



Escuela de Caminos

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos
UPC BARCELONATECH

Optimización de la explotación de inventarios de caída rocas para la valoración de la peligrosidad mediante la relación magnitud frecuencia

Trabajo realizado por:

Rocío Cornejo Balbontín

Dirigido por:

Nieves Lantada Zarzosa

M. Amparo Núñez Andrés

Marc Janeras Casanova

Máster en:

Ingeniería del Terreno

Barcelona, septiembre del 2021

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental

TRABAJO FINAL DE MASTER

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, dar las gracias a Nieves Lantada y Amparo Núñez por su gran apoyo, disponibilidad y colaboración que hicieron posible este Trabajo Final de Máster.

Agradecer al Instituto Cartográfico y Geológico de Cataluña (ICGC) por su soporte general, especialmente a Marc Janeras y a Oriol Pedraza, quienes acompañaron con disposición y conocimientos el desarrollo de este estudio.

Al Proyecto GeoRisk, financiado por la Agencia Estatal de Investigación (AEI) en el marco de del Plan Estatal de Investigación Científica y Técnica y de Innovación, con código de referencia PID2019-103974RB-I00/ AEI / 10.13039/501100011033.

A los profesores, personal administrativo y compañeros de la Universidad que ayudaron a que el máster sea una herramienta en mi futuro.

A mis padres, familia y amigos, quienes apoyaron desde el primer momento esta nueva aventura y me han dado las herramientas y valores de quien soy hoy.

Finalmente, compañero de vida y mejor amigo, que me ha apoyado en todo momento, gracias por hacer esta etapa una aventura inolvidable, ¡vamos por más!

RESUMEN

La caída de rocas es una amenaza presente en macizos con fuertes pendientes, donde no es una tarea fácil poder identificar la peligrosidad, definida como la probabilidad de ocurrencia o la "frecuencia" relacionada con la "magnitud" del fenómeno o su potencial destructivo. En esta investigación, se presenta un enfoque para el análisis de la peligrosidad de desprendimientos en base a los inventarios de eventos presentando una metodología general, y se prueba en el área de Montserrat, donde los desprendimientos rocosos son una amenaza para los 2,75 millones de visitantes que tiene cada año y por las infraestructuras presentes.

La montaña de Montserrat, ubicada a 50 km al noroeste de Barcelona, es conocida por su importancia patrimonial natural y cultural. Se caracteriza por ser una estructura masiva formada por alternancia de conglomerados de limolitas y areniscas. Debido a los desprendimientos ocurridos entre el 2006 y 2010 en el sector de *Degotalls*, cercano al monasterio y con daños a infraestructuras, se evidenció la peligrosidad de este particular macizo.

Para cuantificar la peligrosidad de desprendimientos de rocas, se ha realizado un análisis de magnitud y frecuencia a partir de un inventario de eventos recopilado de la vigilancia de campo y de la investigación histórica. Se determinó una metodología para analizar los 205 registros entregados por el *Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya* (ICGC). El área de estudio se ha dividido en "dominios", delimitaciones basadas en niveles estratigráficos y cuencas hidrográficas de propiedades homogéneas de zona de salida. Para optimizar el análisis, se ha dividido el inventario en cinco submuestras según el nivel de importancia dado por el número de visitantes y de datos registrados, que llevan a esperar un muestreo homogéneo, y se han llamado: Coves del Salnitre, Cremallera, Carretera BP 1103, Monasterio y su aparcamiento.

Los resultados del análisis de la relación magnitud frecuencia mostraron ajustes óptimos por la ley potencial con exponentes que van desde -0,35 a -0,63 para magnitudes entre 0,01 y 1000 m³. Para la zona de estudio donde se ubica el Monasterio, un evento de un volumen igual o superior a 1 m³ le corresponde un periodo de retorno de 5 años; para la zona de aparcamiento de Montserrat, un evento de similar frecuencia corresponde a un volumen igual o superior a 10 m³. En toda la montaña, la metodología desarrollada dio como resultado 27 eventos por año para un volumen igual o superior a 1 m³, lo cual es un peligro relevante, teniendo en consideración el alto número de visitantes.

Adicionalmente, se contrastaron los resultados obtenidos con los resultantes de la monitorización con láser escáner terrestre (TLS) realizadas desde el año 2007 en zonas semejables a cuatro de las submuestras de inventario, y que detectaron actividades de desprendimientos de volúmenes de roca de 0,0002 m³ hasta 800 m³. Los datos obtenidos con láser escáner terrestre permiten registrar de forma sistemática los pequeños desprendimientos con volúmenes inferiores a 0,1 m³ en áreas de estudio más acotadas, ayudando a comparar y/o complementar los datos del inventario en los casos donde existen cambios de tendencia conocido como *rollover*. Comparando los datos de TLS con el inventario, se obtuvieron datos coherentes, e incluso localmente, un elevado grado de ajuste.

ABSTRACT

Rockfall is a threat present in massifs with steep slopes. It is not an easy task to quantify the hazard, which is defined as the probability of occurrence in relation to the “frequency” and the destructive potential with the “magnitude” of the phenomenon. This research presents an approach for hazard assessment of rockfalls in the Montserrat area, where these represent a constant threat to the 2,75 million annual visitors and the existing infrastructures.

The Montserrat mountain, located 50 km northwest of Barcelona, is well-known for its natural and cultural heritage significance. It is characterized by being a massive structure formed by alternating conglomerates of siltstones and sandstones. As evidenced by the landslides that occurred between 2006 and 2010 in the Degotalls sector, located near the Monastery and damaging infrastructures, the hazard level of this particular massif was evidenced.

In order to quantify the rockfall hazard, a magnitude and frequency analysis has been carried out, taking data from an event inventory compiled by field monitoring and historical research. A methodology was determined to analyze 205 records delivered by the *Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya* (ICGC). The study area has been divided into “domains”, delimitations based on stratigraphic levels and hydrographic basins of homogeneous output zone properties. To optimize the analysis, the inventory has been divided into five subsamples according to the level of importance given by the number of visitors and registered data, which leads to expect a homogeneous sampling, and they have been called: Coves del Salnitre, Cremallera, Carretera BP 1103, Monastery and its parking.

The analytical results of the magnitude frequency relationship presented an optimal fitting according to the potential law, with exponents ranging from -0.35 to -0.63 for magnitudes between 0.01 and 1000 m³. For the study area where the Monastery is located, an event of volume equal to or greater than 1 m³ is to be expected for a period of 5 years; for the Montserrat parking area, an event of similar frequency is to be expected for a volume of 10 m³. Throughout the mountain, 27 events are to be expected annually for a volume of 1 m³, which poses a significant threat considering the elevated number of visitors.

Additionally, the results were contrasted with those obtained from the monitoring with a TLS (Terrestrial Laser Scanner) since 2007, in areas that detected rock volume detachment activities from 0.0002 m³ to 800 m³. The data acquired with the TLS scanner allows to systematically record small landslides with volumes smaller than 0.1 m³ in confined study areas, helping to compare and/or complement the inventory data in cases where changes in trend, known as a rollover, are recorded. Comparing the TLS data with the inventory, consistent data was obtained, and a high degree of fitting was achieved locally.

RESUM

El despreniment de roques és una amenaça present en massissos dotats de forts pendents, on la identificació de la perillositat no és una tasca fàcil, aquesta es defineix com la probabilitat d'ocurrència o la "freqüència" juntament relacionada amb la "magnitud" del fenomen o el seu potencial destructiu. En aquesta investigació, es presenta un enfocament alternatiu per a l'anàlisi de la perillositat de desprendiments en base als inventaris d'esdeveniments, presentant una metodologia general que es posa a prova a l'àrea de Montserrat, on els desprendiments rocosos són una amenaça per als 2,75 milions de visitants anuals i per les infraestructures del complex.

La muntanya de Montserrat està situada a 50 km al nord-oest de Barcelona i és àmpliament coneguda per la seva importància patrimonial, natural i cultural. Es caracteritza per ser una estructura massiva formada per alternança de conglomerats de limolites i gresos. Degut als diferents desprendiments compresos entre els anys 2006 i 2010 al sector de Degotalls, situat a prop del Monestir i causant d'anys a infraestructures, es va evidenciar la perillositat d'aquest massís en particular.

Per tal de quantificar el perill dels desprendiments rocosos, s'ha efectuat un anàlisi de freqüència de magnitud a partir d'un inventari basat en esdeveniments recopilat de la vigilància de camp i investigació històrica. S'ha determinat una metodologia per optimitzar els 205 registres lliurats per l'Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC), amb informació de volum i data. L'àrea d'estudi s'ha dividit en "dominis", zones geogràfiques delimitades a partir dels nivells estratigràfics i de conques hidrogràfiques amb propietats homogènies. Per tal d'agilitzar el anàlisi, l'inventari s'ha determinat determinar tenint en compte el nivell d'importància format pel nombre de visitants y les dades registrades. Aquestes zones s'han anomenat: Coves del Salnitre, Cremallera, Carretera BP 1103, Monestir i la seva àrea d'estacionament.

Els resultats de l'anàlisi, en relació a la magnitud freqüència, han mostrat un ajust òptim seguint la llei potencial amb exponents que van des de -0,35 a -0,63 per magnituds entre 0,01 i 1000 m³. Per al domini on està situat el Monestir, s'espera un esdeveniment d'un volum igual o superior a 1 m³ en els propers 5 anys; per al domini de la zona d'estacionament de Montserrat, s'espera un esdeveniment de freqüència similar per a un volum de 10 m³. La metodologia desenvolupada ha retornat que per tota la muntanya, s'esperen 27 esdeveniments anuals per a un volum d'1 m³, atribuint un perill elevat si es té en compte l'alt nombre de visitants.

Addicionalment, els resultats obtinguts s'han contrastat amb els resultats de la monitorització de les campanyes TLS (*Terrestrial Laser Scanner*) realitzades des de l'any 2007, en zones on s'han detectat activitats de desprendiments amb volums de roca de 0,0002 m³ fins 800 m³. Les dades registrades pel TLS han ajudat a registrar petits volums (<0,1 m³) en una àrea d'estudi més acotada, ajudant a comparar i / o complementar les dades de l' inventari en els casos on hi ha un canvi de tendència conegut com *rollover*. Comparant les dades de TLS amb l'inventari, es van obtenir dades coherents, i fins i tot localment, un elevat grau d'ajust.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. MOTIVACIÓN	1
1.2. OBJETIVOS	2
<i>OBJETIVOS GENERALES</i>	2
<i>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</i>	3
1.3. ALCANCES Y LIMITACIONES	3
2. PELIGROSIDAD DE LOS DESPRENDIMIENTOS ROCOSOS	4
2.1. DESPRENDIMIENTOS ROCOSOS	4
2.1.1. ZONA DE SALIDA	5
2.1.2. ZONA DE TRAYECTO	6
2.1.3. ZONA DE LLEGADA	6
2.2. INVENTARIOS DE DESPRENDIMIENTOS ROCOSOS	6
2.3. CURVAS DE MAGNITUD FRECUENCIA	8
3. ÁREA DE ESTUDIO.....	15
3.1. UBICACIÓN	15
3.2. GEOLOGÍA	15
3.3. DESPRENDIMIENTOS ROCOSOS	18
3.4. ZONIFICACIÓN DEL MACIZO DE MONTSERRAT	22
3.4.1. ÁMBITOS	22
3.4.2. REGIONES	23
3.4.1. DOMINIOS	25
3.5. ANÁLISIS GEOMORFOMÉTRICO	26
3.6. ÁREA DE PARED	28
4. BASE DE DATOS DE INVENTARIOS DE DESPRENDIMIENTOS ROCOSOS DE MONTSERRAT	31
4.1. PROCEDENCIA	31
4.1.1. BÚSQUEDA HISTÓRICA	32
4.1.2. INVENTARIO DE DESPRENDIMIENTOS	32
4.2. MUESTRA DATOS	33
4.3. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN DEL INVENTARIO	37
5. OBTENCIÓN DE CURVAS MAGNITUD FRECUENCIA	40
5.1. METODOLOGÍA	40
5.1.1. ANÁLISIS 1	41
5.1.2. ANÁLISIS 2	42
5.1.3. ANÁLISIS 3	43
5.1.4. OTRA VISIÓN DEL ANÁLISIS	44
5.2. APLICACIÓN A MONTSERRAT	45
5.2.1. ANÁLISIS 1	46
5.2.2. ANÁLISIS 2	48
5.2.3. ANÁLISIS 3	51
5.2.4. RESULTADOS	53
6. CONTRASTE CON OTROS ESTUDIOS.....	58
6.1. DISTRIBUCIÓN ESPACIO TEMPORAL SEGÚN ROYÁN Y VILAPLANA	58
6.2. ANTECEDENTES ICGC	59
6.3. CAMPAÑAS TLS	61
6.4. DISCUSIÓN	64
6.4.1. MONASTERIO	67
6.4.2. APARCAMIENTO MONTSERRAT	69
6.4.3. COVES DEL SALNITRE	71
6.4.4. CREMALLERA	73
6.4.1. BP 1103	76

6.4.2.	<i>MUESTRA</i>	78
7.	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	80
7.1.	CONCLUSIONES	80
7.2.	TRABAJOS FUTUROS	82
7.3.	RECOMENDACIONES	83
8.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	84
ANEXOS	89
	ANEXO A: ANÁLISIS GEOMORFOMÉTRICO	
	ANEXO B: FLUJO DE TRABAJO PARA OBTENCIÓN DEL ÁREA DE PARED MEDIANTE ARGIS	
	ANEXO C: INVENTARIO DE DESPRENDIMIENTOS DE ROCAS DE LA MONTAÑA DE MONTSERRAT	
	ANEXO D: DESCRIPCIÓN ÁREAS DE ANÁLISIS DE LA MONTAÑA DE MONTSERRAT	

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1. MOTIVACIÓN

Los desprendimientos rocosos son eventos naturales que constituyen un riesgo tanto para las infraestructuras, como para las personas. El riesgo surge de dicha exposición tanto por pequeños y frecuentes desprendimientos como para eventos insólitos y de gran volumen. Debido a que las administraciones requieren gestionar los posibles riesgos naturales con distintos estudios para poder identificar, delimitar y cuantificar las zonas específicas de riesgo. El riesgo es una combinación de la peligrosidad de un determinado fenómeno, de la vulnerabilidad de las personas/elementos expuestos y su exposición.

La peligrosidad es definida como la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno potencialmente destructivo en un período de tiempo específico y en un área delimitada. La probabilidad de ocurrencia está relacionada con la “frecuencia” y potencial destructivo con la “magnitud” del fenómeno. Por lo tanto, es importante cuantificar esta relación “magnitud”- “frecuencia” para establecer el nivel de actividad de los desprendimientos rocosos. Así finalmente la administración procederá a establecer las medidas preventivas pertinentes para evitar y/o minimizar el riesgo.

Para establecer el nivel de actividad se requiere de tres variables fundamentales del fenómeno: lugar y fecha donde se desencadenó y volumen de la roca desprendida. Para obtener esta información se tienen distintas fuentes; en el pasado a través de documentos, encuestas, fotointerpretación, dendrocronología, etc. y en el presente, mediante el monitoreo y la observación.

Este trabajo tiene como objetivo desarrollar una metodología para la explotación de inventarios de desprendimientos de rocas para obtener la valoración de la peligrosidad con curvas de magnitud frecuencia (MF), como paso previo a la evaluación del riesgo.

En esta investigación la metodología desarrollada se ha aplicado a la montaña de Montserrat, que se encuentra situada al noreste de la Península Ibérica, aproximadamente a 50 km al noroeste de la ciudad de Barcelona. La montaña de *Montserrat* recibe este nombre en catalán de la unión de las palabras “mont Serrat” debido a la forma que tiene el macizo, que significa “monte aserrado”. El macizo rocoso tiene una forma singular y llamativa, con pendientes altas y llegando a tener desniveles de hasta 1.000 metros, siendo su mayor cumbre la de Sant Jeroni, con 1.236 m. Está formado por conglomerados intercalados con capas de limolitas y areniscas, como resultado de la formación de un delta en el Eoceno. La montaña cuenta con una elevada tasa de visitantes que acuden al parque natural y al monasterio de Montserrat (2,75 millones de visitantes anuales el año 2019¹) que, sumado a la probabilidad de ocurrencia de la caída de bloques, resulta una zona de riesgo significativo que es necesario estudiar.

La predicción y evaluación del peligro de los desprendimientos rocosos ha sido y sigue siendo un desafío. Existe una gran cantidad de investigaciones realizadas durante más de 40 años, pero aún es complejo valorar y determinar el nivel de peligro. Debido a que existen muchos puntos de vista, es difícil comparar resultados e implementar un procedimiento eficiente. Para ayudar a las autoridades

¹ <https://www.regio7.cat/bages/2020/01/04/montserrat-estableix-nou-record-2750000/589194.html>

responsables de la gestión de estos riesgos en la toma de decisiones, se requieren estándares para gestionar las posibles amenazas, y así poder asignar los recursos a las áreas de mayor prioridad.

Si se cuantifica el riesgo, aumenta la conciencia de los niveles de riesgo existentes mediante la definición de criterios de aceptabilidad del riesgo. Por lo mismo, se debe advertir el nivel de confiabilidad del análisis realizado ya que depende (Corominas, et al., 2014) de la calidad de los datos y la solidez del método utilizado. El análisis no puede reemplazar si no hay información o rectificar hipótesis incorrectas.

Este trabajo se basa en la base de datos de desprendimientos inventariados por el Instituto Cartográfico y Geológico de Cataluña (ICGC). La base de datos fue creada el año 2002, a raíz de diferentes colaboraciones del ICGC con Ferrocarriles de la Generalitat de Catalunya (FGC) y el Patronato de la Montaña de Montserrat (PMM) y ha tenido continuidad hasta el día de hoy. El inventario cuenta con información útil para desarrollar la metodología de obtención de la frecuencia y magnitud de los desprendimientos rocosos de forma cuantitativa y determinar la peligrosidad en el área de estudio. En general, los inventarios ayudan a ordenar y detallar los registros de caída de rocas, pero normalmente están incompletos, y son subjetivos, ya que dependen de los fenómenos que han sido observados y del nivel de supervisión. La falta de información puede ser temporal, donde existen registros de grandes desprendimientos y luego comienzan a registrarse eventos de menor tamaño, generándose una laguna de información, o directamente es inexistente en ciertas zonas.

1.2. OBJETIVOS

OBJETIVOS GENERALES

Este trabajo nace de la colaboración realizada entre el Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la *Universidad Politécnica de Cataluña* y el *Instituto Cartográfico y Geológico de Cataluña*, en el marco del proyecto de investigación GeoRisk “*Advances in rockfall quantitative risk analysis (QRA) incorporating developments in geomatics*”, con la necesidad de desarrollar herramientas para la predicción y prevención de daños. Concretamente dentro del objetivo 2 de dicho proyecto, que busca afrontar los nuevos retos en la evaluación de susceptibilidad y peligrosidad en desprendimientos rocosos, centrándose en las áreas fuente, relación magnitud-frecuencia y cálculo de trayectorias con fragmentación (Proyecto GeoRisk, 2021).

El objetivo principal de este trabajo es desarrollar y experimentar una metodología, objetiva y reproducible para la explotación de inventarios de desprendimientos de rocas en el área de emplazamiento de la montaña de Montserrat, y generalizable a cualquier otro sitio de estudio con problemática semejante. Finalmente se pretende obtener una valoración de la peligrosidad para el área de estudio, mediante curvas de magnitud frecuencia (MF).

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Como objetivos específicos del trabajo se pretende:

- Obtener un inventario depurado de Montserrat.
 - Revisar, validar, y adaptar a los objetivos del estudio la base de datos de eventos de caída de rocas en Montserrat.
 - Valorar la precisión de los campos críticos.
 - Caracterizar la muestra del inventario.
- Determinar una base cartográfica de susceptibilidad de salida.
 - Análisis geomorfométrico para identificar las zonas potenciales de salida (paredes inclinadas y verticales).
 - Discretizar las áreas de estudio.
- Plantear y ensayar metodologías de explotación del inventario en términos de magnitud-frecuencia.
 - Discretizar muestras homogéneas.
 - Extraer relaciones magnitud frecuencia.
 - Contrastar resultados entre sub-muestras.
- Obtener una valoración de la peligrosidad de desprendimientos en Montserrat.
 - Ajustar una relación magnitud – frecuencia a escala local de Montserrat.
 - Contrastarlo con resultados análogos de monitoreo mediante TLS.
- Valorar la capacidad de definir escenarios de peligrosidad representativos.

1.3. ALCANCES Y LIMITACIONES

En el desarrollo de la investigación se trabajó con los datos de inventarios entregados por el Instituto Cartográfico y Geológico de Cataluña, por lo que no se ha realizado trabajo de campo para la obtención de datos. En el presente trabajo se analizaron los datos según su frecuencia espacial y temporal, y magnitud en detalle.

El presente estudio representa la actividad mediante una media anual de los desprendimientos. No se realizó un análisis de desprendimientos con una tasa diaria o mensual.

Debido a que el objetivo principal es obtener las curvas de magnitud frecuencia de ocurrencia, no se estudió el mecanismo de desprendimiento, propagación y fragmentación de los bloques. Tampoco se realizó la relación de la actividad de desprendimientos con los posibles factores meteorológicos.

CAPÍTULO 2

PELIGROSIDAD DE LOS DESPRENDIMIENTOS ROCOSOS

2.1. DESPRENDIMIENTOS ROCOSOS

El desprendimiento de rocas es un tipo de deslizamiento de terreno o movimiento gravitacional de pendiente, que resulta común en áreas montañosas, y que comprende el desprendimiento de un volumen de masa rocosa del macizo en una pendiente pronunciada, su transporte rápido por rebote, rodamiento y/o deslizamiento y deposición en la zona de acumulación (Hutchinson, 1988).

Este evento geológico es una seria amenaza para infraestructuras viarias, áreas turísticas, residenciales, etc., en muchas zonas montañosas del mundo. En la Figura 1 se observa un desprendimiento de rocas en el año 2008, que obligó a cortar la carretera y el tren cremallera que llegan al monasterio de Montserrat.



Figura 1. Desprendimiento de rocas en el Cremallera de Montserrat (Pagina web ICGC, Consulta 2021)

Los desprendimientos rocosos o caída de rocas pueden ser individuales o en conjunto, y generalmente se fragmentan en bloques más pequeños al impactar contra el suelo a medida que se desplazan ladera abajo. La trayectoria del bloque puede ser caída libre, rebotando, deslizándose y/o rodando. Existen distintos mecanismos que desencadenan los desprendimientos, los cuales generalmente son naturales y de análisis complejo. En este trabajo se utilizará de forma general el término desprendimiento de roca, sin analizar en detalle el mecanismo de caída de ésta.

Como se muestra en la Figura 2, en las áreas afectadas de los desprendimientos rocosos, se distinguen tres zonas que serán comentadas con detalle a continuación: la zona de salida de donde se

depende la roca, la zona de trayecto, por donde pasan las trayectorias de los diferentes bloques y la zona de llegada o depósito.

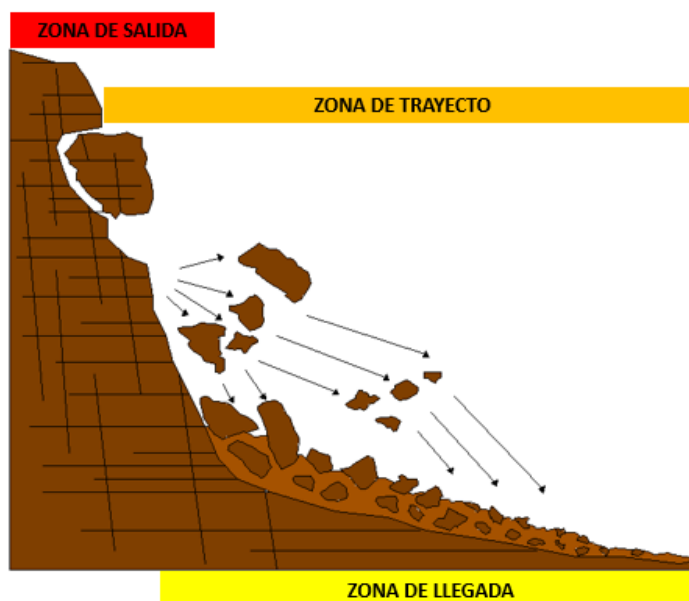


Figura 2. Esquema ilustrativo de las diferentes zonas de un desprendimiento rocoso (Modificada de Royán, 2015)

2.1.1. ZONA DE SALIDA

La zona de salida es aquella donde existe afloramiento del macizo rocoso, y se caracteriza en algunos casos por tener cicatrices de desprendimientos. Otro factor importante que desencadena el desprendimiento es la pendiente del área de desprendimiento.

Se pueden dar fundamentalmente tres tipos de mecanismos de salida según la distribución en el espacio de las discontinuidades existentes según Hoek & Bray (1981) y Giani(1992): el "planar" o deslizamiento a través de un plano de discontinuidad, la "cuña ", que se manifiesta en la intersección entre dos planos de discontinuidad, el "vuelco" y, por último, la posibilidad de movilización mediante un deslizamiento rotacional. La disposición estructural de las discontinuidades son factores que podrían estar subyacentes en la variación espacial de la actividad: según orientación y pendiente de la zona de salida.

Las cicatrices (por forma y color) son indicios de actividad en la zona de salida y permiten describir la distribución estadística de volúmenes desprendidos, pero no su distribución en el tiempo. Estas cicatrices ayudan en el muestreo de distribución de volúmenes, pero no se sabe a detalle si son cicatrices de un golpe o un desprendimiento como tal.

Es complejo de obtener la información de los indicios de actividad, un claro ejemplo es el trabajo de Domènech (2015). Este estudio definió una metodología para obtener la distribución de volúmenes de desprendimientos, utilizando las cicatrices de estos utilizando una nube de puntos en la pared obtenidos con un LiDAR Terrestre (TLS). Se han calculado varias distribuciones de volúmenes para tener en cuenta los mecanismos de desprendimientos y el rango de volumen desprendido. En su trabajo, el periodo de tiempo durante el cual se ha desprendido la totalidad del volumen se estimó mediante la datación de la superficie inicial a partir de la cual comenzó la actividad de desprendimientos, mediante el isótopo cosmogénico ^{36}Cl . Otro trabajo interesante y que muestra la

dificultad de obtener la información de desprendimientos rocosos es el de Gallach (2012) que utiliza el color como un indicador de desprendimiento rocoso, además de la geomorfología del macizo en estudio.

Las masas potencialmente inestables son la actividad futura. Es posible identificar masas con disposición desfavorable, valorar cualitativamente el equilibrio, pero en ningún caso cuantificar su estabilidad ni predecir su caída. De modo que tampoco cuantifica la actividad.

Copons (2007) distingue y clasifica los diferentes factores que intervienen directamente en la movilización de los cuerpos rocosos, y por lo tanto en la distribución espacio-temporal de la actividad de desprendimientos: (a) los factores intrínsecos del macizo rocoso, geometría y disposición de planos de discontinuidad y estratificación; (b) los factores degradantes, como serían los factores que intervienen en la degradación de los planos de discontinuidad, como son la temperatura, la circulación de aguas, la presencia de vegetación, y (c) las situaciones desencadenantes que ponen en movimiento masas rocosas como son las situaciones de precipitaciones extremas, incendios forestales, alteración antrópica de la morfología de la ladera, etc.

2.1.2. ZONA DE TRAYECTO

Es la zona de recorrido o propagación por donde la masa rocosa se ha desplazado hasta llegar a la zona en la que se detienen y se acumulan (Royan, 2012). A lo largo del trayecto el volumen rocoso puede presentar diferentes tipos de movimiento como son la caída libre (vertientes muy cercanas a la vertical), rebotes, rodadura (laderas con pendientes medias y bajas) y desplazamiento (laderas con pendientes medias y bajas) (Copons, 2007). En gran parte de los desprendimientos se suele producir la fragmentación de los bloques (Ruiz-Carulla, et al., 2020), especialmente a mayor magnitud.

Los indicios de actividad se pueden presentar en la zona de trayectoria como en forma de canales o incisiones en la ladera, en impactos a la vegetación y superficie donde rebotan y / o por donde ruedan, y en forma de daños en los elementos expuestos. Corominas & Moya (2010) utilizan la dendrogeomorfología, es decir, analizan el área de árboles dañados y lo proponen como un indicador de la magnitud del desprendimiento de rocas.

2.1.3. ZONA DE LLEGADA

Es la zona situada al pie o talud de la ladera donde se detienen y se acumulan los bloques rocosos, formando una serie de depósitos llamados canchales.

2.2. INVENTARIOS DE DESPRENDIMIENTOS ROCOSOS

Los inventarios de desprendimientos desgraciadamente, en algunos casos están incompletos, ya que, si el volumen del evento es pequeño, éste puede no haber sido detectado. En cambio, cuanto mayor es el evento, más largo debe ser el período de observación (Hantz, Vengeon, & Dussauge-Peisser, 2003).

A lo largo de la historia se han propuesto diferentes metodologías para la obtención de datos, por ejemplo, Bunce, et al. (1997) utilizaron las marcas de impacto en la carretera producidas a causa de antiguos desprendimientos con el fin de ampliar el registro de eventos. Corominas & Moya (2010)

utilizaron la dendrogeomorfología para determinar la frecuencia y la magnitud de desprendimientos, entre otros procesos, mediante un análisis espacial de árboles dañados. Corona & Trappmann (2013) utilizaron la dendrogeomorfología para determinar las zonas de salida y la relación magnitud frecuencia de desprendimientos. Otra técnica consiste en contar cicatrices visibles, resultantes de impactos de bloques, en la superficie de la corteza de las hayas (Trappmann & Stoffel, 2013).

Aunque los bloques detenidos en la ladera informan cualitativamente del nivel de actividad del área, los inventarios son necesarios para obtener de forma cuantitativa la actividad de la zona. Hasta el momento existen muchas limitaciones para tener un inventario completo, esto puede deberse a:

- Si el evento de desprendimiento es muy pequeño, éste puede no haber sido detectado, en cambio, cuanto mayor es el evento, más largo es el periodo de observación (Hantz, Vengeon, & Dussauge-Peisser, An historical, geomechanical and probabilistic approach to rock-fall hazard assessment, 2003). Generalmente los eventos de gran magnitud en el pasado son los registrados debido a cortes de caminos, daños en infraestructuras o hasta muertes de personas. Por lo mismo, los inventarios con información más detallada y registro continuo son relativamente nuevos.
- Es recurrente no saber con exactitud su zona de salida debido a que en muchas veces el bloque está detenido cuando es registrado, por lo que se debe suponer. Técnicas como la de Gallach (2012), que utilizó el color para obtener la zona del desprendimiento.
- Con exactitud no se sabe la fecha en que ha ocurrido por lo que se debe recurrir a otros medios como ortofotografías, lo cual es solo aplicable para un periodo reciente de años y para magnitudes mayores, acorde a la escala de las imágenes. Existen trabajos como la de Corominas & Moya (2010) que a través de la dendrocronología obtuvieron la frecuencia y extensión para su estudio.
- Muchas veces los bloques de salida se fragmentan y llegan varios bloques a la zona de llegada. Puede resultar incierto si una distribución de bloques es fruto de un evento mayor o de varios eventos menores.

Para resumir, las fuentes de información disponibles de los desprendimientos rocosos son:

- Datos de indicios (cicatrices en pared, impactos en vegetación, bloques de roca en el área, impactos en estructuras).
 - Distintas técnicas indirectas de datación, complejas para realizar de forma común (cosmogénico, colorimetría, dendrocronología, liquenometría).
 - Fotointerpretación: revisión comparada de series de ortofotos.
- Inventarios de observación mediante:
 - Seguimiento experto: observación continua directa.
 - Encuesta: observación indirecta, memoria personal y transmisión oral.
 - Documentación: anotaciones en archivos.
- Monitoreo mediante teledetección instrumental.

2.3. CURVAS DE MAGNITUD FRECUENCIA

Los peligros naturales son acontecimientos físicos y/o fenómenos que pueden ser potencialmente perjudiciales, causando lesiones o muertes, daños materiales, etc. Estos fenómenos pueden tener un origen geológico, hidrometeorológico o biológico y se caracterizan por su localización, magnitud y frecuencia. La actividad humana también puede inducir a que se produzcan fenómenos o que aumenten la capacidad de destrucción.

Todo fenómeno natural tiene intrínseca una peligrosidad, que se define como la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno con cierto potencial destructivo en un periodo de tiempo específico y en un área del espacio determinado. La probabilidad de ocurrencia está relacionada con la "frecuencia" del fenómeno y el potencial destructivo con la "magnitud" del fenómeno (ICGC, Guia per l'elaboració d'Estudis d'Identificació de Riscos Geològics per a urbanisme, 2021)

Las relaciones de magnitud -frecuencia (MF) ayudan en la evaluación de la peligrosidad de caídas de bloques. Esta relación es inversa, es decir, cuanto mayor es la magnitud, con menor frecuencia temporal ocurre. Si bien la magnitud puede ser muy variable, desde valores inferiores a 1 m^3 a volúmenes de roca que superan los 1000 m^3 , una gran velocidad de caída implicada en el evento produce una alta energía de impacto y por lo tanto una alta peligrosidad a los elementos expuestos.

La actividad de desprendimientos en un macizo corresponde a un tiempo y espacio determinado, según una distribución de volumen de salida. Propiamente la magnitud del evento no es sólo el volumen, sino que también la posible destrucción y trayectoria. Por lo tanto, la magnitud es una valoración global de todo el movimiento (desprendimiento y caída). Debido a que la densidad es prácticamente homogénea para el macizo, la mayor variación será la del volumen de roca. Por eso, para este estudio se asemejará la magnitud al volumen de salida (total), definiendo la peligrosidad como de salida ya que no es considerado el grado de propagación de la caída del bloque.

Para determinar el nivel de actividad, se debe normalizar con respecto a un espacio, para hacer comparables los distintos análisis. En esta investigación se usará el área de pared en la unidad de hectómetro cuadrado (hm^2). Para llegar a la magnitud también se puede discretizar en rangos de volúmenes o de forma continua, según el tratamiento de la información disponible.

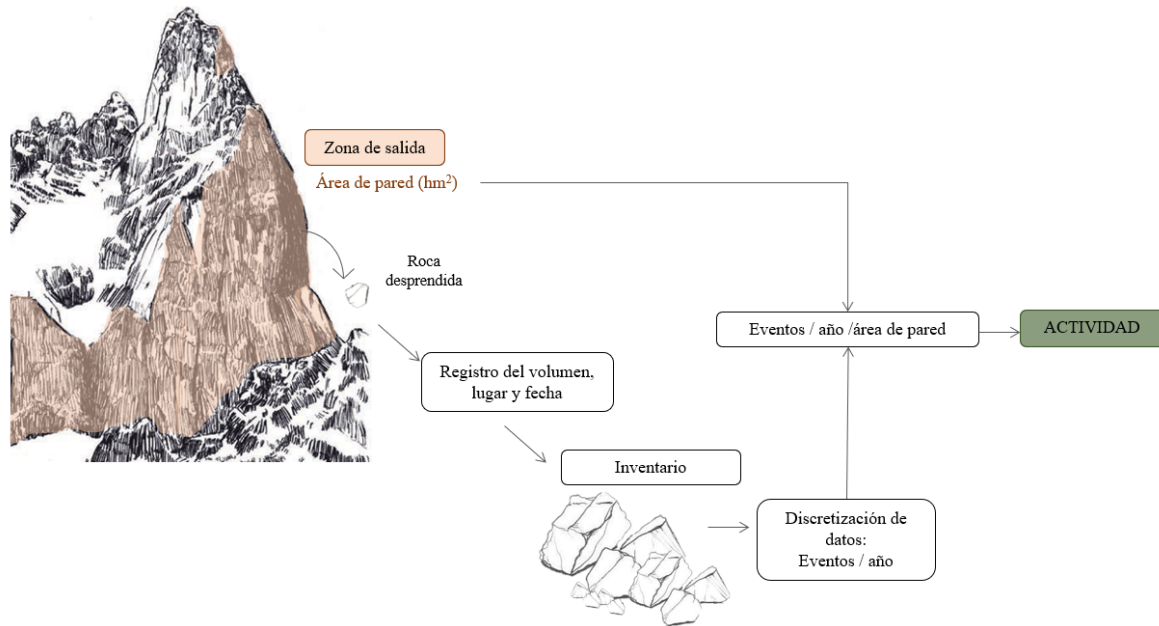


Figura 3. Diagrama para determinar el nivel de actividad

Para preparar la relación MF, hay dos datos de entrada que son necesarias: la magnitud, que se caracteriza por el volumen y la frecuencia, que se puede expresar como el número total de ocurrencias por año. Normalmente, las relaciones magnitud frecuencia o probabilidad de ocurrencia se da como frecuencia acumulada. Se ha verificado empíricamente que las curvas de magnitud frecuencia se relacionan mediante una ley de potencial equivalente a una relación lineal en la doble escala logarítmica (Malamud et al., 2004).

Los estudios basados en inventarios históricos de desprendimientos de rocas han demostrado que la relación entre el volumen y la frecuencia espacio-temporal que representa el número de caídas por unidad de tiempo y superficie del acantilado estaba bien descrita por una ley de potencial según Hantz D., (2011):

$$F_{st}(V) = A_{st} \cdot V^{-B}$$

Donde:

- F: Frecuencia espacio - temporal de las caídas de volumen mayores o iguales que V
- A_{st} : Actividad nominal
- V: Volumen desprendido bloque en m^3
- B: Coeficiente de uniformidad

La ley potencial permite la evaluación cuantitativa de la frecuencia de impacto anual de los bloques en un problema del tipo difuso. Se califica como peligro difuso, cuando se considera que el desprendimiento de la roca puede ser en cualquier punto de una pared. Supuesto que se usa frecuentemente en volúmenes de roca pequeños, ya que es complejo identificarlos a todos. En la actualidad, no es posible predecir los desprendimientos, a menos que se efectúe un constante monitoreo. Por lo tanto, la única forma de tener una idea de los comportamientos de una pared de roca es tener en cuenta la historia, determinando la frecuencia de caídas (promedio de caída por año por hm^2 de pared).

Se han identificado varios factores que afectan en la pendiente de la distribución del volumen, dando una apariencia incorrecta según las propiedades de la escala. El valor de A_{st} , es el número de caída de volúmenes mayores que 1 m^3 por unidad de tiempo y área de pared, por lo tanto, refleja la actividad que tiene la pared. La actividad nominal depende directamente de la estructura del macizo rocoso y el contexto morfodinámico.

La característica que tiene la distribución magnitud frecuencia que consiste en el decrecimiento de la ley potencial sobre varios órdenes de magnitud. El valor del exponente B de la ley potencial es importante ya que expresa el relativo predominio de los tamaños de desprendimientos. Un exponente alto indica que los desprendimientos pequeños dominan en la distribución de volúmenes y viceversa. Malamud et al. (2004) y Brunetti et al. (2009) observaron que los desprendimientos de rocas muestran valores de exponente más pequeños que otros tipos de deslizamientos de tierra.

En la Figura 4 se muestra la relación MF donde se observa que en el eje de ordenadas (probabilidad) sería representado con la frecuencia acumulada. Por lo mismo, los puntos de la serie serán estrictamente decrecientes. En la abscisa se representa la magnitud en base al volumen de la roca.

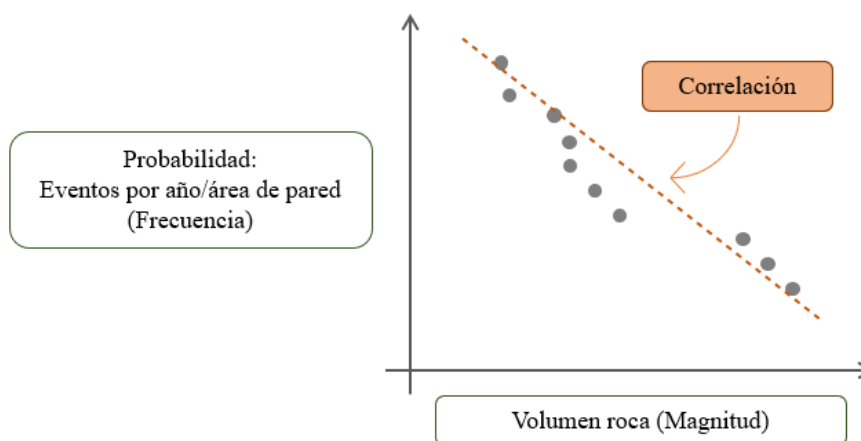


Figura 4. Relación Magnitud Frecuencia

La diferencia la atribuyen a que los desprendimientos son la desintegración de la masa de roca donde el valor del exponente puede variar entre 0,3- 0,5 para macizos rocosos y para estratificados, valores entre 0,5- 0,8 según Hantz & Levy, (2018). Este valor es negativo ya que la frecuencia disminuye a medida que los volúmenes aumentan. El valor absoluto de B refleja cuan homogénea es la distribución de volúmenes y si es mayor, mayor será la distribución homogénea en el rango de volumen utilizado.

Cuando se realiza la correlación de la magnitud frecuencia, en una escala log- log, la relación puede no ser puramente lineal, es decir, que aparezca el efecto rollover (Figura 5) para magnitudes pequeñas. Esto implica que el número de eventos observados de menor tamaño es inferior al esperado de la relación MF como muestra la Figura 5. Existen teorías al respecto, según Hungr et al. (1999) y Stark & Hovius (2001) este efecto se debe a la falta de registros (censura) de los pequeños movimientos que no son detectados en las fotografías áreas.

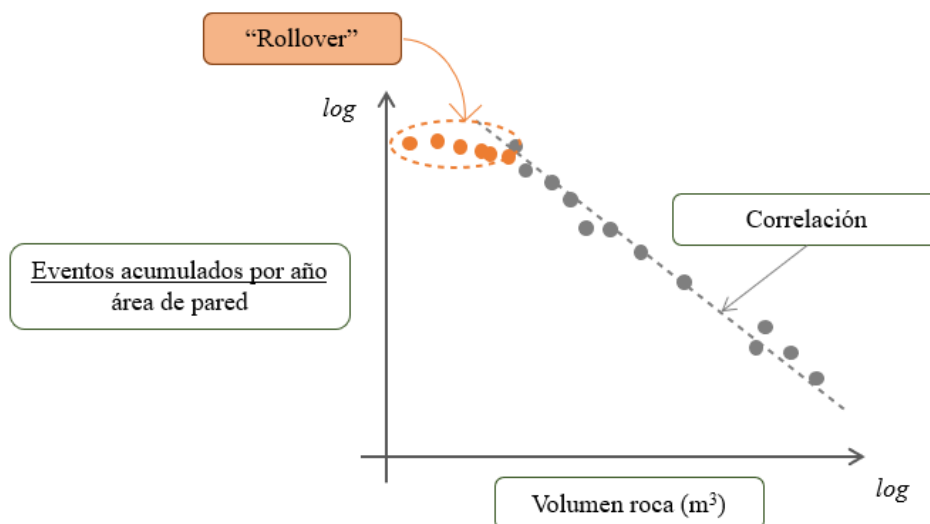


Figura 5. Efecto rollover en una relación magnitud frecuencia

Al integrar la relación magnitud frecuencia, se obtiene la tasa de erosión lineal de la pared (Hantz & Levy, 2018). Si se limita con los volúmenes posibles de caída, menores que un volumen máximo, la tasa de erosión o retroceso, está dada por la fórmula de la Figura 6. La integral converge para que F_{st} que varía de 0 a infinito (en otras palabras, varía de 0 a V_{max}), ya que B es menor que 1. Por lo tanto la tasa obtenida integra los volúmenes más pequeños. La fórmula debe ser aplicada en m^3 para los volúmenes y A_{st} , en $\text{año}^{-1} m^{-2}$.

