

# APLICACIONES DEL LIDAR EN LA VALORACIÓN DE LA PELIGROSIDAD POR CAÍDA DE ROCAS EN VALL DE NÚRIA

Marc Janeras<sup>1</sup>, Maria Navarro<sup>1</sup>, Georgina Arnó<sup>1</sup>, Ferran López<sup>1</sup>, Marcel Barberà<sup>1</sup>, Antonio Ruiz<sup>2</sup>, Wolfgang Kornus<sup>2</sup>, Julià Talaya<sup>2</sup>

<sup>1</sup>RSE, Aplicaciones Territoriales, S.A. C/ Entença 95, E-08015 Barcelona

<sup>2</sup>Institut Cartogràfic de Catalunya Parc de Montjuïc E-08038 Barcelona

## RESUMEN

El Valle de Núria y la línea del Cremallera están situados en un entorno de alta montaña con vertientes subverticales que presentan desniveles de aproximadamente 300 m. Este medio está sujeto a una dinámica natural en la que se dan procesos geomorfológicos destructivos, como son las caídas de roca. En este sentido la Dent d'en Rossell es una de las áreas más activas de todo el valle. Con objeto de aumentar la seguridad del Cremallera se han incorporado nuevas técnicas de estudio para la valoración de la peligrosidad, como son el LIDAR aéreo y terrestre. El uso de este método permite modelar la superficie topográfica, obteniendo un modelo digital de elevación (MED). Esta técnica de alta precisión ha permitido desarrollar una metodología específica en la Dent d'en Rossell para estimar el riesgo por desprendimientos de rocas sobre el Cremallera, que hubiese sido imposible llevar a cabo a partir de un modelo convencional topográfico. En este estudio se muestran dos ejemplos de posibles aplicaciones LIDAR relacionadas con la detección de áreas potencialmente inestables y la valoración de la peligrosidad.

**Palabras clave:** MED, Láser escáner, LIDAR, caída de rocas, áreas potencialmente inestables, peligrosidad.

## 1. Introducción

### 1.1. El Cremallera de Ribes-Núria

El Santuario de la Virgen de Núria está situado en la cabecera del Valle de Núria, en el Pirineo catalán (comarca del Ripollès), cerca de la frontera francesa. Este paraje se ha visitado a lo largo de la historia, primero por devotos y después por excursionistas, esquiadores y turistas en busca de naturaleza y tranquilidad. Con la inauguración del Cremallera de Ribes-Núria en 1931 y el desarrollo de actividades lúdicas relacionadas con la naturaleza, la nieve y la alta montaña el flujo de gente no ha parado de crecer. Hay que tener en cuenta que el Cremallera constituye el único medio motorizado para acceder al valle.

El Valle de Núria y la línea del Cremallera están situados en un entorno de alta montaña sujeto a la dinámica natural que implica la evolución del relieve. En esta dinámica tienen lugar una serie de procesos geomorfológicos destructivos y constructivos. Dadas las características geológicas del valle, uno de los principales procesos geomorfológicos más activos, asociados a un grado de riesgo geológico son los desprendimientos de rocas.

### 1.2. Antecedentes

En 1986, la Generalitat de Catalunya se hizo cargo de la explotación del Cremallera entre Ribes-Núria. Desde entonces, el interés por mejorar la seguridad del Cremallera frente a los desprendimientos de rocas ha sido constante. Por ello durante años la administración pública de FGC (Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya), la DGTP (Direcció General de Ports i Transports) i GISA (Gestió d'Infraestructures, S.A) han llevado a cabo diferentes proyectos de mitigación en los cuales han participado RSE Aplicaciones Territoriales, S.A. y el ICC (Institut Cartogràfic de Catalunya). Esto ha permitido desarrollar una metodología de trabajo que incluye la detección de áreas potencialmente inestables, una clasificación según la prioridad de actuación y una propuesta de las medidas correctoras más adecuadas en cada caso. RSE se encarga también de la redacción de proyectos y de la dirección de las obras.

La Dent d'en Rossell es una de las áreas adyacentes al Cremallera con mayor afectación por este tipo de movimiento de masas de todo el valle. Se trata de una vertiente rocosa de fuerte pendiente situada en la margen derecha del Valle de Núria alrededor del túnel del Fénech (Figura 1). Este sector presenta paredes subverticales con desniveles de aproximadamente 300 m.

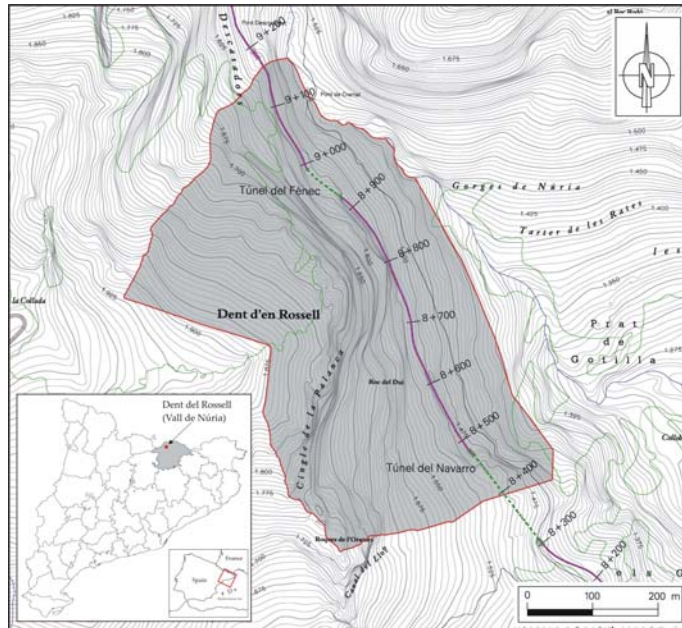


Figura 1. Mapa de situación de la Dent d'en Rossell. El área sombreada en gris corresponde al sector estudiado. La línea de color violeta corresponde a la traza del Cremallera y las líneas verdes discontinuas son los túneles del Fenech (al norte) y el túnel del Navarro (al Sur). La base topográfica a escala 1:5.000 corresponde a la hoja 289-079 (la Farga) editado por el ICC (2001).

En los últimos años se han producido diversos desprendimientos en la Dent d'en Rossell, que han afectado en mayor o menor medida la línea del Cremallera. Los eventos más importantes ocurrieron en Octubre de 1993, Marzo de 2003, Abril de 2003 y Junio de 2003. Las características de cada uno de ellos se especificaran en apartados posteriores. Con objeto de mejorar los trabajos de valoración de la peligrosidad y del nivel de riesgo asociado se ha hecho imprescindible buscar nuevas técnicas de estudio que permitan mejorar la obtención de datos sobre la vertiente rocosa y su morfología real, mejorando así los resultados finales en el estudio y mitigación del riesgo.

Recientemente, una de las nuevas técnicas de estudio incorporadas en los trabajos de identificación y evaluación de los desprendimientos de rocas en la Dent d'en Rossell, es el LIDAR (Light Detection and Ranging). El uso de este método permite modelar la superficie topográfica de manera precisa, obteniendo un MED (Modelo Digital de Elevación) en 2.5D o incluso en 3D [1]. Esta técnica de alta precisión, ha permitido desarrollar una metodología de trabajo específica en el sector de la Dent d'en Rossell que estime el riesgo de desprendimientos de rocas sobre el Cremallera, que hubiese sido imposible llevar a cabo a partir de modelos topográficos obtenidos mediante métodos de modelización convencionales

## 2. Objetivos

El principal objetivo de este trabajo es analizar las ventajas y los posibles inconvenientes que puede tener la aplicación del MED obtenido mediante LIDAR, frente a otros métodos convencionales para la valoración de la peligrosidad de caída de rocas. El riesgo geológico asociado a cualquier tipo de fenómeno se deduce necesariamente a partir de tres estadios:

- 1) Detección de áreas potencialmente inestables.
- 2) Evaluación de la peligrosidad, teniendo en cuenta la frecuencia y magnitud del fenómeno.
- 3) Reconocimiento de la vulnerabilidad del sector susceptible de ser afectado.

