



Universidad de Oviedo

Análisis de trayectorias de caída de rocas en la senda del río Cares

Trabajo Fin de Máster
Máster en Recursos Geológicos e Ingeniería Geológica



Diego Pérez Millán
Julio 2019



Máster en Recursos Geológicos
e Ingeniería Geológica

Universidad de Oviedo



D. Diego Pérez Millán, autor del Trabajo Fin de Máster titulado “Análisis de trayectorias de caída de rocas en la senda del río Cares”, confirma que es un trabajo original y solicita su presentación en el Máster Universitario Recursos Geológicos e Ingeniería Geológica de la Universidad de Oviedo.

En Oviedo, a 14 de julio de 2019

Fdo. Diego Pérez Millán

El Dr. Carlos López Fernández, Profesor Titular del Departamento de Geología de la Universidad de Oviedo, confirma que ha tutelado el trabajo “Análisis de trayectorias de caída de rocas en la senda del río Cares”, realizado por D. Diego Pérez Millán, y autoriza su presentación y defensa como Trabajo Fin de Máster en el Máster Universitario en Recursos Geológicos e Ingeniería Geológica de la Universidad de Oviedo.

En Oviedo, a 14 de julio de 2019

Fdo. Carlos López Fernández

Agradecimientos

Me gustaría agradecerse a mi director Carlos López, tanto por mostrar que ser un buen profesor viene de transmitir las ganas por el aprendizaje, como por sus aportaciones continuas en forma de ideas, correcciones y orientación.

A Vicente Gómez por su disposición y ayuda en los ensayos de laboratorio.

A mis compañeros de piso y vida de estos dos años de máster, por no sufrir nunca solo y disfrutar siempre juntos.

Y, por último, a todas las personas incondicionales que han sabido ser cercanas en la distancia.

Gracias.

INDICE

Resumen	1
Abstract.....	2
1. Introducción.....	3
Clasificación de movimientos en masa	4
Causas y factores de los desprendimientos	5
Dinámica de los desprendimientos	6
Estudios previos de peligrosidad en la senda	7
Objetivos.....	10
Contexto geográfico.....	10
Contexto geológico.....	11
2. Metodología.....	15
Revisión bibliográfica	15
Trabajo de campo.....	15
Trabajo de laboratorio	16
Trabajo de gabinete.....	17
Recopilación y procesado de datos LiDAR	17
Análisis de trayectorias con el programa <i>RocFall</i>	18
3. Resultados y discusión.....	21
Perfil 1	26
Perfil 2	31
Perfil 3	36
Perfil 4	42
Comparación de perfiles.....	47
Limitaciones de las modelizaciones.....	48
Líneas de trabajo futuras.....	50

4. Conclusiones	51
5. Referencias	52

ANEXOS:

ANEXO I: Perfil 1	57
ANEXO II: Perfil 2	59
ANEXO III: Perfil 3.....	61
ANEXO IV: Perfil 4.....	63

Resumen

En este trabajo se modelizaron las posibles trayectorias de desprendimientos rocosos en un tramo de peligrosidad alta de la senda del Cares, ruta recorrida anualmente por más de 200.000 visitantes. El objetivo del trabajo ha sido caracterizar los desprendimientos en relación al trazado de la senda, tratando de lograr avances hacia un futuro sistema de alerta temprana.

A partir de datos LiDAR se elaboró un modelo digital de elevaciones que, a su vez, permitió elaborar los cuatro perfiles topográficos modelizados con el programa de análisis de trayectorias *RocFall*. Asimismo, se estimó la masa media de bloques representativa de cada perfil y se determinaron los parámetros representativos de los diferentes materiales de la ladera. Mediante numerosas pruebas y modelizaciones, se comprobó que la modelización más cercana a los datos tomados en campo, correspondía a un modelo con varios puntos de inicio del movimiento a una velocidad de 1,5 m/s, sin considerar el ángulo de rozamiento.