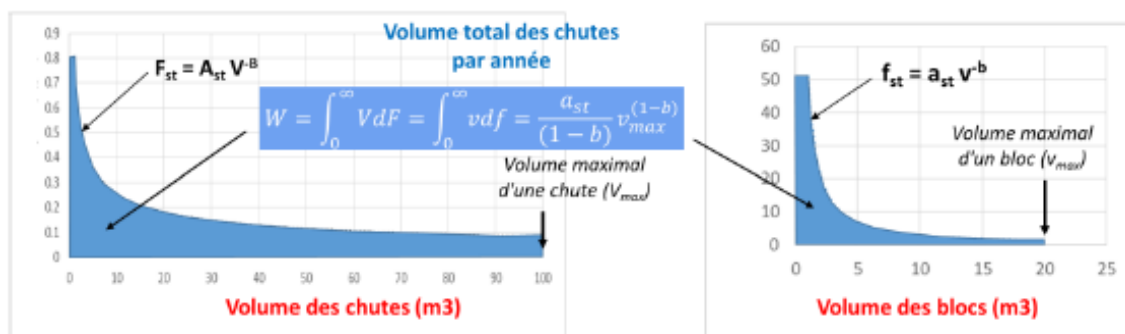


Figura 6. Determinación de la frecuencia de bloques en función de su volumen. El W es el volumen total anual de desprendimientos, representada por la superficie azul. (Hantz & Levy, 2018)

Como B , el volumen máximo depende de la estructura del macizo rocoso (Hantz & Levy, 2018). Se puede determinar el volumen máximo, gracias a los registros de desprendimientos en el área de estudio.

En la Tabla 1 se muestra una recapitulación bibliográfica de los parámetros obtenidos por diferentes autores para desprendimientos rocosos obtenidos por medio de inventarios o técnicas más modernas como TLS. El parámetro A no está normalizado, por lo que estos valores no son comparables con el presente estudio.

Tabla 1. Resumen de parámetros relación MF

Nombre artículo	Autor	Año	Área estudio	Datos	Periodo (años)	A	B	R ²
Probabilistic approach to rock fall hazard assessment: potential of historical data analysis (*)	Gardner	1970	Alberta (Canadá)	409	2 periodos de verano	-	0,72	-
Magnitude and frequency of rock falls and rock slides along the main transportation corridors of southwestern British Columbia	Hungur , O; Evans, S; Hazzard, J	1999	British Columbia (Corridors of southwestern)	389	30	0,773	0,434	0,99
				123		0,121	0,402	0,94
				64		1,358	0,703	0,95
				122		1,133	0,646	0,99
Frequency–volume relation and prediction of rainfall-induced landslides(**)	Dai, FC.; Lee, F.	2001	Hong Kong		5	2,533	0,791	0,995
Probabilistic approach to rock fall hazard assessment: potential of historical data analysis	C. Dussauge-Peisser, A. Helmstetter, J.-R. Grasso, D. Hantz, P. Desvarreux, M. Jeannin, A. Giraud	2002	Grenoble, Alpes Franceses	88	60	4,2	0,41	-
			Yosemite Valley, California (EEUU)	101	78	4,5	0,46	-
			The Val d'Arly, Alpes Franceses	111	18	8,5	0,45	-
Rockfall Hazard Analysis for Hong Kong Based on Rockfall Inventory	K. T. Chau, R. H. C. Wong, J. Liu and C. F. Lee	2003	Hong Kong	201	-	1,86	0,896	-
Statistical analysis of rockfall volume distributions: Implications for rockfall dynamics	Dussauge,C.; Grasso,JR.; Helmstetter, A.	2003	Worldwide Inventory	142	-	-	0,51	0,9
			Reunion Island, Indian Ocean	370	May–Aug. 1998	-	0,5 - 1	-
Contribution of dendrochronology to the determination of magnitude-frequency relationships of landslides(**)	Coromidas y Moya	2010	Torrente Tordó, Lleida (España)	-	-	31,46	0,75	0,965
Estimación de la relación magnitud – frecuencia de corrientes de derrubios mediante fotointerpretación. Aplicación a la zona del Parc Nacional D'Aigüestortes i Estany de Sant Maurici (Pirineo central) (**)	Llorens, M.	2011	Pirineo central (España)	-	-	1207,2	1,016	0,955
Magnitude–frequency relation for rockfall scars using a terrestrial laser scanner	Santana, D.; Corominas, J.; Mavrouli, O.; Garcia-Sellés, D.	2012	Eastern Pyrenees (Andorra)	5000	-	1919,2	0,92	0,987

Nombre artículo	Autor	Año	Área estudio	Datos	Periodo (años)	A	B	R ²
Probabilistic coastal cliff collapse hazard from repeated terrestrial laser surveys: Case study from Mesnil Val (Normandy, northern France)	Dewez	2013	Mesnil Val chalk cliff site (along the English Channe Normandy)	8500	2,5	65,38	0,54	0,996
Brief communication "Estimating rockfall frequency in a mountain limestone cliff using terrestrial laser scanner"	Guerin, A.; Hantz, D.; Rossetti, JP.; Jaboyedoff, M.	2014	Mont Saint-Eynard (France)	162	3,2	37	0,69	0,983
			Mont Saint-Eynard (France)	344	3,2	41	0,75	0,994
Automatic Rockfalls Volume Estimation Based on Terrestrial Laser Scanning Data	Carrea, D.; Abellan, A.; Derron, M.; Jaboyedoff, M.	2015	La Cornalle - Vaud (Switzerland)	118	2	18,59	0,676	0,9729
Assessment of the magnitude frequency relationship of landslides and rockfalls: Application to hazard mapping	Guillem Domènech i Surinyach	2015	Barcedana Valley (Spain)	-	-	121,76	0,541	0,9704
Effects of sampling interval on the frequency - magnitude relationship of rockfalls detected from terrestrial laser scanning using semi-automated methods	Veen, M.; Hutchinson, D.	2017	White Canyon West (Southwestern British Columbia)	1618	1,26	32,925	0,971	0,993
Monitoreo de bloques de rocas mediante el uso de láser escáner terrestre (TLS). Estudio de alternativas para la detección de bloques desprendidos	Vinueza, J.	2020	Monasterio de Piedra, Zaragoza (España)	15	3 años	3,08	0,311	0,8728
						2,94	0,378	0,9344

(*) Referencia bibliográfica (Dussauge, Grasso, & Helmstetter, 2003)

(**) Estudios de movimientos en masa (deslizamientos de tierra o corrientes de derrubios) expresados en m³.

El valor absoluto del exponente de la ley potencial obtenido en los mencionados estudios, Tabla 1, varía entre 0,311 a 1,016, y en general, tienden a tener un buen ajuste. En el estudio de Gardner, donde el valor de B es 0,72, se tiene un entorno geológico de rocas calcáreas y cuarcitas. En el estudio de Hungr, et al., (1999) los resultados indican que un parámetro en el orden de 0,7 es característico de la relación MF en rocas sedimentarias. En pendientes más planas, parámetro B del orden del 0,4, parece apropiado para rocas intrusivas félsicas masivas que posiblemente producen una proporción relativamente mayor de fallas de gran magnitud controladas estructuralmente. En el estudio de Dussauge-Peisser et al. (2002) se obtienen parámetros B de 0,41 ~0,45 para rocas metamórficas y sedimentarias, acantilados calcáreos y graníticos.

La precisión en que la regresión potencial se ajusta a la curva ha sido estudiada y discutida por varios autores. En nuestras relaciones MF existe un efecto de rollover muy común en las curvas, que describe que los datos disminuyen por debajo de la regresión en magnitudes pequeñas. Esto puede explicar la carencia de eventos pequeños que son difíciles de visualizar en el campo (vegetación, mallas, bancos, etc). Otros autores como Guzzetti, et al.,(2002), por el contrario, especulan que el efecto rollover no se debe a la falta de muestreo. El mismo autor describe que el rollover sucede en magnitudes mucho mayores a la magnitud mínima divisible.

La presencia del efecto rollover en todas las zonas puede llevar a pensar que un factor que lo produce puede ser el submuestreo de los pequeños volúmenes (menos de 0, 1 m³). Otro factor puede ser el patrón de fracturación del macizo, donde la disposición de las diferentes familias no dé lugar a bloques más pequeños que ciertos volúmenes dados. De todos modos, en el caso de Montserrat, los bloques más pequeños (< 3 m³ aprox.) no se producen por la intersección de las discontinuidades en el macizo sino por las deformaciones plásticas ubicadas en la parte más superficial del conglomerado y la meteorización fisicoquímica de la matriz del conglomerado. Tal como indica la Tabla 2, los desprendimientos de menor magnitud son guijarro o agregados que se desprenden diariamente debido a la meteorización fisicoquímica de la matriz del conglomerado.

CAPÍTULO 3

ÁREA DE ESTUDIO

3.1. UBICACIÓN

La montaña de Montserrat es, según la tradición, la montaña más emblemática de Catalunya (España). Este atractivo turístico y natural está situado a 50 km al noroeste de Barcelona (ver Figura 7) entre las comarcas catalanas del Bages, Anoia y el Baix Llobregat. Se encuentra en el margen oriental de la unidad morfoestructural denominada depresión o cuenca del Ebro, en la mitad septentrional de la cadena prelitoral catalana y en el límite con la cadena costera. En ella se ubica el santuario y monasterio benedictino dedicado a la Virgen de Montserrat y un parque natural, donde se realizan actividades recreativas como la escalada y excursiones. El año 2019, el santuario tuvo 2,75 millones de visitantes, que supone un 5% de crecimiento con respecto al año anterior.



Figura 7. Ubicación general (izquierda) y extensión y delimitación del área de estudio (derecha)

3.2. GEOLOGÍA

La geología de Cataluña cuenta con dos cordilleras; al norte el Pirineo en dirección Este – Oeste; del lado de Levante, la cordillera costera catalana formada por un conjunto de relieves pequeños. En general, la morfología de la cuenca del Ebro es plana y con pequeñas colinas, donde se depositaron los abanicos aluviales. Al sur de la cuenca que están los relieves de Montserrat, que corresponden a los abanicos aluviales depositadas durante el Eoceno medio, hace unos 40- 34 M (López-Blanco, 2006), resultado de la sedimentación de los ríos procedentes de las Cordilleras costeras catalanas que drenaban hacia la Cuenca del Ebro.

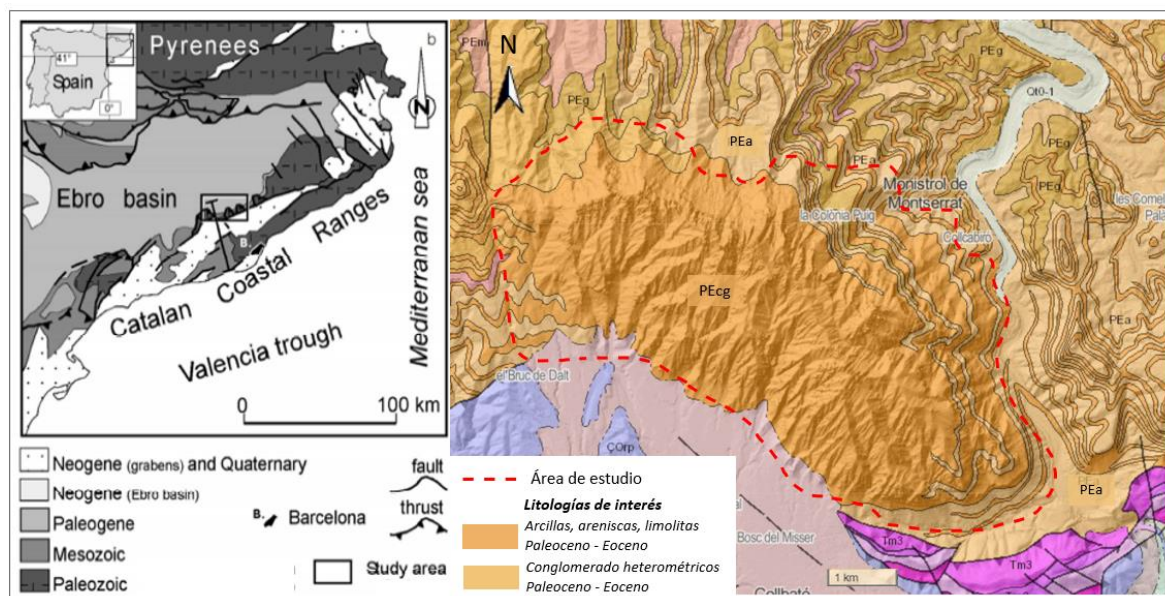


Figura 8. Mapa geológico de las principales unidades geológicas de Cataluña. Ubicación de la zona de estudio. (López-Blanco, 2006). (izquierda). Mapa geológico escala 1: 25000 de la vertiente SE de Montserrat (Modificado ICGC, 2021)

La morfología de Montserrat es característica por sus agujas y pináculos, producto de la mezcla de la erosión de los conglomerados con una red densa de diaclasas, fracturas con una dirección predominante NNE-SSO y NO-SE. Los conglomerados de Montserrat están compuestos por cantos rodados que diferentes características, principalmente de composición carbonatada. El conjunto posee una naturaleza continua en la vertiente sudoeste que desaparece en dirección norte, ya que los conglomerados pierden potencia, y aumentan las intercalaciones de arenitas y lutitas rojas, disminuyendo en los cantos. En la vertiente noreste, se distinguen hasta 8 niveles o tramos de 75 a 250 m de potencia de conglomerados intercalados con lutitas y arenitas rojas de gran continuidad lateral, así como arenitas y margas de origen marino. De manera que se produce un cambio lateral, hacia un conjunto de lutitas y arenitas rojas alteradas (López-Blanco, 2006). Debido a que estos materiales afectados principalmente por diaclasas, en detalle una red sub vertical de tres familias principales de fracturas. Estas fracturas se crearon posterior al depósito de los conglomerados, en las fases compresivas de la orogenia alpina. En la Figura 9 se muestran los diferentes niveles estratigráficos formados por la superposición de paquetes de continuidad sub horizontal de conglomerados.

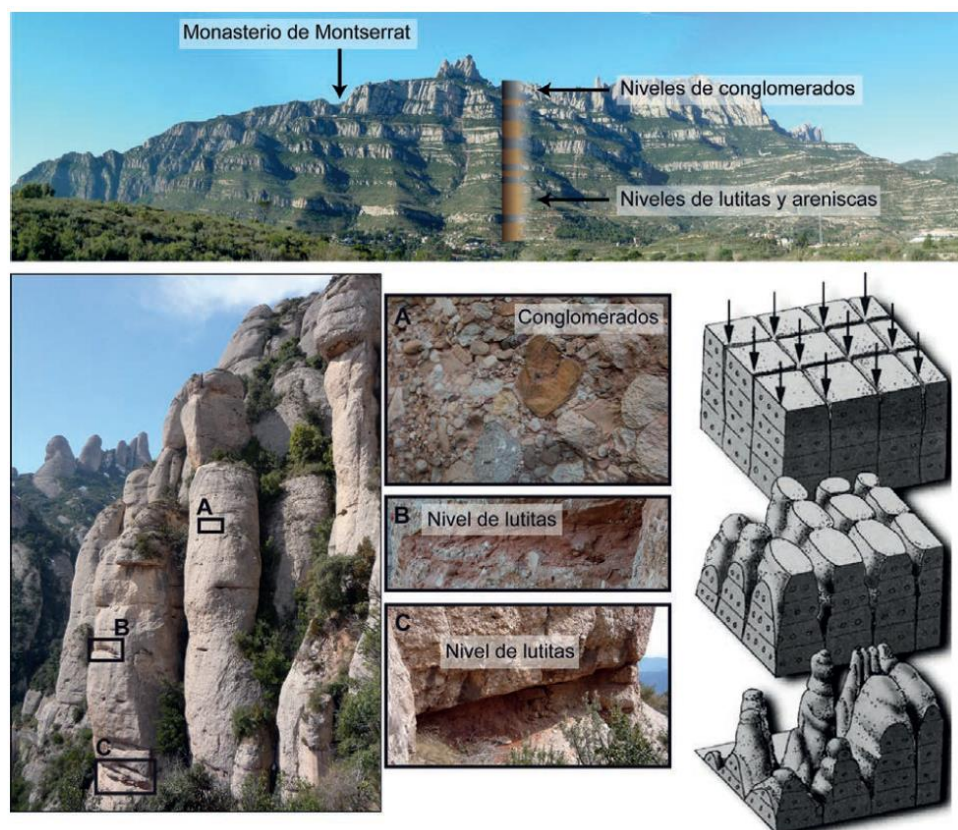


Figura 9. Panorámica de la montaña de Montserrat y fotografías de detalle de las principales litologías. Se incluye un esquema de la evolución kárstica del modelado montserratino controlado por la red de diaclasas (Fontquerni, Vilaplana, Guinau, & Royán, 2013)

El papel fundamental en la morfología actual del macizo es el alto grado de compactación de los conglomerados, cantos y cemento calcáreo. Este modelado montserratino se muestra en la Figura 10 (en forma de monolitos y agujas sobre conglomerados recibe el nombre de mallos). Gracias al agua de escorrentía superficial y subterránea se ha disuelto el carbonato (karstificación), modelando las formas del macizo que han sido condicionadas por las discontinuidades existentes (red de diaclasas). Esto además de favorecer la creación de las agujas y pináculos de grandes alturas, en sectores donde las características del macizo son menos cimentadas y el agua produce disgregaciones y roturas de la roca por pérdida de cohesión, dando lugar a grandes desprendimientos rocosos.

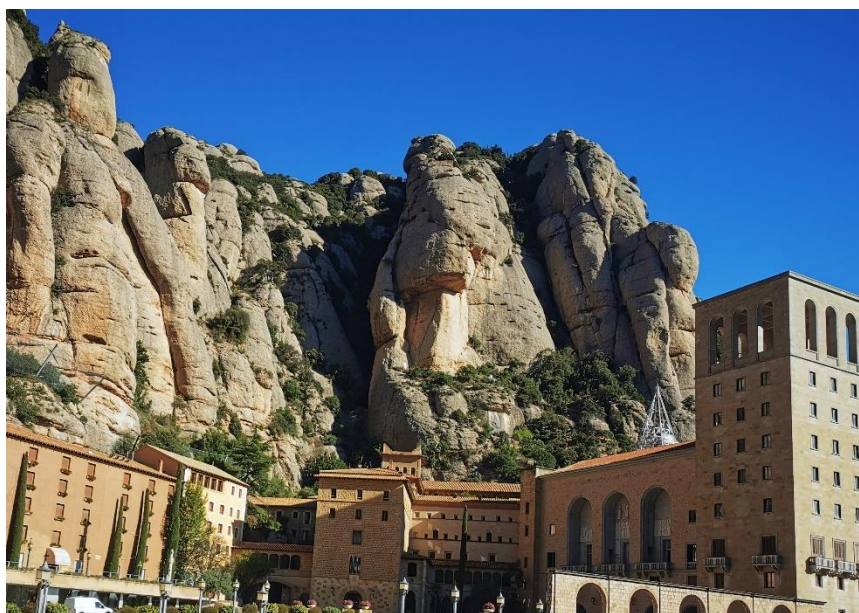


Figura 10. Panorámica de la montaña de Montserrat, sector del Monasterio.

Otro factor indispensable para la ocurrencia de desprendimientos de rocas es la pendiente de la pared. Según Corominas, et. al. (2013) el ángulo mínimo necesario para el desencadenamiento es de aproximadamente 45° y en Montserrat, muchos sectores superan este umbral. Sumado a la pendiente, otro factor importante es la presencia de discontinuidades, compuestas de diaclasas y estratificaciones. Y el tercer factor importante, nombrado anteriormente, es la alteración y erosión de los niveles blandos (lutitas) que provocan la pérdida basal en bloques de roca delimitados por discontinuidades.

Los eventos que se producen debido a la dinámica geomorfológica de movimientos en masa de las laderas y torrentes que se encuentran aún activos en la montaña. Los desprendimientos de rocas de distintas tipologías y tamaños. La presencia de escarpes, nichos y acumulaciones de rocas y derrubios al pie de la montaña son la expresión morfológica de desprendimientos. Adicional estos fenómenos, de menor frecuencia, son los flujos torrenciales y corrientes de derrubios producidos por episodios de lluvias abundantes. Un ejemplo de este caso es el ocurrido en junio del año 2000, donde se produjo el corte de la carretera y de las instalaciones del monasterio. Otro fenómeno natural, también con una frecuencia menor que los desprendimientos rocosos, son los deslizamientos superficiales de pequeña y mediana magnitud, los cuales generalmente movilizan coluviones (Vilaplana, Royán, Fontquerni, Janeras, & González, 2016).

3.3. DESPRENDIMIENTOS ROCOSOS

Los desprendimientos se producen gracias al deterioro de las propiedades resistentes del macizo rocoso, tanto en la litología y estructura de las discontinuidades de la roca. En Montserrat los desprendimientos se producen debido a los siguientes fenómenos:

- Los desprendimientos de roca de menor volumen y más frecuentes están relacionadas con la meteorización del conglomerado.
- Se producen deslizamientos superficiales de pequeña y mediana magnitud que generalmente movilizan coluviones

- Flujos hiper concentrados en dinámica torrencial, es decir, durante episodios de lluvias abundantes se pueden producir flujos torrenciales y corrientes de derrubios.

La magnitud de los desprendimientos rocosos en Montserrat tiene diferencias de hasta 6 órdenes de magnitud. En la Tabla 2 se resumen los 3 mecanismos que se consideran de mayor a menor volumen (Janeras, et al., 2017).

Tabla 2. Fenomenología de la caída de rocas reducida a tres clases de mecanismos (Janeras, et al., 2017)

Sigla	Tipología del bloque	Frecuencia de caída de rocas	Mecanismo de desprendimiento	Volumen
M1	Grandes bloques, agujas y bloques singulares	Diaria, prácticamente continua	Debilitación de las juntas que delimitan los bloques y erosión de las limonitas de base.	30 – 1000 m ³
M2	Lajas y placas	Varias por año (mensual/trimestral)	Tensiones inducidas por efectos térmicos y meteorológicos de alteración superficial de la roca	0,3 – 10 m ³
M3	Guijarro y agregados	Cada pocos años.	Meteorización fisicoquímica de la matriz del conglomerado	0,001 – 0,03 m ³

Uno de los trabajos que aporta más información sobre la actividad en la Montaña de Montserrat es el de Royán y Vilaplana (2012): "Distribución espacio - temporal de los desprendimientos de rocas en la montaña de Montserrat ". Para calcular la densidad espacial de los desprendimientos, dividieron el área de estudio en cuatro secciones según la frecuencia de fracturación, tal y como hizo Alsaker et al., (1996). Donde analizaron las trayectorias de los bloques y su relación con la pendiente de la zona de salida. La frecuencia temporal la obtuvieron a partir del trazado de las trayectorias observadas, ya que son las que aportan información sobre la actividad reciente asumiendo que cada trayectoria corresponde a un evento. Por ello, se dividió el número de trayectorias entre el número de años de cada intervalo de tiempo entre eventos.

En la Figura 11 se muestra como varían las fracturas, siendo considerable en el noroeste, graduándose se forma moderada en la zona central y siendo muy alta en la zona sureste de Montserrat.

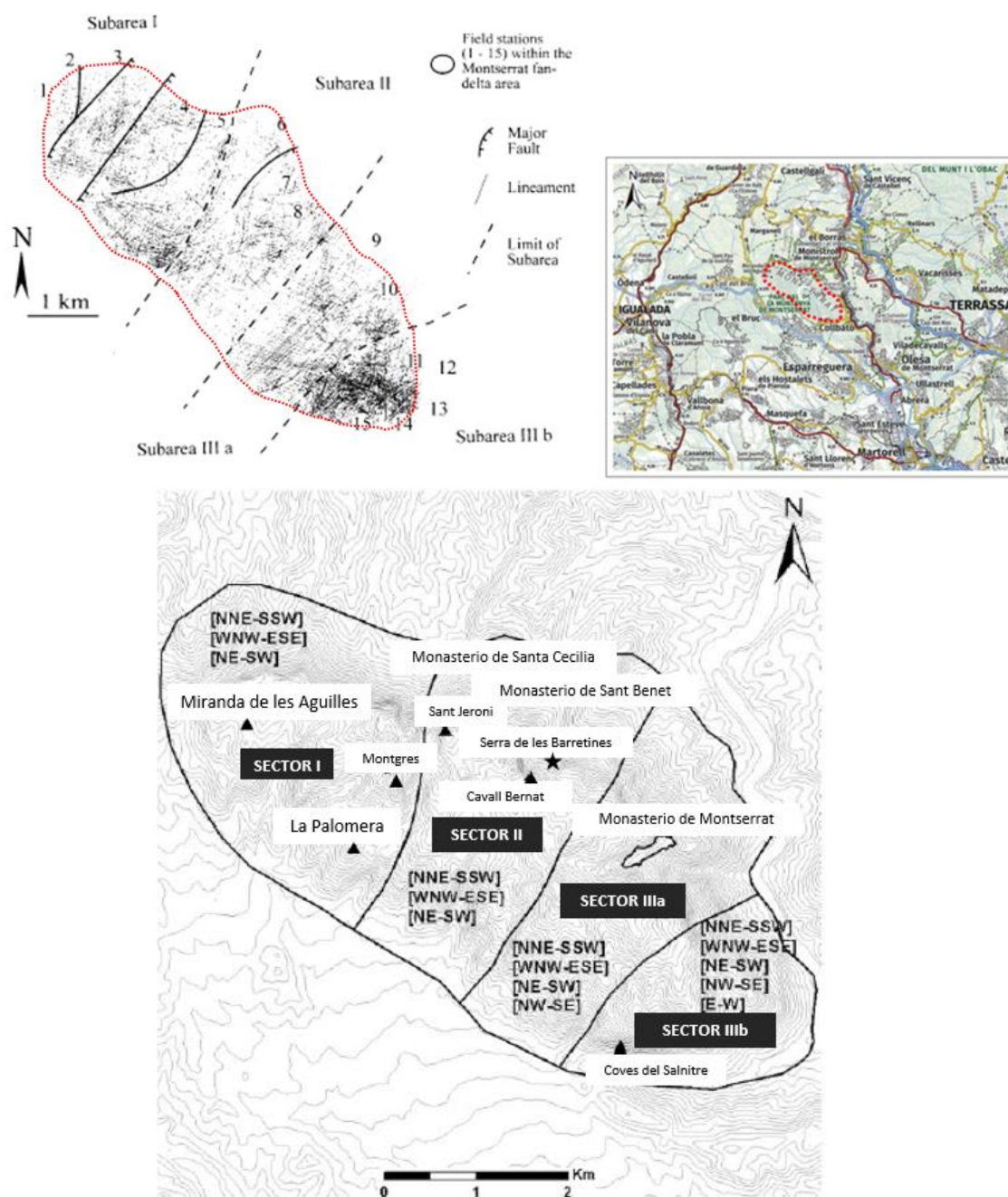


Figura 11. Superior: Mapa de fracturas (a) basado en la fotografía aérea (escala 1: 34.500) del abanico-delta de Montserrat (Alsaker, Gabrielsen, & Roca, 1996) Inferior: División de la Montaña de Montserrat hecha por Alsaker et al. (1996) según los patrones de fracturación (modificada de Royán and Vilaplana, 2012).

Según Janeras (2016), la frecuencia de la caída de bloques se encuentra alrededor de 10 desprendimientos anuales con una magnitud estimable superior a $10-30 \text{ m}^3$, con información del estudio realizado por Royán & Vilaplana (2012).

Desde principios de siglo, se ha realizado la construcción de protecciones activas y pasivas, a lo largo del ferrocarril, autopistas de acceso y áreas más visitadas, como Monasterio y Coves del Salnitre. Estas protecciones deben haber disminuido la actividad de los desprendimientos rocosos, lo cual confirmaría la inversión realizada en protecciones.

El Plan de Mitigación del Riesgo Geológico la Montaña de Montserrat (PMRGM) lo desarrolla el ICGC para el Patronato de la Montaña de Montserrat (PMM), la entidad pública que gestiona la parte patrimonial del Monasterio de Montserrat y del Parque Natural. Se pone en marcha el 20014 y nace de la necesidad como un plan de prevención para una gestión sistemática de riesgos en las áreas más vulnerables (turismo y carreteras). Posteriormente se analizó que para tener un buen plan es necesaria una comprensión integral de los diferentes fenómenos, sus mecanismos de falla y la variabilidad espacial.

Inicialmente el plan surgió como prevención de un riesgo sistemático para la gestión en las zonas más vulnerables, es decir, instalaciones del santuario, así como los caminos. Sin embargo, se vio que, para tener un adecuado plan de mitigación de caída de rocas dentro de esta área particular, la instalación de protección no fue suficiente. Se amplió el plan para una comprensión integral de los diferentes fenómenos, sus mecanismos de falla y variación espacial.

En la Tabla 3 se muestra un resumen del plan de mitigación, que debe estar permanentemente bajo revisión, tratando de reducir el riesgo seguido de una reconsideración de la situación.

Tabla 3. Resumen fases de Plan de Mitigación del Riesgo

Fase	Estudio (seguimiento y auscultación)	Protección (proyecto y obra)
1	Recapitulación de experiencias previas, información antecedente. Pruebas de aplicabilidad de métodos de auscultación.	Implementación inicial: identificación, priorización y resolución de los puntos más críticos del entorno del Santuario. Estabilización de puntos potencialmente peligrosos.
2	Aplicación sistemática de monitoreo para el análisis de la peligrosidad y del riesgo, y de su variabilidad espacio - temporal.	Intervención ampliada en el espacio y a prioridades medianas, para dar continuidad y coherencia a la mitigación
3	Gestión del riesgo integrada en la gestión del entorno. Posible implementación de sistemas de alerta primaria.	Mantenimiento y operatividad del sistema con el objetivo de garantizar su continuidad.

El responsable técnico de la ejecución de este plan es la unidad de ingeniería geológica del ICGC. En las tareas de investigación y desarrollo se trabaja en conjunto con la Universidad Politécnica de Cataluña y la Universidad de Barcelona. Para llevar a cabo los trabajos, se planifican las tareas a seguir: 1) evaluación de la peligrosidad por desprendimientos en el ámbito del monasterio mediante diferentes técnicas y estudios de detalle, 2) auscultación de diferentes bloques que presentan una alta peligrosidad y 3) protección de las zonas potenciales de llegada de bloques. Dentro de las tareas del PMRG, el ICGC construye un inventario de desprendimientos rocosos para caracterizar la actividad de los desprendimientos analizando la variable tiempo y espacio.

Para llevar a cabo la obtención de la peligrosidad, el ICGC en el inicio del plan de mitigación, realiza un registro de los eventos (volumen, fecha y lugar) con dos trabajos en paralelo para determinar el volumen movilizado, inventario y láser escáner terrestre. Tal como resume la Figura 12, con esta información se obtiene la frecuencia (número de eventos en un tiempo y espacio), es decir, el grado de actividad que tiene Montserrat. Con esta información, sumado a la magnitud del bloque desprendido, volumen de salida, se logra obtener el nivel de peligrosidad del macizo con la relación magnitud frecuencia.

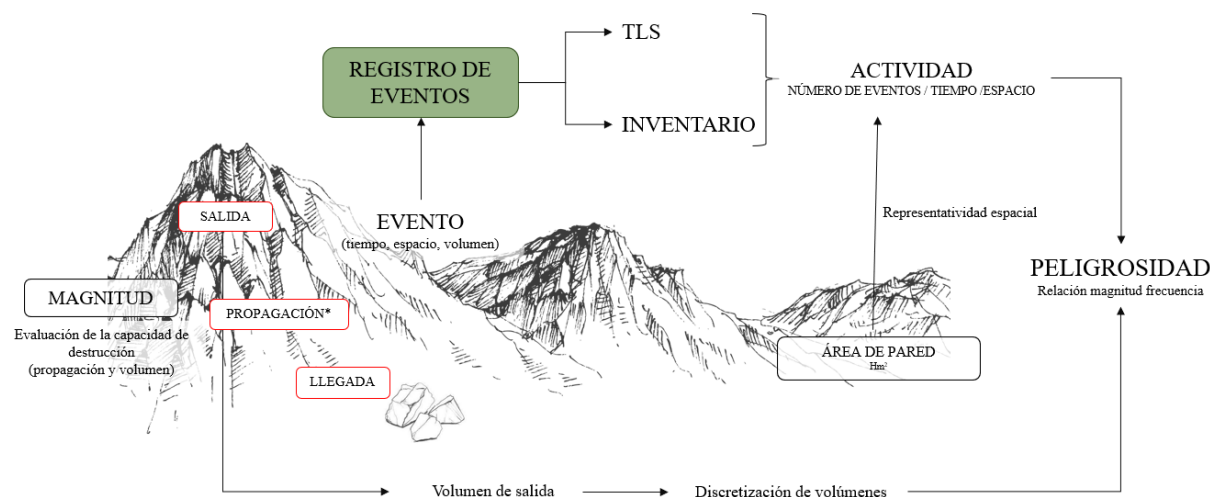


Figura 12. Plan de trabajo para la obtención de la peligrosidad

3.4. ZONIFICACIÓN DEL MACIZO DE MONTSERRAT

La zona de estudio abarca una gran extensión, de 3500 ha aproximadamente. Debido a que queremos caracterizar la peligrosidad en el conjunto de la montaña (resultado único a escala global) y a la vez, analizar su variabilidad espacial se requiere de áreas homogéneas que tengan un comportamiento similar. Para esto se subdividirá en diferentes áreas, en base a diferentes criterios:

- Por propiedades de muestreo:
 - Ámbitos: por capacidad de recogida de datos en el seguimiento.
- Por propiedades del macizo, donde se usan 2 escalas:
 - Regiones: por grandes unidades de relieve, morfologías en la montaña.
 - Dominios: unidad mínima por homogeneidad en macizo rocoso.

3.4.1. ÁMBITOS

Para realizar el seguimiento de Montserrat, el ICGC definió 4 ámbitos de estudio, basándose en criterios de seguimiento, desde un punto de vista orientado a la exposición de personas e infraestructuras. En este caso, para hacer el seguimiento de Montserrat se definieron cuatro ámbitos de estudio (Figura 13). El ámbito 1 hace referencia a toda la zona del Monasterio y sus aparcamientos, una parte de la zona de Degotalls, y trazado del Cremallera, desde la estación de abajo en Monistrol hasta la de arriba en el Monasterio.

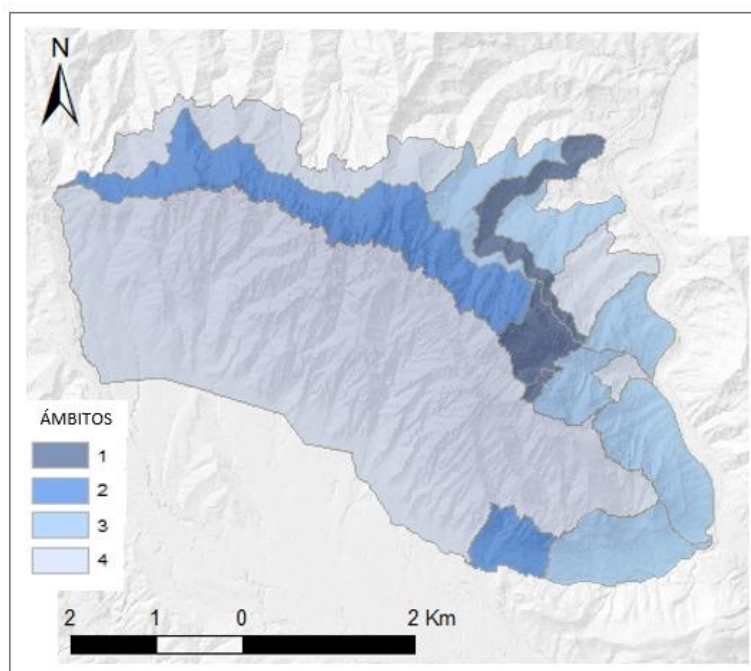


Figura 13. Ámbitos de estudio dentro del Plan de Mitigación del Riesgo Geológico la Montaña de Montserrat.

El ámbito 2 corresponde a una zona de Degotalls, Agulles Perduda, San Jeroni, el Cavall Bernat, Cova dels Lladres, un tramo de la carretera BP 1103 y Coves del Salnitre. Los ámbitos 1 y 2 son prioritarios ya que se trata de una zona de mucha afluencia de turistas y visitantes siendo el grado de exposición y la vulnerabilidad muy altos. Para ambos, el ICGC realiza una visita semestral.

El ámbito 3 cubre parte de la carretera BP-1121, L'Águlla de la Creu y zona de Sant Miguel. Por el otro lado sigue la carretera B-112 que va hasta Collbató. El ámbito 4 cubre el área restante, en la que no se suelen hacer visitas a no ser que se produzca algún evento que sea de interés.

Debido a estos ámbitos, la información que contiene el inventario de desprendimientos es heterogéneo, ya que contiene datos de la observación directa del especialista del ICGC según el nivel de seguimiento del área.

3.4.2. REGIONES

Montserrat además de su atractivo turístico, tiene una morfología particular y llamativa, con una alternancia de paredes de gran verticalidad y altura, laderas de fuerte inclinación con depósitos coluviales y una tupida vegetación. Lo más llamativo es la formación de agujas de roca, que se encuentran en lo alto de la montaña.

Con su atractivo natural de la montaña, ha sido objeto de detallados estudios y mapas de su relieve. En el libro *“Montserrat Pam a Pam”* (Barberà i Saqué, 1977) se describen de manera sistemática las rocas monolíticas de la montaña donde se propusieron 6 grandes regiones y 35 secciones.

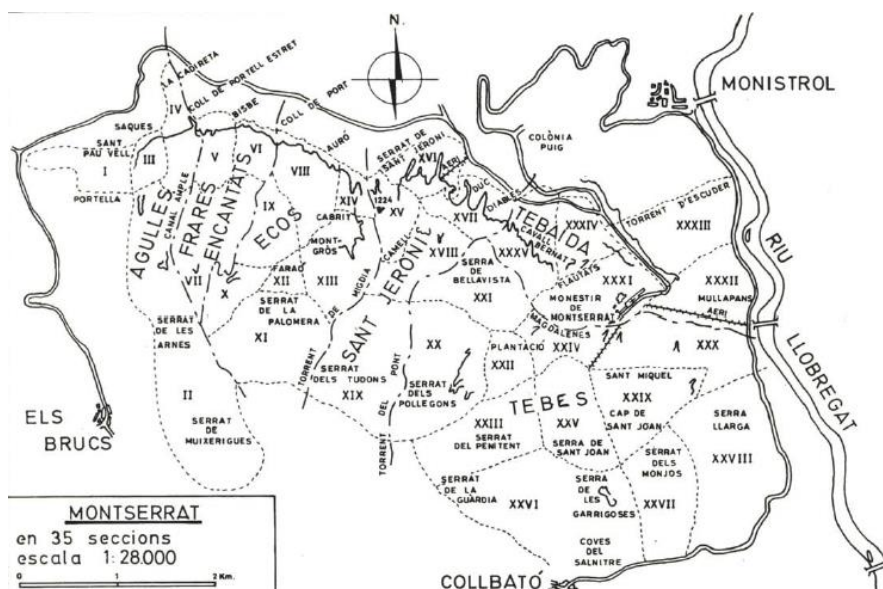


Figura 14. Regiones y secciones determinadas por Josep Barberà i Saqué (1977)

El ICGC se basó en el trabajo de Barberà i Saqué (1977) para sistematizar la información, dividiendo Montserrat en 13 regiones. Esta división es fisiográfica (relieves naturales) de modo que puede ser representativa de zonas relativamente homogéneas de actividad.

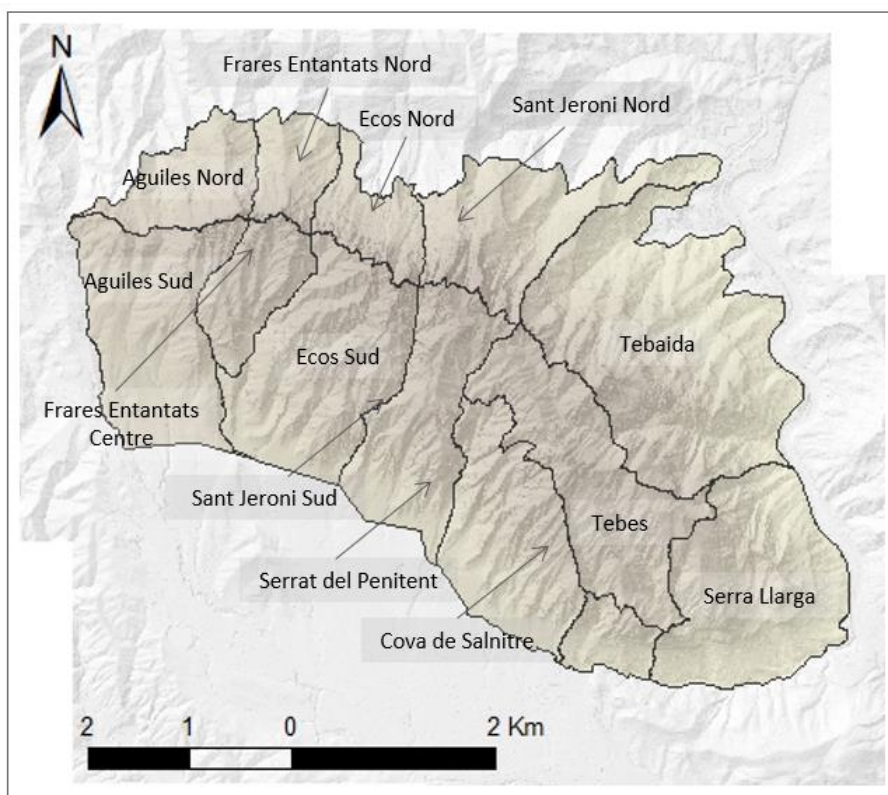


Figura 15. Regiones (13) determinadas para zonificación fisiográfica de Montserrat

3.4.1. DOMINIOS

En, el trabajo de Carmona (2015) se discretizó la montaña de Montserrat en diferentes dominios según criterios geomorfométricos e hidrológicos. Por cada píxel, calculó la frecuencia de desprendimientos a partir de la probabilidad de alcance. La magnitud se obtuvo a partir de la extensión de pared influyente obtenida en cada píxel. Finalmente, se juntó la frecuencia y la magnitud para obtener el potencial de propagación de desprendimientos.

Debido a que los desprendimientos suelen estar en paredes pronunciadas, y que su zona de llegada está controlada por la pendiente, la cual puede ser un buen método para determinar zonas con distinto grado de peligrosidad de desprendimientos rocosos. Los dominios calculados por Carmona (2015) son sectores derivados de las pendientes, orientación, intersección de niveles estratigráficos dominantes, cuencas hidrográficas y en base al grado de obstaculización del terreno.

Actualmente la base de datos del ICGC se basa en estos 1070 dominios para codificar las zonas de salida y llegada de los desprendimientos (ICGC, AP-0094/15, 2015). Para el presente estudio se ha adoptado el dominio como unidad mínima espacial, por lo que consideramos la actividad homogénea dentro de un dominio.

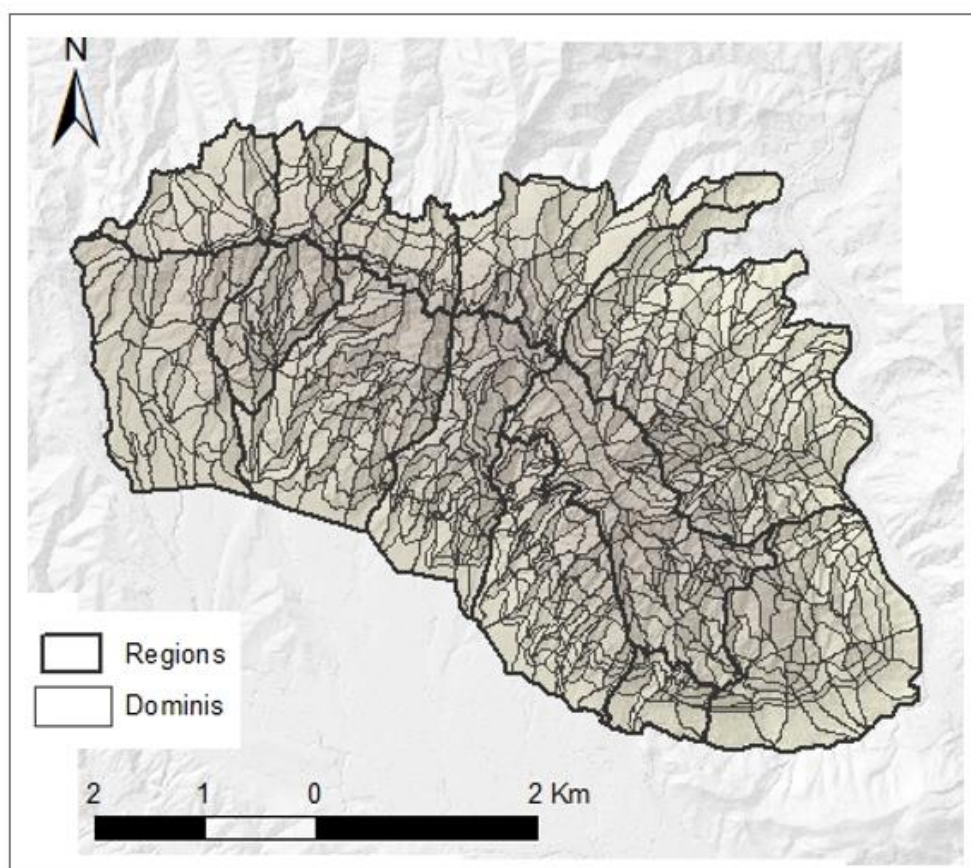


Figura 16. Dominios del área de estudio

3.5. ANÁLISIS GEOMORFOMÉTRICO

En el análisis es necesario determinar las zonas susceptibles de producir desprendimientos, cuantificando el área de éstas. El objetivo es normalizar el cálculo de la actividad en relación con el área de pared. Para obtener esta información utilizamos el análisis geomorfométrico planteado por Loye, Jaboyedoff, & Pedrazzini (2009) a través del programa Histofit.