En el caso de la tecnología LIDAR, ésta puede resultar especialmente útil en las dos primeras fases de estudio. Este artículo demuestra como el LIDAR permite obtener mejores resultados en la valoración de los desprendimientos, contrastando los resultados a partir de tres diferentes MED's de la Dent d'en Rossell: uno obtenido a partir de métodos topográficos convencionales, a escala 1:5.000, con un paso de malla de 15 metros, y los otros dos obtenidos a partir de la combinación del LIDAR terrestre y aéreo con un paso de malla de 8 y 2 metros respectivamente (*ver tabla 1*).

Este trabajo no pretende profundizar en el conocimiento de la dinámica de caída de rocas en el Valle de Núria ni evaluar la peligrosidad y el riesgo que este tipo de fenómeno comporta. Los resultados estos se compararán con algunos de los eventos ocurridos en la Dent d'en Rossell durante el año 2003.

MED	Origen	Paso de malla
Malla 15x15	Base topográfica 1/5000	15 m
Malla 8x8	LIDAR	8 m
Malla 2x2	LIDAR	2 m

Tabla 1: Escala y origen del MED utilizados.

### 3. LIDAR: Datos y metodología

#### 3.1. LIDAR aéreo

La campaña de recolección de datos mediante LIDAR aéreo se llevó a cabo el 28 de Julio de 2003 y consistió en siete pasadas de vuelo paralelas con un solapamiento del 20 %, con las que se cubrió el Valle del Río de Núria (serie A en la tabla 2). El semiángulo de barrido de estas pasadas fue de 7°. La verticalidad del punto de vista utilizado en la mayoría de los casos redujo la probabilidad de oclusiones debido a la existencia de irregularidades en el fondo del valle. Adicionalmente se realizaron dos barridos, uno a cada lado del valle, para obtener más puntos en los sectores más abruptos de las vertientes rocosas con un semiángulo de barrido de 20°, ángulo máximo permitido por el instrumento (serie B de la tabla 2).

	Series	
	A	B
Velocidad (nudos)	120	120
Semiángulo de barrido (grados)	7	20
Frecuencia de escaneado (Hz)	35	20
Repetición del pulso (Hz)	25,000	25,000
Altura sobre el terreno (m)	1300	1300
Solapamiento de las bandas (%)	20	-
Divergencia de rayos (mrad)	0.2	0.2
Distancia de los puntos a lo largo del vuelo (m)	0.88	1.54
Distancia de los puntos transversal al vuelo (m)	0.89	1.51
Marca (m)	0.260	0.260

Tabla 2: Valores de los parámetros de vuelo utilizados.

Una vez acabada la campaña de recogida de datos mediante LIDAR aéreo, los puntos de último eco del láser se clasificaron en suelo y no-suelo. Para ello se utilizó el software Terrascan de Terrasolid. A continuación, mediante el software TerraModeler de Terrasolid, se generó una malla irregular de triangulación (TIN) teniendo en cuenta únicamente los puntos de suelo, para realizar una primera aproximación del MED.

Como la mayoría de los programas informáticos utilizados habitualmente para modelar el terreno, TerraModeler construye superficies en 2.5D, dando a cada punto del dominio horizontal un único valor que corresponde a la elevación del mismo. De esta manera la elevación de las superficies es función de las coordenadas planimétricas (x,y). Por este motivo, el modelo de superficie resultante no es apropiado para representar zonas de extraplomo donde un solo punto (x,y) puede tener tres elevaciones (figura 2).

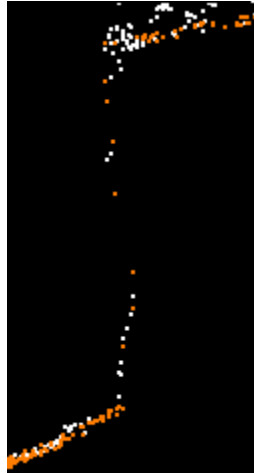


Figura 2: Sección transversal de puntos LIDAR de una vertiente en una zona de extrapomo.

Normalmente, después de la clasificación automática de los puntos, es necesario realizar una labor de edición para eliminar los puntos de vegetación erróneamente clasificados que se incluyen en el modelo del terreno. La presencia de vegetación en este terreno tan inclinado confunde a menudo al programa y requiere una labor intensa de edición. El proceso de edición continúa hasta que se considera que el modelo 2.5D resultante representa la superficie topográfica aceptablemente (sin vegetación), con las limitaciones que comporta la utilización de modelos en 2.5D. Esta superficie intermedia (Figura 3) se empleó con dos propósitos diferentes:

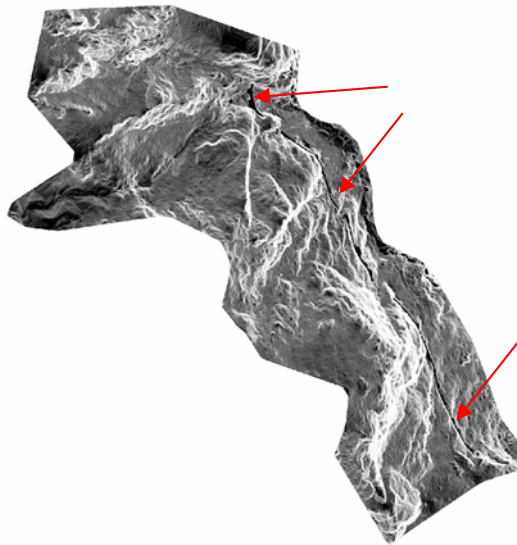


Figura 3: Mapa de vertientes realizado con el modelo de superficie en 2.5D. Las flechas rojas indican la posición de la traza del Cremallera.

El primero fue detectar áreas con baja densidad de datos aéreos o con vacíos importantes de información debido a oclusiones (*Figura 4*). Para cubrir estas áreas se realizó a posteriori una campaña terrestre de recogida de datos. El segundo uso de la superficie intermedia en 2.5D fue mejorar la orientación de los datos del LIDAR terrestre.

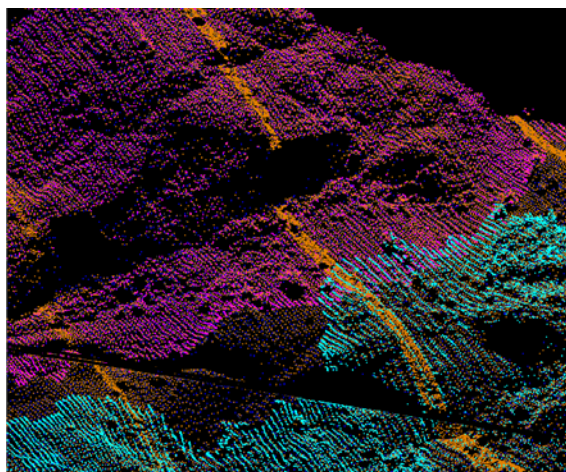


Figura 4: Áreas sin información después de la campaña aérea.

