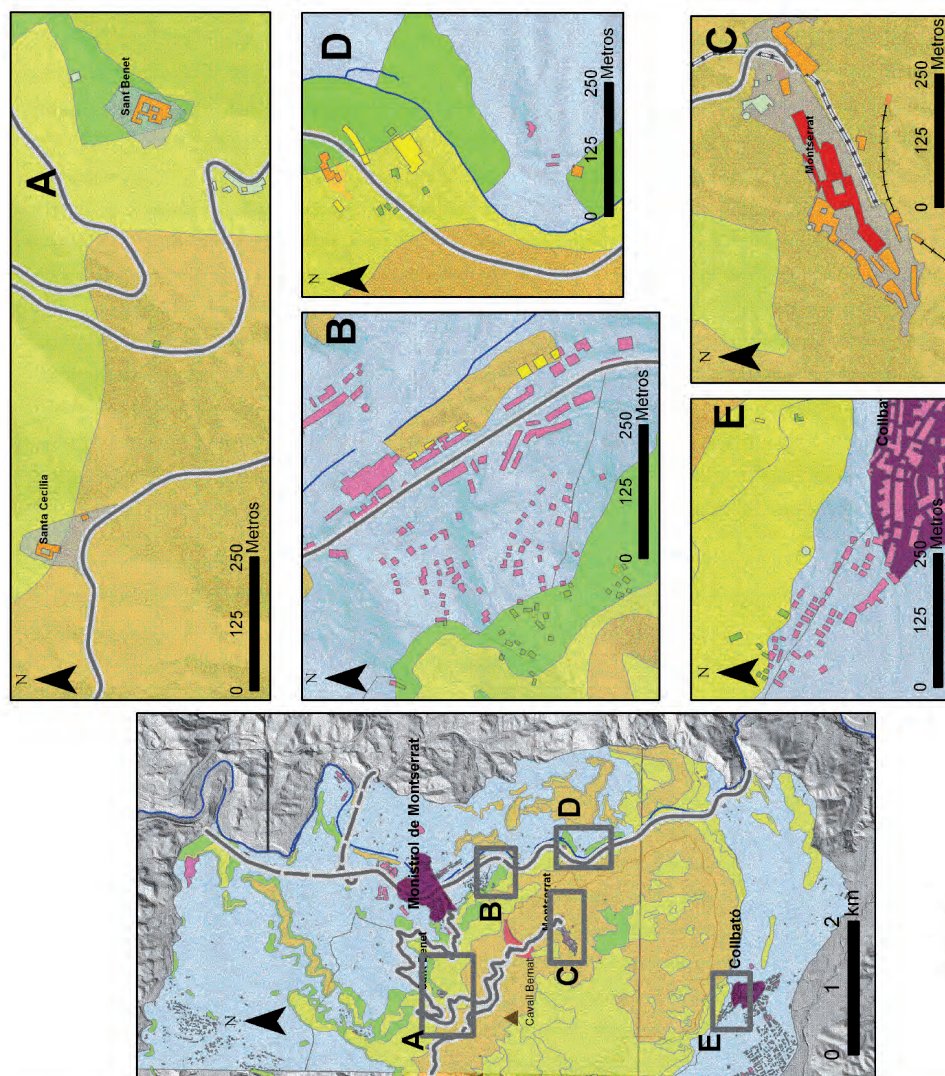




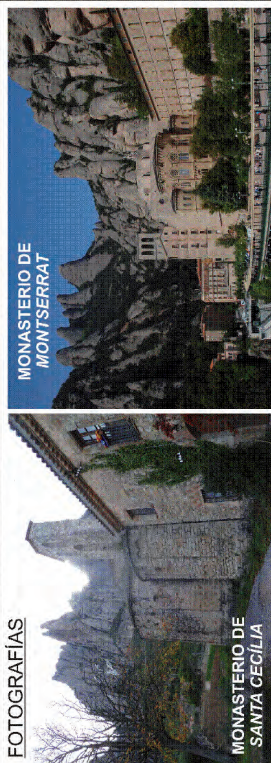


### Ficha F5. ELEMENTOS PERMANENTES

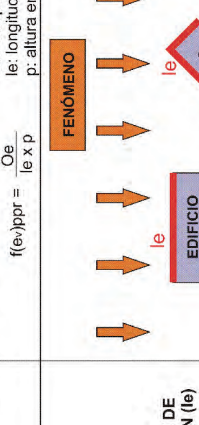
## MAPA



## FOTOGRAFÍAS



### DATOS DE INTERÉS

<p><b>FUNCIÓN DE EXPOSICIÓN <math>F(e_v)</math></b></p>	<p><b>ELEMENTOS PERMANENTES</b></p> <p><math>f(e_v)pr = le \times p</math></p> <p><b>PERSONAS DENTRO DE EDIFICIOS</b></p> <p><math>f(e_v)pr = \frac{O_e}{le \times p}</math></p> <p>le: longitud expuesta del objeto [m]. p: altura en base al número de plantas.</p>
<p><b>LONGITUD DE EXPOSICIÓN (le)</b></p>	<p><b>FENÓMENO</b></p>  <p>le: Ocupación media del edificio. le: longitud expuesta del edificio. p: altura en base al número de plantas.</p> <p><b>Longitud expuesta del edificio (le)</b></p>

CATEGORÍA OCUPACIÓN	OCUPACIÓN EDIFICIO	ELEMENTOS PERMANENTES
Muy Alta	> 200 pers/día	Basílica
Alta	50 – 200 pers/día	Hoteles, monasterios, edificios eclesiásticos de vivienda colectiva (dormitorio montes y escudanía) estaciones de tren-cremallera, funiculares y aéreo, edificios plurifamiliar de más de 6 plantas y restaurantes grandes.
Media	5 – 50 pers/día	Edificios plurivivienda, edificios industriales, restaurantes pequeños a medianos y equipamientos.
Baja	1 – 5 pers/día	Viviendas unifamiliares, casas aisladas y parroquias.
Baja y ocasional	< 1 pers/día	Ermitas aisladas, depósitos de agua y edificios abandonados.