El objetivo del análisis geomorfométrico es diferenciar las morfologías en base a las pendientes, lo cual es limitado ya que la morfología tiene otros factores. Debido a que los desprendimientos rocosos responden a la gravedad, tiene sentido el uso de las pendientes para determinar la zona de salida.

El primer paso, es determinar el área de salida de los desprendimientos rocosos, para ello se utilizaron los Modelos Digitales de Elevaciones (MDE) del ICGC de 2m x 2m por su mayor resolución (elaborados con LiDAR aéreo). En el SIG se procesaron los datos para obtener el mapa de pendientes y posteriormente se efectuó el análisis para toda el área de estudio.

Para realizar el estudio, Histofit utiliza el conteo de píxeles de las pendientes de 0° a 90°, obteniendo un histograma con la distribución de frecuencias (SAD: *slope angle distribution*), que a su vez simbolizan las distintas unidades morfológicas (UM: *morphological units*), y se supone una distribución normal (GDMU: *Gaussian distribution of morphological units*). Finalmente, el programa Histofit hace un cálculo iterativo donde busca el mejor ajuste de GMDU al SAD mediante mínimos cuadrados. El cálculo no considera la planimetría para ponderar la frecuencia del histograma, sino la propia pendiente (área de superficie de terreno real).

En la Figura 17 se muestran las 5 unidades morfológicas utilizadas en el estudio, que se determinaron observando el relieve de Montserrat:

1. Planicies: son donde hay edificaciones. Es un área reducida ya que es al pie de la montaña.
2. Laderas suaves en la parte baja de la montaña, donde se ubican las construcciones, o en aristas y lomos.
3. Pendientes pronunciadas, Unas laderas pronunciadas de suelo coluvial, cubierta de bosque. Aquí sería donde se desencadenan los deslizamientos superficiales.
4. Paredes que tienen distinta morfología, según la orientación norte y sur de la montaña, de rampas de roca no muy inclinadas, a paredes de gran verticalidad e incluso desplomadas. Se dividen las paredes en dos grupos: inclinadas y verticales.

En la Figura 17 se muestra el histograma para Montserrat, donde se visualizan los límites entre unas y otras, mediante la intersección de los GDMU. En el Punto A está la intersección en un ángulo de 9° en que las planicies pasan a ser laderas, a los 19,5° (punto B) serán pendientes pronunciadas, sobre 48° serán paredes inclinadas (punto C) y sobre 70° serán paredes verticales (punto D).

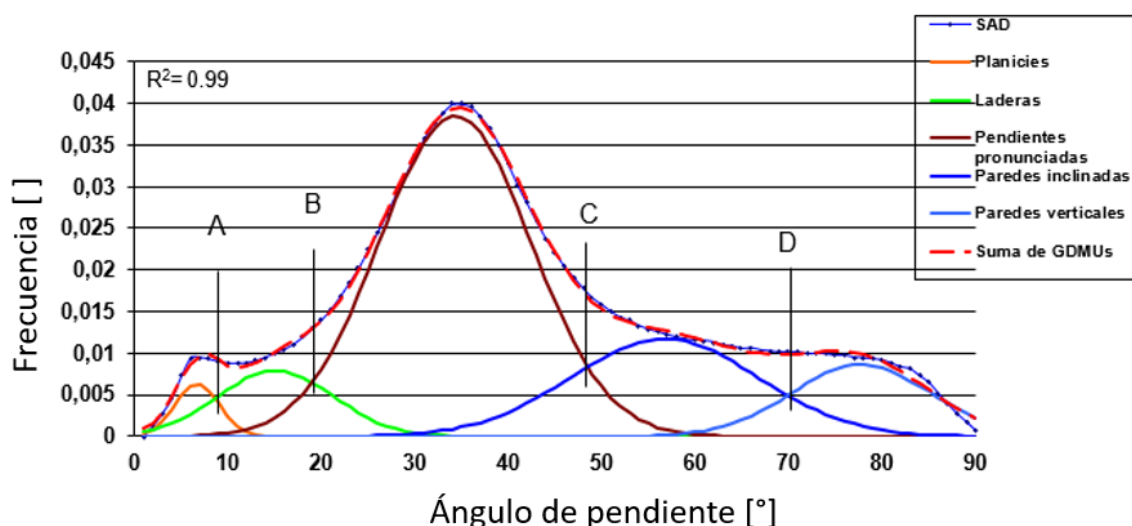


Figura 17. Histogramas de distribución de pendientes para todo Montserrat

Los resultados de límites entre las morfologías para las 13 regiones se muestran en la Tabla 4, donde se visualizan pendientes mayores en el lado norte de Montserrat, En el lado sur, se tienen pendientes menos inclinadas, en forma de rampa. Un ejemplo claro son las rutas de senderismo presentes en la montaña, los itinerarios con baja dificultad se encuentran mayormente en el lado sur de ésta. El detalle de los histogramas de distribución para las regiones se encuentra en el Anexo A.

Tabla 4. Límites entre las morfologías (valores de ángulos en grados)

Región	Ángulo mínimo pared inclinada (°)	Ángulo mínimo pared vertical (°)
Coves del Salnitre	48	71
Serrat Del Penitent	42	61
Tebes	44	65
Ecos Sud	42	65
Agulles Sud	50	70
Agulles Nord	49	66
Freres Encantats Nord	53	78
Freres Encanta Centre	43	64
Serra Llarga	48	68
Ecos Nord	54	75
Sant Jeroni Nord	50	70
Sant Jeroni Sud	45	65
Tebaida	46	67

3.6. ÁREA DE PARED

La frecuencia de las curvas de magnitud frecuencia, serán normalizadas por el área de pared (potencial zona de salida del desprendimiento) para que sea comparable. Para realizar el cálculo, se emplea el área planimétrica obtenida con el Modelo Digital de Elevaciones (MDE), considerando como conocida el área de un píxel, área de pared proyectada en un plano horizontal, y calculando el área natural o inclinada de pared, conocida la pendiente de esta en el píxel del mapa de pendientes. Por tanto, conociendo el número de píxeles que ocupa la pared en planta en el mapa ráster de elevaciones, y su respectiva pendiente (mediante el mapa ráster de pendientes). Es decir, se transforma el mapa de pendientes a mapa de área unitaria de pared, siendo valor del píxel el área real de pared que le corresponde. Se puede calcular el área natural total de la pared como:

$$A_{pared} = \sum_{i=1}^n A_{pixel} \frac{N_i}{\cos \alpha_i}$$

Donde:

A_{pared} : el área real de la pared

A_{pixel} : el área del píxel del MDE

N_i : número de píxeles de pendiente α_i

Como se muestra en la Figura 18, para la misma unidad de área(píxel) pueden existir dos casos, una pared extensa y de gran inclinación o una pared menor inclinada y extensa. En la realidad, el área es mayor a la calculada debido a las irregularidades en la superficie, con curvaturas que son simplificados en los planos para cada píxel.

La actividad en nuestro estudio responde a la “cara expuesta” de la pared, la ondulación solo responde a la forma de los bloques en superficie, pero la tasa de erosión es en sentido perpendicular al plano medio de pared.

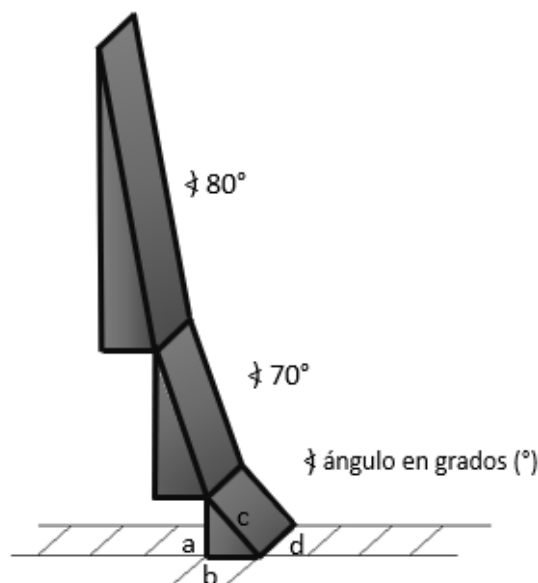


Figura 18. Ejemplo de cálculo del área de pared con un modelo digital de elevaciones ráster. a es la diferencia de elevación entre píxeles, b y d son los lados del píxel y los valores en grados (°) indican la pendiente de cada píxel.

Modificada de Carmona (2015)

En la Figura 19 se observa las pendientes de Montserrat obtenido con el Modelo Digital de Elevaciones de Montserrat.

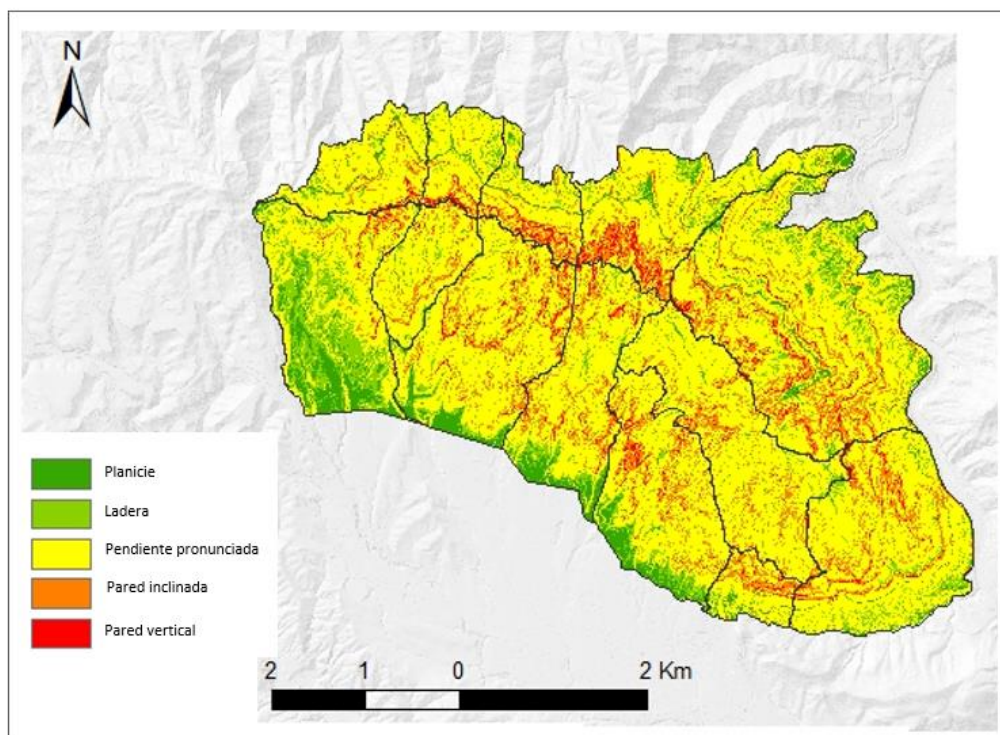


Figura 19. Mapa de pendientes en Montserrat

Los límites utilizados para calcular el área de pared de cada zona de estudio variarán según cada región. En la Tabla 5 se resume la superficie de pared para cada región, donde los sectores norte de la montaña cuentan con más pared inclinada que el sur.

Tabla 5. Resumen de la superficie de pared según región

Región	Superficie de pared (hm ²)	Tipo vertical (%)	Tipo inclinado (%)
Coves del Salnitre	30,42	74,4	25,6
Serrat Del Penitent	97,29	74,2	25,8
Tebes	82,18	81,5	18,5
Ecos Sud	121,47	67,7	32,3
Agulles Sud	33,79	66,0	34,0
Agulles Nord	30,42	65,2	34,8
Frares Encantats Nord	25,94	46,7	53,3
Frares Encanta Centre	31,15	79,1	20,9
Serra Llarga	111,36	75,1	24,9
Ecos Nord	56,77	48,8	51,2
Sant Jeroni Nord	110,91	53,1	46,9
Sant Jeroni Sud	80,84	72,6	27,4
Tebaida	232,11	100	0
Total	1088,42	69,6	30,4

Preliminarmente se trabaja con los modelos digital de elevaciones de la web del Instituto Cartográfico y Geológico de Catalunya (ICGC). Para optimizar el trabajo con los mapas, se procede a juntar y cortar con respecto a la zona precisa de estudio. Con distintas herramientas disponibles en ArGIS, se calcula finalmente el área de pared. En la Figura 20 se muestra el flujo de trabajo en detalle para determinar el área de pared utilizando el software ArcGIS versión 10.5.1. Para ver el detalle del proceso ver Anexo B.

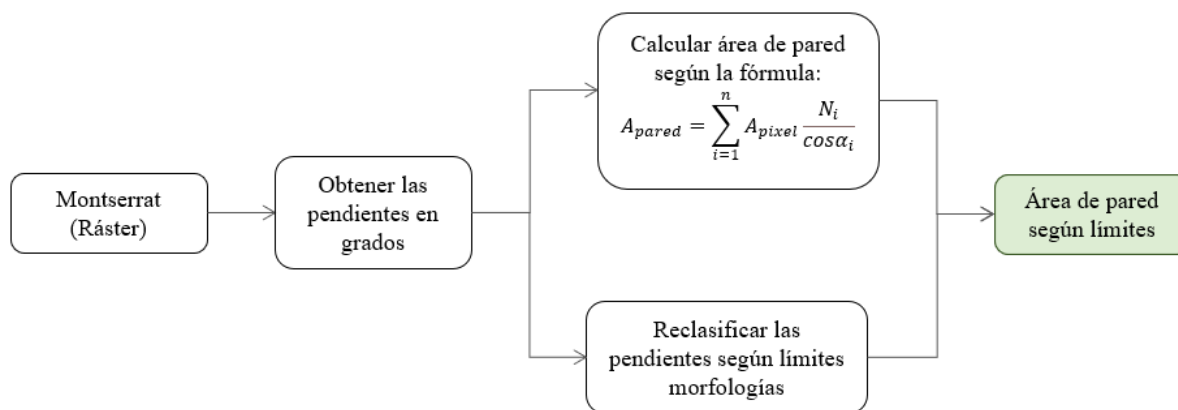


Figura 20. Resumen del flujo de trabajo para la obtención el área de pared

CAPÍTULO 4

BASE DE DATOS DE INVENTARIOS DE DESPRENDIMIENTOS ROCOSOS DE MONTSERRAT

4.1. PROCEDENCIA

El Plan de Mitigación de Riesgos Geológicos en Montserrat está financiado por la Generalidad de Cataluña, promovido por el Patronato de la Montaña de Montserrat y liderado y ejecutado por el Instituto Cartográfico y Geológico de Cataluña. En este plan existen dos conjuntos de paquetes de trabajo principales, el primero consistente en el proyecto y construcción de medidas de protección y mitigación del riesgo. El principal objetivo del segundo paquete de trabajo es mejorar el conocimiento de todos los factores que contribuyen al riesgo de caída de rocas con el fin de establecer una estrategia de mitigación óptima y sostenible.



Figura 21. Diagrama de flujo para la gestión del riesgo de caída de rocas en el Montserrat desarrollado por el ICGC (Buxó, et al., 2017)

En el segundo paquete de trabajo se estudió la geomecánica del macizo rocoso, junto con la búsqueda de indicadores de actividad, y con mayor detalle en algunas áreas de interés. En la actualidad se trabaja ajustando las curvas de MF del inventario, monitoreo y análisis geomorfológico. De ahí nace la importancia para el plan, tener un inventario constantemente actualizado y detallado. Este inventario es una base de datos en PostgreSQL-PostGIS explotada desde el entorno QGIS. Tuvo una primera versión en 2015, mejorada posteriormente. Adicionalmente cuenta con un visor web mediante la plataforma InstaMaps del ICGC para la consulta por parte del Patronato de la Montaña de Montserrat (PMM). Este inventario cuenta con información para determinar la actividad de riesgos geológicos, es decir, cuenta con registros de los desprendimientos rocosos, flujos torrenciales y deslizamientos superficiales.

El inventario es el conjunto de todas las fuentes: documental, encuesta, observacional por seguimiento en campo realizado por el ICGC. Este registro también cuenta las intervenciones hechas para mitigar los riesgos geológicos, que son las obras de protección (generalmente barreras dinámicas), con el objetivo de monitorear su mantenimiento y operación.

El ICGC realizó un estudio en el año 2015, cuyo objetivo fue la búsqueda histórica y documental de desprendimientos e indicios en todo el macizo, así como de la evolución de la exposición y de la protección del Monasterio para: 1) tener una primera base de datos de documentos que hacen referencia a desprendimientos, evolución del recinto y protecciones y 2) proveer el inventario de caídas de bloques.

Desde el año 2015, el inventario se ha registrado de manera continua, con el objetivo de tener un seguimiento claro, ordenado y completo de los eventos de riesgos geológicos en Montserrat. Esto es un factor clave que contribuye a una comprensión mejorada continua de los factores de peligro y riesgo y para la consecuente aplicación de contramedidas.

4.1.1. BÚSQUEDA HISTÓRICA

En cuanto a la búsqueda histórica y documental de desprendimientos en la zona de estudio, existen una gran cantidad de documentos que hacen referencia a la Montaña de Montserrat. Así, la búsqueda se ha hecho en fuentes diversas, tales como:

- Cartoteca ICGC (libros, mapas y fotos)
- Universidad Politécnica de Cataluña - UPC (TFE, trabajo final de estudios)
- Universidad de Barcelona - UB (TFE, trabajo final de estudios)
- Hemerotecas
- Blogs
- Particulares

La información recogida se clasificó según el tipo de información aportada:

- Fuentes documental
- Observación / encuesta
- Trabajos específicos del ICGC

4.1.2. INVENTARIO DE DESPRENDIMIENTOS

El inventario de desprendimientos del ICGC, que se encuentra en la base de datos de la institución, está compuesto de dos partes:

1. Carpeta digital donde hay recogida toda la información según su tipo con una pequeña descripción del evento.
2. Plataforma SIG que permite situar cada uno de los eventos geográficamente. A través la información alfanumérica vinculada a dichos eventos se pueden conocer diferentes características del desprendimiento como son la fecha (exacta o aproximada), la fuente y sus características. En esta plataforma se divide entre la zona de salida, trayecto y zona de llegada. Lo cual es importante al trabajar con los datos del inventario, concretamente con el volumen de los desprendimientos de rocas, donde se diferencia entre los de salida y los de llegada.

El conjunto de datos contiene la información de volúmenes de salida y llegada, un número de identificación, la georreferenciación, el año de ocurrencia, puede contener la fecha exacta (mes y año),

anotaciones descriptivas para cada desprendimiento de rocas e imagen del desprendimiento. En algunos casos, se proporciona información sobre la elevación del desprendimiento e informe de la visita a campo.

4.2. MUESTRA DATOS

La muestra de datos sobre los eventos de caída de rocas en Montserrat se extrae de la base de datos del ICGC en diciembre del año 2020. Los datos que se utilizarán para determinar la actividad son:

- Zona de salida: mínimo un dominio asignado
- Fecha del evento, año del evento
- Volumen en m³

Al momento de extraer la información se presentaron diversos problemas que se debieron resolver para tener una muestra completa y coherente. Las principales tareas para definir el inventario a utilizar y analizar en la obtención de las curvas de magnitud frecuencia fueron:

- Obtener el volumen de salida. Esto se realizó sumando los volúmenes de llegada ante fragmentaciones, verificando fecha y dominio en que ocurrieron los eventos. Debido a:
 - La existencia de registros con dato del punto de salida y del volumen total desprendido.
 - Registros con solo la información de llegada (zona y volumen).
- Como se ha mencionado en el ítem 2.1.1, determinar la zona de salida es complicado al momento de registrar el evento, donde los principales casos son:
 - El evento se centra donde se detuvo el bloque o los daños causados.
 - En eventos de menor magnitud con un seguimiento observacional, puede ser difícil localizar la salida del bloque.
 - Muchas veces ha pasado un tiempo desde que el bloque cayó, y es registrado, por lo que analizar la zona de salida es complejo (bloque puede haber sido removido del lugar, ya no hay evidencia de la trayectoria, etc).

En el inventario, 48 eventos se encuentran sin zona de salida, en cambio, los datos con zona de llegada son 216. Debido a que se trabajará con los datos de salida de los desprendimientos, se hizo una revisión de los dominios y se les asignó el que con más probabilidad era el origen a los eventos que no disponían de esta información.

Finalmente, después de analizar y consolidar la información, se obtuvieron 205 eventos en la muestra final de datos, donde la mayoría de los registros son de los últimos 20 años. Para mayor detalle del inventario ver Anexo C.

Los eventos de desprendimiento de rocas ocurrieron entre 1546 y 2020 (Figura 22), teniendo un mayor registro desde 2015, en 97 dominios. El creciente número de desprendimientos de rocas inventariados a lo largo del tiempo se debe a una mayor disponibilidad de datos, debido a que el 2014 se inició el Plan que ayudó a sistematizar una recogida de datos de forma continua.

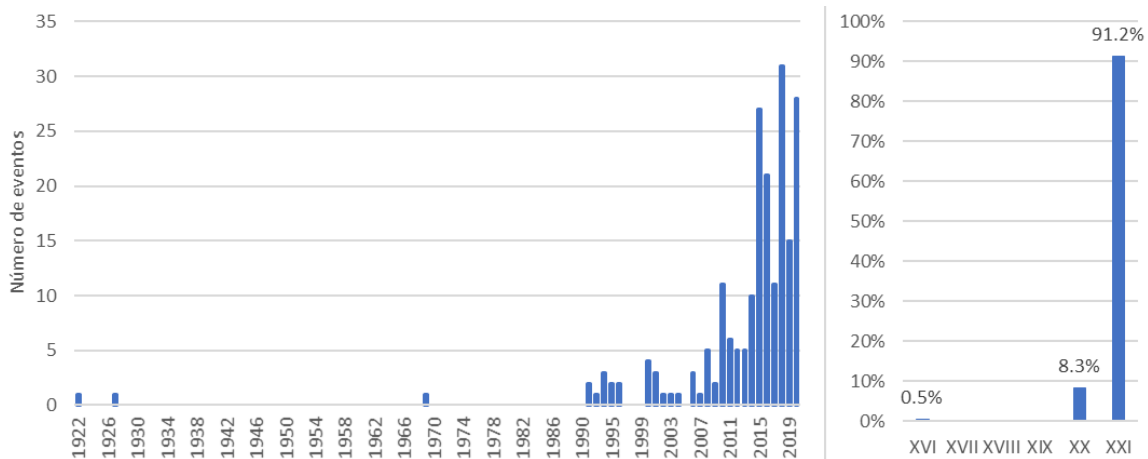


Figura 22. Distribución anual de desprendimientos de rocas sin el dato de 1546 (izquierda) y distribución en % por siglos de los desprendimientos del inventario (derecha)

Los datos del año 1546 y 1927 proceden de las encuestas realizadas. Estos dos datos fueron estimaciones del volumen gracias a las descripciones del Monje Oranies. El dato de 1922 de 100 m³, también es un dato obtenido mediante la interpretación de imágenes en Montserrat (Abadía de Montserrat). Ya los datos desde el año 2000 comienzan a ser registros más precisos gracias a trabajos de investigación (tesinas) e intervención del ICGC en el registro de eventos.

En la Figura 23 se muestra la distribución de los registros obtenidos por el ICGC según la magnitud del desprendimiento. Se puede observar que la distribución no es homogénea, en ciertas regiones se concentran registros, mientras que en otras no hay ninguno.

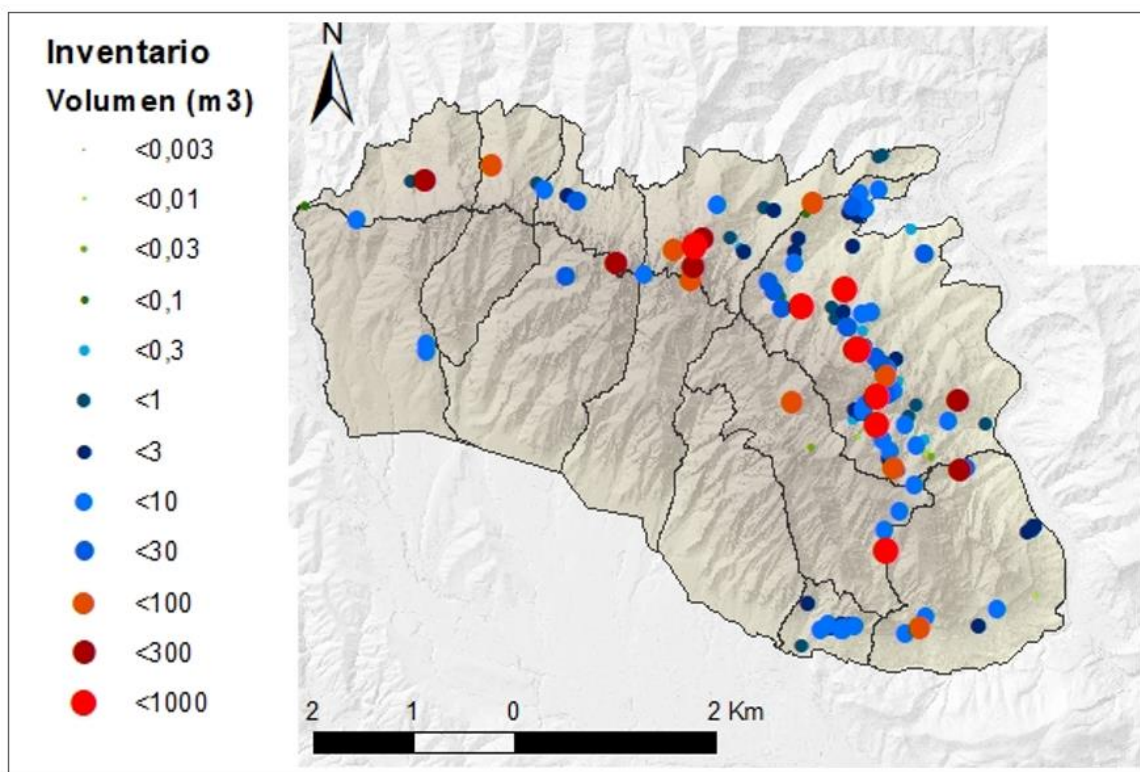


Figura 23. Ubicación de los 205 desprendimientos de roca en Montserrat según la magnitud

Si se consideran las regiones en las que se dividió Montserrat, se puede visualizar en la Figura 23 que Tebaida tiene un 51% de datos (105 desprendimientos) del total. El segundo lugar donde se han detectado más está en Coves del Salnitre con 23% (47 desprendimientos), el resto de las regiones tiene una menor cantidad de eventos que se han registrado. Esto se debe a que el ICGC dio prioridad en los registros de las zonas más frecuentadas en Montserrat, siendo estas:

- Monasterio y su aparcamiento, debido a la presencia continua de turistas y personas de la localidad.
- Coves del Salnitre, donde también se realizan visitas turísticas y senderismo.
- Cremallera, donde transita el tren que lleva a Montserrat.
- Algunas zonas de la carretera de BP 1103, donde existen registros históricos de grandes desprendimientos.

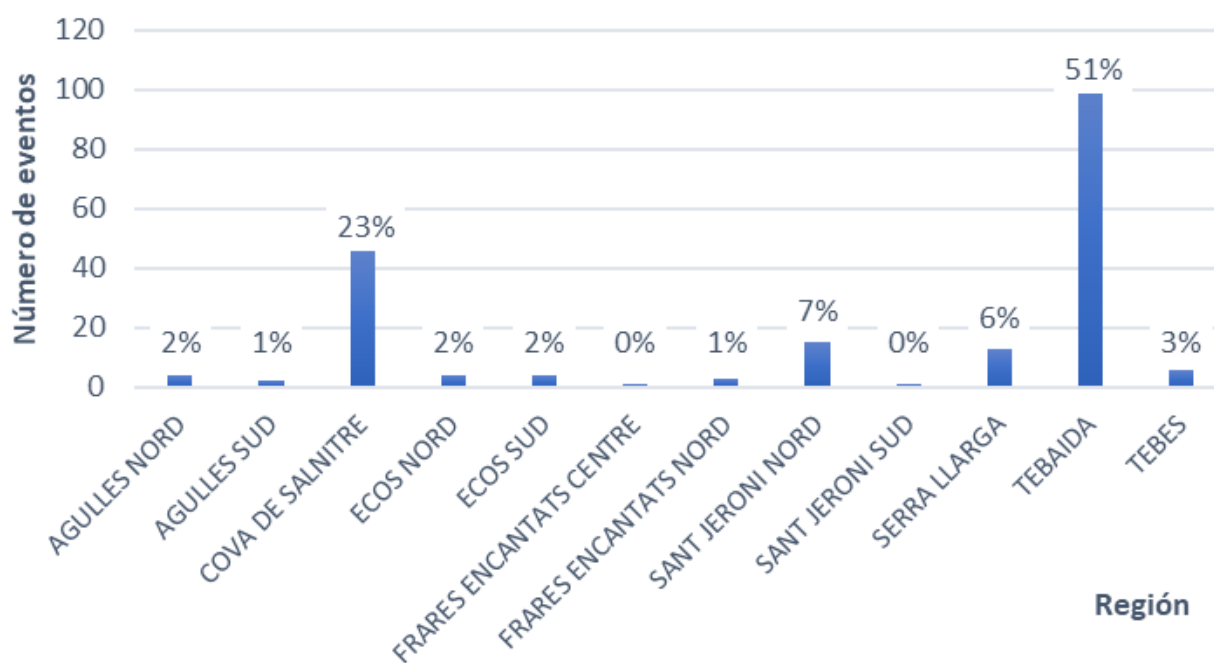


Figura 24. Distribución espacial de desprendimientos de rocas del inventario

En la Tabla 6 se muestran la distribución de los volúmenes sobre la base de un total de 205 desprendimientos de roca. Se visualiza que los mayores volúmenes están en el rango de 1 a 0,1 m³, siendo el 46% de toda la muestra.

Tabla 6. Distribución de volúmenes de desprendimientos de rocas en Montserrat

Volumen de desprendimientos de rocas (m ³)	Desprendimiento de roca (%)
<0,001	0
0,001 - 0,003	2,4
0,003 - 0,01	5,4
0,01 - 0,03	8,3
0,03 - 0,1	8,8
0,1 - 0,3	10,7
0,3 - 1	12,2
1 - 3	15,6
3 - 10	18,5
10 - 30	6,8
30 - 100	3,9
100 - 300	3,4
≥ 300	3,9

En la Figura 25 se muestra el desprendimiento de rocas de forma gráfica. Donde se visualiza que los volúmenes de 3 a 10 m³, son los que tienen una mayor frecuencia. Los volúmenes sobre 30 m³ representan un 11,2% de la muestra total, siendo un alto porcentaje debido a su magnitud.

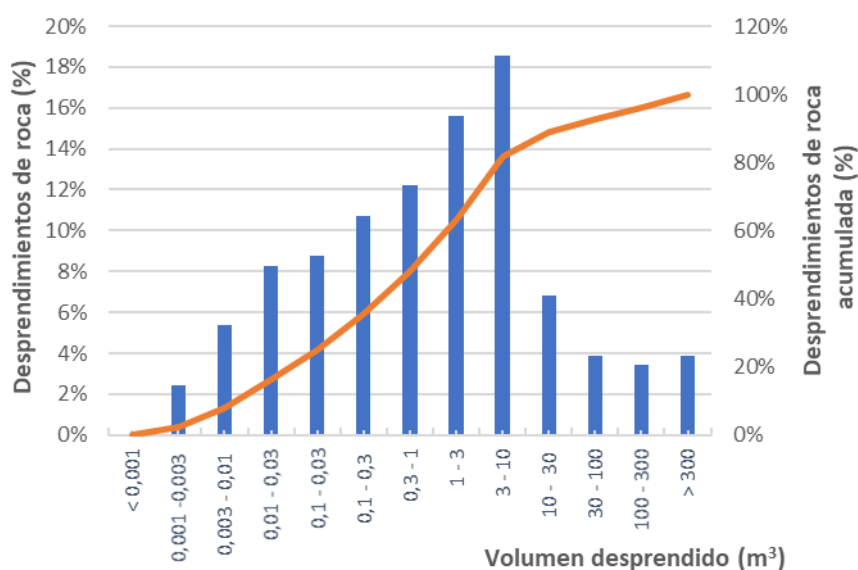


Figura 25. Frecuencia de los desprendimientos de roca, absoluta (azul) y acumulada (naranja)

En la Figura 26 se muestra de forma gráfica el porcentaje de eventos de desprendimiento en las regiones con mayor cantidad de registros, Tebaida y Coves del Salnitre. En la primera región se observa mayor número de eventos de 1 a 10 m³, 35 eventos de un total de 105. Para Coves del Salnitre, el mayor registro es de 1 a 3 m³, con un 18,6% de un total de 43 eventos. También se visualiza que no hay registros mayores a 10 m³.

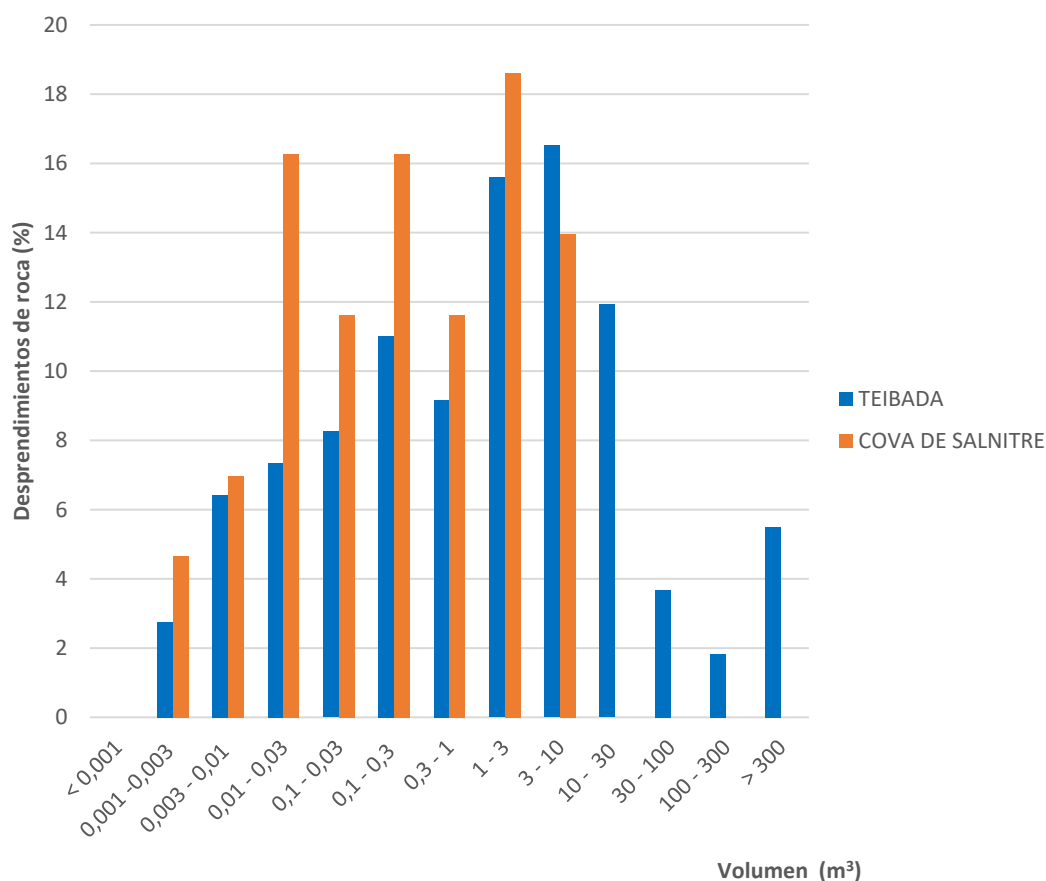


Figura 26. Gráfico del porcentaje de eventos de cada clase de volumen para Tebaida y para Covas del Salnitre

4.3. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN DEL INVENTARIO

Antes de utilizar los datos entregados por el ICGC, se realizó una evaluación de la calidad de estos, detectando inconsistencias, estandarizando valores y mejorando la información para obtener un inventario final para este estudio.

- Para documentar la calidad y determinar el nivel de precisión de la muestra. La precisión de los datos se basó en los principales parámetros de análisis: tiempo, espacio y volumen. A continuación, las clasificaciones utilizadas en el análisis de cada muestra:
 - Alta: aquellos casos donde se midió el tamaño del bloque con la ayuda de nubes de puntos 3D obtenidas con TLS (Terrestrial Laser Scanner), mediante técnicas fotogramétricas o directamente porque había acceso a la roca desprendida. Por lo que la medición es totalmente representativa. Tal como se muestra en la Figura 27, el bloque desprendido se encuentra a un costado de la carretera B 112 entre el km 4.780 y el 4.850, lo cual hace asequible a la medición directa del bloque. Su zona de salida es fácil de detectar debido a que el talud se encuentra en las cercanías del bloque desprendido. Con respecto al año en que ocurrió (2014), en la nota técnica se indica que la visita anterior no había indicios de desprendimientos, por lo que el año es calidad alta.



Figura 27. Calidad de precisión del dato alta (Nota técnica visita del seguimiento geológico de la Montaña de Montserrat, 2015, ICGC)

- Media: Donde se tiene acceso al bloque, pero es complejo medirlo, debido al gran volumen de masa desprendida. Medición parcial o mediante estimación se determinó el volumen. En la Figura 28 se visualiza un desprendimiento rocoso registrado en el aparcamiento de Montserrat, en ambas imágenes se visualiza con claridad la zona de salida, pero en ambos casos se debe estimar el volumen ya que en la imagen de la izquierda queda atrapada en la red y en la imagen de la derecha, los bloques están dispersos.



Figura 28. Desprendimiento aparcamiento Montserrat de calidad media (Nota técnica visita del seguimiento geológico de la Montaña de Montserrat, 2020, ICGC)

- Baja: Se estimó el volumen a distancia o de forma indirecta, a través de imágenes. Por lo que no hay medición, la estimación está basada sobre la visión parcial o limitada. En la Figura 29 se muestra una pared rocosa, situada a unos 200 metros por encima de la carretera B-112, donde detectó un desprendimiento de aproximadamente 10 m³. La trayectoria estimada en 35 metros aproximadamente y un depósito donde estacan algunos bloques de volúmenes de 4 m³ aproximadamente. En este caso la zona de salida es un parámetro preciso, el volumen es estimado de forma visual.



Figura 29. Desprendimiento Canal de les Àguiles de calidad media (Nota técnica visita del seguimiento geológico de la Montaña de Montserrat, 2017, ICGC)

Los datos de calidad alta representan un mayor número de desprendimientos 38% (78 desprendimientos), de calidad media 30% (61 desprendimientos) y 32% de calidad baja (66 desprendimientos).

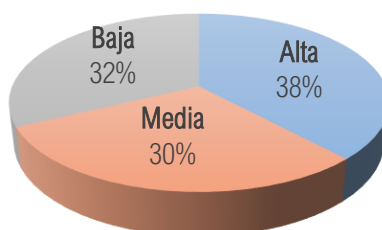


Figura 30. Gráfica de la calidad de datos del inventario

CAPÍTULO 5

OBTENCIÓN DE CURVAS MAGNITUD FRECUENCIA

5.1. METODOLOGÍA

La información de los inventarios de eventos de riesgos, en general, deben responder a 3 preguntas básicas:

- ¿Dónde sucedió?
- ¿Cuándo ocurrió?
- ¿Qué pasó?

En el caso de los desprendimientos rocosos, en la tercera pregunta interesa la magnitud del evento expresado por el tamaño del volumen de la roca.

Para la obtención de las curvas de magnitud frecuencia del presente estudio, análisis espacio – temporal, se debe contar con datos de inventario, siendo imprescindible tener para todos los eventos como mínimo la siguiente información:

- Tiempo: básicamente interesa el año para expresar la probabilidad anual de ocurrencia. No es necesario mayor detalle, debido a que no se realizará un análisis estacional de ocurrencia de los eventos, donde se exigiría saber el mes del evento. Tampoco se realizará una relación con las lluvias desencadenantes, con lo cual se necesitaría saber el día específico.
- Espacio: se plantean dos escalas de análisis, el conjunto de la montaña de Montserrat y variabilidad espacial por ciertas unidades.
- Tal como se indicó anteriormente, el área estudio abarca 3500 ha. Debido a que queremos caracterizar la peligrosidad en el conjunto de la montaña (resultado único a escala global) y a la vez, analizar su variabilidad espacial se requiere de áreas homogéneas que tengan un comportamiento similar. La unidad mínima que se utilizará es el dominio, descrito en el capítulo 3.

Para poder comparar las distintas zonas se utilizará el área de pared de la zona de salida como normalización). Como los eventos son una actividad de ocurrencia de desprendimiento (salida), se pone en relación con el espacio productor de éstos, que sería el área de pared. Por lo tanto, la frecuencia será expresada en término espacio – temporal, con relación a una unidad de tiempo (años) y de espacio (hm^2).

La metodología de trabajo se caracteriza por una serie de análisis de discretización de la muestra de datos de desprendimientos rocosos. En la Figura 31 se muestra un resumen de los análisis a realizar. A continuación, se detallan los supuestos y consideraciones de cada análisis.

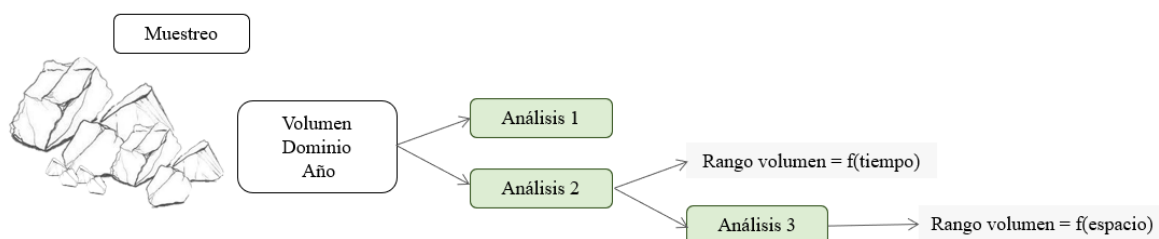


Figura 31. Resumen de la metodología aplicada al muestreo de desprendimientos

5.1.1. ANÁLISIS 1

Este análisis, al que hemos llamado 1, es general y de manera preliminar se analizan todos los datos. En el primer análisis se supone que la muestra es homogénea en tiempo, espacio y tamaño en toda su extensión. Esto es válido en los muestreos instrumentales, como en el caso del TLS, ya que:

- El inicio y final de la muestra no depende del nivel de actividad de la pared, sino que responde a la primera y última campaña realizada.
- La capacidad para detectar desprendimientos es homogénea en el tiempo de duración.
- El espacio en que se muestrea es constante a lo largo del tiempo.