Así, se obtuvieron las posibles trayectorias y sus tipos de movimientos, comprobando que pueden desprenderse principalmente bloques de entre 0,7 y 14 kg que atraviesan la senda a una velocidad oscilante entre 0,7 y 2,3 m/s, observándose diferencias sustanciales entre los perfiles modelizados en lo que a riesgo se refiere.

Este trabajo representa el primer estudio que analiza informáticamente las posibles trayectorias de desprendimientos en la senda del Cares y refleja la necesidad de implementar una metodología de auscultación que aporte un mayor conocimiento sobre la peligrosidad y riesgo de desprendimientos, que permitan en un futuro reducir los daños, en especial humanos.

Abstract

This work modelled the possible trajectories of rock falls in a highly dangerous stretch of the Cares path, a route travelled annually by more than 200,000 visitors. The objective of the work has been to characterize the rockfalls in relation to the course of the path, trying to achieve progress towards a future early warning system.

From LiDAR data, a digital elevation model was elaborated which, in turn, allowed the elaboration of the four topographic profiles modelled with the RocFall trajectory analysis program. In addition, the average mass of representative blocks of each profile was estimated and the representative parameters of the different materials of the slope were determined. By means of numerous tests and modelling, it was verified that the modelling closest to the data taken in the field corresponded to a model with several starting points of the movement at a speed of 1.5 m/s, without considering the angle of friction.

In this way, the possible trajectories and their types of movements were obtained, proving that blocks of between 0.7 and 14 kg can be detached, which cross the path at a speed oscillating between 0.7 and 2.3 m/s. Substantial differences were observed between the modelled profiles in terms of risk.

This work represents the first study that analyzes the possible trajectories of landslides in the path of the Cares and reflects the need to implement an auscultation methodology that provides greater knowledge about the danger and risk of landslides, which will allow in the future to reduce damage, especially human damage.

1. Introducción

El Parque Nacional de los Picos de Europa comprende 67.127 hectáreas de extensión en las comunidades de Asturias, Cantabria y Castilla y León. En el mismo se diferencian los macizos oriental (o de Ándara) y central (o de Urrieles), delimitados por el río Duje, y el occidental (o del Cornión), separado del macizo central por el río Cares. Estos relieves alcanzan los 2.600 metros de altitud, mientras el cauce del Cares discurre a través de un fuerte encajamiento, incluso por debajo de los 300 metros de cota.

Siguiendo el trazado del río transcurre la denominada senda del Cares (Figura 1), ruta de 11 km de longitud entre las localidades asturiana de Poncebos y leonesa de Caín, que anualmente es transitada por más de 200.000 senderistas. Se trata de un camino, de aproximadamente un metro de anchura, que transcurre al pie de una ladera que cuenta con unos desniveles, desde las máximas cotas colindantes, superiores a 1.000 metros de altura. Todas estas condiciones, unidas a un clima atlántico templado-húmedo con hasta 2.000 mm de precipitaciones anuales (de las cuales un 20 % son en forma de nieve) y un sustrato carbonatado fuertemente diaclasado, convierten a este territorio en una zona muy susceptible a los desprendimientos rocosos.