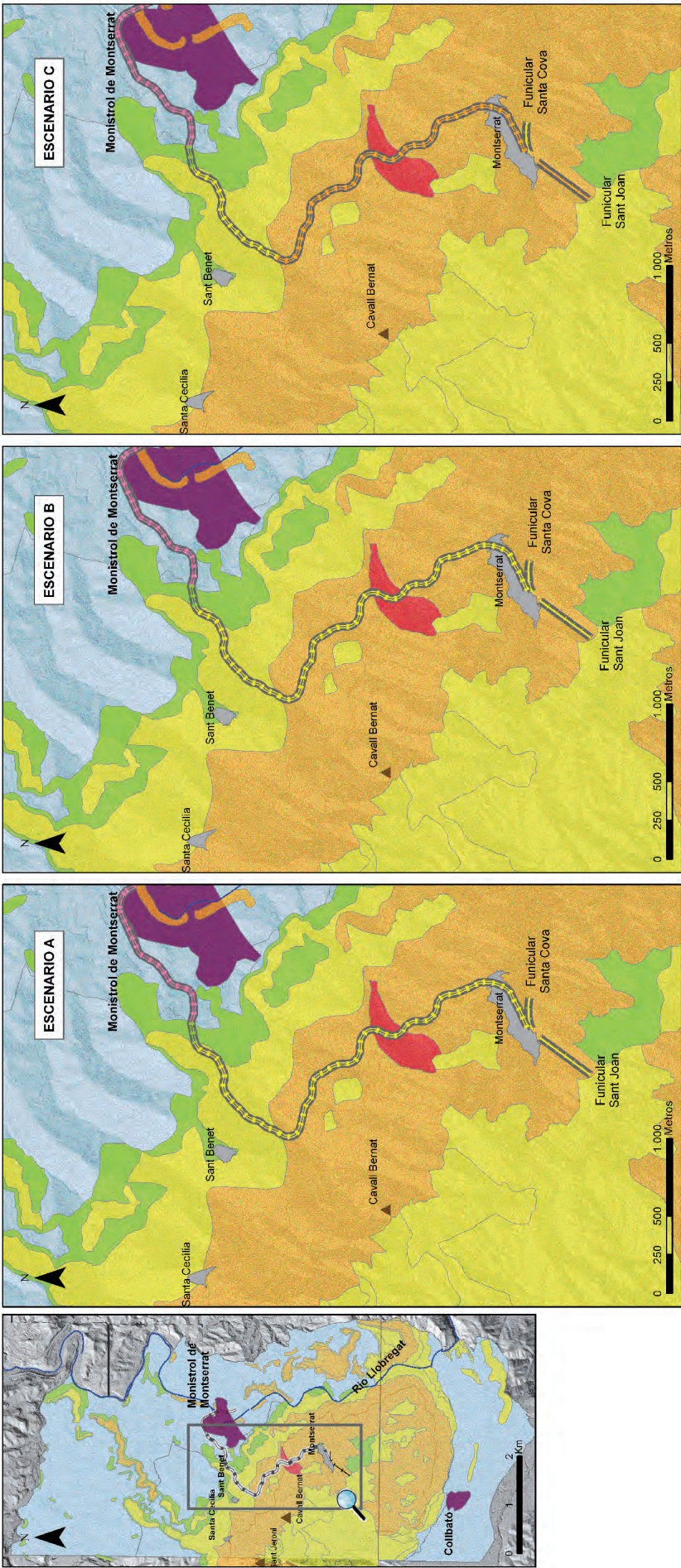


## 10.2. MAPAS DE RESULTADOS

- **Mapa M3:** Grado de exposición del tren-cremallera y de los funiculares.
- **Mapa M4:** Grado de exposición de vehículos en carreteras 1/2.
- **Mapa M5:** Grado de exposición de vehículos en carreteras 2/2.
- **Mapa M6:** Grado de exposición de personas en el tren-cremallera y en los funiculares.
- **Mapa M7:** Grado de exposición de personas en vehículos circulando por carreteras.
- **Mapa M8:** Grado de exposición de personas en caminos.
- **Mapa M9:** Grado de exposición de elementos permanentes.
- **Mapa M10:** Grado de exposición personas en edificios.
- **Mapa M11:** Grado de exposición sintético del escenario A (31 de enero de 2011).
- **Mapa M12:** Grado de exposición sintético del escenario B (27 de julio de 2011).
- **Mapa M13:** Grado de exposición sintético del escenario C (12 de octubre de 2011).



GRADO DE EXPOSICIÓN DEL TREN-CREMALLERA Y LOS FUNICULARES



Proyecto

EXPOSICIÓN Y VULNERABILIDAD A LOS DESPRENDIMIENTOS DE ROCA EN MONTSERRAT

Mapa

M3: GRADO DE EXPOSICIÓN DEL TREN-CREMALLERA Y DE LOS FUNICULARES

Autor

1

RISK NAT

UNIVERSITAT DE BARCELONA

2

FUNDACIÓ MAPFRE

RISCS NATURAL

Financiado por:

1

RISK NAT

UNIVERSITAT DE BARCELONA

2

FUNDACIÓ MAPFRE

RISCS NATURAL

LEYENDA

Localidad

Redino Monasterios

Tren-Cremallera (CR)

Funicular (FN)

Rio

Zona de estudio

Frecuencia de Desprendimientos

Alta

Media

Baja

Muy Baja

No detectada

Grado Exposición CR

Muy Alto

Alto

Medio

Bajo

No detectado

Grado Exposición FN

Muy Alto

Alto

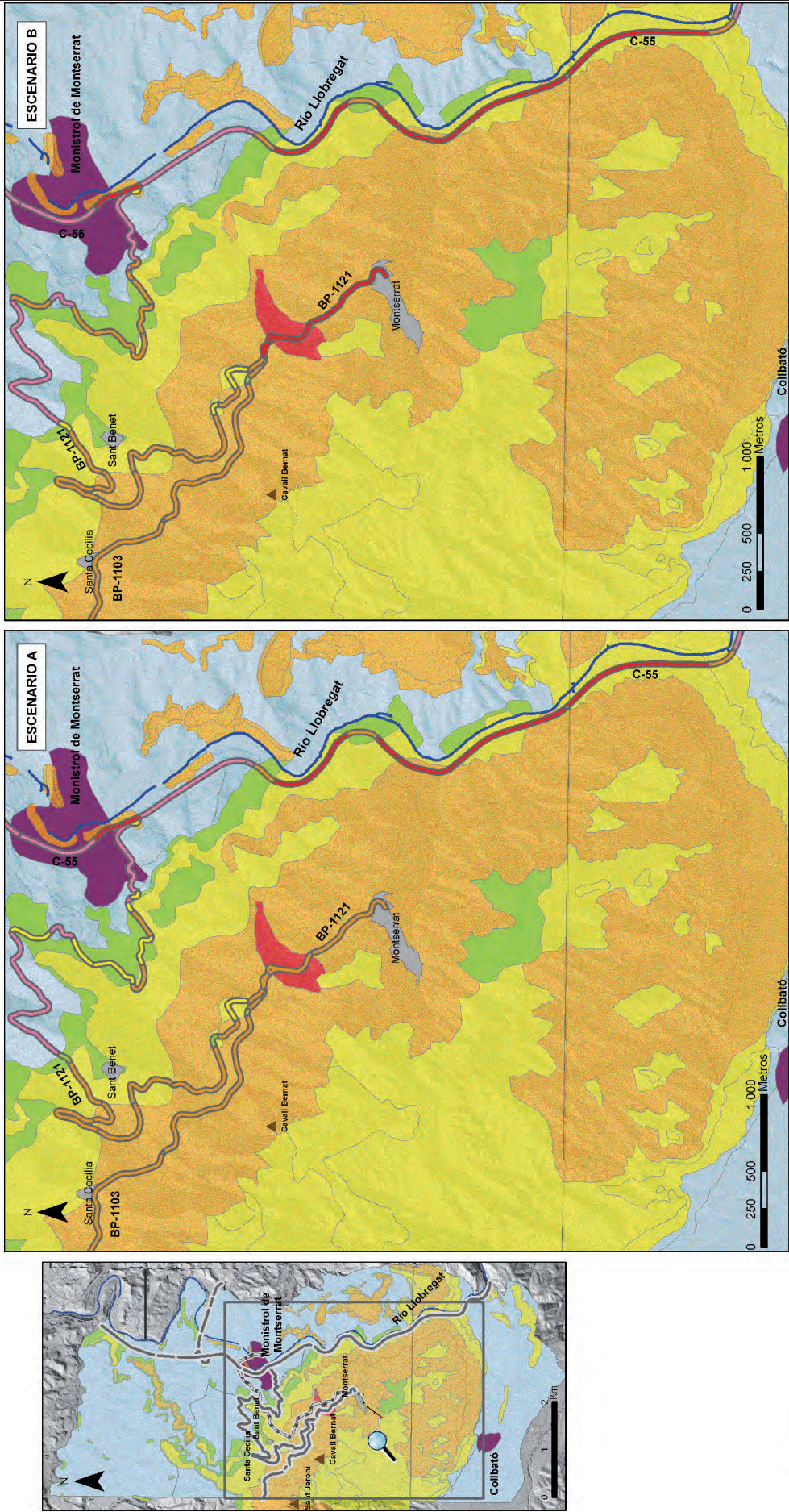
Medio

Bajo

No detectado



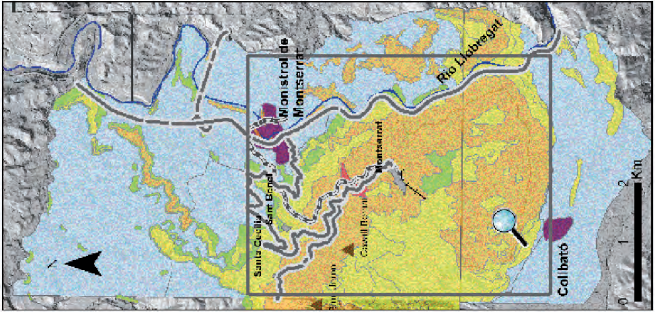
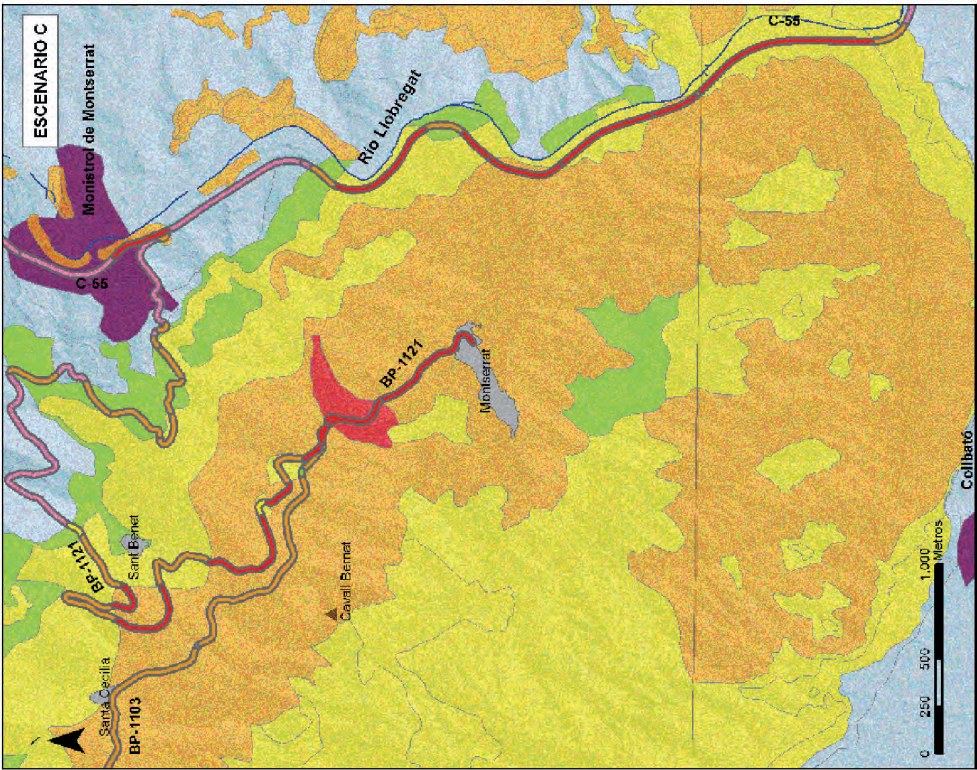
GRADO DE EXPOSICIÓN VEHÍCULOS EN CARRETERAS 1/2