En el presente estudio se consideraron dos tipos de análisis:

- **Análisis continuo:** consiste en graficar directamente todos los volúmenes junto con su frecuencia acumulada, normalizada por área de pared rocosa, y luego obtener su línea de tendencia. Es el método tradicional de la obtención de las curvas MF.
- **Análisis discreto:** este método agrupa los volúmenes de las rocas según distintas clases, que pueden interpretarse en términos cualitativos de magnitud de los desprendimientos. Las categorías de volúmenes utilizadas en el presente estudio es una división regular en escala logarítmica con paso de medio orden de magnitud. Discretizar el volumen en estas categorías significa una simplificación, cierta pérdida de precisión, pero por el contrario establece una base común que permite combinar muestras. Las divisiones son:

Volumen (m ³)	0,001	≥0,003	≥0,01	≥0,03	≥0,1	≥0,3	≥1	≥3	≥10	≥30	≥100	≥300	≥10000
---------------------------	-------	--------	-------	-------	------	------	----	----	-----	-----	------	------	--------

Posteriormente se grafica en escala logarítmica, la frecuencia anual acumulada (normalizada por el área de pared) versus el volumen en m³. Así se obtiene la línea de tendencia potencial para todos los análisis. Para analizar el ajuste de la línea de tendencia, utilizamos el coeficiente de determinación (R²). Este parámetro estima la cantidad de varianza total explicada por el modelo y su valor varía de 0 a 1. Los valores pequeños indican que el modelo no se ajusta bien a los datos.

5.1.2. ANÁLISIS 2

El análisis 2 radica en la variabilidad temporal y volumétrica de los eventos. Si el evento de desprendimiento es muy pequeño, éste puede no haber sido detectado y no hay registro de este. En cambio, si hay un volumen mayor, su periodo de observación es aumenta ya que ha sido registrado anteriormente (Hantz, Vengeon, & Dussauge-Peisser, 2003). Es importante tener en cuenta los vacíos temporales en el inventario, ya que pueden influir en los parámetros de la curva MF (principalmente en la actividad nominal).

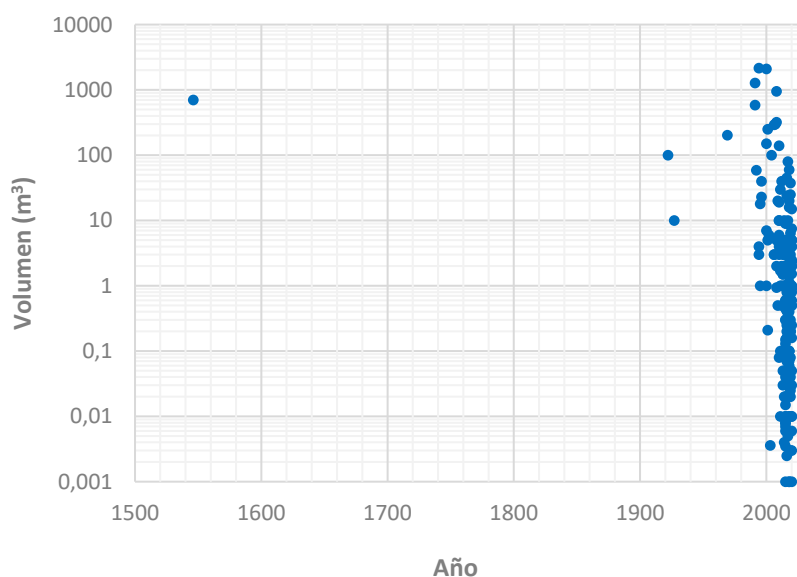


Figura 32. Datos inventario de Montserrat del volumen en m³ versus el año de su registro

Tal como muestra la Figura 32, la densidad de los datos disminuye cuando analizamos los eventos del pasado. Asimismo, se tiene mayor evidencia de los eventos pequeños en los años recientes, mientras que, para los eventos de mayor magnitud se tiene un periodo de muestra más significativo.

Para el análisis se requiere un periodo de muestreo, el cual debe tener un inicio y final. Para el presente estudio se emplearon dos consideraciones, debido a que el periodo de análisis puede ser independiente o derivado del inventario.

- **Intervalo de tiempo directo:** Utilizando las frecuencias discretizadas, se ha determinado un periodo de observación en el que se puede asegurar que se han detectado la mayoría de los eventos de aquel grupo de volumen.

$$Periodo = Año_{final} - Año_{inicial} + 1$$

Donde:

Año_{inicial}: Primer año en el que se considera que hay muestreo (incluido)

Año_{final}: Último año en el que se considera que hay muestreo (incluido)

- **Intervalo de tiempo ampliado:** es similar al método anterior, pero se determina un periodo de observación mayor, asimilando que han ocurrido desprendimientos, pero no han sido observados o controlados, no existiendo en el inventario. Por lo tanto, se puede ampliar el período de observación de las rocas de mayor magnitud:

$$Periodo = (Año_{final} - Año_{inicial} + 1) \frac{N}{N - i}$$

Donde:

N: número de eventos ocurridos dentro del periodo directo

i=1 si ambos extremos responden a fechas de eventos que delimitan la muestra,
i=0,5 si es solo un extremo y el otro es independiente (por ejemplo, el final es el tiempo presente).

La clave es definir el inicio o final de la muestra. Para los monitoreos instrumentales, se emplea la primera y última campaña, con la incertidumbre de que si hubo o no eventos en ese plazo. En cambio, en el inventario mediante observación, se retoman los eventos pasados a los registrados, por lo que el inicio de la muestra coincide con el primer evento documentado, es decir, la actividad está ligada directamente con los registros. El final de la muestra es independiente, porque es el presente año. Para estos cálculos se ha determinado utilizar i=0,5.

Un caso particular es si tenemos solo 1 evento registrado, entonces no hay base para el concepto de frecuencia o recurrencia, porque es evento único. Si tenemos un periodo de muestreo garantizado, independiente de este evento, entonces el periodo directo es el de mayor sentido. Pero si el inicio del periodo es el propio evento porque no tenemos ningún indicio de cuándo antes podía haber habido otro evento similar, y el final es el presente, una primera aproximación a la frecuencia para no sobreestimarla, se considera:

$$Periodo = (Año_{final} - Año_{inicial} + 1) \cdot 2$$

5.1.3. ANÁLISIS 3

El tercer análisis busca considerar una variabilidad temporal y espacial de los desprendimientos. Este análisis está basado en el anterior, es decir, se aplica un filtro sobre el análisis 2 en cuanto al espacio. La dependencia del volumen respecto al tiempo y espacio está acoplada en las dos variables.

El análisis 3 se basa en el nivel de observación de los volúmenes en el inventario, debido a la existencia de zonas donde visualizar e inventariar desprendimientos menores es posible, como en el arcén, caminos, estacionamientos, etc. En cambio, en zonas más altas y alejadas, estos desprendimientos pueden pasar desapercibidos debido a la vegetación y/o posible fragmentación. En ciertos casos puede que el dato del desprendimiento sea fortuito y no representar la muestra analizada. Llamaremos nivel de observación a la capacidad de cuantificar de detectar la totalidad de eventos de cierto volumen.

Para facilitar el presente análisis es necesario la subdivisión del área a estudiar. Posteriormente se clasifican estas zonas según el nivel de observación, obteniendo el área de pared para cada categoría de volúmenes. A continuación, se calcula la frecuencia acumulada, normalizada con el área de pared y periodo de observación respectivo. Finalmente se grafica en escala logarítmica, la frecuencia acumulada (normalizada por el área de pared) versus el volumen en m^3 , para así obtener la línea de tendencia y sus respectivos parámetros.

5.1.4. OTRA VISIÓN DEL ANÁLISIS

Una nueva perspectiva ayudaría en la discretización práctica de los análisis propuestos en el estudio. Los eventos estudiados en Montserrat se han caracterizado en vectores de 3 componentes discretas, Figura 33:

- Lugar, donde se discretiza al dominio de salida (1070 valores posibles para Montserrat)
- Fecha, discretizado al año debido a la falta de datos (semirrecta del pasado hasta el presente)
- Volumen, clasificado dentro de las 13 clases de rangos de volumen.

La discretización de las variables fecha y volumen es regular, en escala lineal la primera y logarítmica la segunda. La variación del espacio es irregular, conteniendo cada dominio un área de salida de desprendimientos diferente.

Con lo anterior, se puede decir que los eventos son vectores $V(d,a,v)$, Figura 33, siendo las componentes: dominio(d), año(a) y volumen(v). El inventario no cubre todo el espacio 3D, sino que la muestra del inventario puede ser considerada completa (o representativa) en parte del espacio, con interdependencia de las 3 componentes.

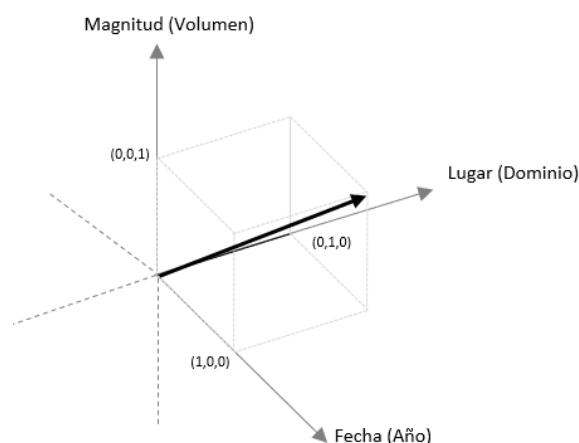


Figura 33. Representación gráfica del vector de un evento

Una matriz con valores binarios puede representar el espacio que cubre la muestra, tomando el valor:

- 1, donde se tiene un valor representativo
- 0, donde no se cuenta con muestra suficiente

Por lo tanto, se tendría para cada punto del espacio 3D del inventario, un $M(d,a,v) = 1$ ó 0 .

El análisis 1 corresponde a definir un espacio de inventario prismático, con unos rangos de cobertura para cada variable independientes entre sí.

El análisis 2 corresponde a recortar el dominio de cobertura del inventario en una proyección sobre el plano Volumen – Año, uniforme para todos los dominios. Dentro del prisma del análisis 1 se añade la condición $M_{VA}(d, a_j, v_i) = 0$ para cierta combinación de valores de volumen v_i , y año, a_j , donde no se tiene suficiente confianza de muestreo completo, aplicada a todo dominio d .

El análisis 3 corresponde a añadir al anterior un recorte del dominio de cobertura del inventario en una proyección sobre el plano Volumen – Dominio, uniforme para todos los años. A la matriz del análisis 2 se añade la condición $M_{VD}(d_k, a, v_i) = 0$ para cierta combinación de valores de volumen v_i y dominio d_k , donde no se tiene suficiente confianza de muestreo completo, aplicada a todo el tiempo “a”.

Debido a que la matriz es el resultado de la composición de las dos proyecciones:

$$M(d, a, v) = M_{VA}(d, a, v) \cdot M_{VD}(d, a, v)$$

Si el evento cumple con las 2 condiciones, es decir, $M_{VA}(d, a, v) = M_{VD}(d, a, v) = 1$, entra en la muestra para el cálculo de la relación MF.

Restaría la opción de un futuro análisis 4, haciendo que la adopción del valor de $M(d, a, v)$ como 1 ó 0 sea independiente para cada punto del espacio 3D del inventario.

5.2. APLICACIÓN A MONTSERRAT

Como se ha indicado en el capítulo 4, el inventario del ICGC no contiene toda la información (tiempo y rango de volúmenes) de eventos ocurridos en la historia de Montserrat ya que es una misión difícil, por no decir imposible. Por este motivo los datos son heterogéneos, en cuanto a tiempo y rango de volúmenes, y se debe realizar una división del área de estudio. Para las distintas zonas de estudio se hará el análisis desde distintos años y dominios.

Tal como se mostró anteriormente, el número total de eventos detectados en el inventario es de 205, y las regiones con mayor número de registros son Tebaida (105 eventos – 51%) y Coves de Salnitre (47 eventos– 23%) (Figura 19). Para la obtención de las curvas magnitud frecuencia se seleccionaron 5 zonas con los datos más homogéneos las cuales son: Coves del Salnitre, Cremallera, tramo de la carretera BP 1103, Monasterio y aparcamiento de Monasterio (Figura 34).

Las 5 zonas de submuestreo de la Figura 34, se encuentran en distintas regiones, tal como se mencionó en el ítem 3.4.2, basado en la fisiografía, pero en el mismo ámbito. Todas se encuentran en el ámbito 1, donde se encuentra la infraestructura y existe mayor exposición, que focaliza el interés de análisis y seguimiento del ICGC. Para mayor detalle de las áreas de estudio ver Anexo D.

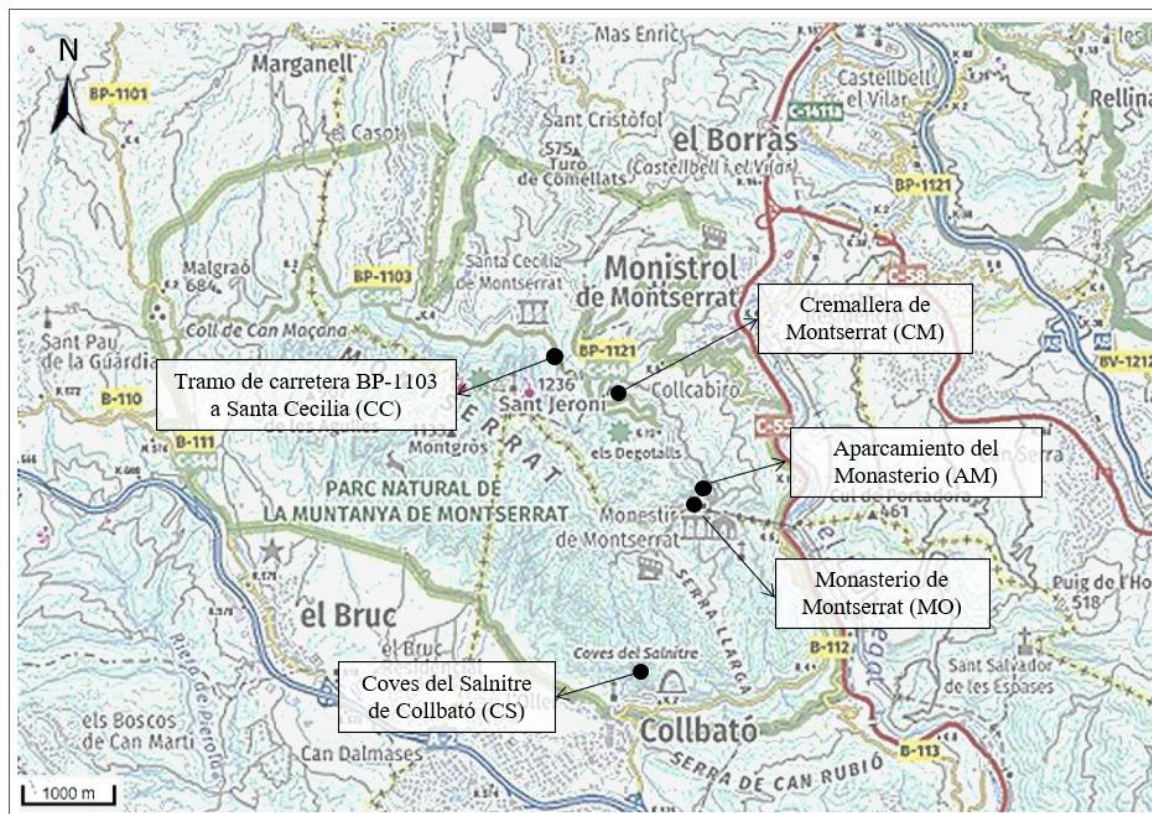


Figura 34. Zonas de estudio

En el análisis general de Montserrat, para obtener la muestra, se sumaron los eventos discretizados y se normalizaron por la suma de las submuestras ($\text{año}^{-1} \text{hm}^{-2}$) de las 5 zonas. La estrategia de esta metodología es dividir la muestra de datos total, que es heterogénea, en submuestras donde sea posible homogeneizar de manera local la información a través de los análisis 1 a 3. De este modo se recompone la muestra para todo Montserrat. Esta es la principal razón para la utilización de la base discreta en clases de volúmenes, con el objetivo conseguir unir toda la muestra.

5.2.1. ANÁLISIS 1

A partir de todos los desprendimientos detectados y descritos en el capítulo 4, se ha realizado el análisis de la relación magnitud frecuencia para las 5 zonas de estudio. En la Figura 35 se muestra la gráfica de ambos análisis, continuo y discreto, para Coves de Salnitre (Collbató), donde se demuestra que el análisis discreto tiene un mejor ajuste

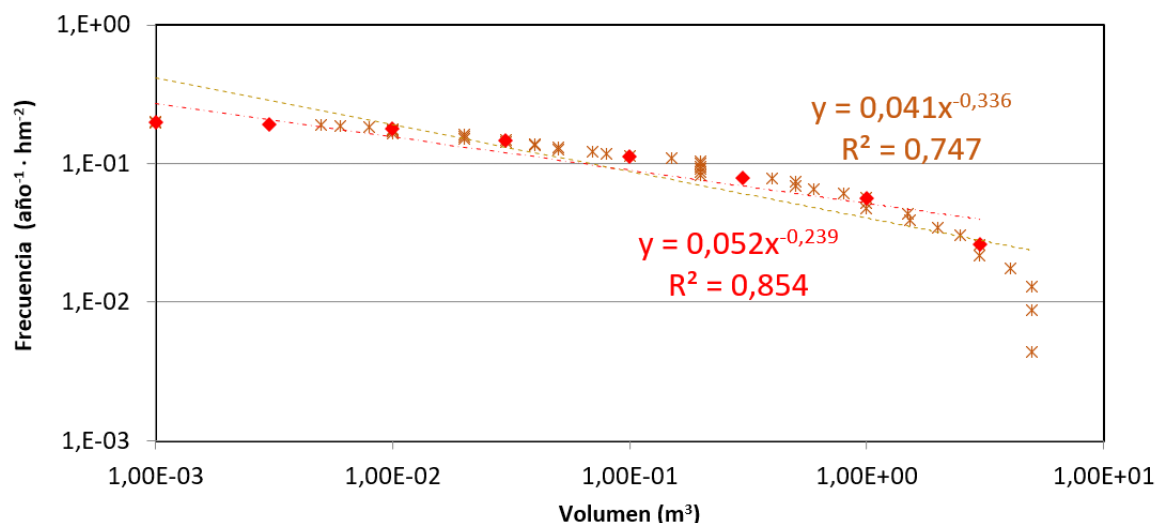


Figura 35. Relación magnitud frecuencia del Análisis 1 para Coves de Salnitre. En naranja el análisis continuo y en rojo, el discreto

Los parámetros que definen las curvas de magnitud frecuencia para todas las áreas se resumen en la Tabla 7. Se puede observar que este ajuste para las demás zonas de estudio presenta curvas similares a coves de Salnitre. El parámetro A_{st} , que refleja el nivel de actividad, es mayor en Coves del Salnitre. Por el contrario, la carretera BP1103 cuenta con menor actividad nominal. El mayor parámetro B, también lo tiene Coves del Salnitre, lo que muestra que es menos frecuente los grandes volúmenes respecto a los pequeños, lo que resulta coherente con la muestra de datos utilizada en esa área. Adicionalmente se muestra el área de pared en hectómetros cuadrados, la cantidad de eventos de la zona y el periodo utilizado estimar la relación MF.

Tabla 7. Resumen relación de magnitud frecuencia – Análisis 1

Submuestra	Área pared (hm ²)	Número de eventos	Duración (años)	Análisis*	A_{st}	B	R ²
Monasterio	15,67	18	21	C	0,012	0,267	0,809
				D	0,017	0,178	0,945
Aparcamiento Monasterio	17,40	29	20	C	0,032	0,264	0,939
				D	0,028	0,224	0,929
Coves del Salnitre	13,37	46	12	C	0,041	0,336	0,789
				D	0,052	0,239	0,884
Cremallera	30,78	19	30	C	0,010	0,321	0,927
				D	0,006	0,262	0,826
BP 1103	146,38	22	21	C	0,004	0,242	0,849
				D	0,005	0,205	0,817

*Análisis continuo (C) y discreto (D)

En la relación MF de la Figura 36, en los datos menores de 0,1 m³ se observa un cambio de tendencia (rollover). Este efecto puede deberse a la dificultad de muestrear los eventos pequeños, tanto por ser visible su desaparición en la pared, como por su corta propagación y afectación. Al eliminar los datos bajo 0,1 m³ (sin rollover) se visualiza un aumento del coeficiente de uniformidad. En el capítulo 0 se procederán a discutir los resultados obtenidos con mayor detalle.

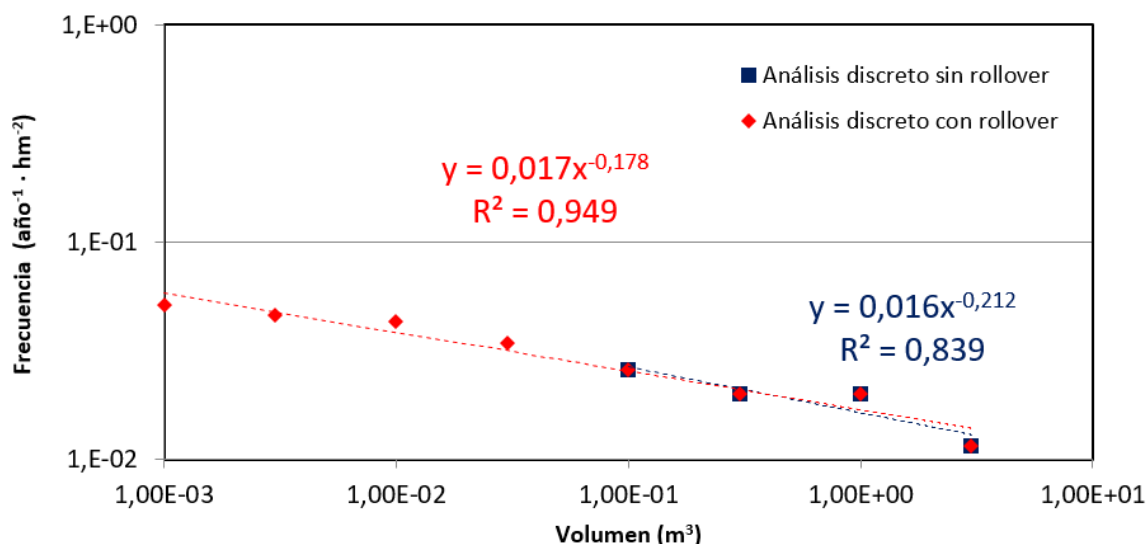


Figura 36. Relación MF con Análisis 1 con y sin rollover para el área de Montserrat

5.2.2. ANÁLISIS 2

El caso de Monasterio es un claro ejemplo de que, debido a la falta de datos en el inventario, se debe discretizar con respecto a la distribución temporal de los datos. En la Figura 37 se muestra la distribución temporal, donde existen dos eventos grandes: uno del año 1546 (700 m³), que afectó directamente al Monasterio y otro, que se registró el año 1927 (10 m³). Desde el año 2000 se cuenta con registros más continuos en el inventario.

Tal como se mencionó, el evento del año 1546 fue detectado mediante una encuesta, este dato tiene una alta precisión del año, pero muy baja precisión en su cubicación. En el evento del año 1927, también está basado en una encuesta, al igual que el dato anterior, tiene alta precisión en su datación y muy baja en la estimación de su volumen. Debido al nivel de incertidumbre que dan estos valores, los 2 eventos descritos son retirados del análisis.

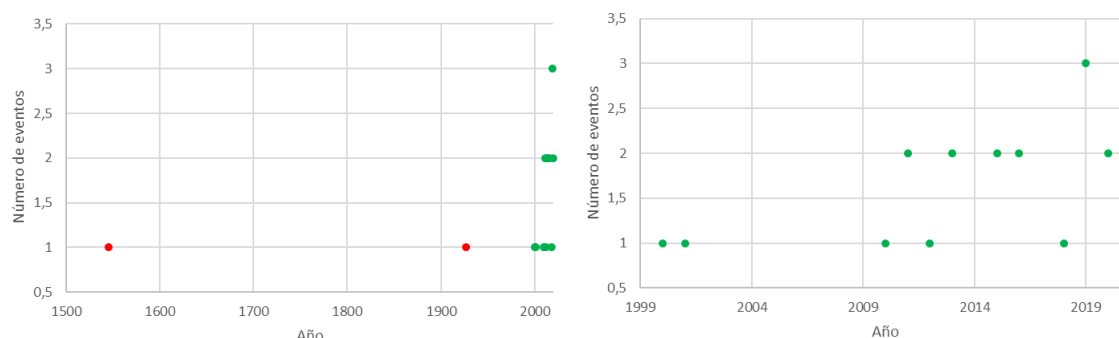


Figura 37. Distribución temporal de datos de Monasterio, con datos desde el año 1546 (izquierda) y con datos desde el año 2000 (derecha).

Para hacer este análisis, se considera el orden de magnitud a contar del primer volumen registrado en el inventario. En la Figura 38, el año 2009 en Covés del Salnitre hubo un evento de $0,5 \text{ m}^3$, por lo que se cuenta el número de eventos mayores a $0,3 \text{ m}^3$ (categorías del análisis discreto) desde ese año. En el año 2010, hubo un evento de $0,08 \text{ m}^3$, por lo que se contabilizan los eventos mayores a $0,03 \text{ m}^3$ desde ese año y así, sucesivamente. Así se realiza la diferenciación temporal de los eventos, con el objetivo de optimizar los datos del inventario, acotando los datos según lo existente.

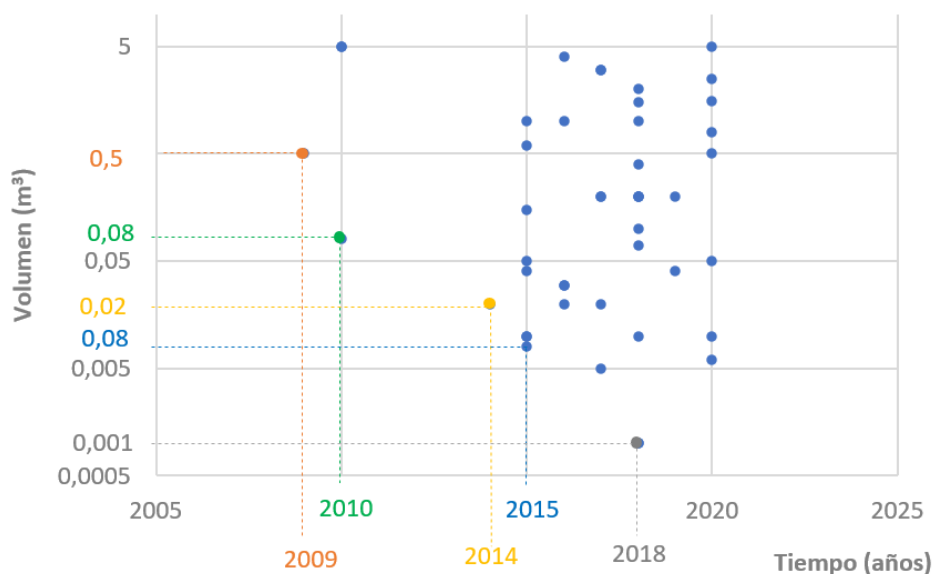


Figura 38. Distribución temporal escalonada de los eventos de Covés del Salnitre

Otra prueba de análisis temporal fue realizar una regresión lineal del tiempo en función del volumen. Se utilizará el método “escalonado” debido a que refleja directamente lo muestreado en el inventario. En la Figura 38 se observa que desde el origen del inventario contiene eventos de menor magnitud y cada vez más frecuentes. Un claro ejemplo de los inventarios históricos, a través de documentos, hemerotecas y encuestas, se registran los eventos de gran magnitud. En la Tabla 8 se resume la variación temporal, indicando el número acumulado de desprendimientos y su periodo de muestreo.

En la Tabla 8 se evidencia el decrecimiento de la frecuencia temporal, donde se divide directamente el número de eventos por el tiempo, sin incluir el área analizada. La frecuencia temporal es muy variable y distinta a lo que se muestra en la Figura 39, donde se evidencia que la frecuencia es menos variable ya que está en función del espacio – tiempo del área de estudio. En la Tabla 8, la frecuencia es igual a cero en volúmenes mayores a 10 m³ desde el año 2009 al 2020, lo que indica que no se han desprendido volúmenes de grandes magnitudes en esta zona.

Tabla 8. Variación temporal de los desprendimientos para Covés del Salnitre en términos de frecuencia acumulada en volumen.

V (m ³)	Frecuencia estadística	Inicio	Fin	Frecuencia temporal (eventos/año)
0,001	22	2018	2020	7,3
0,003	39	2015	2020	6,5
0,01	37	2014	2020	5,3
0,03	33	2010	2020	3
0,1	25	2010	2020	2,3
0,3	18	2009	2020	1,5
1	13	2009	2020	1,1
3	6	2009	2020	0,5
10	0	2009	2020	0
30	0	2009	2020	0
100	0	2009	2020	0
300	0	2009	2020	0
1000	0	2009	2020	0

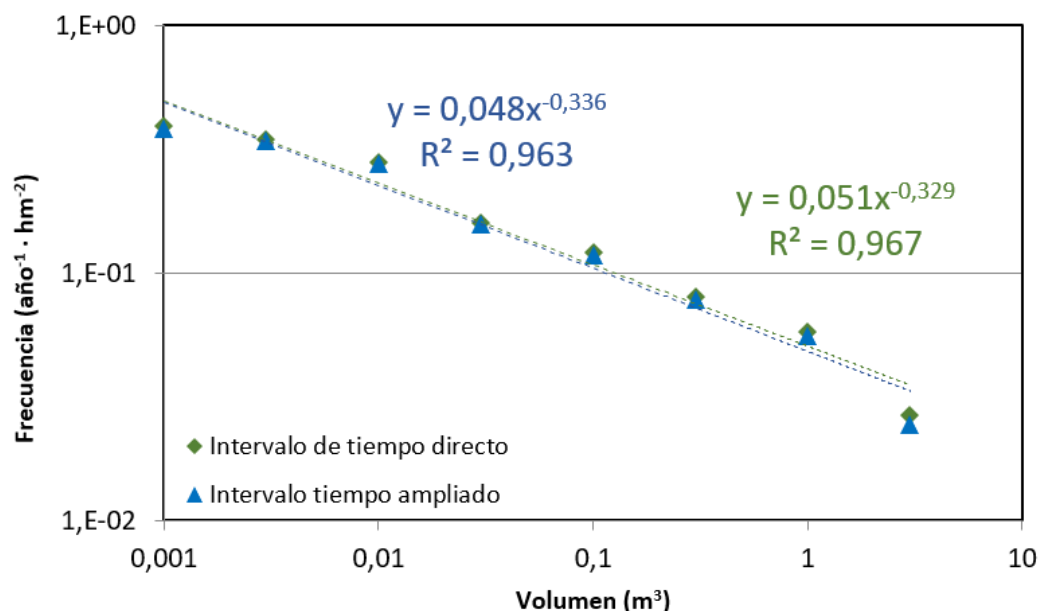


Figura 39. Curva de magnitud frecuencia obtenida con el análisis 2 (con ambos intervalos) en el área de Covés del Salnitre

Cuántos más eventos se tengan en el rango de volumen más se parecen los 2 cálculos. La diferencia surge cuando se tienen 1 o 2 eventos, y se acentúa si eso pasa para distintos rangos de volumen. En la Tabla 9 se observa que ambos métodos tienen resultados de una magnitud similar, debido a que el factor utilizado es de 2. Determinar un periodo de observación mayor es complejo debido a la falta de antecedentes y esto desviaría el objetivo del presente estudio.

Tabla 9. Comparación del análisis del método de obtención del periodo

Zona	Intervalo	A _{st}	B	R ²
Monasterio	Tiempo directo	0,009	0,323	0,923
	Tiempo ampliado	0,008	0,344	0,917
Aparcamiento Monasterio	Tiempo directo	0,041	0,326	0,966
	Tiempo ampliado	0,038	0,340	0,956
Coves del Salnitre	Tiempo directo	0,051	0,329	0,967
	Tiempo ampliado	0,048	0,336	0,963
Cremallera	Tiempo directo	0,008	0,335	0,844
	Tiempo ampliado	0,006	0,395	0,831
BP 1103	Tiempo directo	0,005	0,281	0,895
	Tiempo ampliado	0,004	0,310	0,873

5.2.3. ANÁLISIS 3

Para este análisis se clasificaron los dominios según la magnitud de los eventos que pueden ser registrados. En ciertos casos, algunos datos no se consideraron ya que se tomaron como registros fortuitos y no representativos de la muestra.

En la Figura 40 se muestra el análisis para la zona de Coves del Salnitre. El domino 942, 949 y 950 son los sectores de camino de acceso a las cuevas ubicadas en el dominio 948, por lo que tienen una mejor capacidad de detección, con registro de volúmenes pequeños (volúmenes mayores a 0,001 m³). En los dominios 938, 939 y 941 existe tránsito al estar cruzados por un tramo de carretera, la B112, y por lo tanto es posible la detección de volúmenes mayores a 0,3 m³. Al contrario, en los dominios 943, 945 y 946, menos frecuentados y con dificultad de acceso, se detectan y registran volúmenes superiores a 10 m³, tal como muestra la Tabla 10.

Los dominios 960, 961, 9632 y 963, son los niveles superiores y tienen un nivel de registro sobre 10 m³. Los volúmenes pequeños y medianos pueden quedar retenidos en rellanos y canales, y no llegan a las zonas donde pueden ser inventariadas

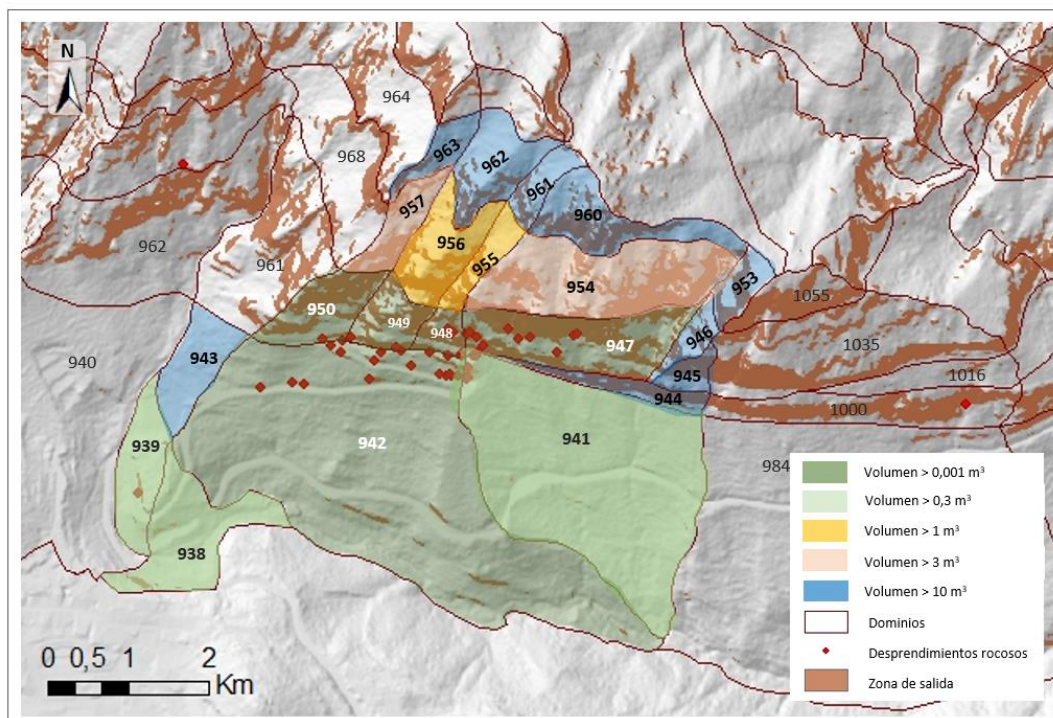


Figura 40. Discretización espacial de Covés del Salnitre según la capacidad de detección de los volúmenes desprendidos

Tabla 10. Detalle de las consideraciones de volúmenes según el dominio

Dominio	V (m ³)												
	1000	300	100	30	10	3	1	0,3	0,1	0,03	0,01	0,003	0,001
938	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17					
939	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07					
941	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25					
942	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64
944	1,14	1,14	1,14	1,14	1,14								
945	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44								
946	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30								
947	3,47	3,47	3,47	3,47	3,47	3,47	3,47	3,47	3,47	3,47	3,47	3,47	3,47
948	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
949	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
950	1,32	1,32	1,32	1,32	1,32	1,32	1,32	1,32	1,32	1,32	1,32	1,32	1,32
953	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54								
954	3,20	3,20	3,20	3,20	3,20	3,20							
955	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40						
956	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15						
957	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81							
960	1,51	1,51	1,51	1,51	1,51								
961	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28								
962	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66								
963	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25								
Suma área de pared	18,11	18,11	18,11	18,11	18,11	12,99	8,98	7,43	6,93	6,93	6,93	6,93	6,93

5.2.4. RESULTADOS

En la Tabla 11 se muestran los resultados para todas las zonas de estudio, con el volumen mínimo y máximo registrado en el inventario, el número de eventos y los parámetros de la curva magnitud frecuencia de cada análisis.

Tabla 11. Resumen de los resultados según zonas y tipo de análisis

Área	Análisis	Intervalo	Vol _{min} (m ³)	Vol _{max} (m ³)	Nº eventos	A _{st} (año ⁻¹ hm ⁻²)	B	R ²
Monasterio	1	-	0,001	700	20	0,017	0,178	0,945
	2	D	0,001	4	18	0,009	0,323	0,923
		A				0,008	0,344	0,917
	3	D	0,03		11	0,029	0,258	0,651
A		0,028				0,215	0,428	
Aparcamiento	1	-	0,003	954	29	0,028	0,224	0,929
	2	D				0,041	0,326	0,966
		A			0,038	0,340	0,956	
	3	D			28	0,058	0,392	0,958
		A				0,052	0,402	0,951
	Coves del Salnitre	1			-	0,001	5	46
2		D	46	0,051	0,329			0,967
		A		0,048	0,336			0,963
3		D	44	0,104	0,375			0,897
		A		0,099	0,381			0,893
Cremallera	1	-	0,05	1275	19	0,006	0,262	0,826
	2	D			19	0,008	0,335	0,844
		A				0,006	0,395	0,831
	3	D			17	0,014	0,449	0,951
		A				0,011	0,508	0,952
BP 1103	1	-	0,02	2100	22	0,005	0,205	0,817
	2	D				0,005	0,281	0,895
		A				0,004	0,310	0,873
	3	D				0,017	0,570	0,975
		A				0,015	0,607	0,973

(D) Intervalo de tiempo directo y (A) Intervalo de tiempo ampliado

En la Figura 41 se visualiza claramente la actividad nominal y sus variaciones para cada área, incluido la de todo Montserrat. La actividad varía de mayor a menor de la siguiente forma:

1. Coves del Salnitre
2. Aparcamiento Monasterio
3. Cremallera
4. Monasterio
5. Tramo BP 1103

La variación de Montserrat es similar a la del tramo de BP 1103. Llama la atención la variación de Coves del Salnitre donde aumenta en un 51% su actividad debido a la aplicación del análisis 3. La actividad para todas las áreas varía por debajo de un orden de magnitud, por lo que existe uniformidad.

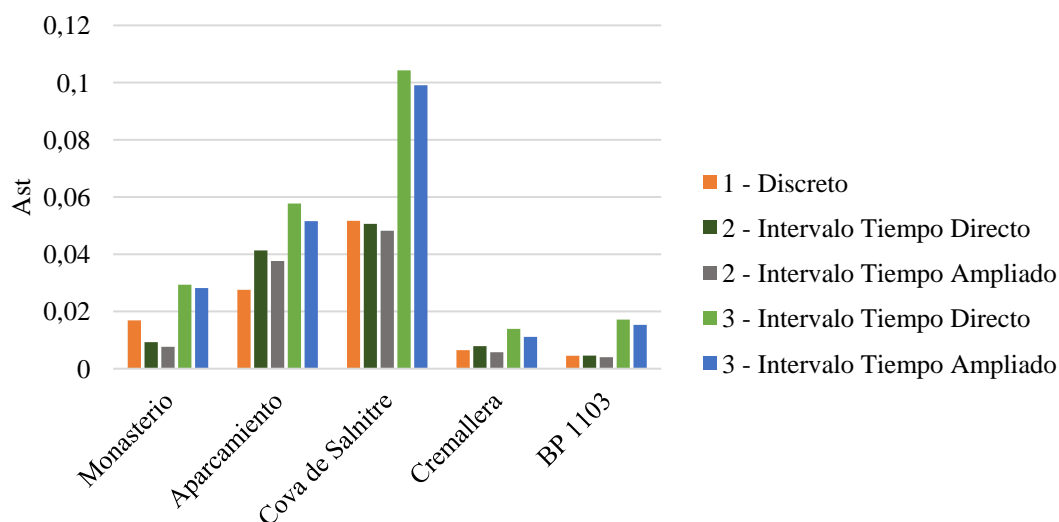


Figura 41. Actividad nominal con rollover por tipo de análisis para cada área y la suma de las 5 zonas (muestra)

En cuanto al parámetro B, tiene mayor variación en el tramo de la carretera BP1103, ya que del análisis 1 al 3, aumenta más del doble su valor. Comparar entre los análisis, no tiene sentido ya que a medida que se van discretizando las muestras, el coeficiente de uniformidad se verá afectado. En el apartado 6.4 se procederá a discutir los resultados obtenidos.

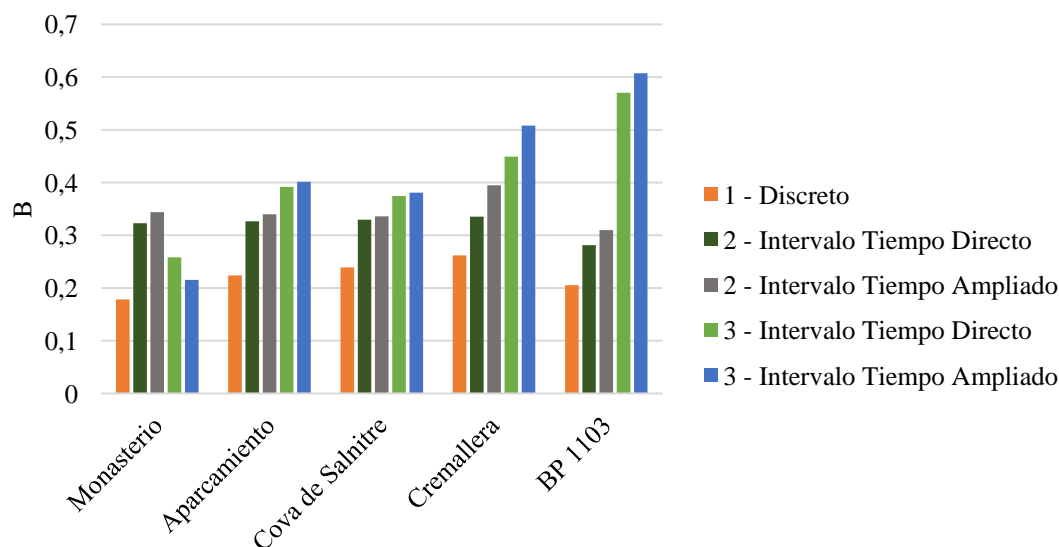


Figura 42. Coeficiente de uniformidad (B) por tipo de análisis (con rollover)

A continuación, se muestran los datos con la nueva distribución de los datos, en la que se han eliminado los datos bajo la línea de tendencia (rollover). De manera general la relación MF se ajusta mejor a volúmenes superiores a $0,1 \text{ m}^3$ (a excepción de Coves del Salnitre, ya que en esta zona se eliminaron los datos sobre $0,01 \text{ m}^3$). En la Figura 43 se muestran ambas relaciones MF para Coves de Salnitre, donde se puede apreciar que se obtiene un mejor ajuste sin los datos menores a $0,01 \text{ m}^3$.