### 3.2. LIDAR terrestre

Para estacionar el escáner terrestre se eligieron cinco emplazamientos situados enfrente de las áreas con importantes vacíos de información aérea. La campaña terrestre de recogida de datos se realizó entre el 8 y el 9 de Septiembre de 2003.

Se instalaron unos prismas y se determinó sus coordenadas mediante GPS y estación total. A partir de las coordenadas de estas placas se hizo una primera aproximación de la orientación de la nube de puntos de cada escáner, pero al estar situados más próximos que el área de medida, la precisión angular de la orientación fue escasa.

Con el fin de mejorar esta orientación preliminar se utilizó un ajuste de superficies. Se elaboró una superficie reticular para cada escena de escáner terrestre y otra elaborada a partir de los puntos obtenidos mediante LIDAR aéreo, clasificados como suelo en el modelo 2.5D intermedio. Esta última superficie se consideró como referencia. La orientación de cada escena de escáner terrestre se ajustó para aproximarse a la superficie de referencia. Con objeto de minimizar la distancia entre la correspondiente superficie de escáner y la de referencia, se trasladó y rotó cada nube de puntos obtenida mediante el LIDAR terrestre. Este proceso se realizó mediante el programa Polyworks de la compañía Innovmetric.

Una vez se refinó la orientación de los puntos terrestres, estos se tuvieron que clasificar, pero el software disponible no era capaz de procesar los datos en las paredes verticales. El algoritmo de filtro y clasificación considera que la pendiente del terreno no es tan elevada y que los puntos que aumentan la inclinación de la superficie por encima de un cierto lindar corresponden a la vegetación. Este criterio falló completamente en esta área.

Para eludir esta limitación se aplicó una rotación global a todos los puntos LIDAR, con objeto de reducir la pendiente media del terreno. La nube de puntos se rotó  $30^\circ$  alrededor de un eje aproximadamente paralelo a la traza del ferrocarril. A partir de aquí se pudieron añadir puntos a la selección previa de puntos de suelo a través de un proceso de edición rápida utilizando las herramientas estándares disponibles en TerraScan.

La cantidad de puntos de suelo disponibles en áreas con vacíos de datos se incrementó, mejorando así el modelo (Figura 5). Después de la edición, se aplicó la rotación inversa y se calculó una superficie triangulada 3D real con todos los puntos clasificados como suelo.

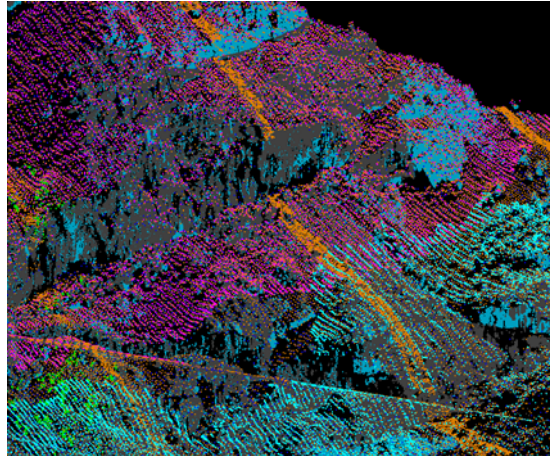


Figure 5: Vacíos cubiertos con el LIDAR terrestre

## 4. Contexto geológico y geodinámico

### 4.1. Litología y estructura

El Valle de Núria se encuentra en la zona axial de los Pirineos donde afloran los materiales más antiguos del sistema montañoso que corresponden a rocas metamórficas de la unidad de Carançà. La estructura regional está fuertemente afectada por ambas orogenias, Herciniana y alpina. Las orientaciones y las medidas de diversas juntas y su tratamiento estadístico han permitido identificar las principales familias de discontinuidades [2] que se muestran en la *tabla 3*.

Familia de discontinuidad	tipo	azimut	buzamiento	espaciado (m)
F1	Diaclasa	080	65	0.3
F2	Diaclasa	020	70	0.4
F3	Foliación	260	30	0.5

**Tabla 3:** orientación y espaciado medios de las tres familias de discontinuidad detectadas en la Dent d'en Rossell [2].

Las características intrínsecas de los gneises y la intensa fracturación que presenta el macizo rocoso condicionan el relieve morfológico del valle. Este relieve es particularmente abrupto en la Dent d'en Rossell, donde las paredes rocosas llegan a ser subverticales y los desniveles son de orden métrico. El sector también se caracteriza por presentar escalones estructurales que forman franjas y explanadas de orden métrico y decimétrico, orientadas según las principales familias de discontinuidades.

### 4.2. Riesgo de desprendimientos en la Dent d'en Rossell.

Los desprendimientos tienen unas características particulares respecto otros peligros, dado que la peligrosidad que llevan asociada suele ser dispersa. Este tipo de fenómeno es el resultado de un proceso evolutivo en el cual interactúan muchos factores (litología, fracturación y agentes geodinámicos externos como la gelifración y la acción de las raíces). Cada desprendimiento es único y específico, y se origina de manera repentina dadas unas condiciones.

En la Dent d'en Rossell, la orientación de las pendientes y de ciertas familias de discontinuidades dan lugar a la existencia de áreas potencialmente inestables que pueden generar caídas de rocas. La relación entre ellos genera bloques individualizados de dimensiones variables. La evidencias más recientes de actividad son los eventos ocurridos los meses de marzo, abril y junio del 2003:

**3 de marzo del 2003:** El desprendimiento de una masa rocosa entre 5-8 m<sup>3</sup> de volumen, causó diversos daños a la cubierta de la salida norte del Túnel del Fénéch. Por los indicios observados, la zona de salida se sitúa a unos 100 m de altura sobre la traza, en la vertical de la salida norte del Túnel del Fénéch. La trayectoria de la masa

movilizada resiguió un escalón estructural hasta la cubierta del túnel, donde quedó una parte del volumen total de material movilizado (roca, tierra y vegetación). Por los impactos del terreno y la vegetación y por los bloques que se frenaron, la trayectoria siguió vertiente abajo cruzando el camino de Querabls a Núria. El alcance máximo del desprendimiento llegó hasta el río Núria. El volumen máximo de los bloques que se pararon a lo largo de la trayectoria fue de  $0.5 \text{ m}^3$ .



Figura 6: Desprendimiento del 3 de marzo del 2003. En amarillo la trayectoria seguida por las rocas.

**4 de abril del 2003:** A las 5:55 h de la mañana una masa de roca, situada en la vertical del PK 8+500, se desprendió del macizo, cerca del túnel del Navarro, a unos 120 metros de altura de la vía del Cremallera. En este punto el macizo está constituido por rocas metamórficas (gneises) intensamente afectados por la fracturación regional. El volumen de salida estimado fue de unos  $50$  a  $70 \text{ m}^3$ , que equivaldrían a más de 130 Tn. La trayectoria del desprendimiento fue rectilínea, atravesando la traza del Cremallera, el camino pedestre, situado unos 50 m por debajo, hasta llegar al río de Núria. La gran magnitud del desprendimiento agotó la capacidad de absorción de 3 líneas de pantallas dinámicas de 6 m de altura y 5000 kJ instaladas en el 2000 y el 2001, provocando graves daños en la catenaria, la vía y el muro de piedra. Una parte del volumen movilizado se frenó en las primeras terrazas existentes en la vertiente y en las barreras dinámicas, un volumen considerable se paró en la plataforma del cremallera y la mayor parte se depositó como tartera por debajo de la traza, llegando poco material al río.