Proyecto	EXPOSICIÓN Y VULNERABILIDAD A LOS DESPRENDIMIENTOS DE ROCA EN MONTSERRAT
Mapa	M4: GRADO DE EXPOSICIÓN DE VEHÍCULOS EN CARRETERAS 1/2
Autor	RISKINAT UNIVERSITAT DE BARCELONA RISCS NATURALS
Financiado por:	FUNDACIÓN MAPFRE



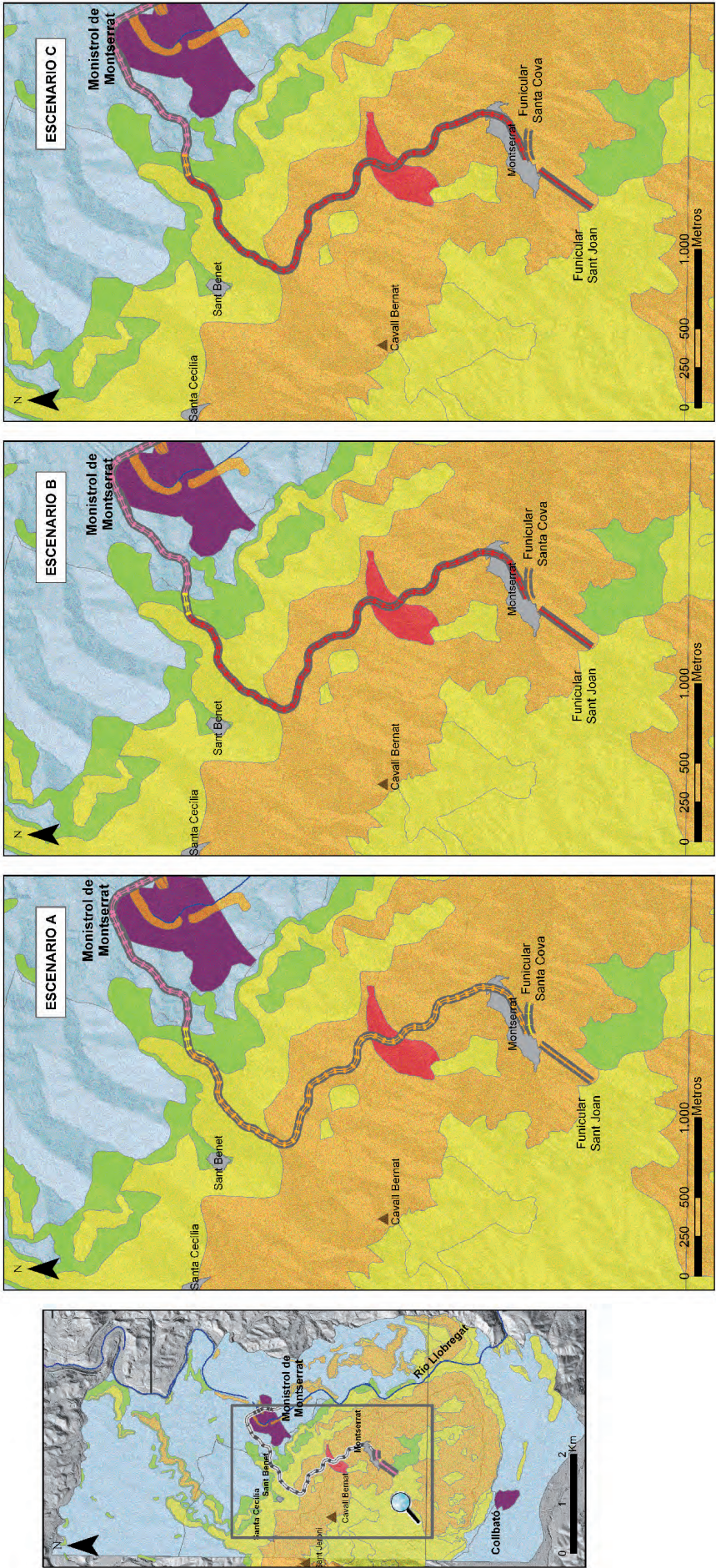
GRADO DE EXPOSICIÓN VEHÍCULOS EN CARRETERAS 2/2



Proyecto		EXPOSICIÓN Y VULNERABILIDAD A LOS DESPRENDIMIENTOS DE ROCA EN MONTSERRAT	
Mapa		M5: GRADO DE EXPOSICIÓN DE VEHÍCULOS EN CARRETERAS 2/2	
Autor	RISK NAT	Financiado por:	
		FUNDACIÓN MAPFRE	



GRADO DE EXPOSICIÓN DE PERSONAS EN EL TREN-CREMALLERA Y EN LOS FUNICULARES



Proyecto

EXPOSICIÓN Y VULNERABILIDAD A LOS DESPRENDIMIENTOS DE ROCA EN MONTSERRAT

Mapa

M6: GRADO DE EXPOSICIÓN DE PERSONAS EN EL TREN-CREMALLERA Y EN LOS FUNICULARES

Autor

**RISK NAT**  
ANÁLISIS DE RIESGOS NATURALES

Financiado por:

**FUNDACIÓN MAPFRE**

LEYENDA

Localidad

Recinto Monasterios

Tren-Cremallera (CR)

Funicular (FN)