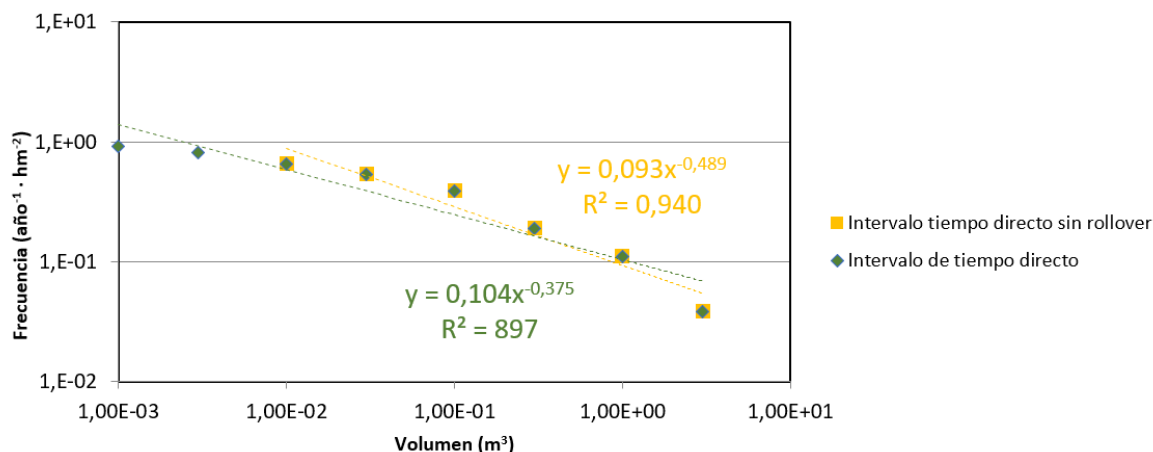


Figura 43. Relación MF de Coves del Salnitre – Análisis 3

En la Tabla 12 se visualizan los resultados de todas las zonas sin rollover. Los datos son similares a los obtenidos con rollover, donde la diferencia máxima es de 35% para el parámetro B con el análisis 2 de toda la muestra.

Tabla 12. Resumen de resultados sin rollover

Área	Análisis	Intervalo	Vol _{min} (m ³)	Vol _{max} (m ³)	A _s (año ⁻¹ hm ⁻²)	B	R ²	
Monasterio	1	-	0,1	700	0,012	0,212	0,829	
	2	D		4	0,009	0,230	0,686	
		A			0,007	0,273	0,678	
	3	D			0,025	0,336	0,800	
		A			0,023	0,350	0,791	
	Aparcamiento	1			-	0,1	954	0,028
2		D	0,047		0,388			0,988
		A	0,038	0,340	0,956			
3		D	0,071	0,478	0,980			
		A	0,065	0,504	0,987			
Coves del Salnitre		1	-	0,01	5			0,048
	2	D	0,048			0,380	0,975	
		A	0,046			0,391	0,972	
	3	D	0,093			0,489	0,940	
		A	0,088			0,499	0,937	
	Cremallera	1	-			0,1	1275	0,010
2		D	0,011	0,430	0,813			
		A	0,008	0,516	0,805			
3		D	0,013	0,430	0,918			
		A	0,011	0,505	0,922			
BP 1103		1	-	0,1	2100			0,006
	2	D	0,007			0,399	0,972	
		A	0,006			0,447	0,949	
	3	D	0,021			0,630	0,983	
		A	0,020			0,679	0,986	

(D) Intervalo de tiempo directo y (A) Intervalo de tiempo ampliado

En la Tabla 13 se observan las frecuencias obtenidas a través de los resultados del presente estudio de magnitud frecuencia en las distintas zonas donde se varió el espacio y tiempo (Análisis 3 con intervalo de tiempo directo) despreciando el rollover, para un volumen de 1 m^3 . Adicionalmente se extrapoló para todo Montserrat, considerando un área de salida sobre 48° (Tabla 4). El periodo de retorno, indica que cada 5 días ocurre un desprendimiento de 1 m^3 , en las 35 ha de montaña.

Tabla 13. Frecuencia anual de desprendimientos de 1 m^3

Área	Frecuencia (evento/ año- hm^2)	Área desprendimiento (hm^2)	Frecuencia (eventos/año)	Periodo de retorno (año)
Monasterio	0,025	9,400	0,234	4,266
Aparcamiento	0,071	8,800	0,621	1,611
Coves del Salnitre	0,093	7,400	0,691	1,448
Cremallera	0,013	21,550	0,278	3,595
BP 1103	0,021	15,800	0,336	2,979
Muestra	0,030	62,960	1,865	0,536
Montserrat	0,030	1053,000	31,186	0,032

Multiplicando por el área de desprendimiento para 1 m^3 , la menor frecuencia se encuentra en Monasterio, con un valor de 0,234 eventos/año, lo cual concuerda con el nivel de protección en el área. Luego le sigue Cremallera, donde también coincide con el nivel existente de protección debido al tránsito del tren. Desde la inauguración de la línea del tren, se ha instaurado un programa de seguimiento geológico – geotécnico con el objetivo de detectar mejoras necesarias y definir prioridades. De esto se elaboran los proyectos de defensa y se realizan intervenciones oportunas, produciéndose una mejora constante de la seguridad del Cremallera (Janeras, et. al.,2013).

Con respecto a Coves del Salnitre, con un mayor número de eventos por año, concuerda con lo visto en la zona, ya que la roca se encuentra muy degradada y, se suma al bajo grado de intervención de la pared, debido a que ya no hay tránsito vehicular. Podríamos señalar que la relación mostrada en eventos por año es acertada.

Si se realizan protecciones activas en las paredes de roca, es decir saneamiento y estabilización, se reduce directamente la actividad (Ast). Pero si se instalan protecciones pasivas, como barreras o mallas de protección, no se cambia la actividad de la pared, sino que se mejora la capacidad de detección y registro de los desprendimientos ya que quedan retenidos y son visibles al momento del registro.



Figura 44. Bloques retenidos en las mallas de Coves del Salnitre (ICGC, Notas técnicas de visita pel seguiment geològic de la muntanya de Montserrat, 2014- 2020)

En el caso de Coves del Salnitre, como se muestra en la Figura 44, donde no hay trabajos directos en la pared, sólo hay una protección pasiva. El caso contrario es el de Cremallera (Figura 45), donde existe un trabajo continuo de protección pasiva y activa, en saneamiento y desquinche de taludes y paredes.



Figura 45. Tramo del tren cremallera de Montserrat

CAPÍTULO 6

CONTRASTE CON OTROS ESTUDIOS

6.1. DISTRIBUCIÓN ESPACIO TEMPORAL SEGÚN ROYÁN Y VILAPLANA

Royán y Vilaplana (2012) trabajaron en la distribución espacio - temporal de los desprendimientos de rocas en la montaña de Montserrat. Plantearon una serie cronológica de ortofotos como fuente de datos para una mirada sistemática de detección del cambio. Este estudio utilizó los documentos técnicos del ICGC y las fotografías aéreas de marzo de 1978 (escala 1: 18.000), agosto de 1992 (escala 1: 22.000) y las ortofotos de 2009 (escala 1: 5.000) para cartografiar: 1) bloques caídos, 2) canchales y conos de derrubios y 3) trayectorias de los bloques caídos. Tal como se mencionó en el ítem 3.3, este trabajó aportó mucha información sobre la montaña de Montserrat. Analizaron las trayectorias de los bloques y su relación con la pendiente de la zona de salida. La frecuencia temporal la obtuvieron a partir del trazado de las trayectorias observadas, dividiendo el número de trayectorias entre el número de años de cada intervalo de tiempo entre eventos.

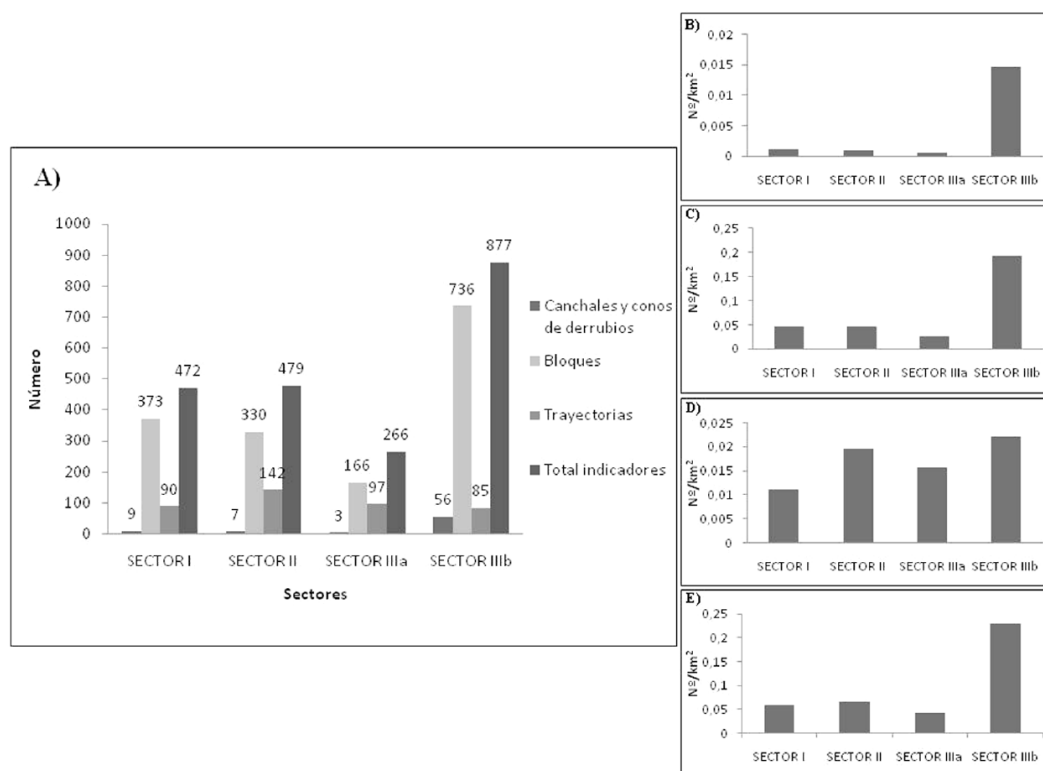


Figura 46. A) Número de indicadores fotointerpretados por cada sector; B) Densidad de canchales y conos de derrubios por sector; C) Densidad de bloques caídos de un volumen mayor a 3 m³ por sector; D) Densidad de trayectorias por sector; E) Densidad del total de indicadores por sector (Royan & Vilaplana, 2012)

Al momento de determinar la distribución temporal, se concluye que desde 1978 hasta el 2009, el número de desprendimientos rocosos ha aumentado. Comparando los indicadores interpretados en las fotos de 1978 y 1992, se verifica un aumento. Posteriormente compararon los datos del año 1992 y 2009 y también observaron un aumento de éstos, pero en menor medida que los años de 1978 - 1992. El total de los indicadores de la ortofoto del año 2009, se consideraron anómalos debido al gran número

de nuevas rocas caídas interpretadas en el sector IIIb y debido a la falta de vegetación debido al incendio de 1994. En el análisis de 1978-1992, el número de indicadores aumentó drásticamente respecto al 1992-2009. Lo que indica que ha habido algún cambio en las condiciones de la montaña que ha dado como resultado un aumento en el número de desprendimientos de rocas desde 1978.

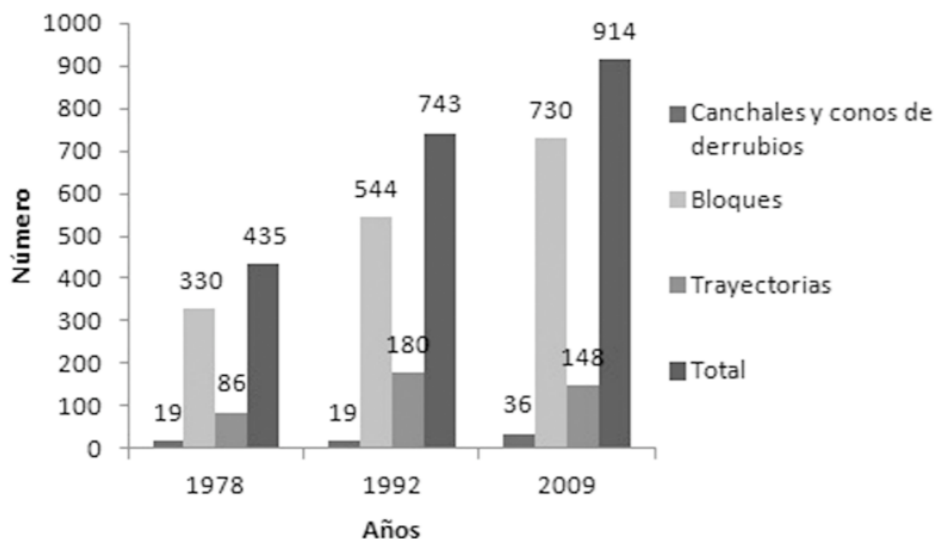


Figura 47. Diagrama con el número de indicadores foto interpretados por cada año analizado (Royan & Vilaplana, 2012)

La ventaja de este análisis que fue sistemático y tuvo cobertura homogénea en todo el macizo. La desventaja del análisis de Royán y Vilaplana es que se ve el tránsito y depósito, no se visualiza la salida de las paredes, según la escala de la ortofoto. Otra desventaja es que los eventos de pequeña magnitud no pueden verse y que se limiten localmente la fotointerpretación, separados por años. Lo importante del análisis realizado por Royan y Vilaplana, es que permitieron un análisis sistemático de eventos a partir de desprendimientos rocosos de 3 m³.

6.2. ANTECEDENTES ICGC

Uno de los objetivos del Plan de Mitigación del Riesgo Geológico la Montaña de Montserrat (PMRGM) es evaluar la peligrosidad de los desprendimientos con diferentes métodos. En el informe titulado “Cálculo de las relaciones de magnitud frecuencia de los desprendimientos rocosos del macizo de Montserrat” (ICGC, AP-0097/15, 2015) se exponen la procedencia de los datos del inventario y la metodología de los cálculos obtenidos. En la Figura 48 y Tabla 14 se muestran los resultados obtenidos por el ICGC, donde la zona de aparcamiento es la que muestra una mayor frecuencia de todas. El coeficiente de uniformidad varía de 0,386 a 0,681 y el ajuste sobre 0,85 para las seis relaciones MF.

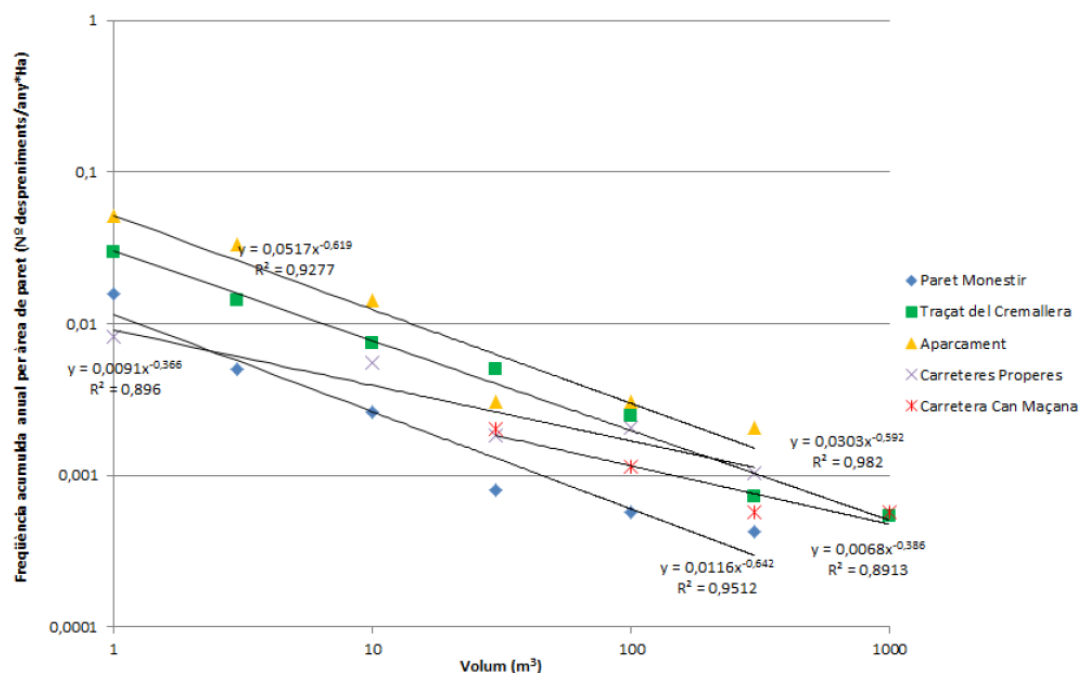


Figura 48. Distribución Magnitud-Frecuencia Acumulada de volúmenes de salida a Montserrat por medio de los datos de inventario (ICGC, AP-0097/15, 2015)

Tabla 14. Leyes potenciales inversas ajustadas a cada dominio – datos de inventario (ICGC, AP-0097/15, 2015)

Zona	Expresión	R ²
Pared del Monasterio	$F(x>X) = 0,0116 x^{-0,642}$	0,9512
Trazado del Cremallera	$F(x>X) = 0,0303 x^{-0,592}$	0,982
Aparcamiento	$F(x>X) = 0,0517x^{-0,619}$	0,9277
Carreteras cercanas	$F(x>X) = 0,0091 x^{-0,619}$	0,896
Carretera Can Maçana	$F(x>X) = 0,0068 x^{-0,386}$	0,8913
Global	$F(x>X) = 0,0252 x^{-0,681}$	0,9778

En el mismo informe también se presentan las relaciones de magnitud frecuencia para los datos obtenidos con TLS, Figura 49 y Tabla 15, y se evalúan con bloques desprendidos entre 0,001 y 0,3 m³, para paredes de las zonas de Degotalls (norte y este) y Monasterio. Para el primer caso también se generó la relación uniendo ambas paredes, norte y este.

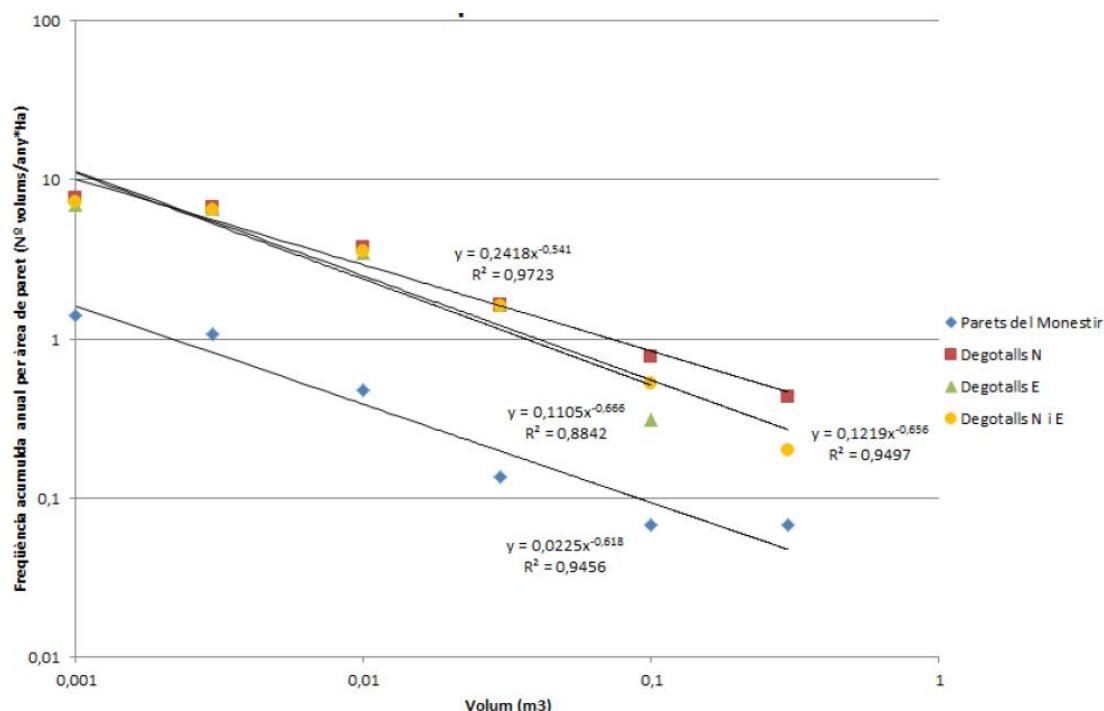


Figura 49. Comparación de las distribuciones Magnitud-Frecuencia Acumulada de volúmenes de salida de las paredes de Degotalls Norte y Este (por separado y global) y de la pared del Monasterio construidas mediante los datos adquiridos con el Láser Escáner Terrestre (ICGC, AP-0097/15, 2015)

Tabla 15. Leyes potenciales inversas ajustadas a cada dominio - datos TLS (ICGC, AP-0097/15, 2015)

Zona	Expresión	R ²
Pared del Monasterio	$F(x>X) = 0,0225 x^{-0,618}$	0,9456
Degotalls N	$F(x>X) = 0,2418 x^{-0,541}$	0,9723
Degotalls E	$F(x>X) = 0,1105^{-0,666}$	0,8842
Degotalls N + E	$F(x>X) = 0,1219 x^{-0,656}$	0,9497
Global	$F(x>X) = 0166 x^{-0,640}$	0,9873

6.3. CAMPAÑAS TLS

El ICGC realiza campañas semestrales con TLS en distintos puntos de Montserrat, concretamente desde el año 2011 en Monasterio y 2007 en Degotalls. La periodicidad de las campañas empieza el 2014 con el plan de mitigación. En la Figura 50 se observan los sectores donde se realizan.

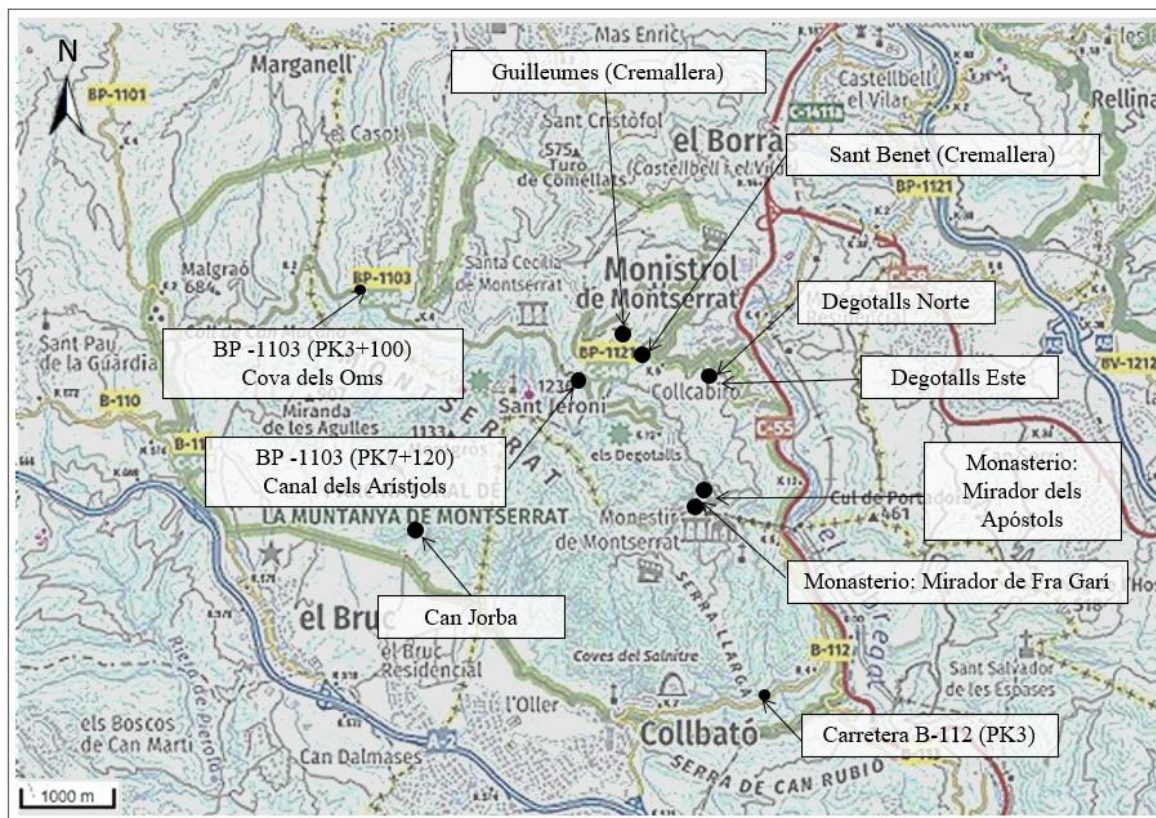


Figura 50. Sectores campañas TLS realizadas por el ICGC

En la Tabla 16 se presenta un resumen de los volúmenes desprendidos detectados en cada sector y el área de la zona donde se realiza el escaneo. Los volúmenes detectados van desde 0,0002 m³ hasta 785,97 m³.

Tabla 16. Resumen datos TLS de las campañas TLS del ICGC

Zona	Área ventana (hm ²)	Periodo (años)	Número eventos	Vol _{max} (m ³)	Vol _{min} (m ³)	Tasa (eventos/año)
Degotalls N+E	3,06	12,56	357	785,97	0,0003	28,4
Monasterio	3,57	8,79	162	0,4831	0,0002	18,4
Guilleumes + Sant Benet	1,83	3,36	19	0,1676	0,0016	5,6
Collbató + Can Jorba	2,32	3,82	21	0,1672	0,0006	5,49

En la Tabla 16 se muestra que Degotalls tiene una mayor actividad, obteniendo el número de eventos por el periodo en años, de 28,4 eventos/año, luego Monasterio con 18,4 eventos/año y finalmente, con 5 eventos/año, las demás áreas.

En cuanto a los volúmenes de roca desprendidos, en la Figura 51 se observa la distribución de los volúmenes desprendidos en relación con el orden de magnitud. La mayoría de los eventos detectados son de pequeña magnitud, siendo el 61,9% de ellos de magnitud 10⁻² (de 0,001 a 0,1 m³) y el 18,9% de magnitud 10⁻¹ (de 0,1 a 1 m³), abarcando estas dos magnitudes el 80,9% del total. Del resto de los eventos, de magnitud 10⁻³ es de 14,6% y el 4,4% son mayor a 1 m³.

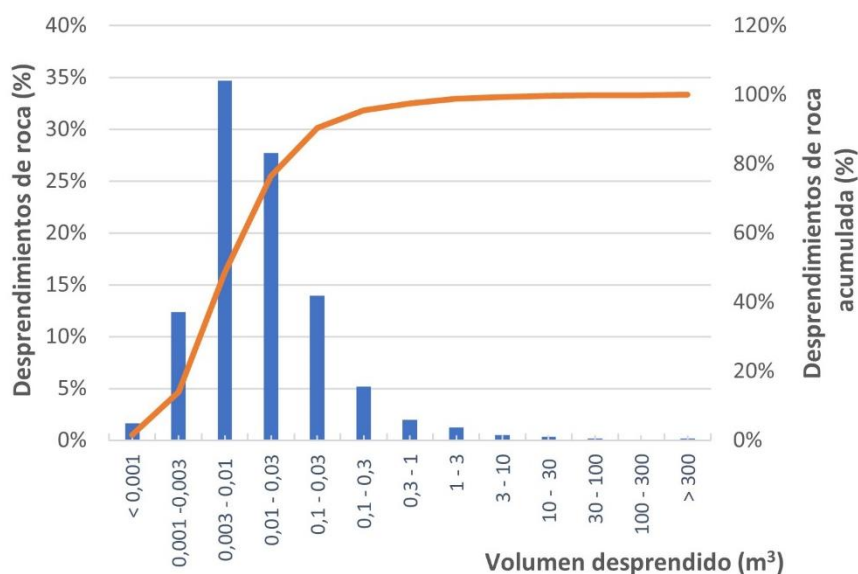


Figura 51. Frecuencia de los desprendimientos de roca del TLS, absoluta (azul) y acumulada (naranja)

El número total de desprendimientos detectados es de 559 y la zona con mayor número de desprendimientos es la Degotalls, en el aparcamiento del Monasterio. Como la duración de los periodos entre campañas no siempre es la misma, el número de desprendimientos acumulado en cada periodo puede no ser indicativo de actividad real.

A partir de la obtención de los desprendimientos detectados y descritos anteriormente, se realizó el análisis de Magnitud Frecuencia para los puntos de monitoreo. Estas curvas tienen mayor capacidad de detección de eventos pequeños, ya que sus magnitudes abarcan desde 10^{-4} hasta 10^2 m³, teniendo seis órdenes de magnitud de diferencia entre el menor y mayor evento. Por tanto, se puede afirmar que se tiene más fiabilidad de que no pasen inadvertidos estos pequeños volúmenes con las campañas TLS.

Disponer de registros de alta magnitud es muy aleatorio. Esto se debe a que las campañas TLS muestrean una pared limitada en un tiempo específico. Sólo en un largo tiempo de monitoreo y muchos emplazamientos se lograría una capacidad de muestreo suficiente para tener mayor probabilidad de detectar estos registros de mayor magnitud. En la muestra analizada, se cuenta con un evento de 785 m³ registrado con TLS. Esto fue gracias a la rotura progresiva de tres fases. La segunda rotura fue dañina y motivó la campaña con TLS, permitiendo el registro de la tercera rotura. Las áreas de campaña, a excepción de Degotalls, tienen eventos máximos de 0,4 m³, acordes al muestreo registrado.

Según Blanch, et al. (2017) el monitoreo de TLS permite detectar fuentes de desprendimientos de rocas que de otro modo serían indetectables, obteniendo inventarios de desprendimientos de rocas donde el 90-95% de los desprendimientos tienen volúmenes <0.1 m³. Gracias al análisis de densidad de desprendimientos rocosos y su distribución de volúmenes, se revelaron las zonas con mayor actividad. Esto permite priorizar las labores de vigilancia y protección en Montserrat. Otro aporte del monitoreo con TLS, fue la detección de bloques inestables en Degotalls N, lo cual fue crucial para realizar el diseño e implementación de elementos de protección para gestionar los riesgos en una zona con un alto nivel de exposición.

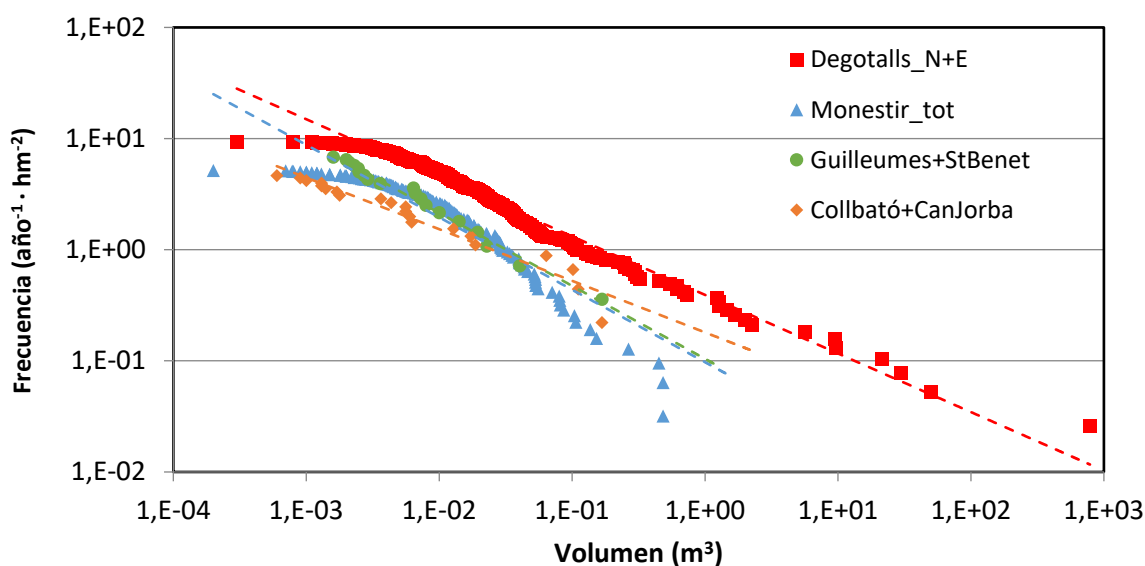


Figura 52. Curvas magnitud frecuencia obtenidas con el registro de TLS

La distribución de los datos se ajusta a la ley potencial negativa mediante los parámetros de la Tabla 17.

Tabla 17. Relación magnitud frecuencia campañas TLS

Zona	A_{st}	B	R^2
Monasterio	0,097	0,652	0,875
Guilleumes + Sant Benet	0,047	0,656	0,986
Collbató + Can Jorba	0,092	0,464	0,943
Degotalls N+E	0,391	0,527	0,977

6.4. DISCUSIÓN

En general, el análisis 1 realizado en este trabajo, que es más sencillo y directo, e infravalora la actividad del macizo. A medida que se varía el tiempo y espacio, se revela un aumento en la actividad que se traduce en un mayor nivel de peligrosidad. Cuando se realizaron los análisis 2 y 3, hubo un aumento los parámetros A_{st} y B en todas de las zonas de estudio.

Del análisis 1 al 2, de variación temporal, hay un leve aumento de A_{st} , donde la mayor variación es del aparcamiento, de 0,028 a 0,041. A medida que se va variando en espacio, es decir, del análisis 2 al 3 tiene un promedio de 150% al aumentar el parámetro A_{st} en las cinco submuestras. El mayor aumento es el tramo de la carretera BP 1103, de 0,005 a 0,0017, y en la menor, en aparcamiento de 0,041 a 0,058. Esto se debe a que los dominios fueron filtrados según el poder de visualización en el inventario. En Cova de Salnitre, que aumenta de 0,051 a 0,104, las áreas de acceso a algunas zonas y la misma vegetación dificultan en las visitas a campo del ICGC la recogida de datos para actualizar el inventario. Por lo mismo, al realizar el análisis 3, de variación espacial, se disminuye considerablemente el área de los posibles desprendimientos.

El coeficiente de uniformidad (B), tal como se mencionó, refleja la uniformidad de los volúmenes en estudio. Si el exponente es menor, implica que un gran evento es poco más infrecuente que un evento pequeño. Si B es mayor implica que un gran evento es mucho más infrecuente que un evento pequeño. Un coeficiente B notablemente mayor implica que un gran evento es mucho más infrecuente que un evento pequeño. Si bien el parámetro B, tiene una variación de la misma magnitud, pero en una escala logarítmica en ambos ejes. Este parámetro no será comparado entre las submuestras ya que es muy variable debido a la escala y condiciones geológicas de cada área.

Todos los análisis muestran un ajuste sobre 0,8 a excepción del análisis 3 de la submuestra de Montserrat. Con esta discretización de volúmenes debido al espacio y tiempo se disminuye el número de eventos. Este comportamiento sorprende, ya que, al disminuir los puntos, es frecuente que el ajuste sea mejor (aumentando). En la Figura 53 se resume la variación de R^2 para el caso con rollover. Para el caso general se muestra un buen ajuste para los 125 datos.

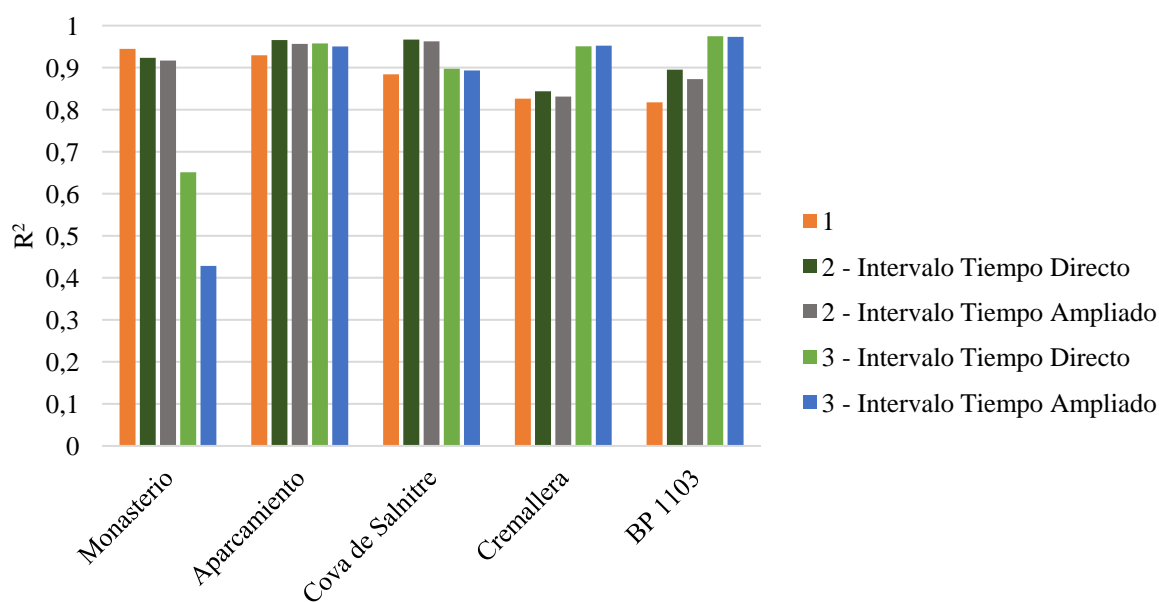


Figura 53. Variación de R^2 de las 5 submuestras al aplicar los distintos análisis

En la Figura 54 se muestra el nivel de peligrosidad obtenido con los distintos análisis. Si bien existe un aumento o disminución de los parámetros A_{st} y B, se compensan con cada análisis, disminuyendo a medida que se varía el espacio y tiempo en cada zona.

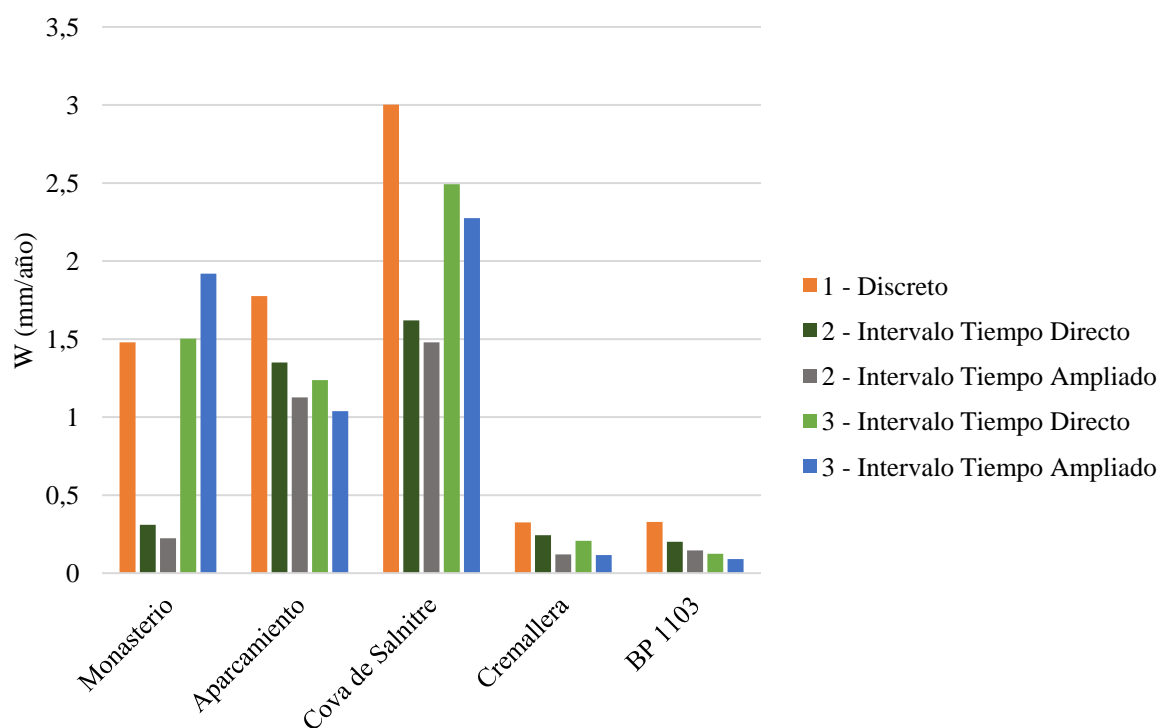


Figura 54. Tasa de retroceso (W) para las 5 submuestras

Para cada submuestra se ha seleccionado el ajuste óptimo obtenido, el cual es el ajuste más cercano al real. A medida que se han realizado los análisis del 1 al 3, con el objetivo de refinar el tiempo y espacio, no tiene por objetivo tener distintos casos para escoger, sino conseguir el ajuste óptimo. Para el presente estudio, debido a que no se cuenta con los ajustes reales, se debe buscar un equilibrio entre los distintos métodos de monitoreo. Con la relación MF se busca acercarse a la realidad, con la capacidad de muestreo que tiene el inventario, sacando máximo provecho de la muestra.

De manera general, el resultado óptimo se ha obtenido con el análisis 3 con el intervalo de tiempo ampliado y sin el efecto de rollover. El coeficiente de ajuste ha ayudado a mejorar la elección del método, pero no ha sido el parámetro determinante.

Resumiendo, el ajuste óptimo se define por el rango de volúmenes:

- V_{\min} (según datos y recorte de rollover)
- V_{\max} (categoría superior para la que se tiene observación)

En la Figura 55 se muestra el resumen de los parámetros B del análisis con el ajuste óptimo, estudio del 2015 y con los datos del TLS (2015). Para el análisis global, el número de registros desde el 2016 representa un 51% de datos de inventario, por lo que existe coherencia en el coeficiente de uniformidad. Por lo tanto, la muestra desde el año 2015 se ha duplicado, pero de manera global mantiene el parámetro B. Se puede concluir que se obtuvo una buena caracterización global del macizo. Se consolida un valor B de 0,631 a 0,681 para Montserrat.

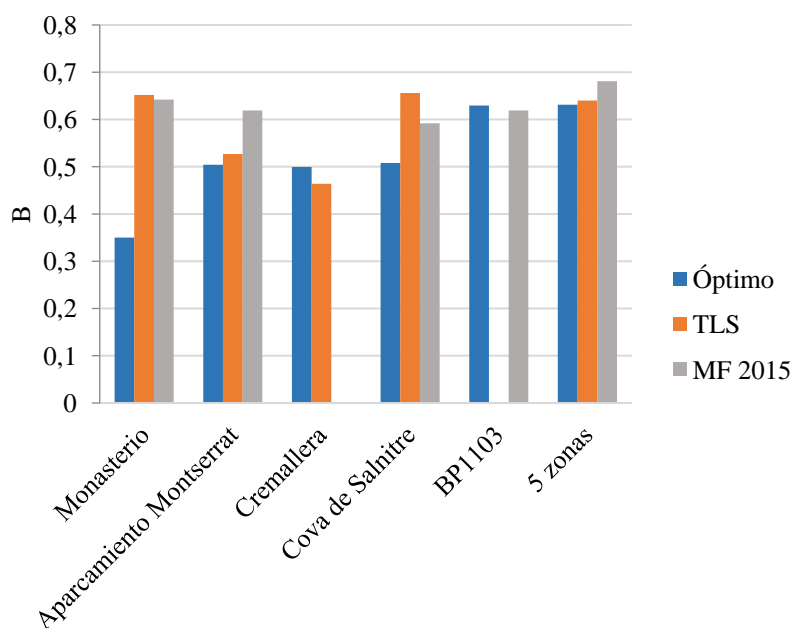


Figura 55. Resumen parámetros B obtenidos con distintos estudios

6.4.1. MONASTERIO

En el caso de monasterio, tal como mostró la Figura 32, un tema relevante fueron los vacíos temporales en la muestra. Se plantearon 3 casos para el segundo análisis:

- Con todos los datos, incluyendo dato del 1546 (el más antiguo)
- Un siglo de datos (desde 1927)
- Inventario más acotado (desde el año 2000)

Debido a este análisis, se dimensionaron los posibles efectos de intentar aprovechar todos los datos para el análisis. En primera instancia utilizar todos los datos dio un buen ajuste, pero posteriormente perjudicaron el análisis, ya que las hipótesis fueron falsas. Los registros aislados del año 1546 y 1927, están por debajo de la línea de tendencia, lo cual aumentan la pendiente y disminuyen el valor de la actividad nominal. Por lo que se concluye que la falta de datos de desprendimientos rocosos de grandes volúmenes, no son representativos del periodo que su datación nos llevaría a considerar.