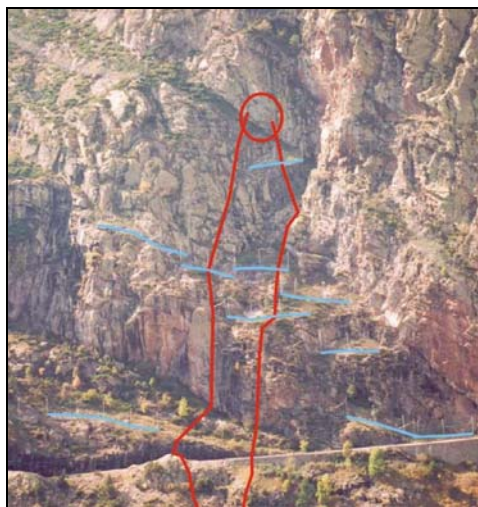


Figura 7: Desprendimiento del 4 de abril del 2003. En azul las barreras dinámicas. En rojo el camino superior del desprendimiento.

**15 de junio del 2003:** A las 23:30 h del día 15 de junio se produjo un desprendimiento en el talud cercano a la traza del Cremallera a la altura del PK 9+050, en la boca norte del túnel del Fénéch. La zona de salida se situó a unos 8 m por encima del nivel de la vía y los bloques siguieron una trayectoria rectilínea que atravesó el camino hasta el río de Núria. El volumen de salida fue de unos 17 m<sup>3</sup>, unas 40 Tn. El desprendimiento incidió de forma directa sobre un palo de catenaria y la plataforma de la vía, donde se quedaron parados unos 8 m<sup>3</sup> del volumen movilizado. El resto de material formó un depósito que se extendió a lo largo de la vertiente entre la traza y el río abriendo un corredor en el bosque. El camino de Romeu quedó obstruido por la acumulación de árboles y bloques. En el río de Núria, se acumularon algunos bloques de grandes dimensiones.



Figura 8: Desprendimiento del 15 de junio del 2003. El área rayada en rojo indica la superficie de deslizamiento.

## 5. Aplicaciones del LIDAR en la valoración de la peligrosidad

### 5.1. Detección de áreas potencialmente inestables

Como ya se ha comentado previamente, la identificación de las áreas susceptibles de generar desprendimientos rocosos en el sector objeto de estudio es una de las principales tareas a realizar en la valoración del riesgo donde la tecnología LIDAR puede aportar mejoras substanciales.

Uno de los casos más claros, es la utilización del MED para analizar la interacción entre las características de la superficie topográfica (morfología del relieve, pendiente, orientación, etc.) y las características estructurales del macizo rocoso (existencia de una o más familias de discontinuidades, orientación y pendiente de estas, etc.). Para llevar a cabo esta interacción y localizar así las áreas favorables a la inestabilidad se ha utilizado un software desarrollado por el *Centre de Recherche sur l'Environnement ALPin (CREALP)* como herramienta de trabajo dentro de lo que se conoce por Metodología Matterock [3].

El principio básico de este software está relacionado con las condiciones necesarias de orientación y buzamiento de los planos de discontinuidad en el macizo rocoso para que puedan desencadenar un desprendimiento, dependiendo de la orientación y el buzamiento de la superficie topográfica. El programa considera que cada 4 puntos del MED constituyen una celda. Entre estos cuatro puntos interpola un plano con una orientación y buzamientos propios, de manera que la superficie topográfica queda definida por una malla regular de puntos con coordenadas (x,y) y un valor de elevación correspondiente a la altura en m.s.n.m.

En la *figura 9* se muestran dos ejemplos. En el primero la relación entre la superficie topográfica y la familia de diaclasas D1, hace improbable el desencadenamiento de un desprendimiento (*Figura 9A*). El segundo ejemplo muestra una relación diferente entre las dos superficies. En este caso, la relación entre las discontinuidades del macizo rocoso i la superficie topográfica resulta ser favorable al desencadenamiento de un desprendimiento (*Figura 9B*).

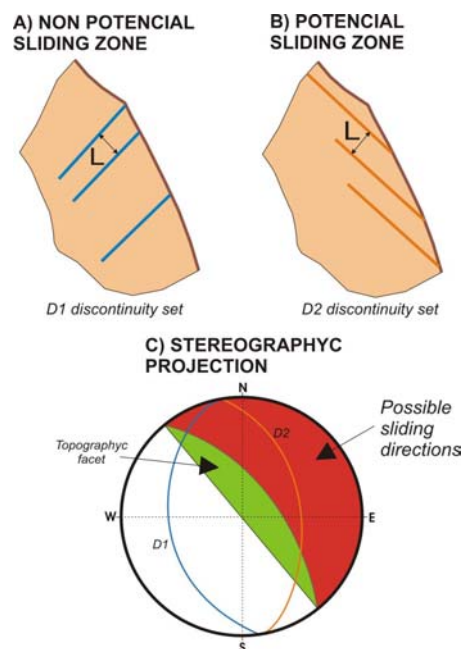


Figura 9: Ejemplos de áreas potencialmente estables (A) y áreas potencialmente inestables (B). L es el espaciado medio entre dos discontinuidades. C: Proyección estereográfica de Lambert de las posibles direcciones de deslizamiento (en rojo) teniendo en cuenta la orientación de la superficie topográfica (en verde). Modificado de [4].

Una vez introducidos los datos que definen la orientación y el buzamiento de los planos de discontinuidad, éstos son cruzados celda a celda por el programa informático con el MED, que asigna a cada una de ellas un valor de 1 o -1 en función de si la intersección entre planos resulta favorable o desfavorable a la inestabilidad respectivamente.

Así pues, se ha analizado la interacción del MED obtenido por métodos tradicionales (con un paso de malla de 15x15 m) (*Figura 10A*) y los dos MED obtenidos por la combinación del LIDAR aéreo y terrestre (con un paso de malla de 8x8 m y 2x2 m respectivamente) (*Figura 10B i 10C*), con los datos estructurales. Por la orientación de la vertiente en la Dent d'en Rossell, sólo se han considerado los datos correspondientes a las familias F1 i F2 ya que el papel de la familia F3 en este sector juega un papel secundario en la estabilidad del macizo rocoso.

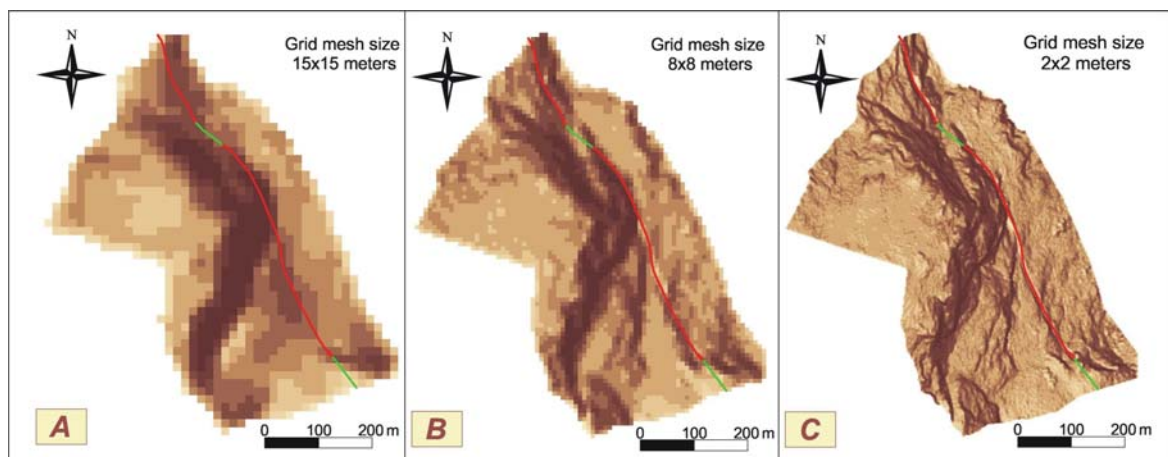


Figura 10: MED de la Dent d'en Rossell. A: obtenido a partir de métodos convencionales. Malla 15x15 m. B y C: MED's obtenidos mediante LIDAR con malla 8x8 y 2x2 m respectivamente. En rojo la traza del Cremallera, en verde los túneles del Fénech y del Navarro.