Río

Zona de estudio

Alta

Media

Baja

Muy Baja

No detectada

Muy alto

Alto

Medio

Bajo

No detectado

Muy Alto

Alto

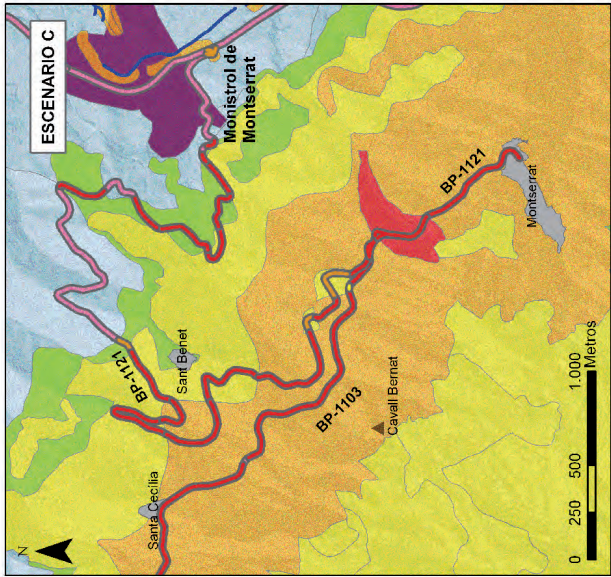
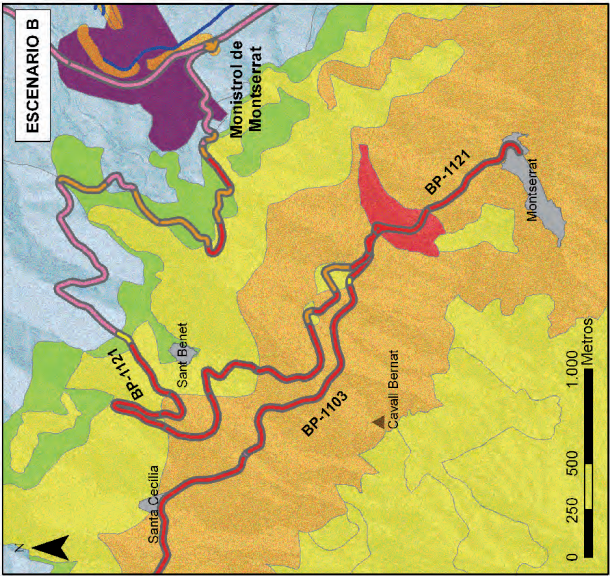
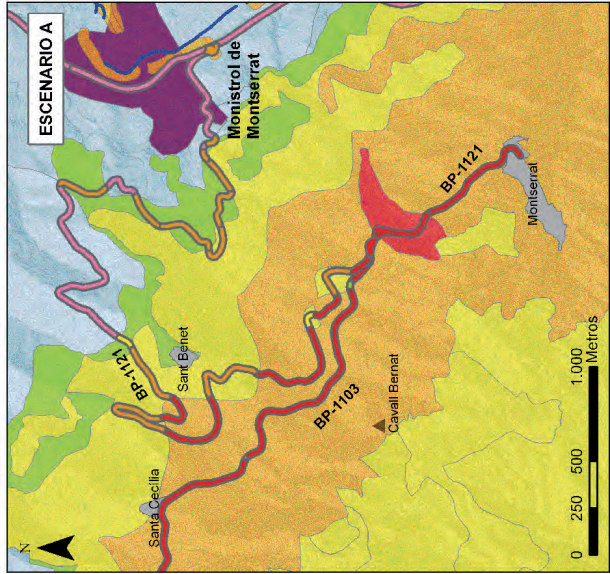
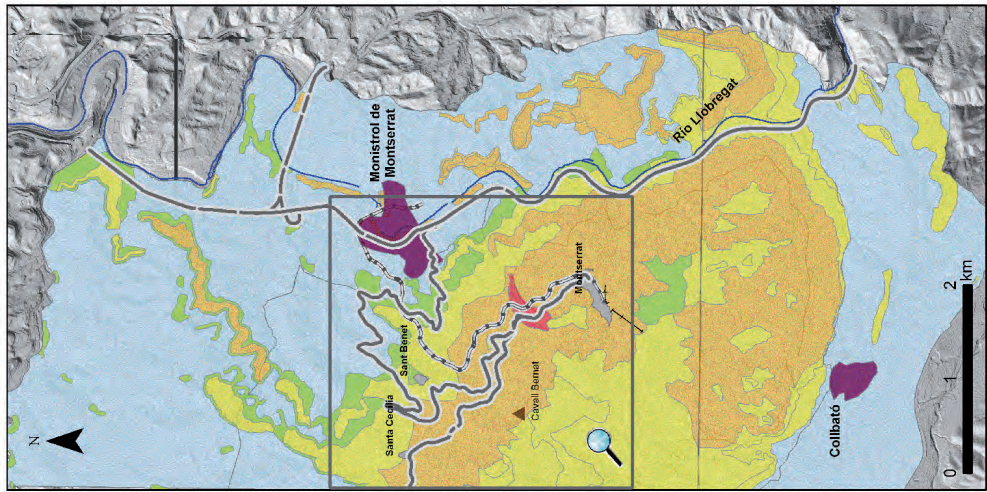
Medio

Bajo

No detectado



GRADO DE EXPOSICIÓN DE PERSONAS EN VEHÍCULOS CIRCULANDO POR CARRETERA



**LEYENDA**

**Frecuencia de Desprendimientos**

- Muy Baja
- Baja
- Media
- Alta
- No detectada

**Grado Exposición PERSONAS en vehículos en Crta.**

- Muy Alto
- Alto
- Medio
- Bajo
- No detectado

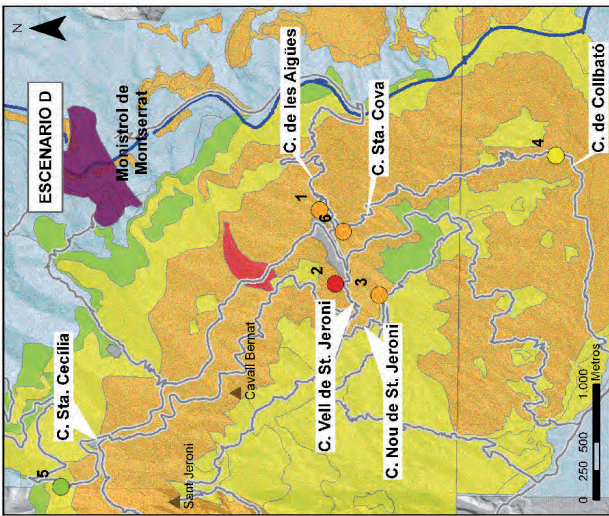
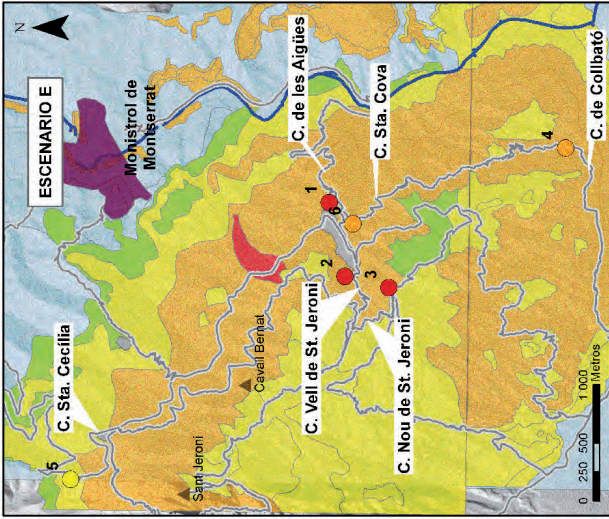
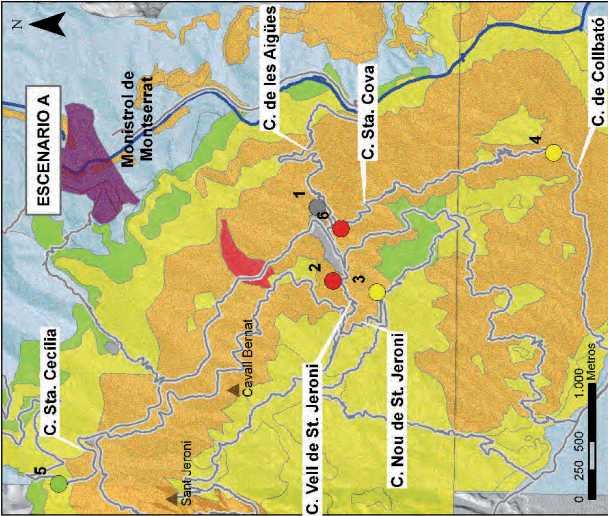
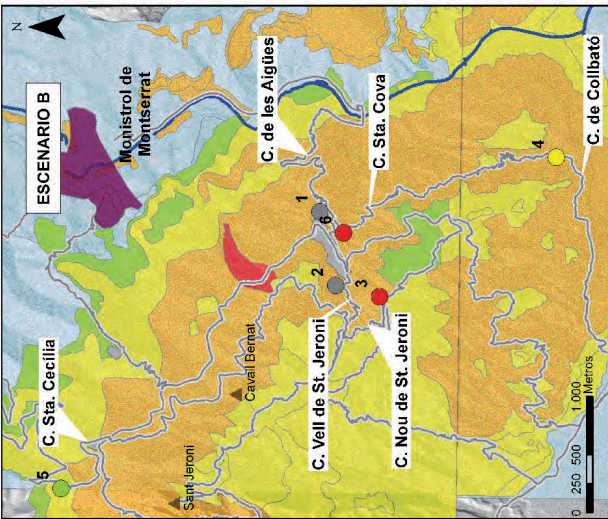
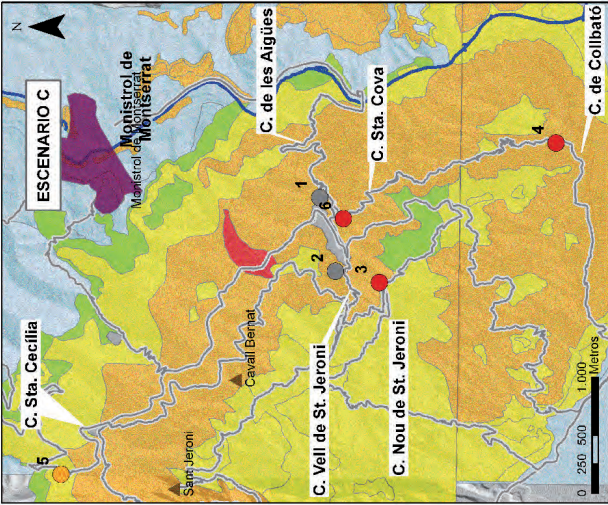
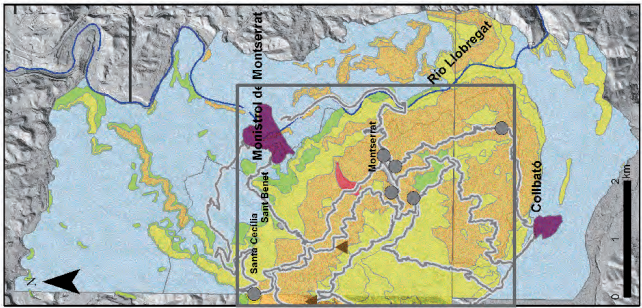
**LEYENDA**