En el tercer análisis, tomando los datos desde el año 2000, discretizando los dominios donde se visualiza un submuestreo de los volúmenes pequeños. Al momento de eliminar el rollover, se aumenta 1,6 veces el valor de B. Esto es contradictorio con la función de distribución acumulada F_{st} , que tiene que ser uniformemente decreciente por definición. Debido a las discretizaciones realizadas en el análisis 2 y 3, donde se hace la base de muestreo variable, el ajuste óptimo obtenido corresponde a los parámetros:

- $A_{st} = 0,023$
- $B = 0,35$

Con todas condiciones y filtros impuestos, se perdió la calidad del ajuste, disminuyendo a $R^2 = 0,791$. Adicionalmente, el ajuste es válido para un rango acotado de volúmenes (de 0,1 a 3 m³), ya que al momento de extrapolar los valores el nivel de incertidumbre aumenta.

Utilizando las campañas de TLS, los resultados son completamente distintos:

- Ast = 0,097
- B= 0,65

La actividad nominal aumenta 4 veces su valor y el coeficiente casi duplica su valor, con una correlación mejor ($R^2 = 0,875$). Al eliminar el rollover del TLS la pendiente aumenta.

Debido a la diferencia de la información obtenida, no es recomendable unir ambos métodos. Con el TLS, se muestra una actividad frecuente de desprendimientos de M3, con cierto rollover bajo los $0,005 \text{ m}^3$, debido a las limitaciones instrumentales. El M2 también es representado por el TLS, pero falta tiempo de muestreo para que el M1 sea representado. En el sector de Monasterio, se visualiza sensiblemente reducida la pendiente, esto se debe a la presencia de paredes monolíticas y agujas redondeadas.

Con el inventario, no se muestra actividad del mecanismo M3, por lo que no se registran eventos de este tipo. Con este método de registro, se registran M2 y algunos eventos menores de M1 (como el de diciembre 2010, que no está en el TLS por ser un registro posterior).

Debido a lo mencionado anteriormente, con ambos métodos de registro, los ajustes obtenidos son distintos. Por lo que la actividad muestreada es distinta con TLS e inventario, siendo visiones parciales de un comportamiento mixto. Una hipótesis es que cada mecanismo tiene una relación MF por su naturaleza, suponiendo:

- Para rangos crecientes de volúmenes, se ajusta linealmente.
- Solapando los 3 mecanismos, puede provocar una ondulación cuando son sumadas las relaciones MF.
- La pendiente varía disminuyendo para cada mecanismo (de 0,7 a 0,3)

La actividad observada con inventario y TLS se observa en la Figura 56, donde la actividad observada es la suma de todo (línea de puntos en rojo).

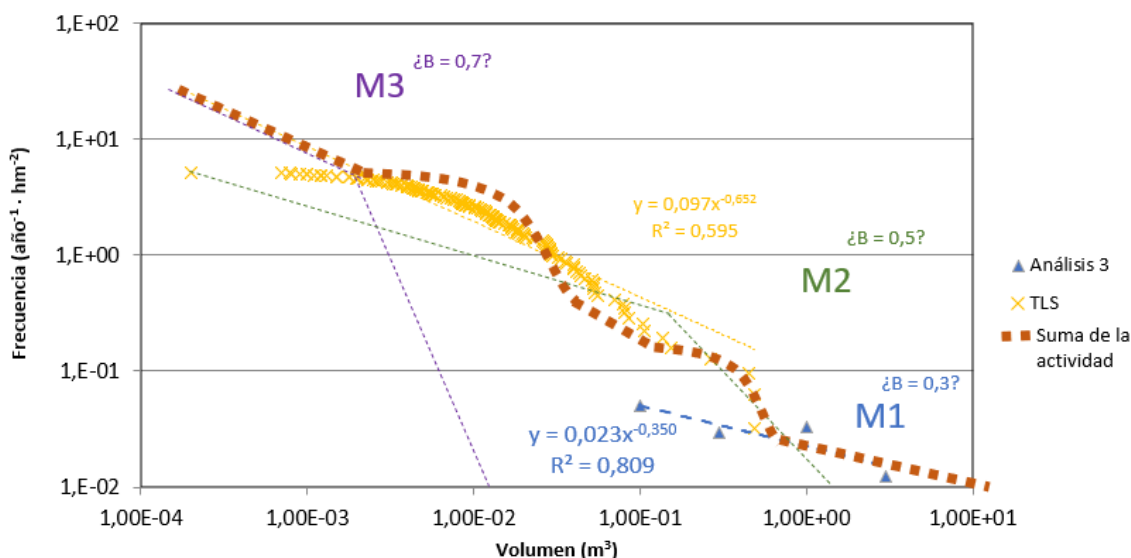


Figura 56. Suma de la actividad obtenida con el inventario y TLS

Para mejorar los parámetros del presente estudio se recomienda registrar los eventos con un nuevo atributo, el cual describa el tipo de mecanismo del desprendimiento (M1, M2 o M3). El objetivo es enlazar esta información con los ajustes de las relaciones MF y verificar la hipótesis mencionada anteriormente.

6.4.2. APARCAMIENTO MONTSERRAT

Con el primer análisis, se observa claramente en la Figura 57 el efecto “rollover” en los pequeños eventos, ya que no se encuentran bien registrados en el inventario. Para el aparcamiento se cuenta con un total de 29 desprendimientos para un muestreo total de 20 años y 9 dominios de registro. Los volúmenes más representativos son sobre 10 m³, lado derecho de la línea de tendencia de la Figura 57. Los parámetros de ajuste, con análisis continuo y discreto, representan la cota inferior de los parámetros Ast y B.

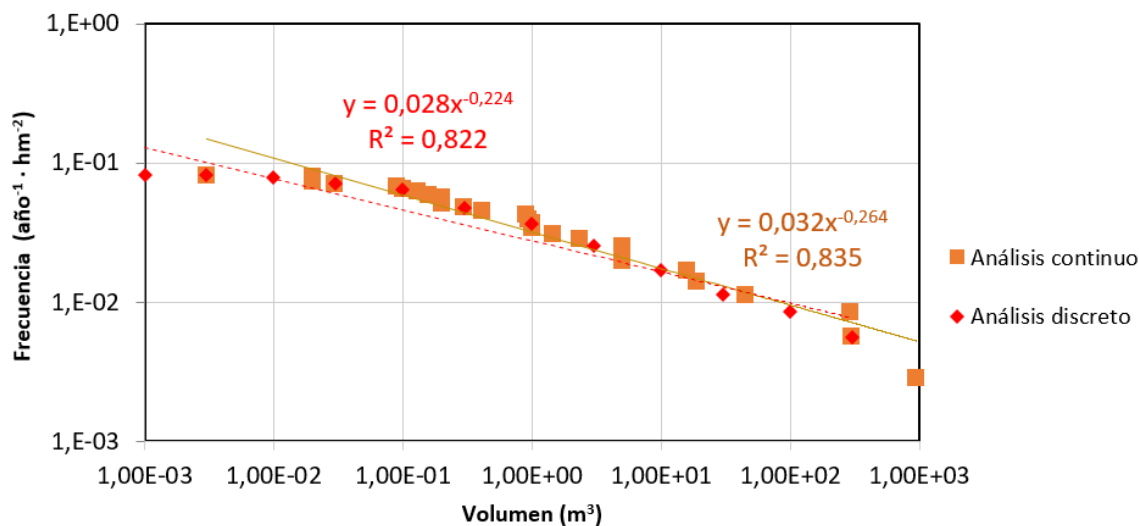


Figura 57. Relación MF de aparcamiento de Montserrat con el análisis 1

Con el segundo análisis, mejora el ajuste significativamente. Tal como muestra la Figura 58, se visualiza claramente los datos según la discretización realizada con este análisis. A medida que se intenta recuperar el registro de actividad del pasado, se va perdiendo la memoria de los eventos pequeños y solo llega la de los mayores volúmenes.

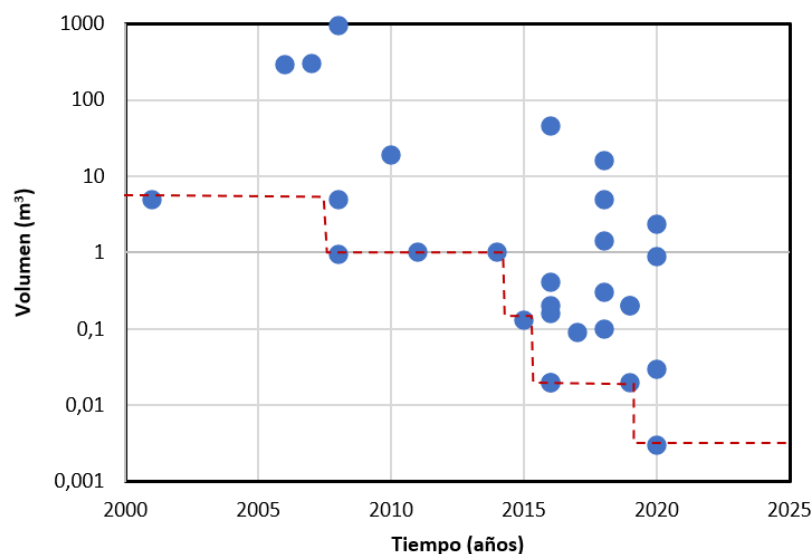


Figura 58. Distribución temporal de la muestra de datos

Con la discretización temporal se obtienen los siguientes parámetros:

- $A_{st} = 0,038 - 0,041$
- $B = 0,326 - 0,340$
- $R^2 = 0,956 - 0,966$

Eliminando el rollover, datos bajo $0,1 \text{ m}^3$, los parámetros aumentan:

- $A_{st} = 0,047 - 0,045$
- $B = 0,388 - 0,418$
- $R^2 = 0,988 - 0,994$

El registro con TLS es de buena calidad en Degotalls debido a los años de registro y variedad de volúmenes detectados. Si bien TLS se registró para las paredes norte y este de Degotalls, juntando ambos, resulta ser representativa para el aparcamiento de Monasterio.

Con el muestreo con TLS, se tienen dificultades para detectar los volúmenes bajo $0,001 \text{ m}^3$ debido a la limitación instrumental y metodología de detección. Las limitaciones con TLS varían según las condiciones locales del área estudiada: según distancia visual, oblicuidad de visión, vegetación, etc. Eliminando el efecto rollover, el ajuste de TLS se obtiene:

- $A_{st} = 0,36$
- $B = 0,531$
- Mejora ligeramente el ajuste, con similar valor $R^2 = 0,99$

Con los datos de inventario, sin el efecto rollover (volúmenes menores a $0,1 \text{ m}^3$), se obtiene un A_{st} de $0,065$ y B de $0,504$, con un ajuste de $0,987$.

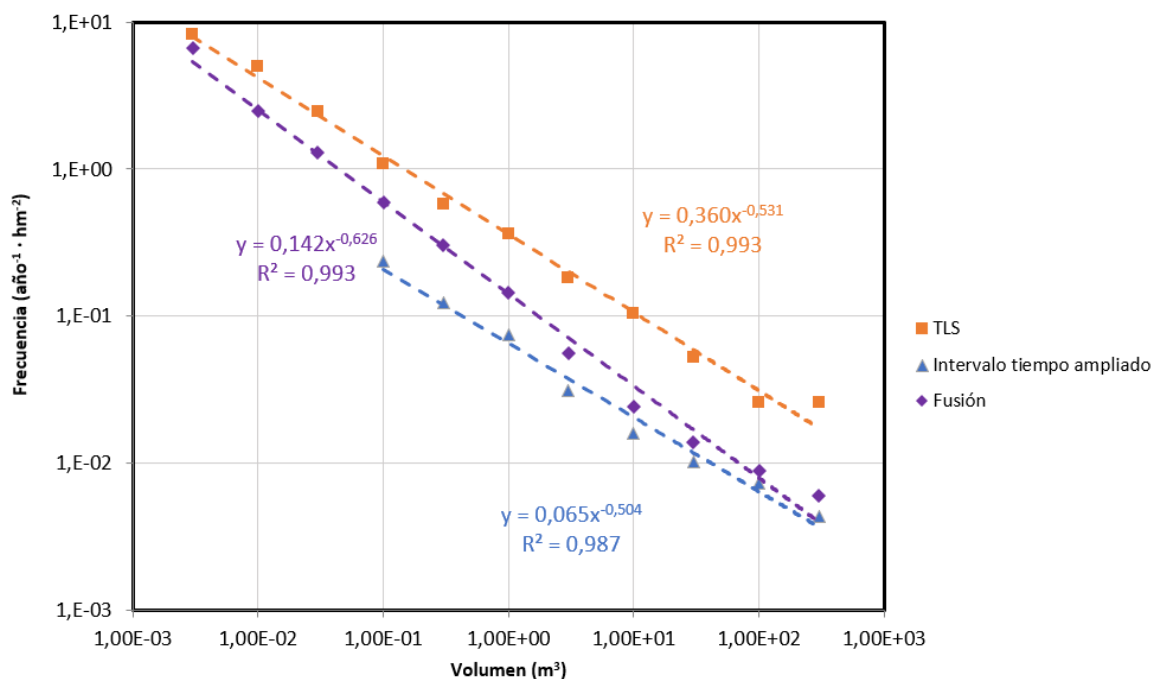


Figura 59. MF obtenida con inventario y TLS para aparcamiento, por separado y fusionado (morado)

Con TLS e inventario se logra obtener un parámetro B similar, logrando un muestreo en un amplio rango de volúmenes. El parámetro Ast obtenido con TLS es seis veces mayor que con el inventario, lo cual se debe a que el área de pared con TLS es de 3 hm² y con un periodo de muestro de 12 años. Con el inventario, se ha muestreado la actividad en un espacio 5,6 veces mayor y casi el doble en el tiempo. Por lo tanto, el inventario se acerca a la peligrosidad media del aparcamiento, donde representa un espacio más amplio. El ajuste de TLS es más representativo de una zona y cierto tiempo de la actividad, por lo mismo es importante realizar los análisis de discretización temporal y espacial de los datos.

Tal como muestra la Figura 59 los volúmenes menores de la línea de tendencia de TLS más inventario, tienen una tendencia similar a la del TLS. En cambio, los volúmenes de mayor magnitud tienen un comportamiento similar a la del inventario (los datos del TLS no alcanzan a registrar estas magnitudes).

El rango bien muestreado de aparcamiento es de 0,01 a 100 m³, los valores de la recta entre TLS e inventario pueden ser válidos. No obstante, la pendiente es fuerte (B=0,626), lo cual puede infravalorar la frecuencia de los eventos mayores si se extrapolan a volúmenes sobre 100 m³. Si los valores son considerablemente mayores, con diferente orden de magnitud, con el ajuste se acentúa aún más. Por lo mismo, es no recomendable utilizar la fusión de ambos métodos en el cálculo de la magnitud frecuencia, ya que se complica el control de los resultados obtenidos con dicha relación.

6.4.3. COVES DEL SALNITRE

Esta área es la que cuenta con mayor número de registros en el inventario (46), que van de 0,001 a 5 m³. Se han registrado un mayor número de desprendimientos de menor volumen, los cuales son los más frecuentes. Debido a que el registro de las pequeñas magnitudes solo está en ciertos dominios, el

análisis 1 da los menores valores del ajuste MF respecto a los posteriores análisis. Sin el rollover de volúmenes menores a $0,03 \text{ m}^3$, se tiene:

- $A_{st} = 0,047$
- $B = 0,361$
- $R^2 = 0,949$

En el segundo análisis, mejora el submuestreo de los datos de menor magnitud, con un volumen mínimo de $0,01 \text{ m}^3$ se obtiene:

- $A_{st} = 0,048$
- $B = 0,380$
- $R^2 = 0,975$ (mejora el ajuste del análisis 1 al 2)

Debido a los rellanos superiores y efectos torrenciales en la zona, los volúmenes pequeños son registrados en las zonas altas del área. En los dominios inferiores si se logran detectar volúmenes a partir de $0,01 \text{ m}^3$. Gracias a estas discretizaciones, en el análisis 3, con el intervalo de tiempo directo o ampliado se obtienen ajustes similares:

- $A_{st} = 0,09$
- $B = 0,49$
- $R^2 = 0,94$

Con TLS, donde los sectores escaneados mediante TLS están fuera de los inventariados (uno hacia el este y el otro hacia al oeste), la relación MF es:

- $A_{st} = 0,12$
- $B = 0,414$
- $R^2 = 0,985$

Si bien el inventario y TLS tienen un contexto similar a grandes rasgos (ambos son de la base de la montaña por el lado sur). Se pueden diferenciar ya que son suficientemente lejanos para tener sus particularidades. Los resultados obtenidos indican que se tienen ajustes con validez más allá de las áreas estudiadas, que pueden ser aplicados a todo el macizo de Montserrat.

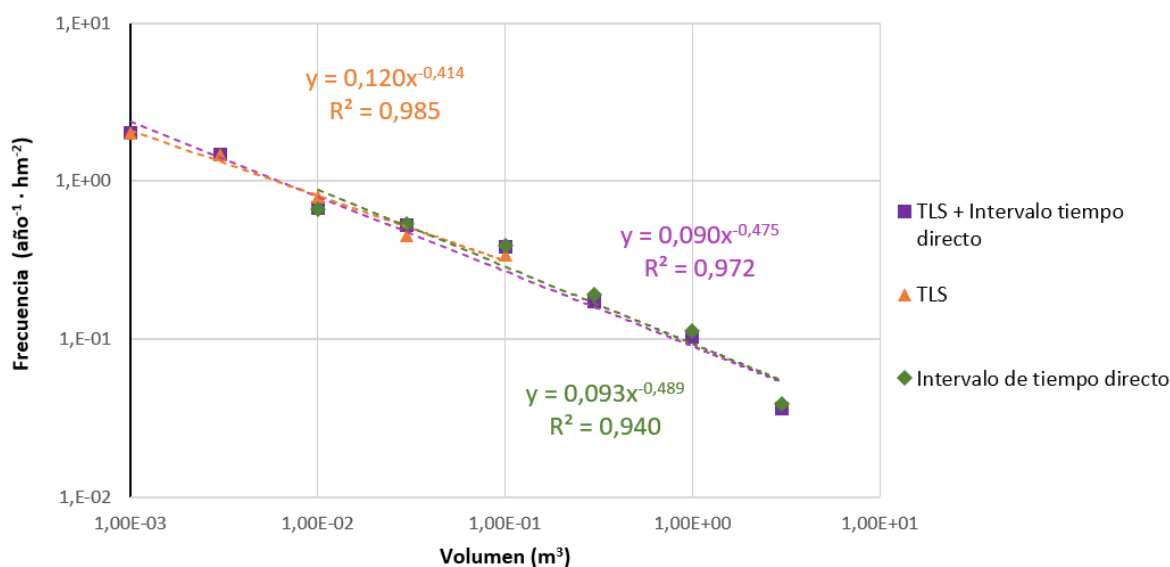


Figura 60. Relación MF obtenida con inventario y TLS, por separado y fusionado (morado).

Luego del análisis realizado en Coves del Salnitre, se deduce lo siguiente:

- El registro con TLS, que cubre 9 hm² por año perfectamente el rango de volúmenes de 0,001 a 0,1 m³.
- Inventario cubre perfectamente el rango de volúmenes: 0,01 a 100 m³ con un muestreo variable (la esencia de la metodología propuesta) entre 50 y 200 hm² año.
- En la zona donde ambos registros se solapan, hay una coherencia entre ambas fuentes de información.
- En esta zona se muestra un buen nivel de registro con ambas técnicas, inventario y TLS. Se muestra una concordancia en ambos parámetros, que cuentan con un buen ajuste en ambas relaciones.
- Para el análisis 3, las diferencias entre intervalo directo y ampliado son mínimas en este caso.

6.4.4. CREMALLERA

Cremallera es el área donde más trabajos de protección se han realizado, tanto de manera pasiva y activa. Con respecto al análisis 1, se muestra claramente un rollover bajo 0,1 m³. Luego de eliminar el rollover, se obtuvo un buen ajuste ($R^2= 0,929$), con $A_{st} = 0,009$ y $B= 0,378$. Debido a la linealidad de los datos, R^2 cercano a 1, en un amplio rango de volúmenes, existe posibilidad de que esta submuestra es representativa.

En el análisis 2, se discretizó de mejor manera el tiempo. Existe un evento de año 1995, de 1 m³, pero no es suficiente razón para suponer que se tienen todos los eventos superiores a esta magnitud desde ese año. Desde el año 2008 existe mayor frecuencia de datación de estos eventos, pero hay un vacío del 1995 al 2008, correspondiente al tiempo de realización del nuevo cremallera, construcción y primeros años de explotación.

Tal como muestra la Figura 61 existen 3 periodos importantes en Cremallera:

- 1991 – 2000. Se redacta el nuevo proyecto de Cremallera donde solo se recupera información de actividades significativas.
- 2001 – 2002. Se realiza la construcción del nuevo Cremallera, donde se realiza muchos trabajos de limpieza y saneamiento. Estos desprendimientos no están en el inventario.
- 2003 – 2020. Uso del tren y con seguimiento permanente por parte del FCG y el ICGC.

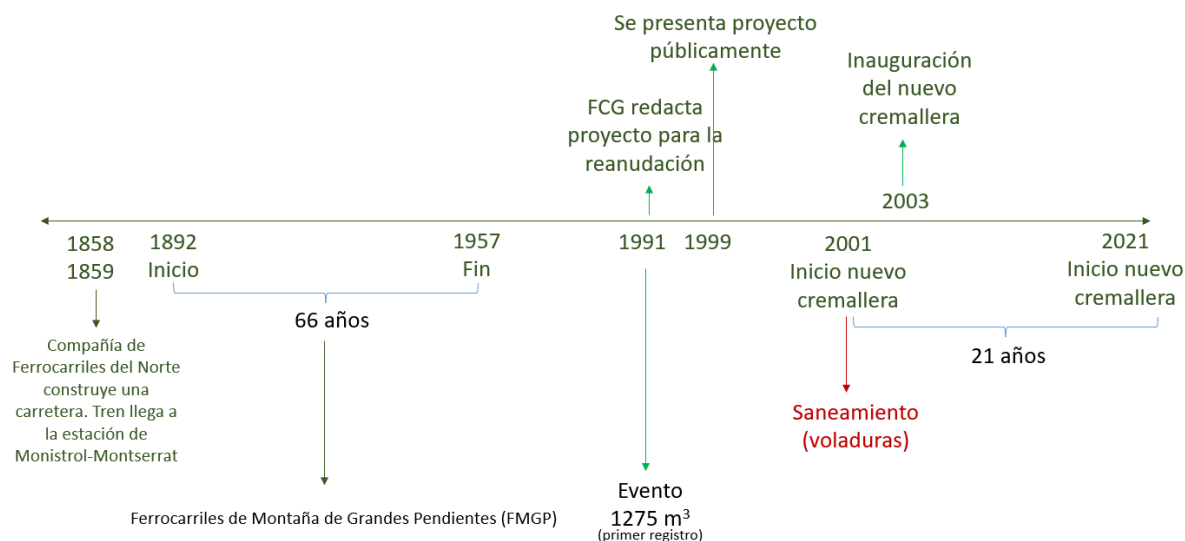


Figura 61. Cronología del tren de Cremallera

El año 1995 existe un registro de 18 m³, lo que supone que se tuvo registros completos de volúmenes sobre 10 m³, debido a que son más grandes y evidentes. Ambos eventos del 1995, se ubican el dominio 2 (cercano a la carretera), gracias a esto los eventos fueron registrados. Otros eventos de similar magnitud, cercanos a 1 m³ y lejanos a la carretera, pueden no haber sido registrados. Para el segundo análisis se considera que grandes desprendimientos (sobre 10 m³) son registrados desde el año 1991.

Con el análisis 2, se tiene una $A_{st} = 0,007$ y $B = 0,366$, pero con un menor ajuste ($R^2 = 0,88$). Con el análisis 3 se realiza la variabilidad espacial con la discretización de los dominios. Debido a que el tren recorre una longitud de 5 Km., cruzando cuencas y niveles distintos, se analiza con una submuestra con mayor número de dominios. Con el análisis 3 con rollover, se obtiene un ajuste:

- $A_{st} = 0,011$
- $B = 0,508$
- $R^2 = 0,952$

Con respecto a la actividad nominal, es la menor de las demás submuestras, junto con Monasterio. Esto se debe al factor antrópico (grado de protección) con que cuentan ambas zonas. Cremallera es la zona donde más medidas se han tomado debido al paso del tren. En otras zonas también pero no con cobertura tan continua.

- La protección activa (estabilización) se centra en grandes bloques, a partir de 10 m³, que muestran mayor precariedad de equilibrio, de modo que rebaja la frecuencia de la parte derecha de la curva.
- La protección pasiva (barreras) se orienta a la protección frente a desprendimientos medianos – pequeños (<10m³) que son posibles de detener y hay muchos en la pared para ser tratados individualmente. De modo que sigue habiendo esta actividad con su frecuencia natural, e incluso las barreras permiten mejorar su detección, ya que son objeto de inspección periódica.

Con respecto al coeficiente de uniformidad, se tiene una diferencia relevante de forma creciente: Monasterio – Aparcamiento – Cremallera. Esto puede deberse a:

- B está relacionada con la estructura del macizo rocoso: a mayor fracturación, mayor B. Eso es coherente con lo existente en las distintas zonas:
 - Monasterio está debajo de paredes con pocas diaclasas, de grandes agujas y rocas bastante monolíticas.
 - Aparcamiento está debajo del mismo nivel de macizo, pero por su parte norte donde aflora quizá de forma más desfavorable. Además, aflora unos niveles de base de menos potencia de conglomerado y mayor fracturación que podrían cambiar la tendencia.
 - Cremallera a lo largo de su trazado tiene condiciones variables, pero en general se mueve por los niveles inferiores, donde las capas de conglomerado se alternan más con lutitas y hay sectores de mayor fracturación.

Con los datos del TLS, se obtiene:

- $A_{st} = 0,037$
- $B = 0,659$
- $R^2 = 0,986$

Esto revela que el TLS da la posibilidad de mejorar la actividad de los pequeños desprendimientos. Por lo anterior, tiene sentido realizar una fusión de ambos registros, obteniendo:

- $A_{st} = 0,017$
- $B = 0,636$
- $R^2 = 0,953$

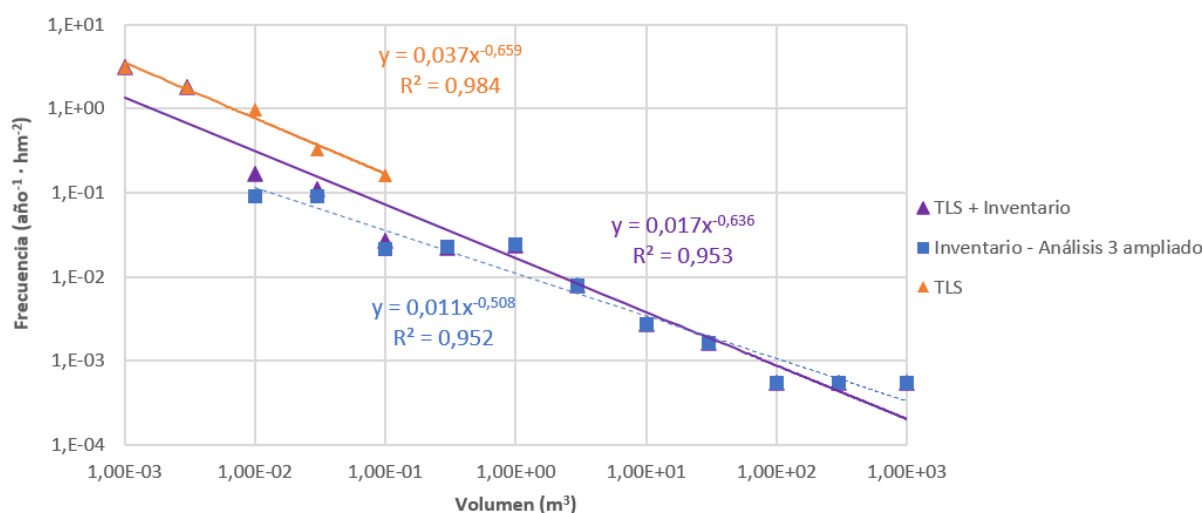


Figura 62. Relación MF para Inventario y TLS, incluyendo su fusión (morado)

Según el estudio de Janeras, et. al.(2013). se estimó un periodo de retorno de 2 años para desprendimientos mayores a 1 -3 m³. En el presente estudio se estimó un periodo de retorno de 2,7 años con la fusión de ambos métodos (TLS e inventario), por lo que ambas frecuencias son similares.

Debido a su pared vertical y en una considerada longitud se tiene una barrera tipo visera (horizontal) al pie de la pared y que cubre la vía, la pared del dominio 136 sería una buena zona para el muestreo de los desprendimientos de menor volumen. A lo largo del seguimiento de esta zona, se han observado desprendimientos en la visera, donde incluso se han hecho trabajos de limpieza de la protección (debido a la acumulación de rocas). Lamentablemente esto no se ha registrado en el inventario, a excepción de un gran evento que dañó la protección.

Para mejorar las condiciones de muestreo de los pequeños volúmenes, se recomienda contabilizar las piedras cuando son removidas de la protección y atribuirles a un periodo de años, obteniendo una tasa de desprendimientos.

6.4.1. BP 1103

El tramo de la carretera BP1103 analizada, cuenta con un área de pared de 146 hm² y periodo de registros de 21 años, se tienen 22 eventos registrados. Con el primer análisis (Figura 63), se visualiza una primera aproximación a la relación MF. Debido a que el muestreo es amplio, se visualiza un rollover evidente de los datos bajo 0,1 m³.

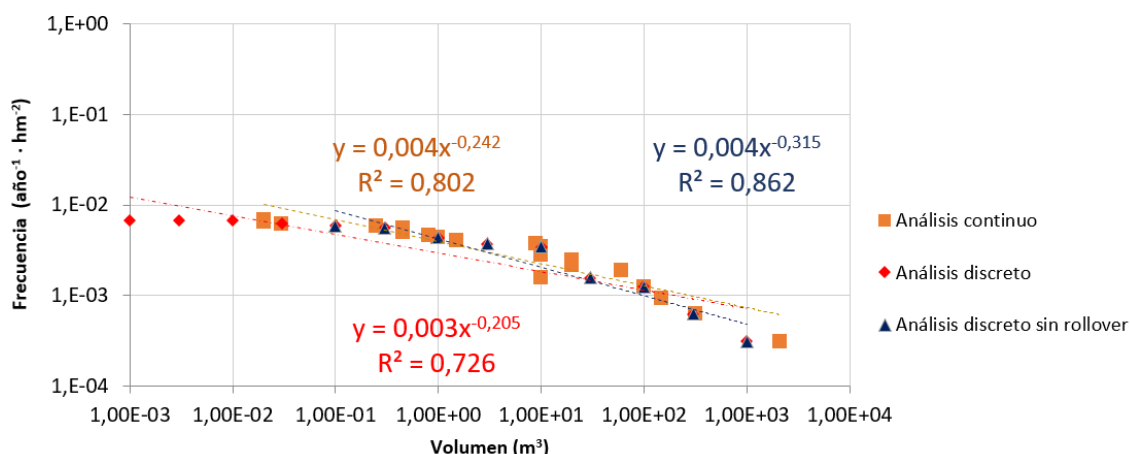


Figura 63. Análisis 1 del tramo de la carretera BP 1103

Si bien con el análisis 2 se obtuvo una mejora en los parámetros, con el tercer análisis es mejor (sin rollover):

- Ast= 0,021 – 0,020
- B= 0,63-0,678
- Mejora ligeramente el ajuste, con similar valor R²=0,98

Con la discretización espacial, se consideró un 12% del área de salida para volúmenes mayores a 0,1 m³ y el 100% para volúmenes sobre 100 m³. Esto se debe al bajo control de actividad que se tiene en esta gran área.

Debido a la discretización espacial se eliminan 4 eventos, como es el caso del año 2017 con un volumen de 10 m³, ya que el registro es de volúmenes mayores a 100 m³. A diferencia del análisis 2, en el que se consideraba dentro de la muestra temporal.

Para una futura línea de estudio, se recomienda realizar una discretización de espacio y tiempo de forma totalmente independiente para todas las muestras. Un ejemplo es el evento del año 2007, de

10 m³, donde se sabe que en ese dominio donde se encuentra no ha ocurrido ningún evento de similar magnitud.

El área con similar comportamiento es el de aparcamiento del Monasterio, cuya ladera también es norte y tiene niveles de cotas similares. Si bien no son iguales exactamente, tienen el mismo nivel de orden de magnitud. La actividad nominal es el triple, es decir, si hay eventos mayores a 1 m³, tienen más frecuencia en el aparcamiento que en el tramo de BP1103 hasta Santa Cecilia. Con eventos reales, sobre 300 m³, la probabilidad es:

- Aparcamiento: $F_{st}(300) = 3,8E-3$
- BP-1103: $F_{st}(300) = 4,9E-4$

Es decir que es casi ocho veces la ocurrencia de eventos en aparcamiento que en el tramo de la carretera en BP1103, esto no se alinea a la realidad del sector y datos de inventario. Este resultado puede deberse a la calidad y cantidad (22) de los datos utilizados, 21 años y 146 hm² de pared. A pesar de utilizar la metodología propuesta, homogeneizar tiempo y espacio de los datos, no hay suficiente calidad de registros para conseguir un resultado confiable. Si bien los datos tienen coherencia en la magnitud, no la tiene en la calidad con respecto a las demás submuestras.

Se puede optimizar la explotación de inventarios y aprovechar la información de estos, pero este recurso es limitado ya que se debe tener una mínima base de registros para la obtención de resultados fiables.

Para mejorar el registro de los eventos de este sector, con muchas áreas de desprendimientos, sectores alejados a las zonas de paso, falta de visión directa y, por lo tanto, complejo control. Se recomienda un seguimiento sistemático para aumentar la calidad de los datos. Por parte del titular de la carretera, su preocupación son los taludes cercanos a la vía, pero no realiza un seguimiento de las laderas alejadas. Por parte del Patronato y del ICGC, está lejano al área más visitada de Montserrat, el Monasterio, por lo que el seguimiento no es tan estricto.

El sector tiene factores desfavorables para la realización del análisis:

- Se mezclaron regiones distintas, lo cual no es relevante
- La carretera cuenta con niveles estratigráficos con niveles distintos, hasta con unidades geológicas distintas. Por lo que esta muestra es una mezcla de factores que hacen perder el control de su calidad. Teóricamente debido a las propiedades del macizo de Montserrat, se supone:
 - Niveles inferiores: Ast y B mayores
 - Niveles superiores: Ast y B menores

El tramo de la carretera BP 1103 es una mezcla de niveles de roca, y es complejo saber con precisión las propiedades de los materiales registrados en el inventario. Se recomienda para el futuro, mejorar el inventario de este sector, incluyendo campañas de monitoreo con TLS en:

- Emplazamiento TLS en Arítjols (desde 2019): muestrea de los niveles inferiores.
- Emplazamiento TLS en Patriarques (ICGC ha realizado pruebas en 2021): donde se muestrea de los niveles superiores.

En la Tabla 18 se exponen los ajustes óptimos para cada submuestra.

Tabla 18. Resumen de los ajustes óptimos para las 5 submuestras

Área	Vol _{max} (m ³)	Vol _{min} (m ³)	A _{st} (año ⁻¹ hm ⁻²)	B	R ²	W (mm/año)
Monasterio	0,1	4	0,023	0,350	0,791	0,631
Aparcamiento	0,1	954	0,065	0,504	0,987	0,700
Coves del Salnitre	0,01	9	0,088	0,499	0,937	0,970
Cremallera	0,1	1275	0,011	0,508	0,952	0,116
BP 1103	0,1	2100	0,021	0,630	0,983	0,111

6.4.2. MUESTRA

Tal como se había mencionado con anterioridad, la muestra es la suma de las 5 submuestras. En la Figura 64 se muestra el ajuste óptimo (en negro) para cada submuestra y el ajuste final para la muestra:

- Ast: 0,026
- B= 0,599
- R²= 0,989

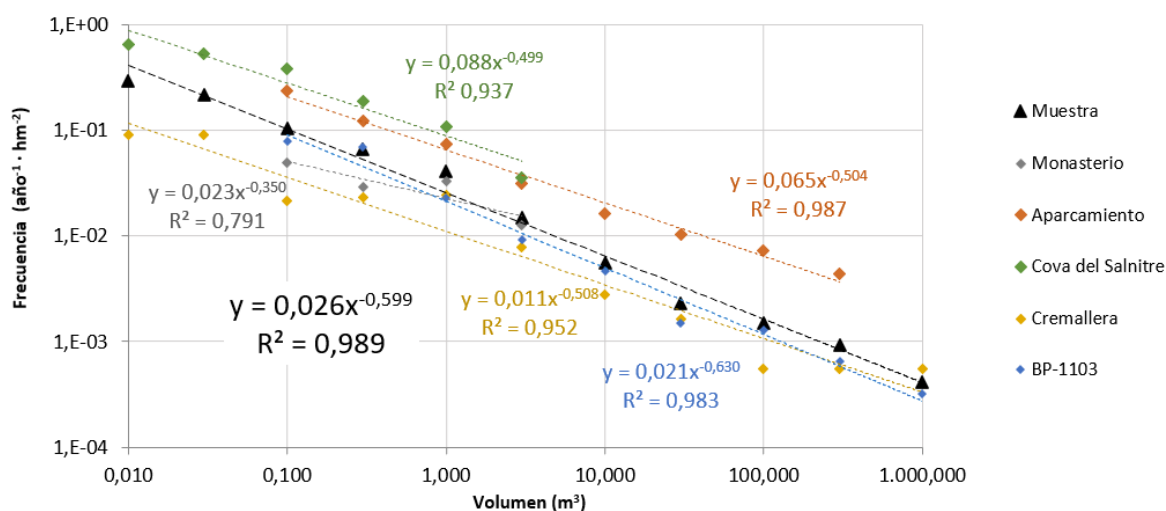


Figura 64. Ajuste óptimo de las 5 submuestras y de toda la muestra (negro)

Con respecto a la actividad nominal, que cuentan con una diferencia aproximada de 1 orden de magnitud:

- Aparcamiento y en Coves del Salnitre son sectores con más actividad
- Cremallera, Monasterio y BP1103 son los menos activos (menor Ast)
- Debido a la cantidad de datos, no está claro si BP1103 está infra muestreado debido al número de eventos respecto al área de estudio.

Con respecto al coeficiente de uniformidad, se visualiza:

- Aparcamiento, Coves del Salnitre y Cremallera tienen valores cercanos a 0,5
- Monasterio tiene un valor bajo, 0,35
- BP1103 cuenta con el mayor valor de los 5 (0,63), lo cual también hace poner en tela de juicio de la calidad de la muestra utilizada.

En la Figura 65 se muestran los resultados obtenidos en el presente estudio junto con los del estudio de Hantz & Levy (2018) en los Alpes. El parámetro B es coherente, y se sitúan en valores próximos a macizos rocosos similares. Con respecto a la actividad nominal (A_{st}) obtenida con el inventario, se encuentra en el nivel inferior. Si se clasifica el nivel de actividad nominal en tres grupos (baja, media y alta), el inventario de la muestra se ubica en una actividad baja, mientras que TLS (2015), en media. El caso de Carry le Rouet y Mesnil Val tienen una actividad alta debido a que son acantilados marinos y cuentan con una gran acción erosiva.

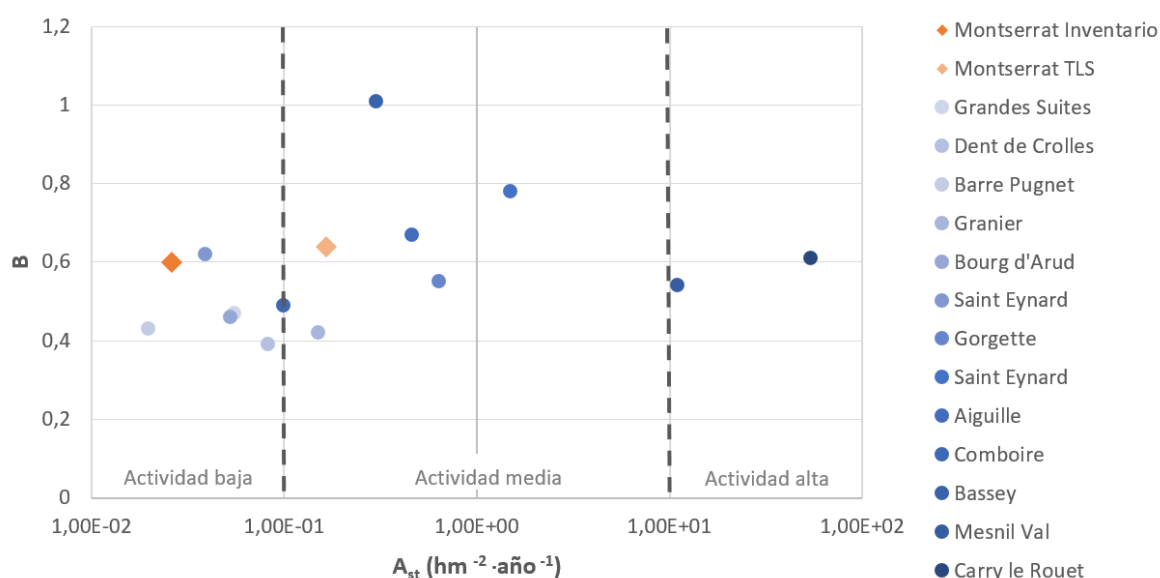


Figura 65. Comparación datos de Montserrat (naranja) con estudio de los acantilados alpinos (Hantz & Levy, 2018)

En general, la tendencia de los análisis realizados es:

- **Ast aumenta debido a que se acota el muestreo espacio – temporal.** En vez de calcular frecuencia sobre todo el tiempo y espacio máximos, se acota para cada clase de volumen, con el objetivo de intentar reproducir la capacidad de muestreo que se ha tenido con el inventario. En algunos casos se pierden datos de la muestra, ya que se reduce el muestreo más influyente y representativo del área.
- **B aumenta** ya que el proceso que se mencionó para Ast, se hace variable con el volumen, por lo que el muestreo aumenta con el volumen haciendo que la frecuencia disminuya aceleradamente.

Si la actividad nominal es infravalorada, se obtendría menor actividad real. Y si se infravalora el coeficiente de uniformidad, se daría menor relevancia a los eventos pequeños que a los de mayor magnitud. Por lo que es importante tener un equilibrio en la discretización a realizar, teniendo claro los parámetros y justificación de los datos de la muestra a utilizar en cada análisis.

CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

7.1. CONCLUSIONES

En esta investigación se ha desarrollado una metodología consistente en distintos análisis para determinar la relación magnitud frecuencia de manera óptima, acotando el tiempo y el espacio, para verificar que el inventario disponible es suficientemente representativo de la actividad de desprendimientos rocosos para cada rango de volumen.

En general, existe heterogeneidad de completitud en los inventarios de actividad de caída de rocas, ya que, no se muestrean por igual los rangos de volúmenes en el espacio y tiempo. El registro de desprendimientos de grandes volúmenes se encuentra en archivos o hemerotecas. Por otro lado, los desprendimientos de pequeña magnitud, rara vez son informados y registrados en inventarios, lo cual dificulta el análisis de los datos. La metodología presentada en este estudio optimiza el análisis de esta problemática utilizando los registros existentes, variando tiempo y espacio para los cuales se puede considerar muestreo significativo. Con la información disponible se han experimentado posibles metodologías en base a un caso de estudio para poder generalizar y exportar a otros casos.

La metodología propuesta se aplicó a la Montaña de Montserrat, ubicada a 50 km al noroeste de Barcelona, donde la caída de rocas representa una amenaza para los 2,75 millones de visitantes anuales. Para lo cual se utilizó un inventario de desprendimientos de esta área recopilado por el *Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya* (ICGC), en el marco del Plan de Mitigación del Riesgo Geológico en la Montaña de Montserrat (PMRGM).

El inventario de Montserrat, claro ejemplo de un inventario de muestreo heterogéneo, cuenta con una tasa de observación no uniforme y que depende de la frecuencia de visitas de las diferentes áreas según su importancia, junto con recuperación de información a través de documentos históricos y encuestas. Gracias a la claridad de la información entregada por el inventario del ICGC se obtuvo con precisión los datos de la zona de salida, dato significativo para este estudio. Luego de un proceso de selección, la muestra contó con 205 registros para toda la montaña, desde 1546 hasta el 2020, haciendo un proceso de valoración de calidad de las tres variables clave: ubicación, datación y cubicaje.