Los resultados de la interacción se han representado en tres mapas que identifican las zonas favorables a la inestabilidad (*Figuras 11, 12 y 13*). En cada uno de ellos está representado el sumatorio de las áreas favorables a la inestabilidad obtenidas del cruce del MED con F1 y las obtenidas del cruce del MED con F2.

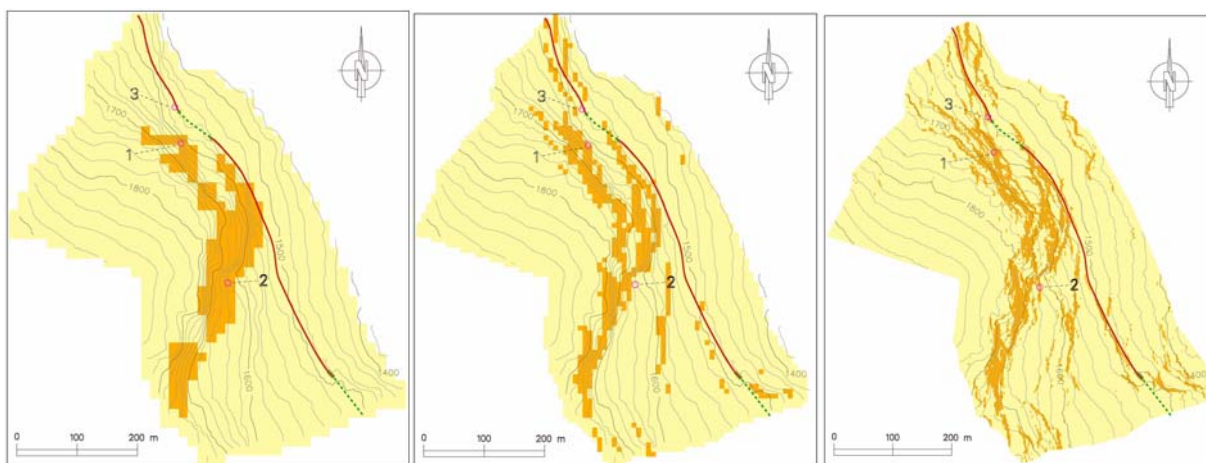


Figura 11: Zonas favorables a la inestabilidad (en naranja) obtenidas a partir del cruce del MED de 15 m con las familias de discontinuidades F1 y F2. 1, 2 y 3, desprendimientos de Marzo, Abril y Junio de 2003 respectivamente.

Figura 12: Zonas favorables a la inestabilidad (en naranja) obtenidas a partir del cruce del MED de 8 m con las familias de discontinuidades F1 y F2. 1, 2 y 3, desprendimientos de Marzo, Abril y Junio de 2003 respectivamente.

Figura 13: Zonas favorables a la inestabilidad (en naranja) obtenidas a partir del cruce del MED de 2 m con las familias de discontinuidades F1 y F2. 1, 2 y 3, desprendimientos de Marzo, Abril y Junio de 2003 respectivamente.

De la observación de las figuras se extrae que con el MED obtenido mediante métodos convencionales (paso de malla de 15x15 m) las áreas favorables al desprendimiento tienden a agruparse homogeneizando los resultados, aunque en los tres casos la proporción entre las áreas favorables y las desfavorables se mantenga prácticamente constante. Esto significa que el uso del MED obtenido mediante el LIDAR, no aporta, en este caso, nuevas áreas fuente si no una redistribución de las zonas susceptibles y consecuentemente una mayor precisión de los resultados.

En la Figura 11 se observa que sólo las zonas de salida de los eventos de Abril y Marzo se encuentran dentro de las áreas favorables detectadas con la malla 15x15. Probablemente se deba a que el episodio de Junio se produjo en el talud adyacente al Cremallera y este no es detectado por este paso de malla. De los MED's obtenidos mediante LIDAR (Figuras 12 y 13), se puede observar que existe una diferencia en la distribución de las áreas favorables. En la malla 2x2 se detectan las tres áreas que originaron los desprendimientos de Marzo, Abril y Junio del 2003, mientras que la malla 8x8 sólo detecta el área favorable que desencadenó el evento de Marzo.

Esto puede ser debido a la escala óptima de trabajo en el sector objeto de estudio. El relieve de la Dent d'en Rossell presenta unas morfologías características con unas dimensiones determinadas, como por ejemplo el talud adyacente a la traza el cremallera, que sólo pueden ser detectadas y modeladas con precisión si se utiliza el MED de 2x2 m.

## 5.2. Aplicación del LIDAR para la estimación de la peligrosidad en la zona de desencadenamiento

Una vez establecidas las características de las familias de discontinuidades (orientación, buzamiento y espaciado medios) y las áreas donde la existencia de éstas puede dar lugar a desprendimientos, la probabilidad de encontrar al menos una discontinuidad en una determinada superficie puede ser evaluada utilizando el número medio de discontinuidades contenidas dentro de esta superficie [5]. Esta probabilidad puede asumirse como una primera cuantificación de la peligrosidad. El valor obtenido es equivalente a la peligrosidad máxima [6], es decir la probabilidad de que en un área determinada haya al menos una discontinuidad. Este tipo de aproximación también se puede aplicar en el caso de que las familias de discontinuidades den lugar a cuñas.

En este sentido, el software Matterocking 2.0, no sólo está diseñado para localizar las áreas favorables a la inestabilidad, sino también para estimar otros parámetros como el número de cuñas que interceptan la superficie topográfica por celda del MED. Este cálculo asume que las discontinuidades son infinitas, y por tanto, además de la orientación de las discontinuidades, es necesario conocer el espaciado medio (L) de cada familia (Tabla 3).

Es importante tener en cuenta que la peligrosidad no es únicamente función de las características estructurales del macizo rocoso, por tanto, sería necesario hacer un cálculo completo de la peligrosidad teniendo en cuenta otros parámetros como el tipo de roca, las condiciones climáticas, el volumen de la masa desprendida, etc.

Mediante el uso de un sistema de información geográfica, el número de cuñas por unidad de celda obtenido con el software Materocking 2.0, se ha transformado en número de cuñas por metro cuadrado de afloramiento. De esta manera los resultados se ajustan más a la realidad (*Figures 14, 15 i 16*).

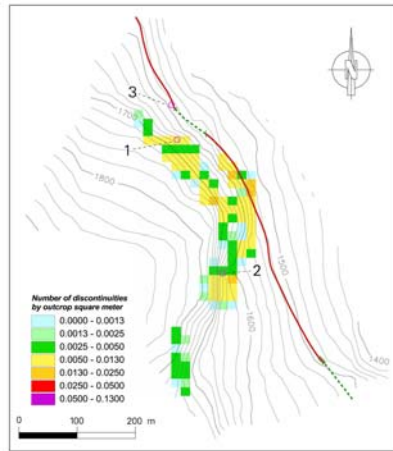


Figura 14: Numero de cuñas por metro cuadrado de afloramiento obtenido con el MED de 15x15 m. 1, 2 y 3, señalan los desprendimientos ocurridos en Marzo, Abril y Junio del 2003 respectivamente.