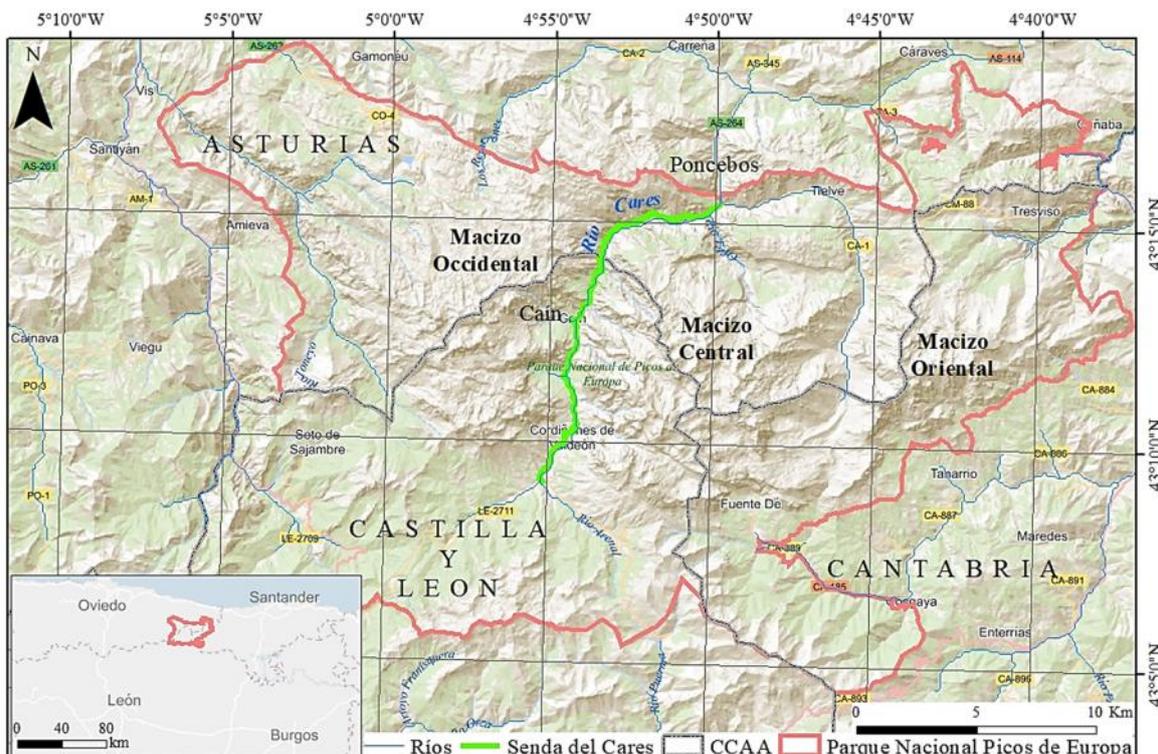


Figura 1. Ubicación geográfica del Parque Nacional de los Picos de Europa y, dentro de éste, de la senda del Cares.

Clasificación de movimientos en masa

Los desprendimientos son fenómenos de caída de rocas que constituyen un riesgo importante, por ejemplo, en explotaciones mineras a cielo abierto, infraestructuras viarias y zonas montañosas con pendientes abruptas que tengan una alta exposición, como es el caso de estudio. Este tipo de fenómenos se clasifican dentro de la categoría de “movimientos en masa” (*mass movement*), también denominados “movimientos de ladera” (*slope movement*). Éstos se definen como un proceso en el que se movilizan materiales por la acción de la gravedad y que pueden poner en peligro tanto bienes como vidas humanas (Gutiérrez Elorza, 2008).

Dentro de los movimientos de ladera se diferencian, también, los deslizamientos (*landslides*), que Cruden (1991) define como el movimiento de una masa de rocas, detritos o tierras hacia debajo de una ladera, y, por otro lado, los de reptación (*creep*), que son deformaciones lentas, pero demasiado pequeñas para producir una rotura de cizalla como un deslizamiento (Zaruba y Mencl, 1982). A pesar de esta terminología, comúnmente se emplea de forma genérica el término “deslizamiento” para casi todas las variedades de movimientos en masa producidos en laderas. El concepto de “movimientos en masa” incluye muchos procesos y factores, por lo que existen varias clasificaciones siendo la más utilizada la de Cruden y Varnes (1996) que sigue los criterios de Varnes (1978). Éste los diferencia según el tipo de movimiento, caída, vuelco, deslizamiento, extensión o flujo, y por el tipo de material, roca o suelo, distinguiendo los suelos en derrubios (*debris*), predominantemente gruesos, y en tierra (*earth*), predominantemente finos. Además, existen otros tipos de movimientos en masa que quedan fuera de la clasificación, que se denominan complejos por ser una combinación de varios de los anteriores.