Con el inventario se logra un amplio muestreo debido a que los grandes volúmenes han sido registrados durante un intervalo de tiempo y área de estudio mayor. Para caracterizar cada una de esas muestras se propuso la definición de la extensión del muestreo logrado como el producto del espacio y tiempo cubiertos, siendo el espacio el área de pared bajo control, y expresado en unidades $\text{hm}^2 \cdot \text{año}$.

La metodología propuesta en el presente estudio se basó en variar la extensión de la muestra en función del volumen con distintos análisis:

- Análisis 1: tratar la muestra como homogénea (completa para todo volumen)
- Análisis 2: capacidad de muestreo de volúmenes variable en el tiempo
- Análisis 3: capacidad de muestreo de volúmenes variable en el tiempo y espacio

Adicionalmente se trabajó con dos cálculos de frecuencia:

- Intervalo de tiempo directo determinado directamente con el primer y último registro
- Intervalo de tiempo ampliado que corrige el periodo de tiempo de muestreo considerando un muestro equivalente desvinculado del inicio del primer registro.

Al aplicar la metodología al inventario de la montaña de Monserrat, se observó que la corrección temporal afecta de forma distinta a las submuestras según su frecuencia:

- Para submuestras con alto número de eventos en un corto plazo de tiempo, la diferencia entre ambos intervalos fue mínima, lo cual no aportó una mejora.
- Para submuestras de intervalo muestreado del mismo orden de frecuencia tuvo un efecto importante, lo cual aumenta la incertidumbre en la determinación de la frecuencia y la mejora puede quedar comprometida según las particularidades del caso.
- La corrección temporal de la frecuencia, aplicando el intervalo de tiempo ampliado, fue óptima en rangos intermedios de volumen.

Al aplicar esta metodología en Montserrat, se obtuvo una técnica funcional con una fácil y clara aplicación, que adicionalmente permitió:

- Aplicar a distintas submuestras que cubren un 66% del inventario.
- Analizar la completitud de la muestra y corregir la heterogeneidad intrínseca del inventario.
- Observar que, con los análisis sucesivos, el ajuste cambia significativamente. En general, con un crecimiento progresivo de A_{st} y B.
- Compensar parte del *rollover* de la muestra original, ocasionado por el infra muestreo de los volúmenes pequeños por falta de observación y registro.

Esta metodología está sujeta a interpretación, de modo que es importante revisar de manera crítica la representatividad de la muestra en cada rango de volumen, para asegurar que se consigue el efecto de optimización en el uso del inventario hacia la peligrosidad real subyacente.

Finalmente se obtuvo una relación MF (magnitud – frecuencia) óptima para cada caso, en el sentido que se basa en toda la parte de la muestra que es representativa. Esto implicó un descarte mínimo de datos, cuando se determina que no consiguen representar una submuestra significativamente. Este fue el caso de los datos históricos de los años 1546 y 1927 de Monasterio, para los que no se consiguió encontrar un periodo de muestreo representativo por falta de otros datos contiguos.

Los parámetros A_{st} y B de las submuestras en el caso óptimo tienen el mismo orden de magnitud, lo cual permite ajustar los datos en una muestra global. Debido a que se trabajó con volúmenes en categorías discretas y a la caracterización del muestreo (extensión espacio – tiempo), se pudieron fusionar las submuestras de forma integrada. Al cubrir las submuestras características bien distintas en la montaña (altitud, orientación, propiedades del macizo rocoso), se considera que esta muestra puede ser aplicada a la escala de todo el macizo, conociendo las limitaciones de una valoración promediada.

Para todo Montserrat se obtiene así una frecuencia de 27 eventos por año para un volumen mayor o igual 1 m^3 , lo cual es una peligrosidad para tener en cuenta ante el alto número de visitantes. Esto es completamente diferente a los 8 eventos por año que se obtendría con el primer análisis, que no posee ninguna estrategia de optimización.

Para contrastar los resultados obtenidos en este trabajo se utilizó la información de las campañas realizadas con TLS (laser escáner terrestre, por sus siglas en inglés), que permite detectar

desprendimientos por comparación de nubes de puntos 3D de la superficie de las paredes. Esta técnica tiene cobertura homogénea en tiempo y espacio para todo el rango de volúmenes, si bien su cobertura es más reducida.

Cuando los casos óptimos fueron contrastados con TLS, se obtuvieron valores cercanos y coherentes, especialmente en término de B, aunque hay una tendencia a valores más altos de A_{st} por parte del TLS. Esto nos induce a pensar que, a pesar de la metodología de análisis aplicada, no se consigue compensar completamente las limitaciones del inventario. El caso de Coves del Salnitre es en el que se obtuvieron parámetros similares entre los datos de inventario y TLS, existiendo coherencia entre ambas fuentes de información. Fusionando ambos registros se logró obtener una máxima cobertura en distintos rangos de volúmenes, compensando las limitaciones de cada registro. El caso opuesto es el de Monasterio, donde no se fusionaron ambos métodos, ya que los parámetros eran demasiado distintos. Una posible interpretación es que deriva de un comportamiento mixto, es decir, TLS muestra la actividad de pequeños desprendimientos de la roca matriz (por la meteorización del conglomerado y la formación de pequeñas descamaciones) y el inventario solo cubre la dinámica de caída de bloques delimitados por juntas que en general son de mayor tamaño. Esto deja en evidencia las limitaciones que cada fuente de información tiene sobre la actividad. Debido a lo anterior, se concluye que TLS cuenta con limitaciones debido a su baja extensión de muestreo y, en el caso de inventario, se tienen pocas garantías de completitud debido a la falta de continuidad en el muestreo. Esto permite que ambas metodologías sean complementarias, ayudando a que las relaciones MF sean más fiables.

Al comparar los resultados con el estudio de Hantz & Levy (2018) en los Alpes, el parámetro B es coherente y se sitúa en valores próximos a macizos rocosos similares. Con respecto a la actividad nominal (A_{st}) obtenida con el inventario, se encuentra en el nivel inferior, mientras que, con TLS, está en el nivel de la media.

El principal resultado de este estudio es que la relación magnitud frecuencia obtenida con el método de optimización utilizando los datos del inventario de Montserrat, permite la caracterización de peligrosidad en esta área de estudio, siendo éste el punto de partida de cualquier análisis cuantitativo de la peligrosidad y posteriormente del riesgo.

7.2. TRABAJOS FUTUROS

En el presente estudio se realizó el análisis 3 (revisión de la cobertura en el espacio), en función del análisis 2 (cobertura variable en el tiempo). Para futuros estudios se recomienda realizar un análisis adicional (análisis 4), relacionando de forma independiente cada variable, es decir, determinar el rango de volúmenes en función de tiempo y espacio.

Para mejorar los parámetros obtenidos en el presente estudio, principalmente en el caso de Monasterio, se recomienda inventariar un nuevo atributo en los eventos: el mecanismo de desprendimiento de éstos (M1, M2 o M3 según Janeras, et al., 2017), ya que, en un futuro se podrá enlazar esta información con los ajustes de las relaciones de magnitud frecuencia.

Uno de los factores que desencadenan los desprendimientos, son las variaciones de temperatura y precipitación. En el primer caso precisamente los ciclos de hielo – deshielo que circula por las discontinuidades, puede provocar la pérdida de la cohesión. Según Royán & Vilaplana (2012) los meses en que ocurren mayor número de caída de rocas son los días de heladas, por lo tanto, los ciclos de hielo-

deshielo. En el caso de las precipitaciones, según Royan (2010), los desprendimientos ocurren preferentemente cuando las lluvias son muy intensas y excepcionales. Un episodio de lluvia a destacar en Montserrat es el de junio de 2000, que provocó un gran desprendimiento en el Canal de Sant Jeroni, con un volumen aproximado de 2100 m³ (Marqués, 2001). Por ello, se debería analizar si existe una correlación de dichos factores climáticos con los desprendimientos del inventario de Montserrat, analizando si las relaciones MF varían en el tiempo según las condiciones ambientales y poder obtener los ajustes inferiores y superiores.

Debido a que el método está sujeto a la interpretación cuando se valora la representatividad de la muestra en cada rango de volumen, es importante para la aplicación de la metodología en trabajos futuros, revisar la sensibilidad del resultado según el criterio interpretativo aplicado.

Se sugiere al PMRG emplear la relación MF estimada en el presente estudio, para realizar la evaluación del riesgo por desprendimientos en las zonas donde haya elementos y/o personas expuestas, generando con técnicas SIG mapas de zonificación del riesgo.

Finalmente, se anima a aplicar esta metodología expuesta a otra zona de estudio, estimando la frecuencia de caída de rocas a otro inventario, obteniendo otros parámetros A_{st} y B. Con nuevos contextos litológicos y estructurales se presentarán nuevas problemáticas, lo cual se plantea con el objetivo de validar lo expuesto en este trabajo y lograr avanzar hacia un uso general de estos análisis.

7.3. RECOMENDACIONES

Para mejorar el muestreo del inventario de Montserrat se recomienda:

- Debido a los datos obtenidos en BP1103, la única submuestra sin contraste con TLS, se recomiendan nuevas campañas de monitoreo con TLS en emplazamientos recientemente iniciados:
 - Emplazamiento TLS en Arítjols: muestreando los niveles inferiores de este gran ámbito.
 - Emplazamiento TLS en Patriarques: muestreando los niveles superiores, de conglomerados más masivos.
- Debido a la hipótesis de superposición de mecanismos diferentes, que pueden dar relaciones MF diferentes. Se recomienda incluir un nuevo atributo con la descripción del mecanismo de desprendimiento del evento, según lo expuesto por (Janeras, et al., 2017)
- Debido al análisis de la calidad de los datos varía y es importante tener la magnitud del evento, se recomienda incluir un nuevo campo donde se indique si la estimación del volumen del bloque desprendido es de forma directa o no.
- Aumentar el registro de los volúmenes pequeños para todas las submuestras, principalmente en la zona del Cremallera, específicamente en el dominio 136, debido a su pared vertical, longitud, y retención en una protección muy visible en forma de visera.
- Mejorar la frecuencia en la inspección y continuar con el registro sistemático del inventario en todas las áreas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alsaker, E., Gabrielsen, R., & Roca, E. (1996). The significance of the fracture pattern of the Late-Eocene Montserrat fan delta, Catalan Coastal Ranges. *Tectonophysics*, 465–491. doi:10.1016/S0040-1951(96)00239-9.
- Barberà i Saqué, J. (1977). *Montserrat Pam a Pam*. Cavall Bernat.
- Blanch, X., Royán, J., Guinau, M., García-Sellés, D., & Vilaplana, J. (2017). 10 years of rockfall analysis in Montserrat (NE Spain). *6th Interdisciplinary Workshop on Rockfall Protection*, 111-121.
- Brunetti, M., Guzzetti, F., & Rossi, M. (2009). Probability distributions of landslide volumes. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 16(2), 179-188.
- Bunce, C., Cruden, D., & Morgenstern, N. (1997). Assessment of the hazard from rock fall on a highway. *Canadian Geotechnical Journal*, 34(3). doi:https://doi.org/10.1139/t97-009
- Buxó, P., J. M., Domènech, G., Pons, J., Prat, E., & López, F. (2017). Development of a Rockfall Risk Mitigation Plan in the Montserrat Massif (Central Catalonia, Spain). *Advancing Culture of Living with Landslides. Workshop on World Landslide Forum*. doi:https://doi.org/10.1007/978-3-319-53485-5_78
- Carmona, A. (2015). *Sectorización y zonificación de la peligrosidad por caída de rocas, aplicación en Montserrat*. Universitat de Barcelona.
- Carrea, D., Abellan, A., Derron, M.-H., & Jaboyedoff, M. (2014). Automatic Rockfalls Volume Estimation Based on Terrestrial Laser Scanning Data. *Engineering Geology for Society and Territory*(2). doi:10.1007/978-3-319-09057-3_68
- Catalunya, I. C. (2021). Guia per l'elaboració d'Estudis d'Identificació de Riscos Geològics per a urbanisme (EIRG). *Codi: AP-0001/21*.
- Chau, K., Wong, R., Liu, J., & et al. (2003). Rockfall Hazard Analysis for Hong Kong Based on Rockfall Inventory. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 36, 383-408. doi:https://doi.org/10.1007/s00603-002-0035-z
- Copons, R. (2007). Avaluació de la perillositat de caigudes de blocs rocosos al Solà d'Andorra la Vella. *Monografies del CENMA, Institut d'Estudis Andorrans*, 213 pp.
- Corominas, J. (2020). Quantitative assessment of landslide risk: how well are we doing? *SCG-XIII International Symposium on Landslides*.
- Corominas, J., & Moya, J. (2010). Contribution of dendrochronology to the determination of magnitude-frequency relationships for landslides. *Geomorphology*, 124. doi:https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.09.001
- Corominas, J., Copons, R., Vilaplana, J., Altimir, J., & Amigó, J. (2003). Integrated landslide susceptibility analysis and hazard assessment in the Principality of Andorra. *Natural Hazards*, 30, 421-435.

- Corominas, J., Van Westen, C., Frattini, P., Cascini, L., Malet, J.-P., Fotopoulou, S., . . . Smith, J. T. (2014). Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk. *Bull. Eng. Geol. Environ.*, 73, 209–263.
- Corona, C., Trappmann, D., & Stoffel, D. (2013). Parameterization of rockfall source areas and magnitudes with ecological recorders: When disturbances in trees serve the calibration and validation of simulation runs. *Geomorphology*, 202, 33-42. doi:<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.02.001>
- Dai, F., & Lee, C. (2001). Frequency–volume relation and prediction of rainfall-induced landslides. *Engineering Geology*, 59(3-4), 253-266. doi:[https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(00\)00077-6](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(00)00077-6).
- De Biagi, V., Napoli, M., Barbero, M., & Peila, D. (2017). Estimation of the return period of rockfall blocks according to their size. *Nat. Hazards Earth Syst*, 17, 103-113. doi:<https://doi.org/10.5194/nhess-17-103-2017>, 2017.
- Dewez, T., Rohmer, J., Regard, V., & Cnudde, C. (2003). Probabilistic coastal cliff collapse hazard from repeated terrestrial laser surveys: Case study from Mesnil Val (Normandy, northern France). *Journal of Coastal Research Special Issue*(65), 702-707. doi:10.2112/SI65-119.1
- Domènech, G. (2015). *Assessment of the magnitude-frequency relationship of landslides and rockfalls: Application to hazard mapping*. Barcelona: Universidad Politècnica de Catalunya.
- Dussauge, C., Grasso, J., & Helmstetter, A. (2003). Statistical analysis of rockfall volume distributions: Implications for rockfall dynamics. *Journal of Geophysical Research*, 108(B6). doi: <https://doi.org/10.1029/2001JB000650>
- Dussauge-Peisser, C., Helmstetter, A., Grasso, J.-R., Hantz, D., & Desvarreux, P. (2002). Probabilistic approach to rock fall hazard assessment: potential of historical data analysis. *Natural Hazards and Earth System Science, Copernicus Publications on behalf of the European Geosciences Union*, 15-26.
- 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'inestabilitat i d'anàlisi SIG*. Grup de recerca RiskNat. Universitat de Barcelona: Thesis Master of Geology. Speciality: Geological Hazards.
- Generalitat de Catalunya. (2000). Geozona 224 Montserrat. *Departament de Medi Ambient i Habitatge. Direcció General del Medi Natural*. Consultat el 2021, a http://mediambient.gencat.cat/web/.content/home/ambits_dactuacio/patrimoni_natural/sistem_es_dinformacio/inventari_despais_dinteres_geologic/consulta_de_les_fitxes_descriptives_del_s_eig/documentos/224_descrip.pdf
- Giani, G. P. (1992). Rockfalls, topples and buckles. In *Rock slope stability analysis* (pp. 191–207). Rotterdam: Balkema.
- Giribet, J. (2008). http://www.gencat.cat/patronatmontserrat/vista_monestir/WEB/index.htm. Obtenido de Montserrat cara nord-est amb vista al Monestir.
- Google. (2021). *Google maps*. Recuperado el 01 de junio de 2021, de <https://www.google.es/maps>
- Guerin, A., Hantz, D., Rossetti, J.-P., & Jaboyedoff, M. (2014). Brief communication "Estimating rockfall frequency in a mountain limestone cliff using terrestrial laser scanner". *Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss*, 2, 123–135. doi:<https://doi.org/10.5194/nhessd-2-123-2014>

- Guerin, A., Stock, G., Radue, M., Jaboyedoff, M., Collins, B., Matasci, B., . . . Avdievitch, N. (2020). Quantifying 40 years of rockfall activity in Yosemite Valley with historical Structure-from-Motion photogrammetry and terrestrial laser scanning. *Geomorphology* 356:107069. doi:10.1016/j.geomorph.2020.107069
- Guzzetti, G., Malamud, B., Turcotte, D., & Reichenbach, P. (2002). Power-law correlations of landslide areas in central Italy. *Earth and Planetary Science Letters*, 195, 169-183. doi:https://doi.org/10.1016/S0012-821X(01)00589-1.
- Hantz, D., & Levy, C. (2018). *Quantification de l'aléa diffus*. Projet National C2ROP.
- Hantz, D., Colas, B., Dewez, T., Levy, C., Rossetti, J., Guerin, A., & Jaboyedoff, M. (2020). Caractérisation quantitative des aléas rocheux de départ diffus. *Revue Française de Géotechnique*, 163(2). doi:10.1051/geotech/2020011
- Hantz, D., Vengeon, J. M., & Dussauge-Peisser, C. (2003). An historical, geomechanical and probabilistic approach to rock-fall hazard assessment. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. doi:https://doi.org/10.5194/nhess-3-693-2003
- Hoek, E., & Bray, J. (1981). *Rock slope engineering* (Third edition ed.). (I. o. Metallurgi., Ed.) London: Chapman&Hall.
- Hungr, O., Evans, S., & Hazzard, J. (1999). Magnitude and frequency of rock falls and rock slides along the main transportation corridors of southwestern British Columbia. *Canadian Geotechnical Journal*, 36(2). doi:https://doi-org.recursos.biblioteca.upc.edu/10.1139/t98-106
- Hutchinson, J. (1988). Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology. *Landslides. Proceedings 5th International Conference on Landslides, Lausanne*.
- ICGC. (2014- 2020). *Notas tècniques de visita pel seguiment geològic de la muntanya de Montserrat*. Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya.
- ICGC. (2015). *Anàlisi estadística del potencial de propagació de caiguda de roques a la Muntanya de Montserrat*. AP-0094/15. Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya.
- ICGC. (2015). *Càlcul de les relacions magnitud- freqüència dels desprendiments rocosos al massís de Montserrat*. AP-0097/15. Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya.
- ICGC. (2015). *Cerca històrica i documental d'indicis de desprendiments rocosos al massís de Montserrat*. AP-0095/15. Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya.
- ICGC. (2015). *Construcció d'un inventari de desprendiments a Montserrat pel registre de l'activitat*. AP-0096/15. Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya.
- ICGC. (2021). *Guia per l'elaboració d'Estudis d'Identificació de Riscos Geològics per a urbanisme (EIRG)*. AP-0001/21. Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya.
- ICGC. (2021). *Instituto Cartográfico y Geográfico de Cataluña*. Recuperado el 01 de junio de Consulta 2021, de <https://www.icgc.cat/>
- Janeras, M. (2017). ¿Qué nos enseña la pared de Degotalls en Montserrat sobre los desprendimientos de roca? *IX Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables. Centre Internacional de Mètodes Numèrics en Enginyeria (CIMNE)*.

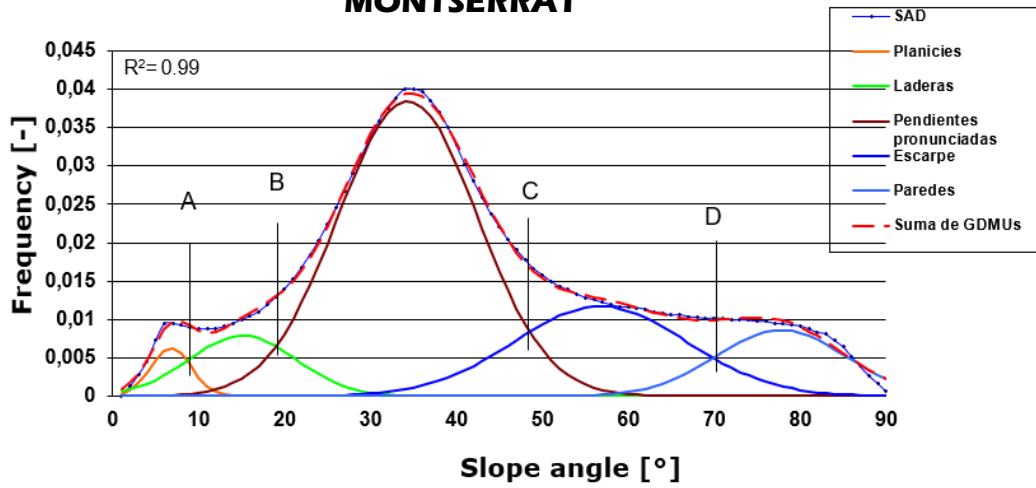
- Janeras, M., Corominas, J., Jara, J., Guinau, M., Aguasca, A., Blanch, X., . . . Buxó, P. (2017). Rocexs 2017 Field Trip: Rockfall Risk Management in the Montserrat Massif. *6th Interdisciplinary Workshop on Rockfall Protection*.
- Janeras, M., Gili, J., Guinau, M., Vilaplana, J., Buxó, P., & Palau, J. (2018). Lessons learned from Degotalls rock wall monitoring in the Montserrat Massif (Catalonia, NE Spain). *4th Rock Slope Stability Symposium (RSS-2018)*.
- Janeras, M., Palau, J., Prat, E., Pons, J., Rodríguez, H., Martínez, P., & Comellas, J. (2013). Valoración de 10 años de mitigación del riesgo de caída de rocas en el Cremallera de Montserrat. *Conference: VIII Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables*.
- Le Roy, G. (2020). *Rockfalls multi-methods detection and characterization*. Applied geology. Université Grenoble Alpes.
- Llorens, M. (2011). *Estimación de la relación magnitud – frecuencia de corrientes de derrubios mediante fotointerpretación. Aplicación a la zona del Parc Nacional D'Aigüestortes i Estany de Sant Maurici (Pirineo central)*. Barcelona: Trabajo Final de Grado - Universidad Politécnica de Cataluña.
- López-Blanco, M. (2006). Stratigraphic and tectonosedimentary development of the Eocene Sant Llorenç del Munt and Montserrat fan-delta complexes. *Contributions to Science*, 125-148.
- Loye, A., Jaboyedoff, M., & Pedrazzini, A. (2009). Identification of potential rockfall source areas at a regional scale using a DEM-based geomorphometric analysis. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. doi:10.5194/nhess-9-1643-2009
- Malamud, B., Turcotte, D., Guzzetti, F., & Reichenbach, P. (2004). Landslide inventories and their statistical properties. *Earth Surface Processes and Landforms*, 29, 687-711. doi:https://doi.org/10.1002/esp.1064
- Marqués, M. A. (2001). Impacto en el medio físico de las lluvias extremas en el macizo de Montserrat. *Tecnología del agua*, 42-50.
- Núñez, M. A., Buill, F., Puig Polo, C., Lantada, N., Prades, A., Janeras, M., & Gili, J. (2019, May 15-17). Comparison of geomatic techniques for rockfall monitoring. Athens, Greece: 4th Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM).
- Pelletier, J., Malamud, B., Blodgett, T., & Turcotte, D. (1997). Scale-invariance of soil moisture variability and its implications for the frequency-size distribution of landslides. *Engineering Geology*, 48, 255-268. doi:https://doi.org/10.1016/S0013-7952(97)00041-0.
- Proyecto GeoRisk. (2021). *UPC. Departamento de Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica*. Recuperado el 06 de junio de 2021, de <https://georisk.upc.edu/es/Proyecto-GeoRisk/objetivo-2>
- Requena, G. (2010). Caracterització de les zones de sortida de despreniments de la paret de Degotalls (Montserrat). Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya.
- Royán, M. (2015). *Caracterización y predicción de desprendimientos de rocas mediante LiDAR Terrestre*. Barcelona: Universidad de Barcelona.
- Royan, M., & Vilaplana, J. M. (2012). Distribución espacio-temporal de los desprendimientos de rocas en la montaña de Montserrat. *Revista de la Sociedad Española de Geomorfología y Asociación Española para el Estudio del Cuaternario*, Vol. 26, Nº. 1-2. 151-170.

- Ruiz-Carulla, R., Corominas, J., Gili, J. A., Matas, G., Lantada, N., Moya, J., . . . Puig, C. (2020). Analysis of Fragmentation of Rock Blocks from Real-Scale Tests. *Geosciences*, *10*(8), 308. doi:<https://doi.org/10.3390/geosciences10080308>
- Santana, D., Coromidas, J., Mavrouli, O., & García-Sellés, D. (2012). Magnitude–frequency relation for rockfall scars using a Terrestrial Laser Scanner. *Engineering Geology*, *145-146*, 50-64. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2012.07.001>.
- Stark, C., & Hovius, H. (2001). The characterization of landslide size distributions. *Geophysical Research Letters* *28*, 1091–1094.
- Trappmann, D., & Stoffel, M. (2013). Counting scars on tree stems to assess rockfall hazards: A low effort approach, but how reliable? *Geomorphology*, *180-181*, 180-186. doi:<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.10.009>
- Turcotte, D., Malamud, B. G., & Reichenbach, P. (2002). Self-organization, the cascade model, and natural hazards. *Proc Natl Acad Sci U S A.*, *2530-7*, 19-99. doi:10.1073/pnas.012582199
- Van Veen, M., Hutchinson, D., & Kromer, R. e. (2017). methods, effects of sampling interval on the frequency - magnitude relationship of rockfalls detected from terrestrial laser scanning using semi-automated. *Landslides*, *14*, 1579–1592. doi:<https://doi.org/10.1007/s10346-017-0801-3>
- Vilaplana, J., Royán, M., Fontquerni, S., Janeras, M., & González, M. (2016). *Los desprendimientos de rocas en la montaña de Montserrat. Un riesgo geológico relevante*. Universitat de Barcelona., Grupo RISK NAT. Institut GEOMODELS. Departament de Geodinàmica i Geofísica. Facultat de Geologia. Àrea de Geotecnia y Prevención de Riesgos Geológicos. Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC).
- Vilaplana, M., & Busquets-Buezo, P. (2000). *Geozona 224 Montserrat*.
- Vinueza, J. (2020). *Monitoreo de bloques de rocas mediante el uso de láser escáner terrestre (TLS). Estudio de alternativas para la detección de bloques desprendidos*. Barcelona: Trabajo Final de Máster - Universidad Politècnica Catalunya.
- Zonu. (2008). *Mapa geográfico de Cataluña 2008*. Recuperado el 06 de junio de 2021, de https://www.gifex.com/fullsize/2010-07-26-11883/Mapa_geografico_de_Cataluna_2008.html

ANEXO A

Análisis Geomorfométrico

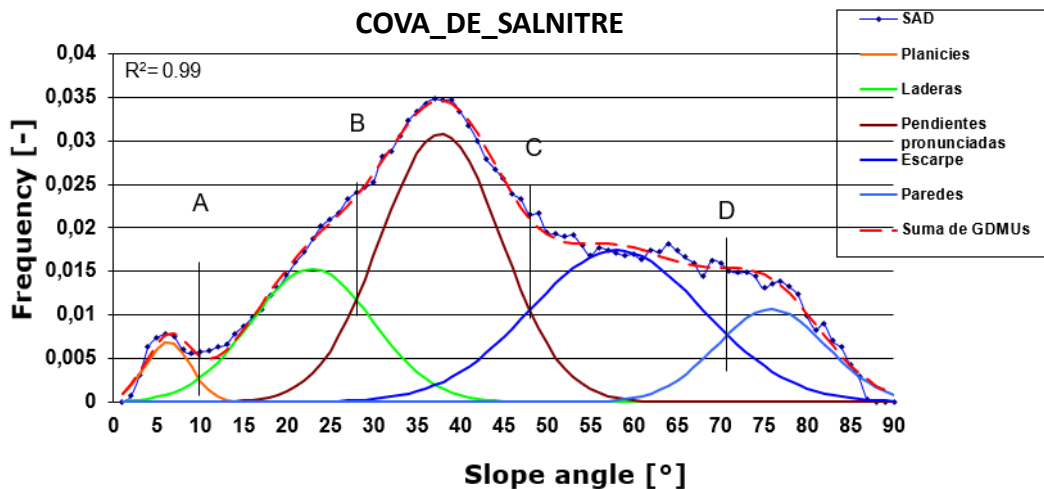
MONTSERRAT

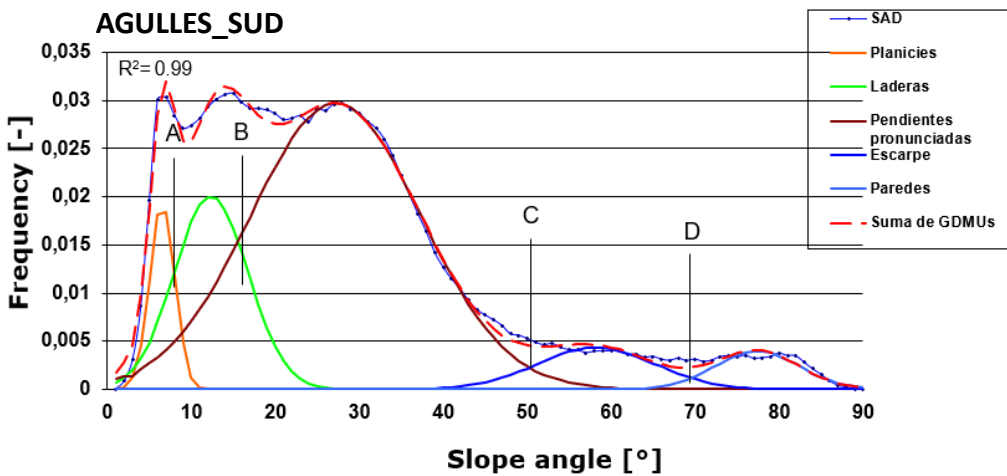
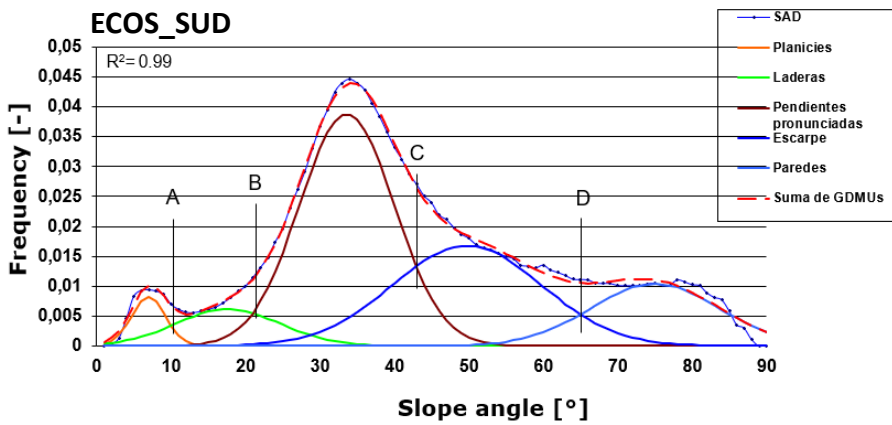
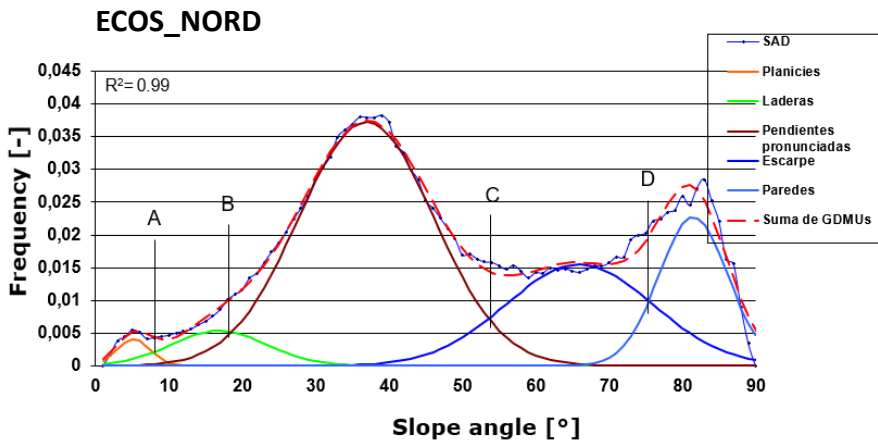
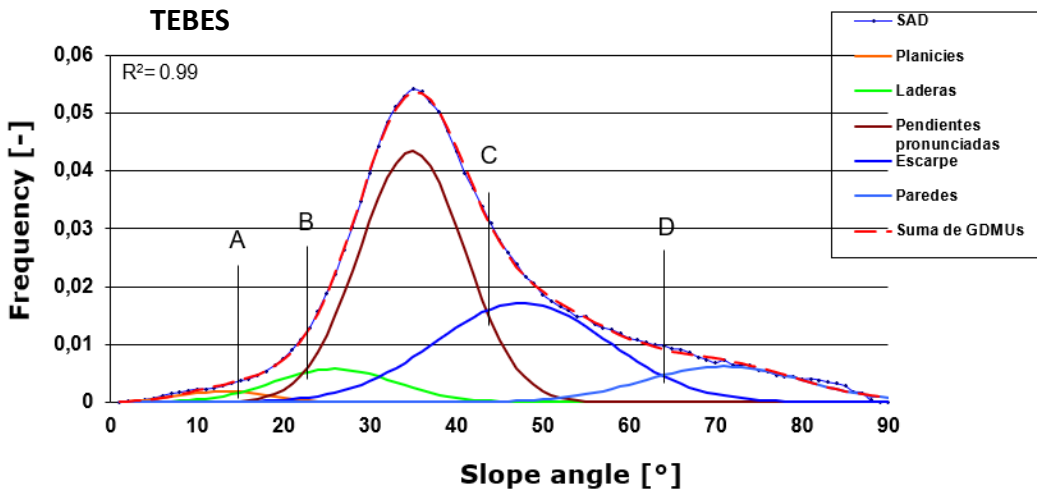


Resumen ajuste geomorfológicos

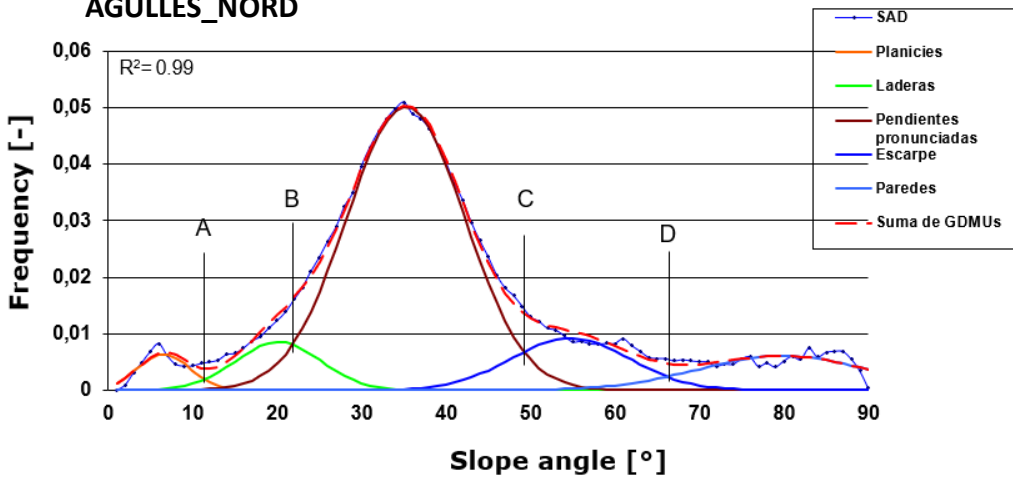
REGIONES	AJUSTE MANUAL	
TODA EL ÁREA	48	70
COVA_DE_SALNITRE	48	71
SERRAT_DEL_PENIT	42	61
TEBES	44	65
ECOS_SUD	42	65
AGULLES_SUD	50	70
AGULLES_NORD	49	66
FRARES_ENCANTATS_NORD	53	78
FRARES_ENCANTA_CENTRE	43	64
SERRA_LLARGA	48	68
ECOS_NORD	54	75
SANT_JERONI_NORD	50	70
SANT_JERONI_SUD	45	65
TEBAIDA	46	67