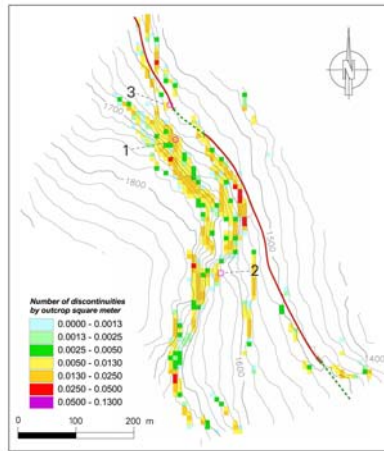


Figura 15: Numero de cuñas por metro cuadrado de afloramiento obtenido con el MED de 8x8 m. 1, 2 y 3, señalan los desprendimientos ocurridos en Marzo, Abril y Junio del 2003 respectivamente.

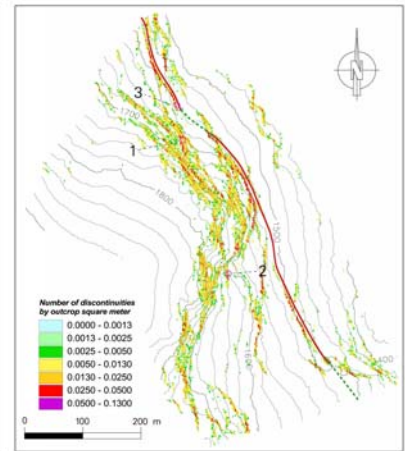


Figura 16: Numero de cuñas por metro cuadrado de afloramiento obtenido con el MED de 2x2 m. 1, 2 y 3, señalan los desprendimientos ocurridos en Marzo, Abril y Junio del 2003 respectivamente.

De la observación de las figuras 14, 15 i 16 se puede extraer que el número de cuñas que interceptan la superficie topográfica por metro cuadrado de afloramiento es ligeramente superior cuanto más pequeño es el paso de malla utilizado. Esto se debe a la homogenización del relieve que se da en los pasos de malla más grandes. Dada una cierta orientación de las familias de discontinuidad, la densidad depende directamente de la pendiente del terreno (*Figura 17*). El MED con un paso de malla de 2X2 reproduce mejor la pendiente real de las vertientes subverticales, mientras que el 15x15 suaviza este relieve reproduciendo pendientes muy inferiores a las reales.

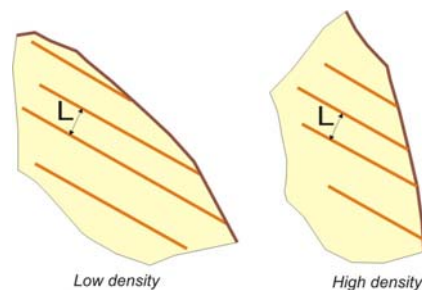


Figura 17: Relación entre la pendiente topográfica y el número de discontinuidades que interceptan la superficie topográfica.

De estas observaciones se puede concluir que usando el MED con un paso de malla de 15x15 m para el cálculo de la media del número de discontinuidades por metro cuadrado de afloramiento, que se puede asumir como el primer análisis de peligrosidad, estamos subestimando los resultados en detrimento del factor de seguridad. Entre los MED de 8x8 y 2x2, el último reproduce mejor la superficie topográfica, de tal manera que se puede esperar que los resultados se aproximen más a la realidad.

### 5.3. Aplicación del LIDAR para la valoración de la peligrosidad a partir de modelos de caída de rocas

#### • Introducción

El objetivo de este punto es comparar los resultados de los modelos de simulación de caída de rocas entre los tres MED, de modo similar al estudio de [7].

Existen dos tipos de modelos que se distinguen por realizar el cálculo en dos o tres dimensiones. Los modelos tridimensionales calculan las trayectorias de los bloques sobre un MED, y permiten obtener la distribución en planta de las energías, alturas de rebote, y los puntos de llegada de los bloques. Los modelos bidimensionales trabajan sobre perfiles topográficos preestablecidos y permiten obtener la distribución estadística a lo largo del

recorrido de las mismas variables. En este caso se ha trabajado con dos modelos comerciales en 2D y 3D. Estos modelos numéricos se han calibrado y validado a partir de los datos que se dispone de los desprendimientos ocurridos en el 2003.

- Modelos de caídas de rocas

El modelo tridimensional permite realizar cálculos numéricos a partir de leyes físicas que relacionan los parámetros mecánicos de la vertiente con la cinemática de los bloques. Este software calcula la distribución espacial de las trayectorias de los bloques, de las energías por unidad de masa, de los rebotes y de los puntos de llegada sobre una base topográfica digital (MED). El programa permite simular un elevado número de caídas de rocas y identificar las áreas más adecuadas para realizar la intervención de protección.

Sobre el propio MED se distinguen los tipos de terreno, a los que se asignan tres parámetros que definen su comportamiento mecánico: el coeficiente de restitución normal ( $R_n$ ), el coeficiente de restitución tangencial ( $R_t$ ) y el coeficiente de rozamiento de rodamiento-deslizamiento ( $k$ ). También se introducen tres parámetros geométricos (ángulos límite) que determinan los cambios en el tipo de movimiento de los bloques a lo largo de su recorrido. La variación de la pendiente del relieve y la forma de incidencia de los bloques implica un paso entre las fases de saltación y la de rodamiento-deslizamiento.

El modelo bidimensional prefiere la trayectoria de un perfil longitudinal, pero por el contrario permite un análisis estadístico más completo de las variables del movimiento, según el relieve y los parámetros que definen los tipos de terreno de forma similar al modelo 3D. En consecuencia, los resultados de los modelos son complementarios.

La calibración de estos modelos permite asignar a los parámetros un valor que reproduzca el comportamiento específico de los tipos de terreno en el sector de estudio. Una vez calibrado, el modelo será capaz de predecir los futuros eventos que se puedan dar en este contexto. En este caso, la calibración del modelo ha sido posible a partir de los datos que se dispone de los tres eventos testimoniales del 2003, el 3 de marzo, el del 4 de abril y el 15 de junio (ver apartado 4.1)

- Análisis comparativa de los MED

Se ha simulado los desprendimientos conocidos del 2003 con las tres mallas definidas anteriormente: 15x15, 8x8 y 2x2, y de esta manera se ha podido comprobar qué topografía se ajustaba mejor a los resultados respecto las observaciones de campo. A continuación se adjuntan los resultados de los desprendimientos de marzo y de abril del 2003 obtenidos a partir del modelo tridimensional.