Siguiendo la clasificación mencionada y el trabajo de Álvarez García (2016), los desprendimientos que suceden en la zona de estudio se pueden clasificar como una caída de rocas (*rockfall*); según Varnes (1978) se podrían definir como caída (*fall*) porque comienzan con el desprendimiento del suelo o de la roca de una pendiente pronunciada a lo largo de una superficie en la que se produce poco o ningún desplazamiento de cizallamiento; el material entonces desciende principalmente por el aire cayendo, rebotando o rodando. Asimismo, se consideran de tipo rocoso (*rock*)

porque el material es una masa dura o firme que estaba intacta en su lugar natural antes del inicio del movimiento.

Causas y factores de los desprendimientos

Para Suárez (2009) los desprendimientos se originan por un cambio en las fuerzas que actúan sobre un bloque o una masa rocosa. En el caso de las laderas de la senda del Cares concurren factores de tipo estructural y orográfico, que actúan como condicionantes, y de tipo climático, que constituye el factor desencadenante, tal y como recoge en su trabajo Álvarez García (2016). El factor orográfico viene dado por la existencia de escarpes de pendiente pronunciada por encima de la senda, mientras que el factor estructural viene determinado por el sistema de discontinuidades del macizo rocoso. Una alta densidad de discontinuidades favorece la ocurrencia de desprendimientos, independientemente de que las familias de discontinuidades estén integradas por un número reducido de estas, siendo además de baja continuidad e irregulares.

Por otra parte, los factores meteorológicos pueden actuar individual o conjuntamente, destacando las precipitaciones (Fernández y Vilaplana, 2004), los ciclos de hielo-deshielo (Matsuoka y Sakai, 1999), el aumento de humedad en las rocas (Sass, 2005) y el aumento de la temperatura media anual (Davies *et al.*, 2001). Además, otros factores desencadenantes a considerar son los aludes y los incendios, fenómenos recurrentes cada año en esta zona, que propician la desaparición de la vegetación y que consumen la materia orgánica del suelo, contribuyendo así desencadenamiento de desprendimientos durante las semanas y meses siguientes; este efecto se ve potenciado en la zona de estudio por episodios de precipitaciones intensas con la consiguiente escorrentía superficial (De Graff y Gallegos, 2012 y Jordan, 2009). Adicionalmente, en este caso, se puede sumar la presencia de fauna (mayoritariamente caprina), que ocasiona la removilización de los bloques sueltos que conforman los canchales.

Otros de los potenciales factores desencadenantes de desprendimientos son la presencia de raíces de árboles, si bien apenas tiene incidencia en este caso dada la ausencia de vegetación arbórea en los puntos de origen, y la actividad sísmica, aunque en este caso y de acuerdo con el mapa de Peligrosidad Sísmica de España (Ministerio de

Fomento, 2002), en la región de Picos de Europa la peligrosidad sísmica es muy reducida.

Dinámica de los desprendimientos

Tal y como indican Ramírez y Alejano (2004), en una caída de bloques el movimiento siempre se inicia por caída libre, pero la trayectoria de los bloques a lo largo de la caída además puede ser por (i) rebote, (ii) rodadura y (iii) deslizamiento o una combinación de estos, incluso simultáneamente. La dificultad de su análisis viene dada por la naturaleza tridimensional de los bloques y la superficie por la que caen, además de que pueden fragmentarse nuevamente durante la caída. Todas estas variables en conjunto hacen muy complejo el desarrollo de modelos matemáticos que permitan definir el comportamiento de la roca, si tiene que incluir el paso instantáneo de un tipo de movimiento a otro.

En cambio, como un desprendimiento de un bloque rocoso se asimila al movimiento de un sólido rígido que está rotando mientras cae, su energía cinética total se puede descomponer en la suma de la energía cinética de traslación, que es la relativa al desplazamiento del centro de masas del cuerpo por el espacio, y de la energía cinética de rotación, que es la relativa al movimiento de rotación respecto a un eje fijo. Dentro de la ecuación 1 la energía cinética de traslación (E_{tra}) depende de la masa del cuerpo (m) y su velocidad lineal (v), mientras que la energía cinética de rotación (E_{rot}) depende de la velocidad angular del cuerpo (ω) y del tensor de momentos de inercia (I).