- Localidad
- Recinto Monasterios
- Carretera
- Tren-Cremallera
- Funicular
- Río
- Zona de estudio

Proyecto	EXPOSICIÓN Y VULNERABILIDAD A LOS DESPRENDIMIENTOS DE ROCA EN MONTSERRAT
Mapa	IM7: GRADO DE EXPOSICIÓN DE PERSONAS EN VEHÍCULOS CIRCULANDO POR CARRETERAS
Autor	RISK <sup>NAT</sup> <small>RIESGOS NATURALES</small> Financiado por: FUNDACIÓN WAPFRE

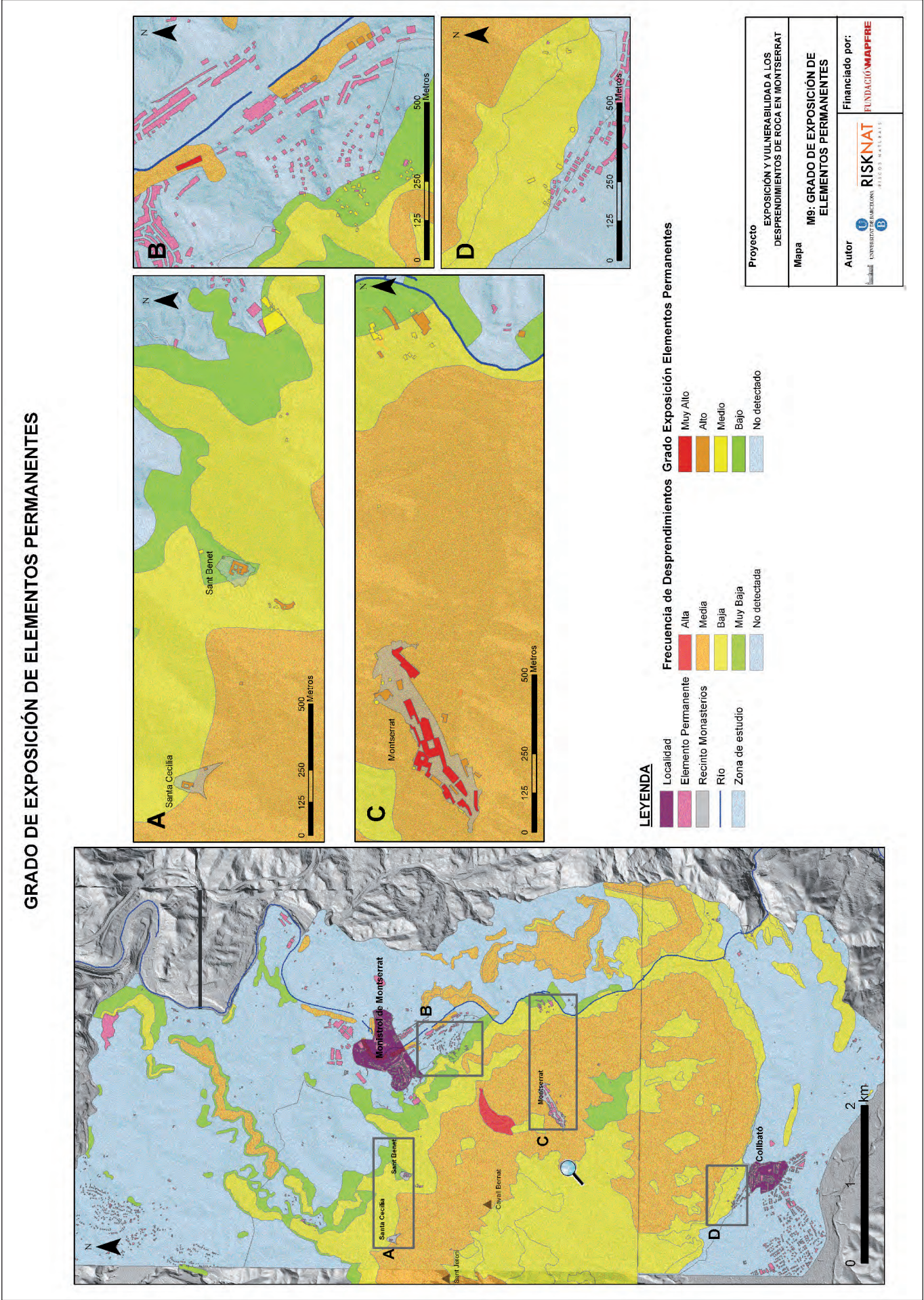


GRADO DE EXPOSICIÓN DE PERSONAS EN CAMINOS



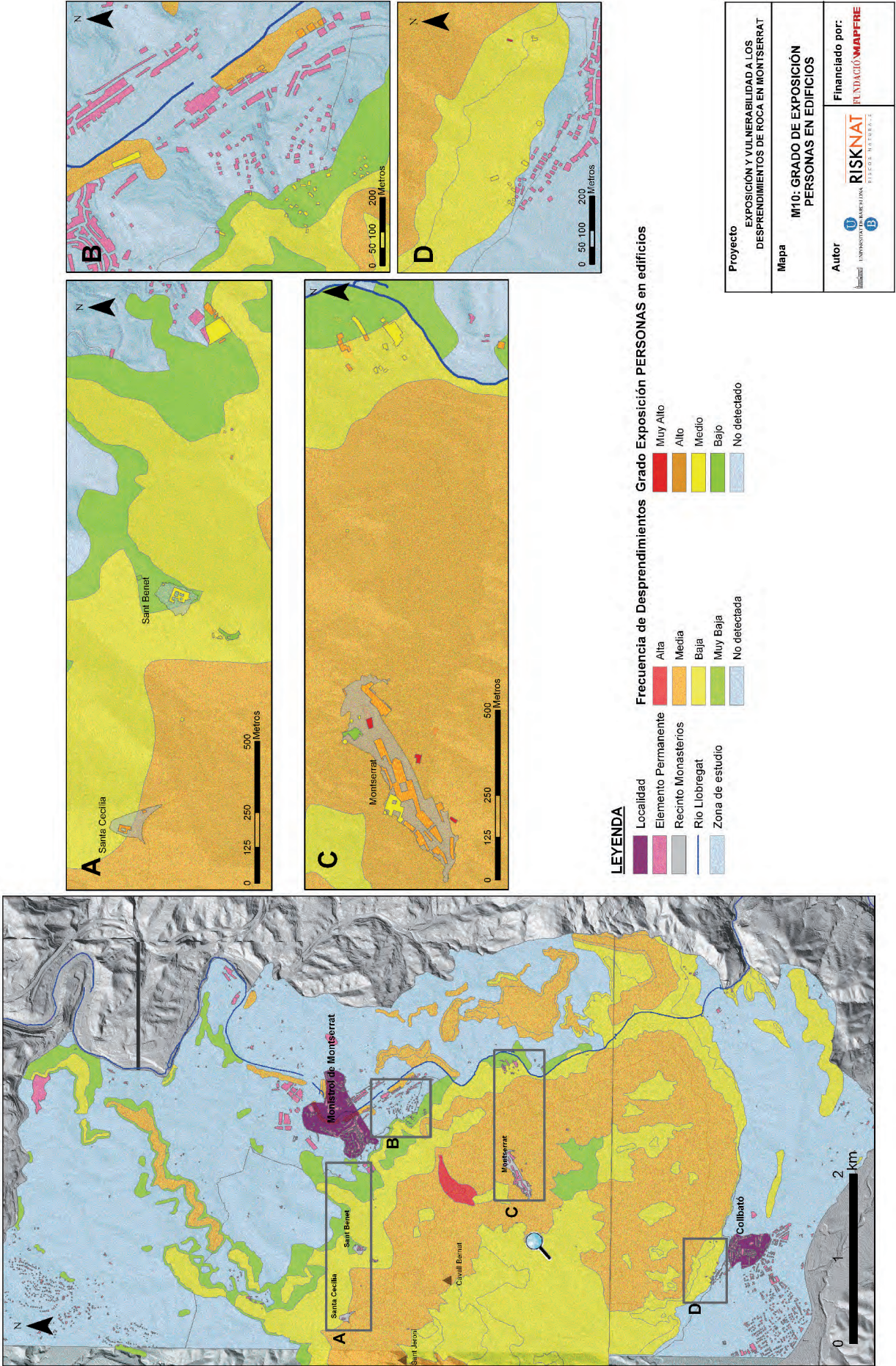
Proyecto		EXPOSICIÓN Y VULNERABILIDAD A LOS DESPRENDIMIENTOS DE ROCA EN MONTSERRAT
Mapa		M8: GRADO DE EXPOSICIÓN DE PERSONAS EN CAMINOS
Autor	RISKINAT	Financiado por:
		FUNDACIÓN MAPFRE