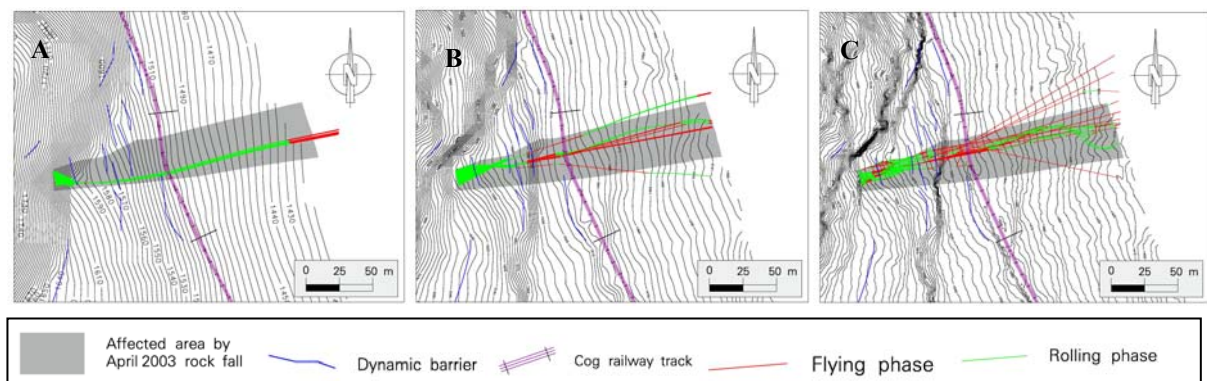


Figura 18: Trayectorias del desprendimiento de abril del 2003, obtenido a partir del modelo 3D con diferentes tamaños de mallas A 15x15, B: 8x8, C: 2x2.

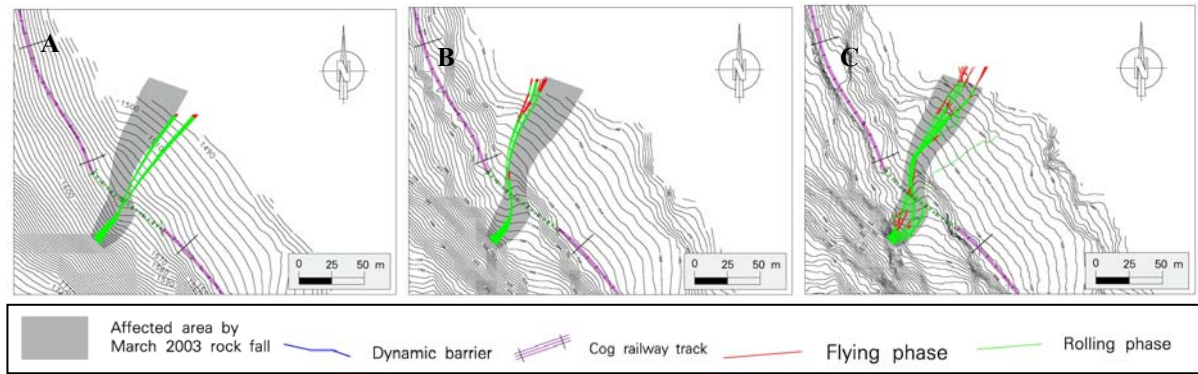


Figura 19: Trayectorias del desprendimiento de marzo del 2003, obtenido a partir del modelo 3D con diferentes pasos de malla. A: 15x15, B: 8x8, C: 2x2.

En los primeros resultados se puede apreciar que las trayectorias simuladas con las topografías LIDAR se ajustan mejor al canal que recorren las rocas según su trazado sinuoso, tal y como se puede observar en la figura 19. La malla 15x15 genera unas trayectorias mas rectilíneas porque no detecta las pequeñas variaciones del relieve que pueden desviar la trayectoria de las rocas, tal y como sucede con la canal oblicua sobre el túnel de Fènech.

Una característica a destacar es el aumento de la dispersión en los resultados a medida que disminuimos el paso de malla, dado que se acentúan más las irregularidades. Evidentemente, a medida que aumenta el paso de malla más suave y simplificada es la topografía y en consecuencia no se distinguen tantos cambios de comportamiento entre rodamiento y saltación a lo largo de las trayectorias, tal y como observó [8].

Tal y como se observa en las figuras 18 y 19, las topografías que provienen del LIDAR definen mejor las diferentes morfologías de la vertiente, representando los resaltos y las terrazas que se encuentran y generándose esta distinción en la dinámica de caídas de rocas. Este hecho queda reflejado en los perfiles longitudinales de las trayectorias del desprendimiento de abril que se obtiene a partir del modelo 3D.



Figura 20: perfiles longitudinales del desprendimiento de abril de 2003, obtenido mediante el modelo 3D con diferentes tamaños de malla. A: 15x15, B: 8x8, C: 2x2.

En la figura 20 se puede ver como varía el comportamiento de los bloques en una trayectoria tipo, para cada malla. En ningún caso, es el mismo camino ya que el modelo reproduce una dispersión de trayectorias con pequeñas variaciones de las condiciones iniciales del movimiento.

En los resultados de los puntos de llegada del desprendimiento de abril del 2003 (figura 22) se puede ver que no hay grandes diferencias entre los que muestra la malla 15x15 y la 8x8, mientras sí que se aprecia una mayor precisión con la malla 2x2. Esta última presenta concentraciones de llegada en las zonas donde se observaron rocas, como la traza, mientras que las otras dos solo muestran concentraciones en las pantallas (Figura 22).

Por tanto, no solo hay una mejora en la precisión de los resultados cuando se trabaja con la topografía LIDAR, sino que conviene escoger el paso de malla que se adapte mejor a las formas de relieve. En este caso el ancho de la plataforma del cremallera es de unos 4 m y la malla 2x2 representa muy bien esta y otras formas, en cambio la malla 8x8 las omite.

En este sentido se probó una simulación con una paso de malla de 1 m y se vio que esta escala daba lugar a una topografía con superficies demasiado abruptas, que fuerzan a las trayectorias a saltar continuamente con constantes

oscilaciones de la pendiente a lo largo del recorrido y generan comportamientos que se alejan de la realidad. Además, es una escala incómoda para trabajar, dado que lentece mucho el proceso de cálculo.



Figura 21: Masa parada por una de las barreras superiores en el desprendimiento de abril del 2003.

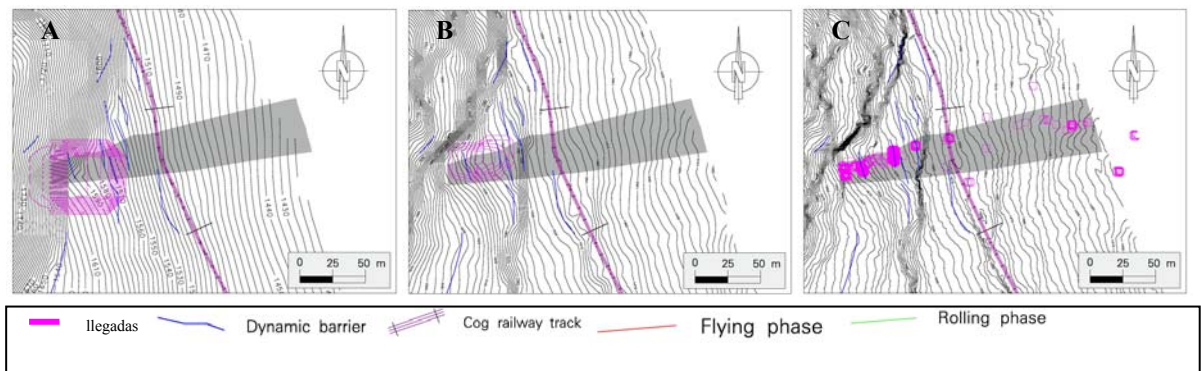


Figura 22: Puntos de llegada del desprendimiento de abril del 2003, obtenido a partir de un modelo 3D con diferentes tamaños de malla. A: 15x15, B: 8x8, C: 2x2

A continuación se comentan los aspectos más relevantes de los resultados obtenidos con modelos numéricos bidimensionales.