COVA_DE_SALNITRE

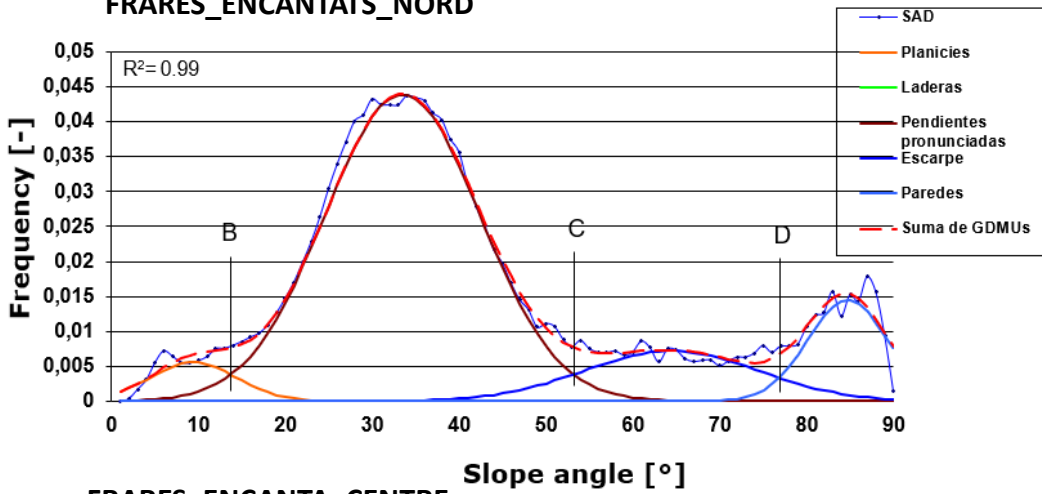




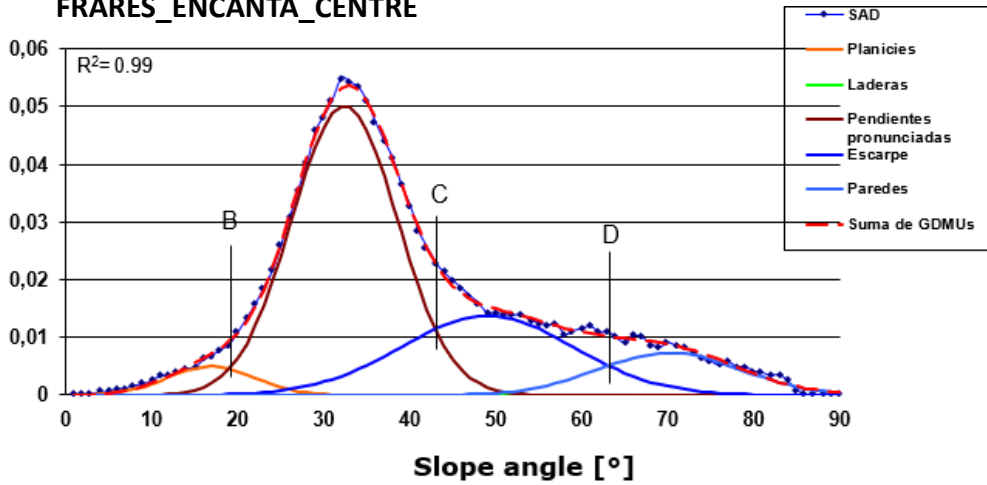
AGULLES_NORD



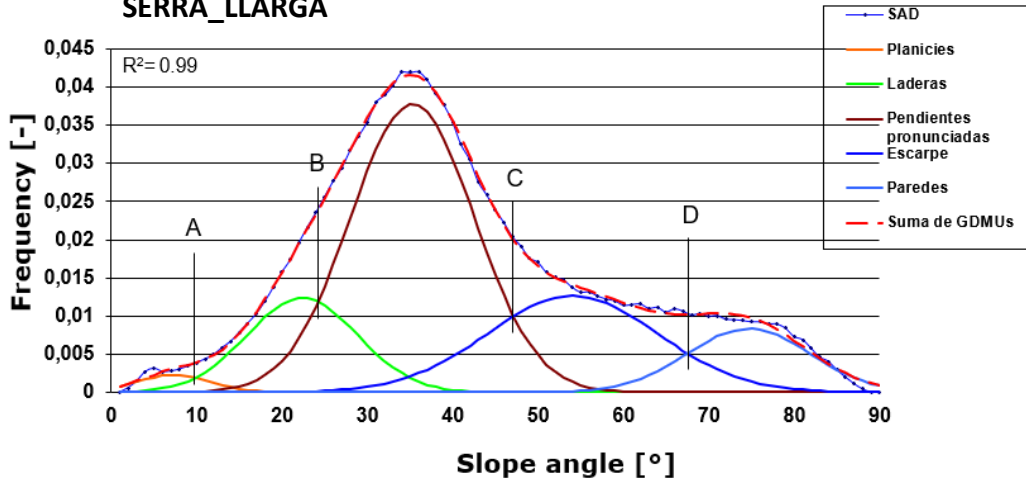
FRARES_ENCANTATS_NORD



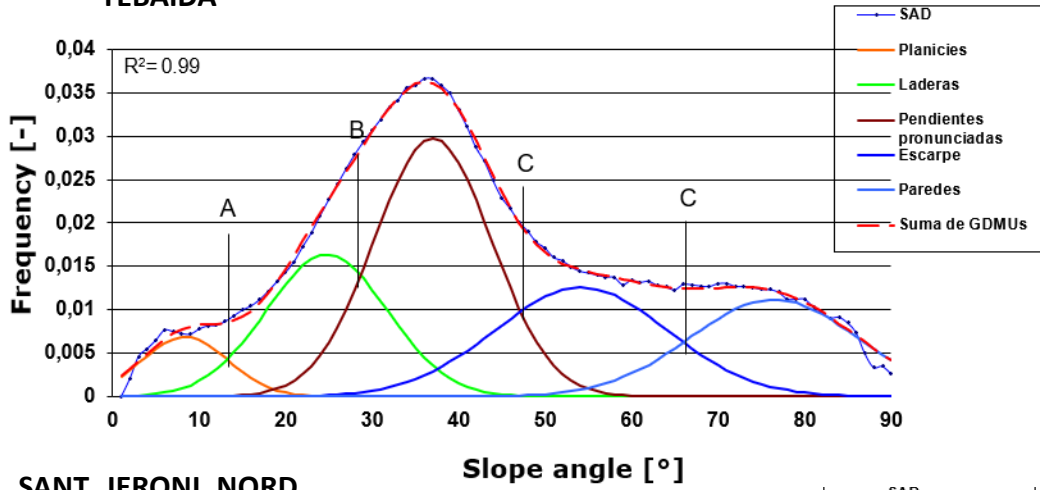
FRARES_ENCANTA_CENTRE



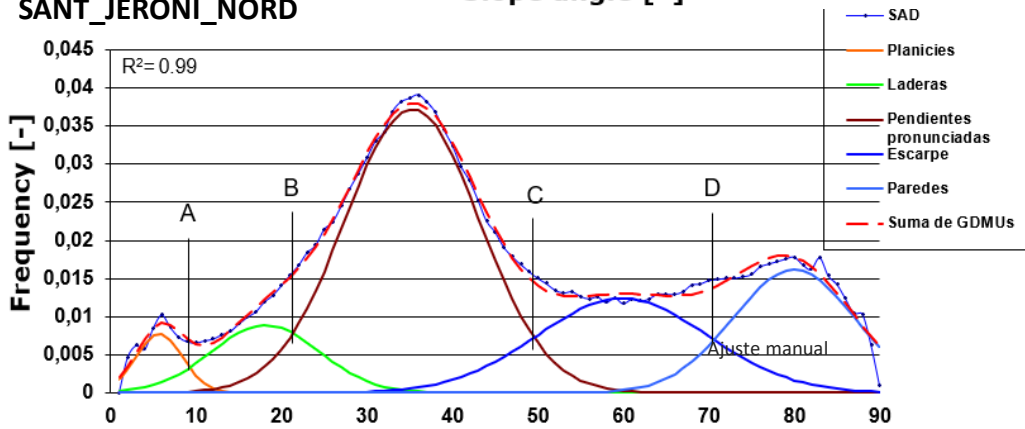
SERRA_LLARGA



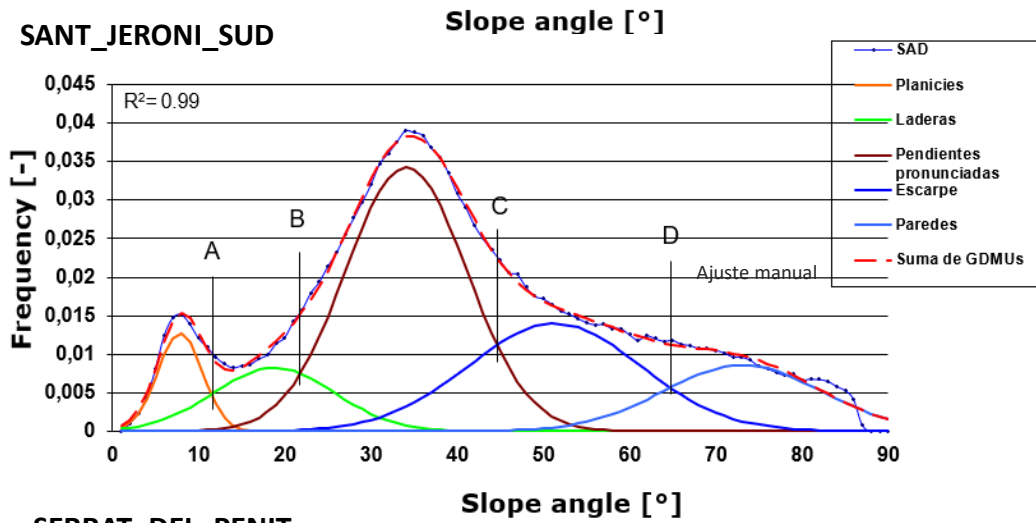
TEBAIDA



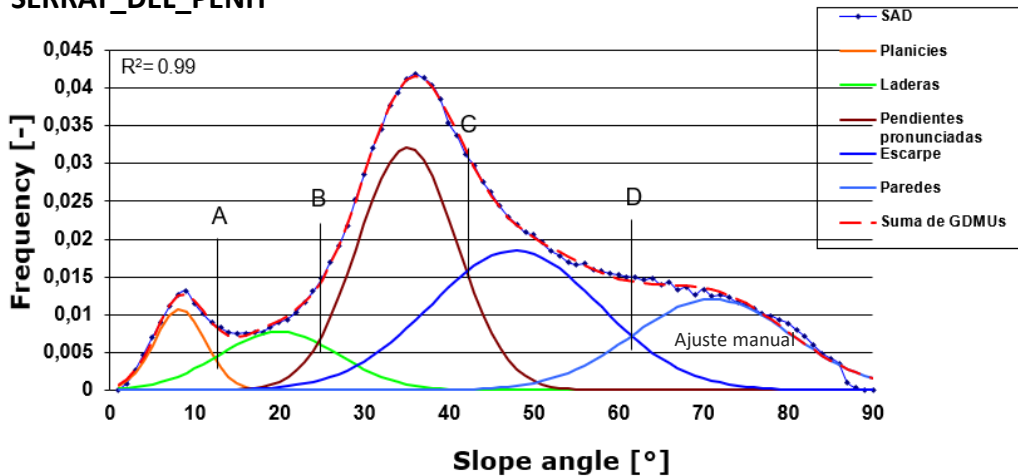
SANT_JERONI_NORD



SANT_JERONI_SUD

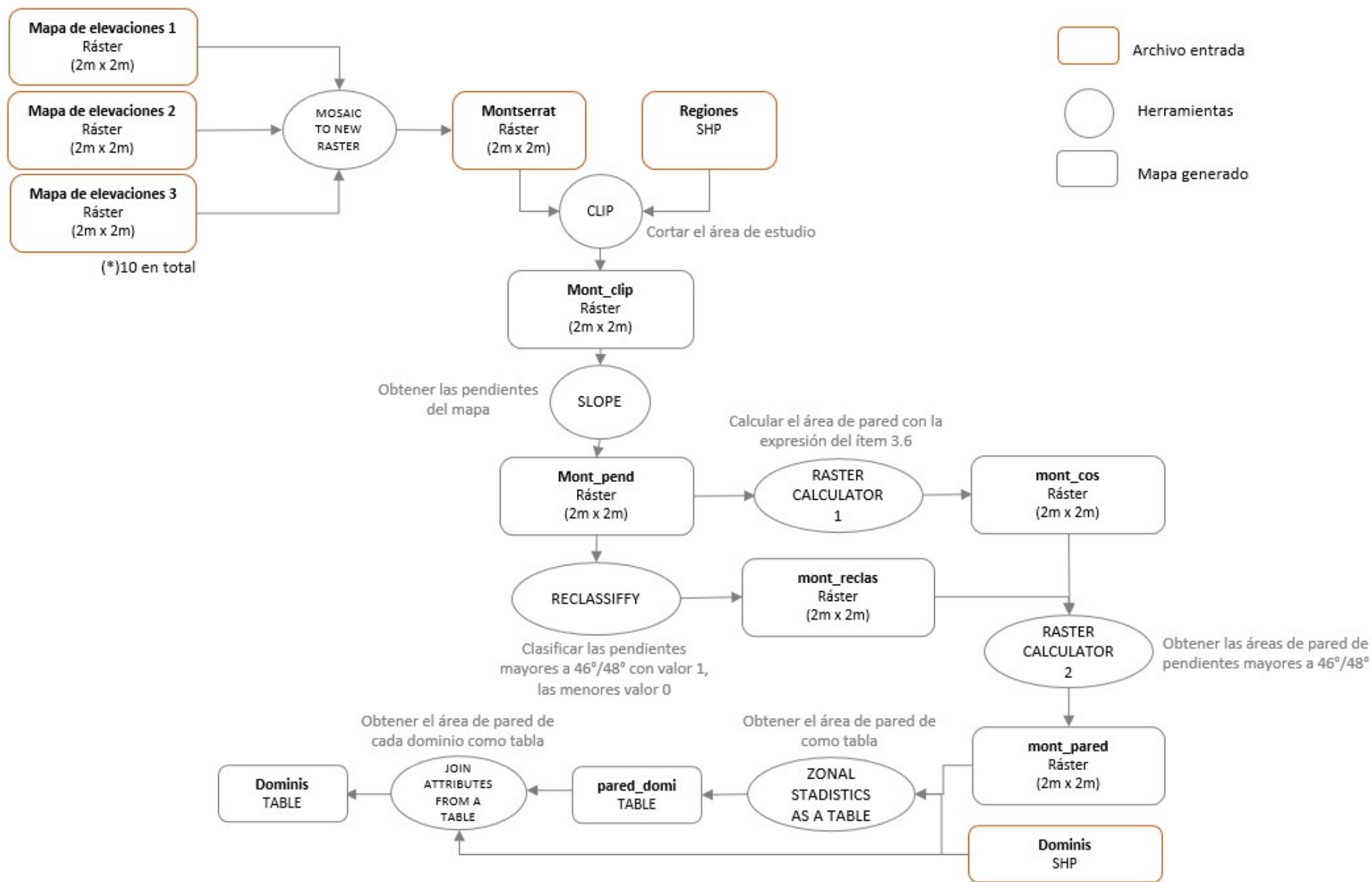


SERRAT_DEL_PENIT



ANEXO B

Flujo de trabajo para obtención del área de pared mediante ArGIS



Flujo de trabajo para obtener área de pared en el SIG
(las capas de información geográfica se representan con rectángulos y las herramientas con elipses)

ANEXO C

Inventario de desprendimientos de rocas de la montaña de Montserrat

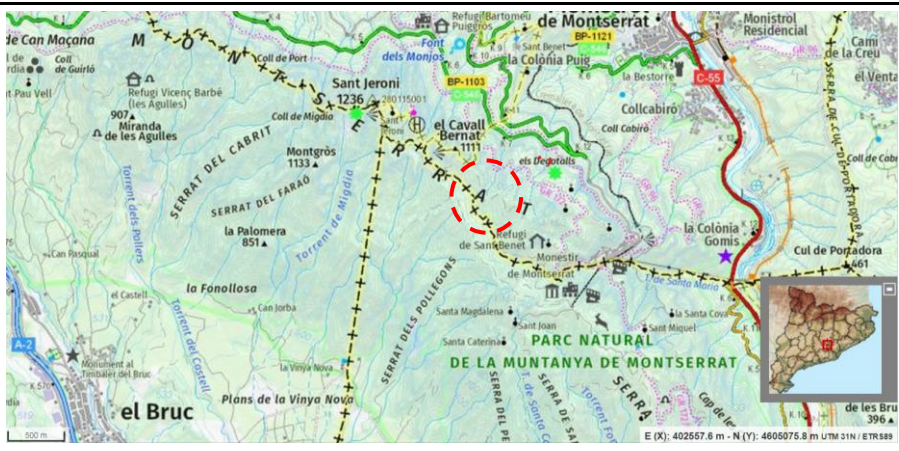
Número evento	Id Fenómeno	ID Desprendimiento	Año	Fecha	Volumen (m ³)	Región	Ámbito	Dominio de Salida	Calidad del dato
1	TA0207DE0001	DEZS0001	1546	01/03/1546	700	Tebaida	1	207	Media
2	TA0178DE0002	DEZS0002	1922		100	Tebaida	3	178	Baja*
3	TA0205DE0003	DEZS0003	1927	19/5/1927	10	Tebaida	1	205	Alta
4	AN0398DE0069	DEZA0066	1969	11/10/2010	202.5	Agulles Nord	2	398	Baja
5	TA0077DE0005	DEZS0005	1991		1275	Tebaida	1	77	Baja
6	TA0214DE0004	DEZS0004	1991	21/3/1991	585	Tebaida	1	214	Alta
7	TA0011DE0006	DEZS0006	1992	1/7/1992	59	Tebaida	1	11	Baja*
8	TE0828DE0035	DEZS0035	1994		2160	TEBES	4	828	Media
9	TE0826DE0039	DEZS0038	1994		4	TEBES	4	826	Baja
10	TE0828DE0036	DEZS0036	1994		3	TEBES	4	828	Alta
11	TA0002DE0008	DEZS0008	1995		18	Tebaida	1	2	Baja
12	TA0002DE0007	DEZS0007	1995		1	Tebaida	1	2	Baja
13	TE0928DE0009	DEZS0009	1996		40	TEBES	4	928	Baja
14	TA0091DE0010	DEZS0010	1996		23	Tebaida	3	91	Alta
15	JN0301DE0012	DEZS0012	2000	10/6/2000	2100	Sant Jeroni Nord	2	301	Baja
16	JN0303DE0141	DEZS0105	2000		150	Sant Jeroni Nord	2	303	Media
17	SL1032DE0040	DEZS0039	2000		7	Serra Llarga	3	1032	Baja*
18	TA0211DE0011	DEZS0011	2000	10/6/2000	1	Tebaida	1	211	Media
19	SL1017DE0038	DEZS0037	2001		250	Serra Llarga	3	1017	Baja
20	TA0116DE0014	DEZS0014	2001		5	Tebaida	1	116	Baja*
21	TA0207DE0015	DEZS0015	2001		0.21	Tebaida	1	207	Alta
22	TA0002DE0016	DEZS0016	2002	1/4/2002	6	Tebaida	1	2	Baja
23	SL0977DE0216	DEZA0208	2003		0.0036	Serra Llarga	3	977	Media*
24	JN0283DE0017	DEZS0017	2004	1/4/2004	100	Sant Jeroni Nord	2	283	Baja
25	TA0116DE0018	DEZS0018	2006	29/1/2006	292	Tebaida	1	119	Baja
26	TA0241DE0019	DEZS0019	2006	10/2/2006	3	Tebaida	3	241	Baja
27	TA0171DE0050	DEZS0048	2006		3	Tebaida	4	171	Baja
28	TA0116DE0020	DEZS0020	2007	2/1/2007	300	Tebaida	1	119	Baja
29	TA0116DE0021	DEZS0021	2008	28/12/2008	954	Tebaida	1	119	Media
30	TA0039DE0022	DEZS0022	2008	4/11/2008	320	Tebaida	2	39	Alta
31	TA0116DE0078	DEZA0075	2008	3/11/2008	5	Tebaida	1	116	Alta
32	TA0020DE0023	DEZS0023	2008	2/11/2008	2	Tebaida	1	20	Alta
33	TA0116DE0077	DEZA0074	2008	14/5/2008	0.94	Tebaida	1	116	Media
34	TA0025DE0024	DEZS0024	2009	12/2/2009	20	Tebaida	2	25	Alta
35	CS0947DE0041	DEZA0038	2009		0.5	Cova de Salnitre	2	947	Baja
36	EN0344DE0025	DEZS0025	2010	9/10/2010	140	Ecos Nord	2	344	Media
37	TA0116DE0031	DEZS0031	2010	8/5/2010	19	Tebaida	1	116	Media
38	TA0025DE0026	DEZS0026	2010	24/9/2010	10	Tebaida	2	25	Baja
39	TA0082DE0048	DEZS0046	2010		10	Tebaida	2	82	Baja
40	SL0995DE0027	DEZS0027	2010	1/3/2010	6	Serra Llarga	3	995	Baja
41	CS0941DE0030	DEZS0030	2010	11/10/2010	5	Cova de Salnitre	2	941	Alta
42	TA0216DE0029	DEZS0029	2010	30/4/2010	5	Tebaida	3	216	Baja
43	CS0942DE0146	DEZS0110	2010	11/10/2010	5	Cova de Salnitre	2	942	Media
44	TA0208DE0028	DEZS0028	2010	15/12/2010	4	Tebaida	1	208	Media
45	TA0002DE0047	DEZS0045	2010	11/10/2010	3	Tebaida	1	2	Media
46	CS0942DE0060	DEZA0057	2010		0.08	Cova de Salnitre	2	950	Alta
47	SL0999DE0032	DEZS0032	2011	1/9/2011	30	Serra Llarga	3	999	Media
48	TA0193DE0051	DEZS0049	2011		5	Tebaida	3	193	Baja
49	TA0136DE0062	DEZS0057	2011	13/3/2011	1.7	Tebaida	1	136	Baja
50	TA0119DE0042	DEZS0040	2011	4/11/2011	1	Tebaida	1	116	Alta
51	TA0205DE0094	DEZS0078	2011		0.1	Tebaida	1	205	Media
52	TA0211DE0043	DEZS0041	2011	22/11/2011	0.01	Tebaida	1	211	Alta
53	FN0375DE0057	DEZS0054	2012		40	Freres Encantats Nord	2	375	Baja
54	TA0079DE0033	DEZS0033	2012	31/10/2012	4	Tebaida	1	79	Baja
55	TA0048DE0052	DEZS0050	2012		2	Tebaida	3	48	Baja
56	TA0211DE0034	DEZS0034	2012	1/8/2010	1	Tebaida	1	211	Baja
57	JN0262DE0044	DEZS0042	2012	30/10/2012	0.5	Sant Jeroni Nord	3	262	Alta
58	TA0020DE0064	DEZS0059	2013		3	Tebaida	1	20	Media
59	JN0261DE0045	DEZS0043	2013	21/1/2013	1.5	Sant Jeroni Nord	3	261	Alta
60	TA0012DE0095	DEZS0079	2013		1.5	Tebaida	1	12	Alta
61	TA0208DE0054	DEZS0051	2013	21/11/2013	0.05	Tebaida	1	208	Alta
62	TA0208DE0046	DEZS0044	2013	13/3/2013	0.03	Tebaida	1	208	Baja
63	TA0082DE0049	DEZS0047	2014	24/6/2014	10	Tebaida	2	82	Media
64	TA0242DE0055	DEZS0052	2014	24/6/2014	2	Tebaida	3	242	Baja
65	SL0991DE0058	DEZS0055	2014		2	Serra Llarga	3	991	Media
66	TA0116DE0080	DEZS0071	2014	24/6/2014	1	Tebaida	1	116	Media
67	TA0002DE0075	DEZS0068	2014	1/12/2014	1	Tebaida	1	2	Media
68	EN0334DE0082	DEZA0079	2014	1/12/2014	0.5	Freres Encantats Nord	2	334	Alta
69	TA0190DE0059	DEZS0056	2014		0.5	Tebaida	3	190	Media
70	TA0002DE0079	DEZS0070	2014	24/6/2014	0.05	Tebaida	1	2	Baja
71	CS0947DE0081	DEZA0078	2014	9/10/2014	0.02	Cova de Salnitre	2	947	Alta
72	TA0192DE0013	DEZS0013	2014	13/5/2014	0.004	Tebaida	3	192	Alta
73	TA0191DE0068	DEZS0063	2015	2/10/2015	9	Tebaida	3	191	Baja
74	AS0435DE0130	DEZS0100	2015		5	Agulles Sud	4	435	Media
75	SL1000DE0067	DEZS0062	2015		3	Serra Llarga	3	1000	Baja
76	AS0435DE0129	DEZS0099	2015	1/10/2015	3	Agulles Sud	4	435	Media
77	CS0941DE0061	DEZA0058	2015	4/11/2015	1	Cova de Salnitre	2	947	Alta
78	SL0975DE0086	DEZS0075	2015		0.6	Serra Llarga	3	975	Alta
79	CS0947DE0065	DEZS0060	2015	4/11/2015	0.6	Cova de Salnitre	2	947	Alta
80	JN0255DE0084	DEZS0073	2015	18/2/2015	0.5	Sant Jeroni Nord	3	255	Alta
81	TA0082DE0073	DEZS0066	2015	2/10/2015	0.45	Tebaida	2	82	Media
82	SL0975DE0085	DEZS0074	2015		0.3	Serra Llarga	3	975	Media
83	TA0002DE0070	DEZS0064	2015	22/7/2015	0.3	Tebaida	1	2	Alta
84	CS0942DE0152	DEZA0148	2015	3/11/2015	0.15	Cova de Salnitre	2	950	Alta
85	TA0116DE0072	DEZS0065	2015	2/10/2015	0.13	Tebaida	1	116	Baja
86	TA0191DE0066	DEZS0061	2015	5/11/2015	0.1	Tebaida	3	191	Alta
87	CS0942DE0151	DEZA0147	2015	3/11/2015	0.05	Cova de Salnitre	2	950	Alta
88	CS0942DE0093	DEZA0090	2015	2/11/2015	0.04	Cova de Salnitre	2	948	Alta
89	JN0273DE0076	DEZS0069	2015		0.02	Sant Jeroni Nord	2	273	Alta
90	TA0025DE0089	DEZS0076	2015	15/5/2015	0.02	Tebaida	2	25	Media
91	TA0184DE0091	DEZS0077	2015	2/10/2015	0.015	Tebaida	3	184	Alta

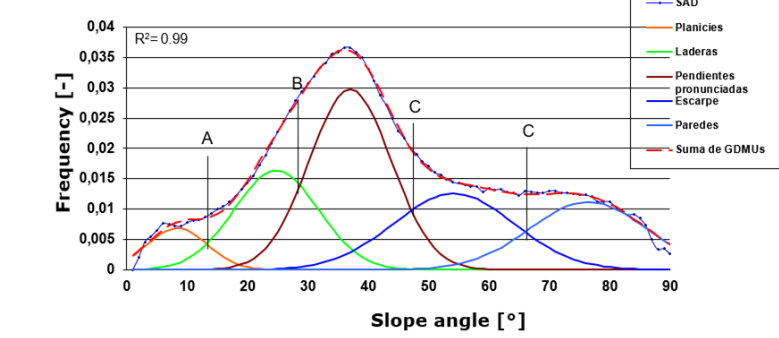
Número evento	Id Fenómeno	ID Desprendimiento	Año	Fecha	Volumen (m ³)	Región	Ámbito	Dominio de Salida	Calidad del dato
92	CS0942DE0037	DEZA0034	2015	11/3/2015	0.01	Cova de Salnitre	2	949	Alta
93	CS0947DE0088	DEZA0085	2015	18/2/2015	0.01	Cova de Salnitre	2	947	Alta
94	TA0184DE0074	DEZS0067	2015	2/10/2015	0.008	Tebaida	3	184	Alta
95	CS0942DE0087	DEZA0084	2015	18/2/2015	0.008	Cova de Salnitre	2	949	Alta
96	TA0180DE0090	DEZA0087	2015	2/10/2015	0.007	Tebaida	3	180	Alta
97	TA0207DE0092	DEZA0089	2015	2/11/2015	0.006	Tebaida	1	207	Alta
98	TA0191DE0083	DEZS0072	2015	18/2/2015	0.0035	Tebaida	3	191	Baja
99	TA0205DE0071	DEZA0068	2015	17/8/2015	0.001	Tebaida	1	205	Alta
100	TA0117DE0106	DEZS0089	2016		45	Tebaida	1	117	Media
101	ES0581DE0154	DEZS0115	2016		24	Ecos Sud	4	581	Baja
102	JN0292DE0100	DEZS0084	2016		9	Sant Jeroni Nord	2	292	Media
103	CS0947DE0137	DEZA0134	2016		4.03	Cova de Salnitre	2	947	Media
104	TA0218DE0191	DEZA0183	2016	27/11/2016	1	Tebaida	3	218	Alta
105	CS0949DE0124	DEZS0095	2016	27/6/2016	1	Cova de Salnitre	2	949	Alta
106	JN0275DE0102	DEZS0086	2016		0.8	Sant Jeroni Nord	2	275	Media
107	TA0058DE0103	DEZS0087	2016		0.45	Tebaida	2	58	Media
108	JN0292DE0101	DEZS0085	2016		0.45	Sant Jeroni Nord	2	292	Media
109	TA0116DE0098	DEZS0082	2016		0.41	Tebaida	1	116	Baja
110	TA0274DE0099	DEZS0083	2016		0.25	Sant Jeroni Nord	2	274	Media
111	TA0116DE0097	DEZS0081	2016		0.2	Tebaida	1	116	Alta
112	TA0116DE0063	DEZS0058	2016		0.16	Tebaida	1	116	Media
113	TA0011DE0096	DEZS0080	2016		0.07	Tebaida	1	11	Alta
114	TA0220DE0107	DEZS0090	2016	19/5/2016	0.05	Tebaida	1	220	Alta
115	CS0947DE0135	DEZA0132	2016		0.03	Cova de Salnitre	2	947	Alta
116	CS0947DE0136	DEZA0133	2016		0.03	Cova de Salnitre	2	947	Alta
117	TA0116DE0104	DEZS0088	2016		0.02	Tebaida	1	116	Media
118	CS0941DE0120	DEZS0091	2016		0.02	Cova de Salnitre	2	941	Alta
119	TA0116DE0105	DEZA0102	2016		0.02	Tebaida	1	116	Media
120	TA0207DE0108	DEZA0105	2016		0.0025	Tebaida	1	207	Baja
121	JN0303DE0143	DEZS0107	2017		80	Sant Jeroni Nord	2	303	Alta
122	SL1001DE0131	DEZS0101	2017	12/12/2017	10	Serra Llarga	3	1001	Media
123	JS0678DE0140	DEZS0104	2017		5	Sant Jeroni Sud	4	678	Alta
124	CS0942DE0122	DEZS0093	2017	18/5/2017	3	Cova de Salnitre	2	942	Baja
125	CS0947DE0138	DEZA0135	2017		3	Cova de Salnitre	2	941	Media
126	FN0370DE0128	DEZS0098	2017	17/11/2017	0.4	Freres Encantats Nord	2	370	Media
127	CS0948DE0125	DEZS0096	2017	13/11/2017	0.2	Cova de Salnitre	2	948	Baja
128	CS0942DE0134	DEZA0131	2017		0.2	Cova de Salnitre	2	947	Alta
129	TA0116DE0126	DEZS0097	2017	13/11/2017	0.09	Tebaida	1	116	Alta
130	CS0942DE0123	DEZS0094	2017	13/11/2017	0.02	Cova de Salnitre	2	942	Baja
131	CS0942DE0121	DEZS0092	2017	18/5/2017	0.005	Cova de Salnitre	2	942	Baja
132	JN0312DE0142	DEZS0106	2018	13/4/2018	60	Sant Jeroni Nord	2	312	Baja
133	TA0038DE0177	DEZS0134	2018	24/10/2018	20	Tebaida	2	38	Media
134	TA0116DE0160	DEZS0120	2018	15/11/2018	16	Tebaida	1	116	Media
135	TA0117DE0161	DEZS0121	2018	15/11/2018	5	Tebaida	1	117	Media
136	AN0403DE0173	DEZS0130	2018	14/10/2018	3.75	Agulles Nord	2	403	Baja
137	TA0001DE0176	DEZS0133	2018		3.08	Tebaida	3	1	Alta
138	TA0198DE0127	DEZA0124	2018		3	Tebaida	1	210	Alta
139	EN0334DE0170	DEZS0128	2018	7/11/2018	2.25	Ecos Nord	2	334	Alta
140	CS0942DE0150	DEZS0114	2018	15/4/2018	2	Cova de Salnitre	2	942	Baja
141	CS0959DE0157	DEZA0153	2018		1.5	Cova de Salnitre	2	959	Alta
142	JN0273DE0158	DEZS0118	2018	15/11/2018	1.5	Sant Jeroni Nord	2	273	Media
143	SL0975DE0163	DEZS0123	2018	15/11/2018	1.5	Serra Llarga	3	975	Alta
144	TA0113DE0159	DEZS0119	2018	15/11/2018	1.44	Tebaida	1	116	Media
145	SL0980DE0165	DEZA0164	2018		1.14	Serra Llarga	3	980	Baja
146	CS0947DE0147	DEZS0111	2018	16/1/2018	1	Cova de Salnitre	2	947	Alta
147	AN0399DE0133	DEZS0103	2018	13/4/2018	0.75	Agulles Nord	2	399	Media
148	CS0939DE0166	DEZS0124	2018	15/11/2018	0.4	Cova de Salnitre	2	939	Alta
149	TA0118DE0175	DEZS0132	2018		0.3	Tebaida	1	118	Alta
150	SL0980DE0164	DEZA0163	2018		0.21	Serra Llarga	3	996	Baja
151	CS0942DE0145	DEZS0109	2018	25/3/2018	0.2	Cova de Salnitre	2	942	Alta
152	CS0942DE0148	DEZS0112	2018	26/1/2018	0.2	Cova de Salnitre	2	942	Alta
153	CS0942DE0149	DEZS0113	2018	25/3/2018	0.2	Cova de Salnitre	2	942	Baja
154	TA0212DE0162	DEZS0122	2018	15/11/2018	0.1	Tebaida	1	212	Baja
155	TA0117DE0171	DEZS0129	2018	19/11/2018	0.1	Tebaida	1	117	Alta
156	CS0950DE0168	DEZS0126	2018	15/11/2018	0.1	Cova de Salnitre	2	950	Alta
157	CS0947DE0144	DEZS0108	2018		0.07	Cova de Salnitre	2	947	Media
158	AN0404DE0155	DEZS0116	2018	17/8/2018	0.06	Agulles Nord	2	404	Alta
159	TE0930DE0172	DEZA0167	2018	14/10/2018	0.01	Tebes	4	930	Alta
160	CS0942DE0156	DEZA0152	2018		0.01	Cova de Salnitre	2	942	Baja
161	CS0942DE0167	DEZS0125	2018	15/11/2018	0.001	Cova de Salnitre	2	942	Alta
162	CS0948DE0169	DEZS0127	2018	15/11/2018	0.001	Cova de Salnitre	2	948	Baja
163	TA0243DE0190	DEZS0142	2019	21/12/2019	37.5	Tebaida	3	243	Baja
164	EN0334DE0189	DEZS0141	2019	7/12/2019	25	Ecos Nord	2	334	Media
165	TA0079DE0186	DEZS0140	2019		6.4	Tebaida	1	79	Baja
166	TA0208DE0184	DEZS0138	2019	14/10/2019	3	Tebaida	1	208	Baja
167	TA0205DE0179	DEZS0135	2019	9/4/2019	1	Tebaida	1	205	Alta
168	TA0194DE0181	DEZS0136	2019		0.3	Tebaida	3	194	Alta
169	TA0138DE0174	DEZS0131	2019		0.2	Tebaida	1	138	Alta
170	TA0115DE0183	DEZA0175	2019	18/7/2019	0.2	Tebaida	1	115	Baja
171	CS0947DE0188	DEZA0180	2019		0.2	Cova de Salnitre	2	947	Baja
172	TA0002DE0185	DEZS0139	2019	23/11/2019	0.08	Tebaida	1	2	Alta
173	CS0941DE0178	DEZA0169	2019	11/1/2019	0.04	Cova de Salnitre	2	947	Media
174	TA0033DE0182	DEZS0137	2019		0.03	Tebaida	2	35	Alta
175	TA0207DE0153	DEZA0149	2019		0.025	Tebaida	1	207	Baja
176	TA0117DE0180	DEZA0171	2019	19/5/2019	0.02	Tebaida	1	117	Alta
177	TA0238DE0187	DEZA0179	2019	27/7/2019	0.003	Tebaida	1	238	Media
178	FC0468DE0220		2020	24/1/2020	15	Freres Encantats Centre	4	468	Media
179	ES0561DE0217		2020	24/1/2020	7.5	Ecos Sud	4	561	Baja
180	CS0949DE0206	DEZS0155	2020	22/4/2020	5	Cova de Salnitre	2	949	Media
181	EN0335DE0199	DEZS0150	2020	24/1/2020	5	Ecos Nord	2	335	Media
182	ES0561DE0219		2020	24/1/2020	5	Ecos Sud	4	561	Baja

Número evento	Id Fenómeno	ID Desprendimiento	Año	Fecha	Volumen (m ³)	Región	Ámbito	Dominio de Salida	Calidad del dato
183	TA0205DE0204	DEZS0153	2020	22/4/2020	4	Tebaída	1	205	Media
184	TE0857DE0212	DEZS0158	2020	10/8/2020	4	Tebes	4	857	Media
185	CS0948DE0193	DEZS0144	2020	24/1/2020	2.49	Cova de Salnitre	2	948	Media
186	TA0116DE0197	DEZS0148	2020	24/1/2020	2.34	Tebaída	1	116	Media
187	CS0958DE0221		2020	24/1/2020	2	Cova de Salnitre	2	958	Baja
188	ES0561DE0218		2020	24/1/2020	2	Ecos Sud	4	561	Media
189	CS0948DE0192	DEZS0143	2020	24/1/2020	1.53	Cova de Salnitre	2	948	Baja
190	TA0002DE0209	DEZS0157	2020	26/5/2020	1	Tebaída	1	2	Baja
191	TA0082DE0198	DEZS0149	2020	24/1/2020	1	Tebaída	2	82	Media
192	TA0116DE0196	DEZS0147	2020	24/1/2020	0.9	Tebaída	1	116	Baja
193	CS0941DE0213	DEZS0159	2020	1/12/2020	0.8	Cova de Salnitre	2	941	Media
194	TA0162DE0195	DEZS0146	2020	24/1/2020	0.6	Tebaída	3	162	Baja
195	CS0942DE0194	DEZS0145	2020	24/1/2020	0.5	Cova de Salnitre	2	942	Media
196	JN0255DE0200	DEZS0151	2020	24/1/2020	0.5	Sant Jeroni Nord	3	255	Alta
197	TA0088DE0208	DEZS0156	2020	22/4/2020	0.25	Tebaída	3	88	Alta
198	TA0184DE0215	DEZA0207	2020	22/6/2020	0.16	Tebaída	3	184	Alta
199	CS0942DE0205	DEZS0154	2020	22/4/2020	0.05	Cova de Salnitre	2	942	Media
200	TA0116DE0201	DEZA0193	2020	6/2/2020	0.03	Tebaída	1	116	Alta
201	TA0205DE0203	DEZS0152	2020	22/4/2020	0.01	Tebaída	1	205	Alta
202	CS0948DE0214	DEZS0160	2020	1/12/2020	0.01	Cova de Salnitre	2	948	Media
203	CS0948DE0207	DEZA0199	2020	22/4/2020	0.006	Cova de Salnitre	2	948	Baja
204	TA0116DE0202	DEZA0194	2020	6/2/2020	0.003	Tebaída	1	116	Alta
205	TA0214DE0211	DEZA0203	2020	10/8/2020	0.001	Tebaída	1	214	Alta

ANEXO D

Descripción áreas de análisis de la montaña de Montserrat

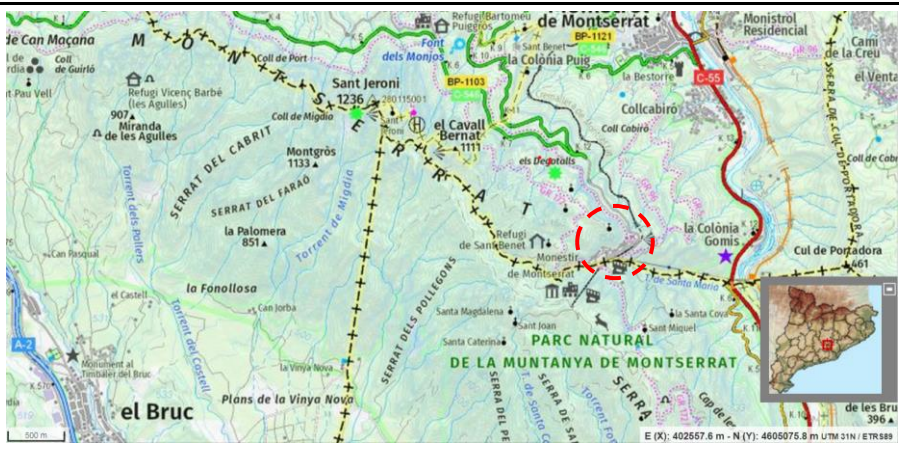
Submuestra:	Monasterio
Sigla:	MO
Ubicación:	
Región:	Tebaida
Ámbito:	1
Dominios:	205; 206; 207;208; 209; 210; 211; 220; 221;222;223; 224

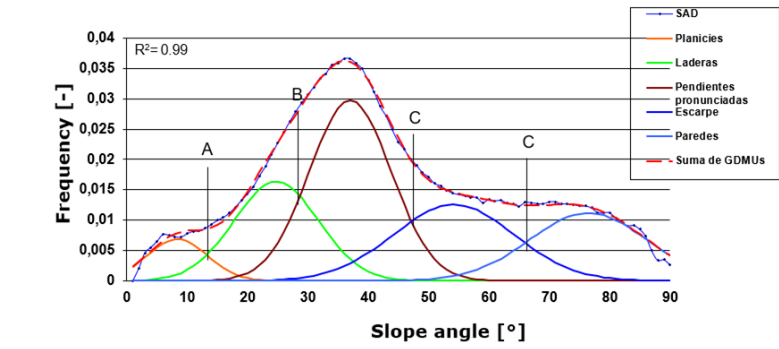
Geomorfología:	
Ángulo de corte:	pared inclinada 46 ° pared vertical 67 °

Extensión:	5,9 hm ²
------------	---------------------

Área de pared:	15,668 hm ²
----------------	------------------------

Datos de inventario:	Volumen mínimo	0,001 m ³
	Volumen máximo	700 m ³
	Año primer registro	1546

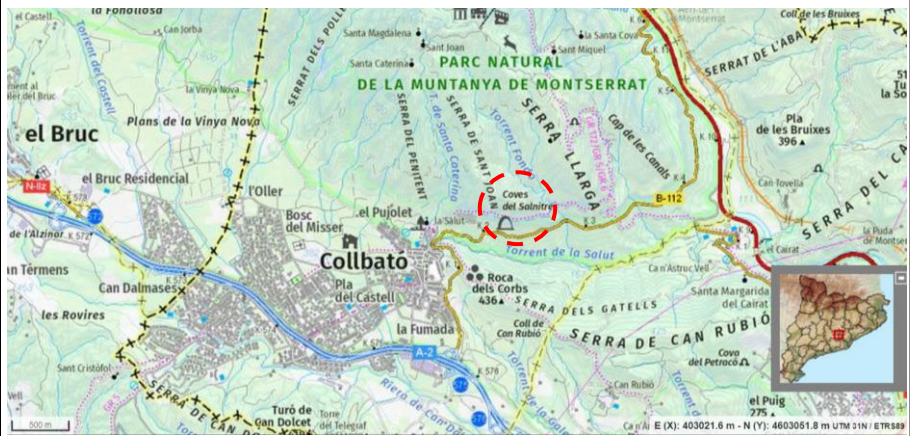
Submuestra:	Aparcamiento Monasterio
Sigla:	AP
Ubicación:	
Región:	Tebaida
Ámbito:	1
Dominios:	81; 115; 116; 117; 118; 119; 120; 138; 140

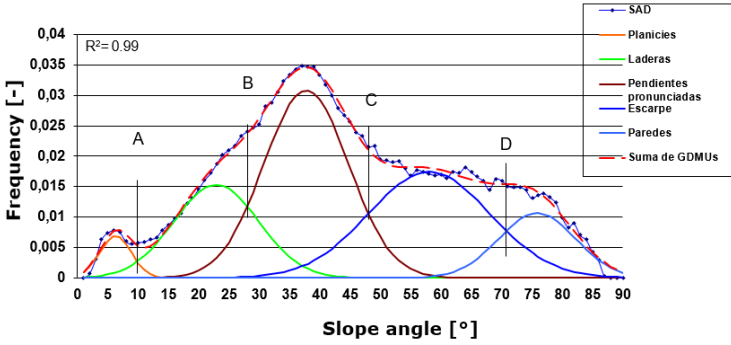
Geomorfología:	
Ángulo de corte:	pared inclinada 46 ° pared vertical 67 °

Extensión:	5,81 hm ²
------------	----------------------

Área de pared:	17,120 hm ²
----------------	------------------------

Datos de inventario:	Volumen mínimo	0,003 m ³
	Volumen máximo	954 m ³
	Año primer registro	2001

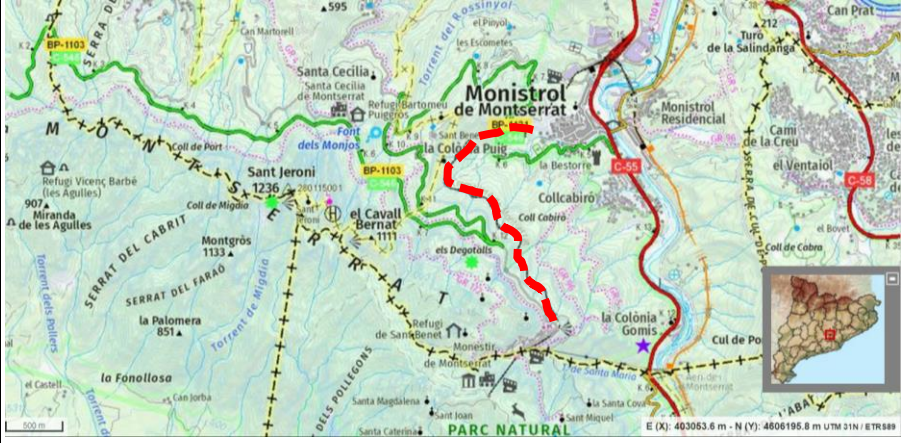
Submuestra:	Coves del Salnitre
Sigla:	CS
Ubicación:	
Región:	Cova de Salnitre
Ámbito:	2
Dominios:	938; 939; 941; 942; 943; 944; 945; 946; 947; 948; 949; 950; 953; 954; 955; 956; 957; 960; 961; 962; 963

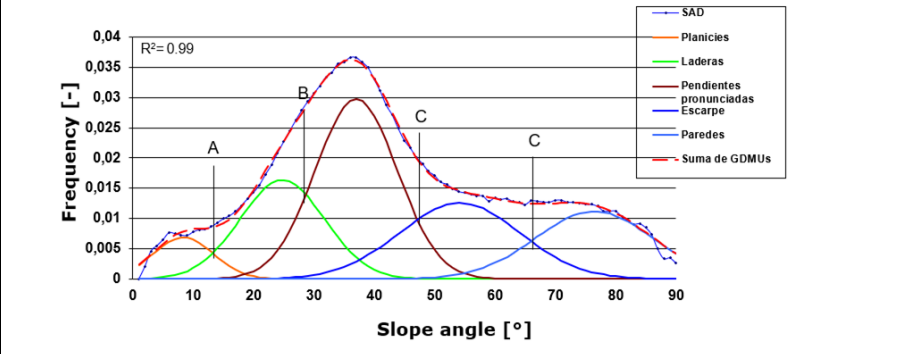
Geomorfología:		
Ángulo de corte:	pared inclinada	48 °
	pared vertical	71 °

Extensión:	8,32 hm ²
------------	----------------------

Área de pared:	18,752 hm ²
----------------	------------------------

Datos de inventario:	Volumen mínimo	0,001 m ³
	Volumen máximo	5 m ³
	Año primer registro	2009


Submuestra:	Cremallera
Sigla:	CM
Ubicación:	
Región:	Tebaida
Ámbito:	1
Dominios:	2; 3; 7; 8; 9; 10; 11; 12; 16; 17; 18; 19; 20; 23; 31; 32; 51; 52; 53; 54; 77; 78; 79; 112; 113; 114; 136; 137; 139

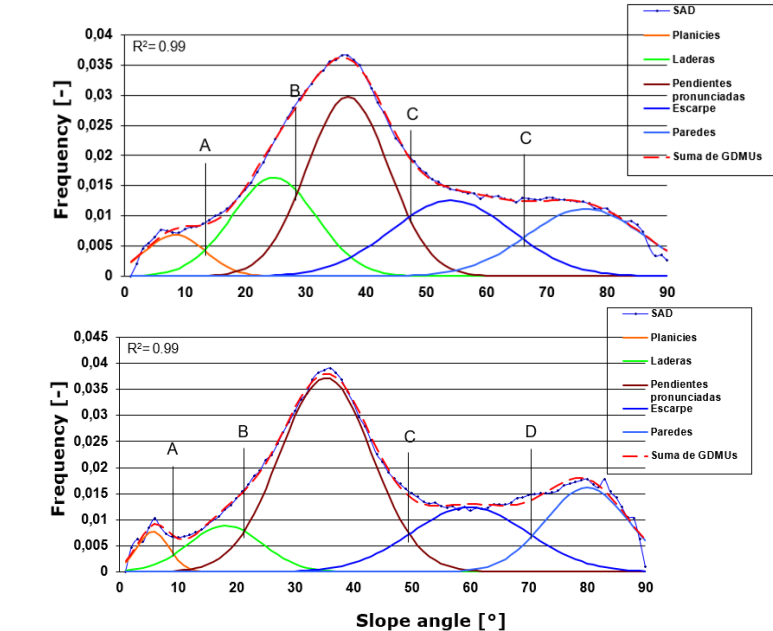
Geomorfología:	
Ángulo de corte:	pared inclinada 46 ° pared vertical 67 °

Extensión:	12,76 hm ²
------------	-----------------------

Área de pared:	30,240 hm ²
----------------	------------------------

Datos de inventario:	Volumen mínimo	0,05 m ³
	Volumen máximo	1275 m ³
	Año primer registro	1991

Submuestra:	Tramo carretera BP1103 a Santa Cecilia
Sigla:	CC
Ubicación:	
Región:	Tebaida; Sant Jeroni Nord
Ámbito:	2
Dominios:	Tebaida: 25; 26; 27; 28; 29; 35; 36; 37; 38; 39; 40; 41; 3; 42; 43; 44; 45; 46; 57; 58; 59; 60; 61; 62; 63; 64; 82; 83; 84; 85; 86 Sant Jeroni Nord: 272; 273; 274; 275; 276; 277; 278; 279; 280; 282; 282; 283; 284; 285; 286; 287; 288; 289; 300; 301; 302; 303; 304; 307; 310; 311; 312

Geomorfología:	
Ángulo de corte:	pared inclinada 46 / 50 ° pared vertical 67 / 70 °

Extensión:	56,23 hm ²
------------	-----------------------

Área de pared:	146,38 hm ²
----------------	------------------------

Datos de inventario:	Volumen mínimo	0,02 m ³
	Volumen máximo	2100 m ³
	Año primer registro	2000