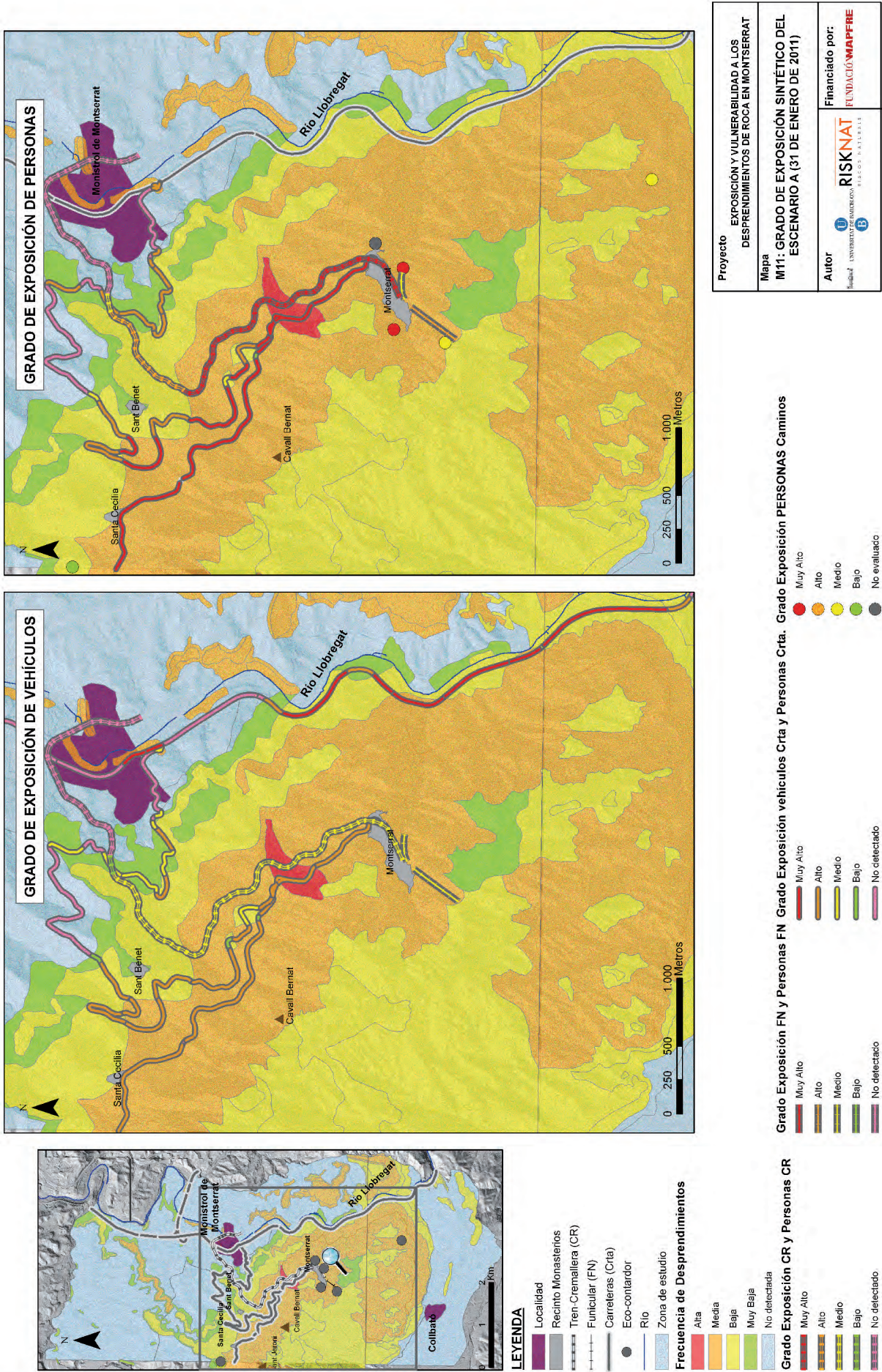


GRADO DE EXPOSICIÓN DE PERSONAS EN EDIFICIOS



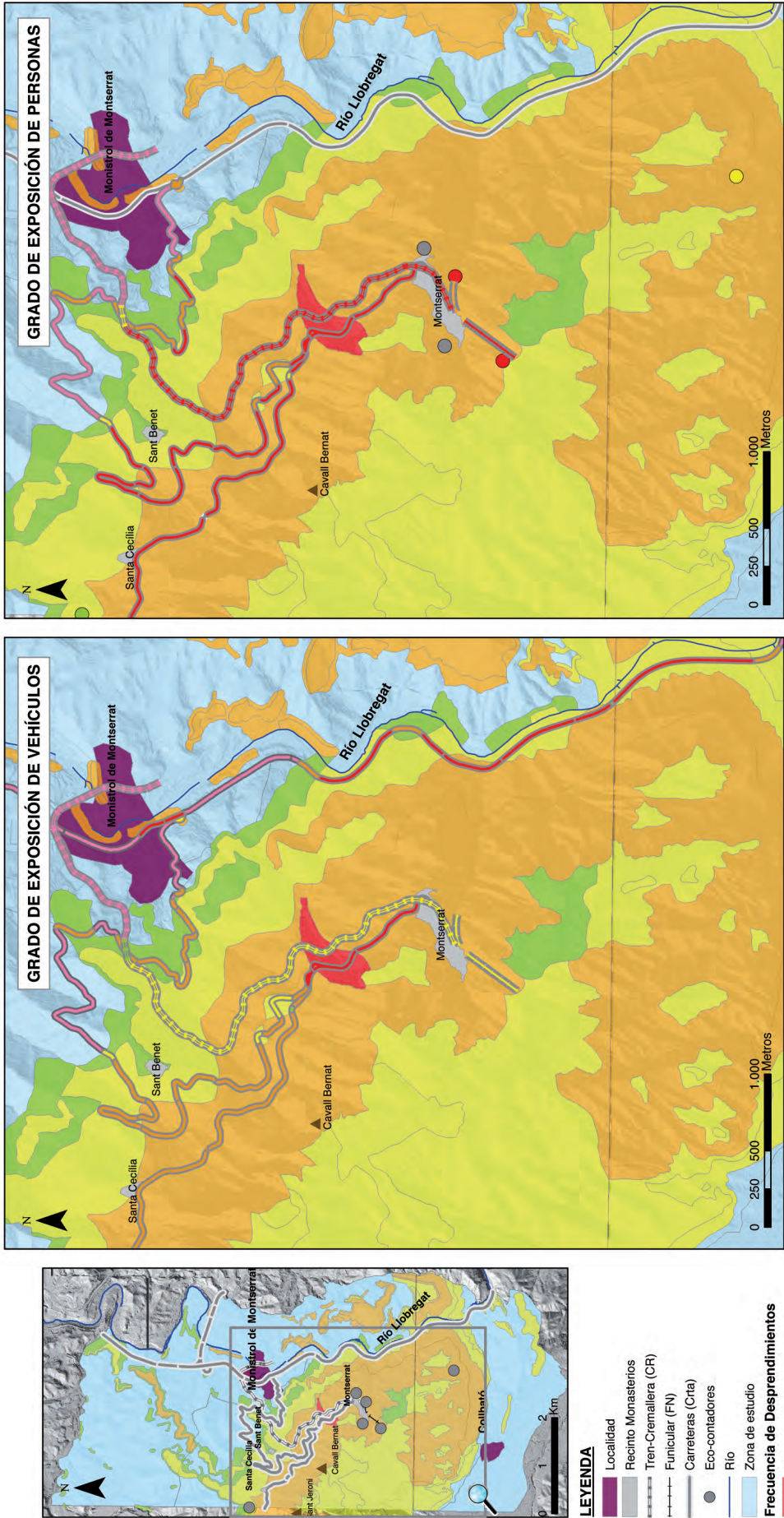


GRADO DE EXPOSICIÓN SINTÉTICO DE UN ESCENARIO DE MÍNIMOS





GRADO DE EXPOSICIÓN SINTÉTICO DE UN ESCENARIO HABITUAL



LEYENDA

- Localidad
- Recinto Monasterios
- Tren-Cremalera (CR)
- Funicular (FN)
- Carreteras (Crt)
- Eco-contadores
- Rio
- Zona de estudio
- Frecuencia de Desprendimientos