Se ha simulado el evento de abril de 2003 y se han detectado diferentes distribuciones de las alturas de rebote en la zona central de la ladera entre las mallas 2x2 y 15x15 (ver figura 23). Similarmente a los resultados del modelo 3D, en la topografía suavizada de 15x15 domina el movimiento de rodamiento y deslizamiento, a diferencia de la malla 2x2 que reproduce mayores rebotes. La malla 2x2 ajusta mucho mejor el perfil de las variables del movimiento (velocidad y altura de salto) a lo largo del recorrido, porque describe mejor las terrazas y paredes.

Esto permite un mejor emplazamiento de las obras de protección contra caída de rocas en los puntos de máxima eficacia. En particular, es conveniente posicionar las barreras de defensa (que tienen una cierta capacidad de absorción de energía) en puntos de mínima altura de salto y baja velocidad, para que sean capaces de interceptar el máximo número de bloques y retener un mayor volumen.

Cuando comparamos perfiles de velocidad en la figura 24, podemos observar que en la malla 15x15 hay un incremento de la velocidad al cruzar la línea férrea, en contraste con la malla 2x2. En este último caso, el modelo representa las pequeñas morfologías escalonadas donde los bloques impactan con el terreno y pierden energía cinética, reduciendo su velocidad.

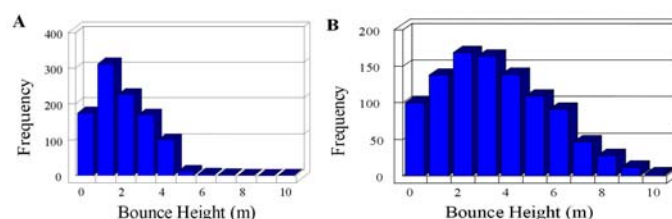


Figura 23: Resultados del modelo 2D: altura de rebote a 1560 m del desprendimiento de abril del 2003. A: perfil de la malla 15x15, B: 2x2 perfil de la malla.

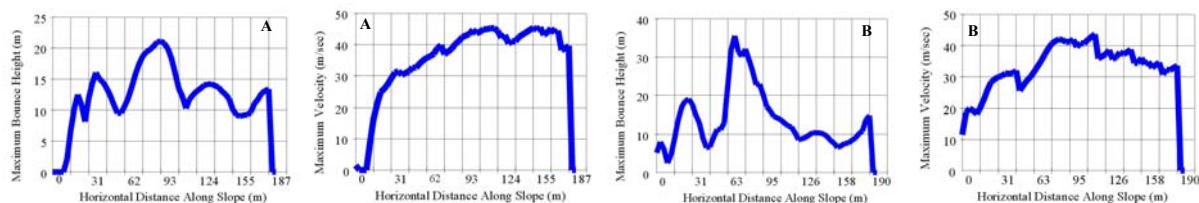


Figura 24: Resultados del modelo 2D: perfiles de altura de rebote y velocidad a lo largo del recorrido. A: perfiles de la malla 15x15, B: perfiles de la malla 2x2.

Los modelos tridimensionales se pueden considerar como una herramienta útil de predicción de la distribución de las posibles trayectorias, energía cinética, alturas de rebote y puntos de llegada de los desprendimientos, siempre y cuando dispongamos de suficientes datos históricos de eventos para calibrar el modelo adecuadamente. Como ha sido demostrado, la tecnología LIDAR permite trabajar sobre topografías de alta resolución. Esto mejora la utilidad de los modelos tridimensionales frente a los argumentos expuestos por [9].

A nivel de investigación, se han desarrollado algoritmos de cálculo para modelar detalladamente la dinámica de caída de rocas. Aún así, los programas comerciales de uso común presentan algunas limitaciones que dificultan sacar el máximo provecho de la topografía LIDAR. Estos simulan el movimiento de una forma muy simplificada y los resultados se limitan frecuentemente a los valores extremos y medios. La resolución de la topografía LIDAR permite imaginar que nuevos tratamientos estadísticos de todas las trayectorias celda por celda podrían resultar más útiles en un futuro inmediato.

## 6. Conclusiones y recomendaciones

- La incorporación de la tecnología LIDAR en el estudio de caída de rocas permite poner en práctica una metodología específica de análisis de la susceptibilidad y las áreas de peligrosidad. Esto no hubiese sido posible con topografías convencionales.
- El MED obtenido con métodos convencionales, con un paso de malla de 15 m, en diferencia con el MED obtenido mediante LIDAR, suaviza demasiado el relieve, lo cual conduce a resultados diferentes que reducen el factor de seguridad en la detección de zonas potencialmente inestables. Los cálculos sobre topografía LIDAR reproducen mucho mejor los eventos de caídas de rocas y detectan más detalladamente las áreas potencialmente inestables.
- Partiendo de la topografía LIDAR, la escala de trabajo tiene un gran impacto en los resultados de la simulación. En el caso de la Dent d'en Rossell, los resultados obtenidos con una malla de 2x2, son los que se ajustan mejor a los eventos observados en este sector. En otro sector el paso de malla óptimo podría ser otro.
- Los modelos comerciales de simulación de caída de rocas pueden reproducir bastante bien la dinámica de caída de rocas, siempre que los parámetros se puedan calibrar correctamente y con suficientes datos de eventos conocidos.
- Los modelos tridimensionales son una herramienta útil para predecir la distribución de las trayectorias, velocidades y alturas de salto de futuras caídas de rocas. De todos modos, tienen limitaciones que dificultan sacar el máximo provecho de la topografía LIDAR.

## Referencias

- [1] Ruiz A., Kornus, W., Talaya, J., Colomer, J.L., 2004. Terrain Modelling in an Extremely Steep Mountain: A Combination of Airborne and Terrestrial LIDAR. IASPRS 36(3), pp. 281-284.
- [2] Rendón, A. 2004 *Evaluación de la peligrosidad geológica por desprendimiento de rocas en Vall de Núria, Pirineos Orientales*. Earth Sciences PhD Thesis, Universitat de Barcelona.
- [3] Rouiller, J.D., Jaboyedoff, M., et al. 1998. *Pentes instables dans le Pennique valaisan. Matterock: une méthodologie d'auscultation des falaises et de détection des éboulements majeurs potentiels*. Vdf Hochschulverlag, Zurich, pp. 239.
- [4] Jaboyedoff, M., Baillifard, F., Kaufmann, J.F., Labiose, V. 2003. *Identification des versants rocheux potentiellement instables*. Quanterra short course 03-F, pp.27.

- [5] Rouiller, J.D., Marro, C., 1997. Application de la méthodologie "MATTEROCK" à l'évaluation du danger lié aux falaises. *Eclogae Geologicae Helvetiae* 90, pp. 393-399.
- [6] Jaboyedoff, M., Baillifard, F., Marro, C., Philippossian, F. and Rouiller, J.D., 1999. Detection of rock instabilities: Matterock methodology. *Joint Japan-Swiss Scientific on Impact Load by Rock falls and design of protection structures*. Kanazawa, Japan 4-7 October 1999, pp. 37-43.
- [7] Agliardi, F. and Crosta, G.B., 2003. High resolution three-dimensional numerical modeling of rock falls. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 40/4, pp. 455-471.
- [8] Abellán, A., 2003. *Utilización y validación de un modelo de simulación en 3D para el cálculo de la peligrosidad residual por caídas de rocas sobre el tren cremallera de Vall de Núria*. Final first degree of Geologic Engineering. Universitat de Barcelona.
- [9] Krauter, E. and Spang, R.M., 2001. Rock fall simulation – A State of the art tool for risk assessment and dimensioning of rock fall barriers. *International Conference of Landslides; Causes, Impacts and Countermeasures*, Davos, Switzerland (17-21 June 2001), pp. 607-615.