Grado de Exposición

- Alta
- Media
- Baja
- Muy Baja
- No detectada

Grado de Exposición CR y Personas CR

- Muy Alto
- Alto
- Medio
- Bajo
- No detectado

Grado de Exposición FN y Personas FN

- Muy Alto
- Alto
- Medio
- Bajo
- No detectado

Grado de Exposición vehículos Crt y Personas Crt

- Muy Alto
- Alto
- Medio
- Bajo
- No detectado

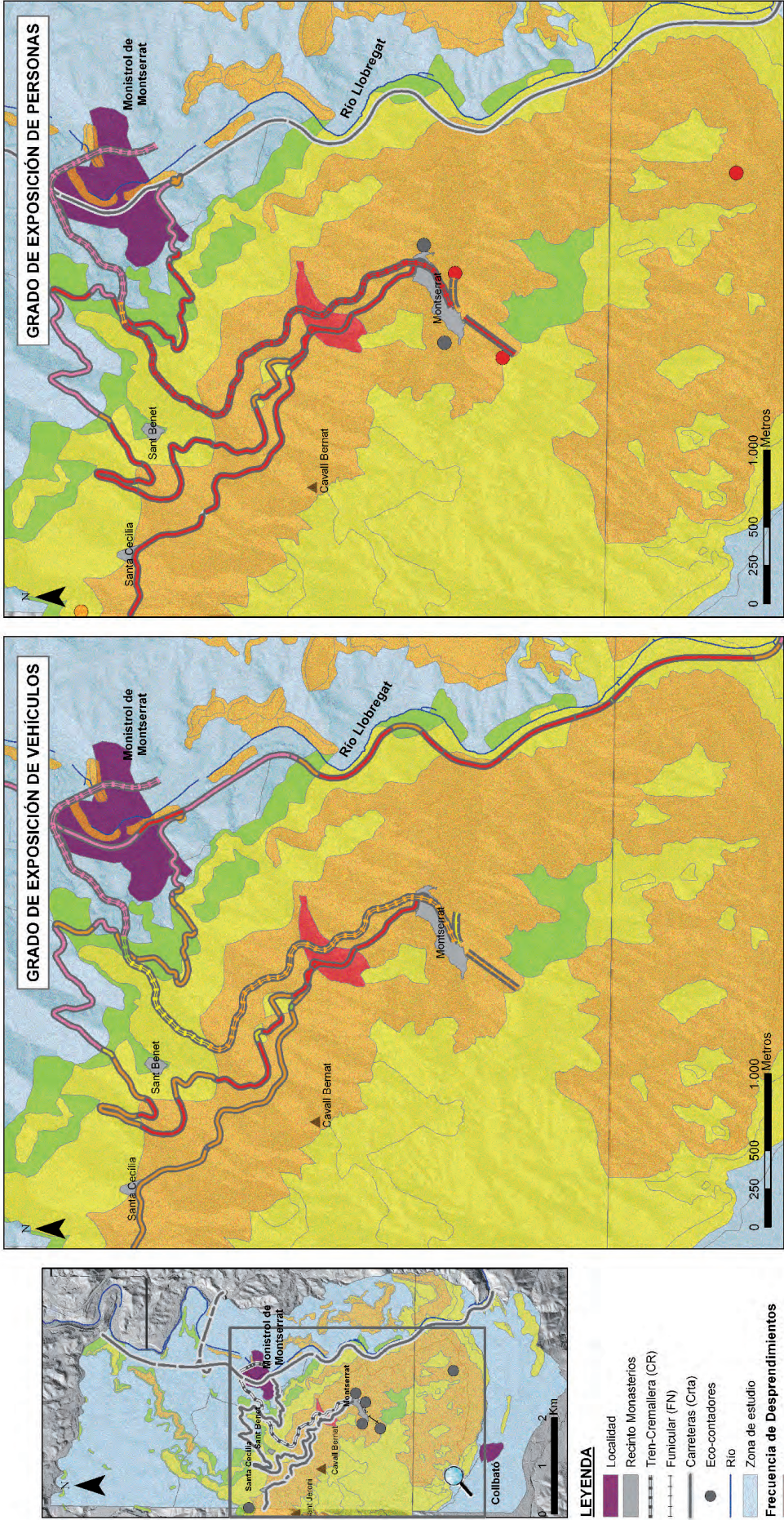
Grado de Exposición PERSONAS Caminos

- Muy Alto
- Alto
- Medio
- Bajo
- No evaluado

Proyecto	EXPOSICIÓN Y VULNERABILIDAD A LOS DESPRENDIMIENTOS DE ROCA EN MONTSERRAT		
Mapa	M12: GRADO DE EXPOSICIÓN SINTÉTICO DEL ESCENARIO B (27 DE JULIO DE 2011)		
Autor	RISK NAT UNIVERSITAT DE BARCELONA RISCS NATURALS		Financiado por: FUNDACIÓN MAPFRE



GRADO DE EXPOSICIÓN SINTÉTICO DE UN ESCENARIO DE MÁXIMOS



Proyecto		EXPOSICIÓN Y VULNERABILIDAD A LOS DESPRENDIMIENTOS DE ROCA EN MONTSERRAT
Mapa		M13: GRADO DE EXPOSICIÓN SINTÉTICO DEL ESCENARIO C (12 DE OCTUBRE DE 2011)
Autor	RISK NAT	Financiado por:
		FUNDACIÓN MAPFRE

Grado Exposición CR y Personas CR		Grado Exposición FN y Personas FN	Grado Exposición vehículos Crt y Personas Crt	Grado Exposición PERSONAS Caminos
Muy Alto	Alto	Muy Alto	Muy Alto	Muy Alto
Alto	Medio	Alto	Alto	Alto
Medio	Bajo	Medio	Medio	Medio
Bajo	No detectado	Bajo	Bajo	Bajo
No detectado		No detectado	Carreteras	No evaluado



### 10.3. TAREAS/ACTIVIDADES VINCULADAS AL PROYECTO

#### TAREAS REALIZADAS

##### Póster en Congreso

El pasado mes de Julio se presentó en el marco del VIII Congreso Geológico de España, un póster donde se exponía la propuesta metodológica que se está desarrollando en este proyecto. El congreso fue organizado por la Universidad de Oviedo y la Sociedad Geológica de España. A continuación se detalla la referencia del póster y se adjunta en los anexos:

*Autores:* Sara Fontquerni, Joan Manuel Vilaplana, Marta Guinau, Manuel Jesús Royán, Marcel Barberà y Marc Janeras.

*Título:* “*Los elementos vulnerables expuestos a los desprendimientos de rocas en Montserrat*”.

*Revista:* Geo-temas nº 13. Especial VIII Congreso Geológico de España 2012.

*Lugar y Año:* Oviedo, 2012.

##### Contactos con otras instituciones:

- Zona de estudio y contacto con la comunidad del Monasterio: se ha realizado dos visitas a campo con la finalidad de observar la zona de estudio, identificar los elementos vulnerables, acceder a las zonas restringidas del Monasterio, fotografiar la zona de estudio desde el campanario del monasterio de Montserrat y hablar con algunos monjes del monasterio de los desprendimientos de rocas históricos.
- Información solicitada:
  - o Generalitat de Catalunya: petición de datos de Intensidad Media Diarias (IMD) a la Direcció General de Carreteres de las principales carreteras existentes en la zona de estudio (C-55, C-58, BP-1121 y BP-1103). Recibida.
  - o PNMM: Al Parque Natural de la Muntanya de Montserrat se le han solicitado datos detallados de los usuarios del parque. Se han pedido los datos de los eco-contadores instalados en diferentes caminos y senderos del parque. De esta manera se dispondrá de los vehículos y los excursionistas que los usan. Pendiente de recibir.
  - o ICC: Petición de cesión del Modelo Digital del Terreno (MDT) 2x2 de la zona de estudio. Recibida.
  - o FGC: datos técnicos del tren-cremallera y de los funiculares de la Santa Cova y Sant Joan. El fin es conocer las velocidades que se desplazan estos vehículos en cada tramo de sus respectivos trayectos. Pendiente de recibir.
- Reunión de Geocat, IGC y RISK NAT: este septiembre se ha realizado una reunión entre estas instituciones con la finalidad de dar a conocer el proyecto que se está realizando y los objetivos a medio y largo plazo de la tesis doctoral en la que se enmarca.

##### Trabajos del grupo RISK NAT

Paralelamente a este proyecto el grupo RISK NAT está realizando proyectos que lo complementan y que aportan conocimiento de gran interés:

- Tesis doctoral de Manuel Jesús Royán que tiene como objetivo el desarrollo de metodologías para la caracterización y predicción de desprendimientos de rocas mediante la utilización de la tecnología LIDAR (Light Detection And Ranging) terrestre. En esta tesis se realiza el monitoreo de diferentes escarpes rocosos de Montserrat.

*Título:* Caracterización y predicción de desprendimientos de rocas mediante LIDAR terrestre.

*Directores:* Joan Manuel Vilaplana (RISK NAT-UB) y Antonio Abellán (Institute of Geomatics and Risk Analysis de la Université de Lausanne).

*Año:* 2010-2014.

- Proyecto final del Master de Geología especialidad en Riesgos Geológicos que tuvo como objetivo la caracterización de la susceptibilidad de caída de rocas de la Paret del Monasterio de Montserrat, elaborando una serie de documentos visuales que permitan una fácil interpretación de los resultados.

*Autor:* Xavi Gallach

*Título:* “Estudi de susceptibilitat de caiguda de roques a la paret del Monestir de Montserrat a partir de la inspecció d'indicadors d'inestabilitat i d'anàlisi SIG”

*Director:* Joan Manuel Vilaplana.

*Año:* 2012.

##### Desarrollo de la metodología

Desde que se inició esta investigación los esfuerzos se han centrado en desarrollar una metodología sobre la evaluación del Grado de exposición y su aplicación al PNMM para el fenómeno de las caídas de rocas.



#### 10.4. PÓSTER: VIII CONGRESO GEOLÓGICO DE ESPAÑA 2012

##### Referencia bibliográfica

*Autores:* Sara Fontquerni, Joan Manuel Vilaplana, Marta Guinau, Manuel Jesús Royán, Marcel Barberà y Marc Janeras

*Título:* "Los elementos vulnerables expuestos a los desprendimientos de rocas en Montserrat".

*Revista:* Geo-temas nº 13. Especial VIII Congreso Geológico de España 2012.

*Lugar y Año:* Oviedo, 2012.

# Los elementos vulnerables expuestos a los desprendimientos de rocas en Montserrat

S. Fontquerní<sup>1</sup>, J.M. Vilaplana<sup>1</sup>, M. Guinà<sup>1</sup>, M.J. Royán<sup>1</sup>, M. Barberà<sup>2</sup> y M. Janeras<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Grupo RISK NAT, Institut Geomodels, Dpt. de Geodinàmica i Geofísica, Facultat de Geologia, Universitat de Barcelona, C/ Martí i Franquès s/n 08028 Barcelona, [sfontquerni@ub.edu](mailto:sfontquerni@ub.edu)  
<sup>2</sup> GEOCAT, Gestió de Projectes S.A. Av. Josep Tarradellas, 34 08029 Barcelona

## RESUMEN

La montaña de Montserrat es uno de los parajes más emblemáticos de Cataluña, caracterizada por la singularidad de sus rasgos geomorfológicos. Los materiales aflorantes son conglomerados intercalados con limolitas y/o areniscas subhorizontales afectados por una red subvertical de tres familias principales de diaclasas. Las laderas del Parque Natural de la montaña de Montserrat se encuentran afectadas por desprendimientos de rocas, que con cierta frecuencia superan los 1000 m<sup>3</sup>. Estos constituyen un riesgo geológico importante para todos los elementos expuestos a este fenómeno. La evaluación del grado de exposición de los elementos expuestos es un paso más en la cuantificación del riesgo. Se ha realizado una identificación y clasificación de los elementos vulnerables expuestos a desprendimientos. El mapa de elementos expuestos se ha cruzado con el mapa de peligrosidad basado en la frecuencia de ocurrencia. En este trabajo se presentan los primeros resultados sobre los elementos vulnerables expuestos a diferentes grados de peligrosidad. Se ha detectado que los principales elementos expuestos se ubican en zonas de peligrosidad alta y solo en las partes más bajas topográficamente esta peligrosidad se reduce a media o baja. En 2010 más de dos millones de personas visitaron el recinto del Monestir de Montserrat y en días de máxima afluencia solo en el tren-cremallera se pueden registrar 4000 usuarios, descendiendo a unos 400 los días de menor concurrencia.

## CONTEXTO



## PROBLEMÁTICA

Afectación de elementos vulnerables expuestos al fenómeno geológico de los desprendimientos.



## ELEMENTOS VULNERABLES



## DATOS UTILIZADOS

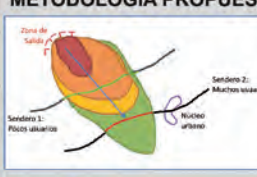
- Zonificación de la peligrosidad por desprendimientos: "Mapa per la prevenció dels riscos geològics" del IGC (2012).
- Datos de usuarios de los senderos a partir de eco-contadores instalados en diferentes puntos del Parque Natural por el Patronat de la Muntanya de Montserrat (PMM, 2010).
- Cartografía base:
  - \* Web ICC: [www.icc.cat/visar3/](http://www.icc.cat/visar3/)
  - \* Departament de Medi Ambient i Habitatge de la Generalitat de Catalunya: <http://idmah.nexusgeographics.com/>

## HIPOTESIS DE ENTRADA

- Escenarios:
 

Escenario	Fecha	Estado del Sendero	Velocidad media	Velocidad máxima	Velocidad mínima
1	1 de mayo de 2010	Abierto	3.3 km/h	10 km/h	1 km/h
2	1 de mayo de 2010	Cerrado	3.3 km/h	10 km/h	1 km/h
- Velocidad media al andar de una persona: 3.3 km/h.
- Horas de tráfico de personas en los caminos: 11 h (Des de que llega el primer tren-cremallera hasta que se va el último).
- Distribución homogénea a lo largo del tiempo y del espacio de los usuarios de los senderos.

## METODOLOGÍA PROPUESTA Y APLICADA



$E = F * f(e_v)$

donde:  
 E: Índice de exposición al riesgo  
 F: Frecuencia de ocurrencia del fenómeno  
 f(e<sub>v</sub>): Función de exposición del elemento vulnerable en base a su tipología

Entre los diferentes Elementos Vulnerables clasificados, se analiza la exposición de los usuarios de senderos:

$f(e_v) = C * V$

donde:  
 C: Concurrencia de personas (pers/h)  
 V: Velocidad al andar (km/h)

## RESULTADOS PRELIMINARES

### ANÁLISIS EXPOSICIÓN: usuarios senderos



## CONCLUSIONES

- 1- La función de exposición del elemento vulnerable es específica de cada tipología de elemento.
- 2- La exposición de elementos temporales es dependiente de los escenarios que se definen.
- 3- El índice de exposición se calcula a partir de la frecuencia de ocurrencia del fenómeno y de la función de exposición del elemento que se quiere evaluar.
- 4- En este trabajo se presentan resultados preliminares de la propuesta metodológica de un estudio en curso que se centra en el análisis de la exposición al riesgo por desprendimientos de roca, y su aplicación a una de las tipologías de elementos vulnerables expuestos de la montaña de Montserrat.

## REFERENCIAS

- Oliver, J.M., López Blanco, M. y Ramos, E. (2007) Presencia de la incopecie *Dactyloctenium aegyptium* en el complejo de abertor costero de Sant Llorenç del Munt (Ebro, Cuenca del Ebro, NE de España). *Geobotanica*, nº 41, 2007.
- IGC (2011). Reconocimiento preliminar de la zona de riesgo que afecta al recinto del Monestir de Montserrat. Institut Geològic de Catalunya. Codi AP-04011. Barcelona.
- IGC (2012). Mapa per la prevenció dels riscos geològics 1:25.000, hoja nº 362-3-4 (Montserrat de Montserrat). Institut Geològic de Catalunya. Barcelona.
- PMM (2010). Dades dels ecocontadors del Parc Natural i del Patrimoni de la Muntanya de Montserrat. nº 7 Edició 2010.

## CLASIFICACIÓN ELEMENTOS VULNERABLES

TIPOLOGÍA ELEMENTO	Permanente	Temporal
<b>Areal</b>		
Recinto Monasterio	Edificio residencial, templo, hoteles, jardines, etc.	Usuarios
Estaciones	Edificio	Usuarios
Aparcamientos	Infraestructura asociada	Usuarios
Otros	Emitas, refugios, edificios aislados, depósitos de agua etc.	Usuarios
<b>Lineal</b>		
Tren cremallera	Vías	Usuarios
	Catenaria	Vagones
	Infraestructura asociada	
Tren FGC	Vías	Usuarios
	Catenaria	Vagones
	Infraestructura asociada	
Teleférico	Infraestructura (torres y cable)	Usuarios
	Vía	Cabinas
Funiculares		Usuarios
	Firme	Cabinas teleférico
	Infraestructura asociada	Cabinas funicular
Carreteras		Usuarios (vehículos y personas)
Senderos	Sendero	Usuarios
	Infraestructura asociada	
Calles	Calle	Usuarios (vehículos y personas)
	Infraestructura asociada	
<b>Puntual</b>		
Personas		Usuarios (habitantes, visitantes, excursionistas y escaladores)
Vehículos		Autocarres
		Coches
		Motos
Otros	Torres eléctricas	
	Infraestructuras puntuales (antenas, torres, pequeñas infraestructuras, etc.)	

## AGRADECIMIENTOS

Esta investigación tiene el soporte Fundación MAPFRE, del grupo RISK NAT 2009GR/520 y del proyecto NUTESA-CGL2010-18609 (PN I+D+i y Fondos Feder). Al IGC y a GEOCAT por aportar información fundamental.