Ecuación 1. Energía cinética para un sólido rígido que está rotando mientras cae.

$$E_c = E_{tra} + E_{rot} = \frac{1}{2} m \cdot v^2 + \frac{1}{2} I \cdot \omega^2$$

Por otro lado, en este trabajo no se va a profundizar en las ecuaciones que rigen cada tipo de movimiento, pero sí se describen según el orden teórico de ocurrencia durante una caída. El primero es la caída libre, cuya trayectoria es descrita por una parábola y el punto de impacto está determinado en un sistema coordenado por la intersección entre ésta y la poligonal del terreno. A continuación, el rebote ocurre con el impacto de la roca sobre la ladera tras la caída libre y está regido por un coeficiente de restitución (R) que expresa la cantidad de energía disipada durante el impacto, diferenciándose el coeficiente de restitución normal (R_n), que es la división de la

componente normal de la velocidad de rebote e impacto, que tienen sentidos contrarios, y el coeficiente de restitución tangencial (R_t), que es la división de la componente tangencial de la velocidad de rebote e impacto, que tienen la misma dirección y sentido. El tipo de movimiento que, teóricamente, sucedería al rebote viene marcado, para un modelo de partícula como el que se va a utilizar en este trabajo, por la velocidad de salida del impacto. Si ésta es próxima a cero (o inferior a un valor denominado velocidad mínima que, en este caso, será 0,1) el bloque se detiene en el punto de impacto. También se puede diferenciar el tipo de movimiento tras el rebote por el ángulo de rebote, si es superior a un valor mínimo, el bloque rodará; si es inferior, pasará de rodadura a deslizamiento, aunque es una transición compleja ya que ambos modos se pueden desarrollar simultáneamente.

Ante esta complejidad, han sido desarrollados estudios empíricos realizados con el objetivo de conocer la dinámica de los tipos de movimientos durante un fenómeno de caída de bloques. Un ejemplo es el de Giani *et al.* (2004), que realizaron e interpretaron múltiples ensayos que permitieron obtener diversas conclusiones respecto a las limitaciones en simulaciones de trayectorias de bloques. Así, determinaron que los factores que afectan de forma muy significativa a la trayectoria y alcance de los bloques son los siguientes: (i) las variaciones locales de la topografía del talud para bloques de similar forma y volumen con el mismo punto de origen; (ii) la geometría del bloque, alcanzando los bloques esféricos mayor eficiencia de movimiento; (iii) la posición relativa del bloque con la superficie en el momento del impacto, dado que si se produce con una arista la pérdida de energía es mínima, pero si lo hace con un plano puede llegar hasta a detenerse; (iv) el momento de inercia en el plano de movimiento, que viene marcado por la velocidad rotacional de un bloque que depende a su vez de la geometría y del volumen, algo que puede variar mucho según la sección del bloque, y, por último, (v) la fragmentación del bloque que puede suponer tanto una pérdida de energía y la detención de todos los bloques generados como un aumento de energía y que sean proyectados con una trayectoria mayor.

Estudios previos de peligrosidad en la senda

Con anterioridad a la realización de este trabajo fin de máster, Álvarez García (2016) efectuó una evaluación y zonificación de la peligrosidad por procesos de ladera a

lo largo de la senda del Cares basada en: (i) recopilación de 22 eventos de inestabilidad de laderas en la prensa local y en el servicio de emergencias entre 2001 y 2016, 6 de ellos con daños personales provocando 9 heridos y 2 muertes; (ii) recopilación de datos de litologías, formaciones superficiales, datos climatológicos e incendios; (iii) trabajo de fotointerpretación a partir de fotografía aérea; (iv) trabajo de campo; (v) elaboración de una base de datos mediante SIG de toda la información previamente obtenida; (vi) tratamiento y análisis de la información mediante SIG; y (vii) elaboración de una cartografía de peligrosidad. Esta cartografía diferencia los tramos de la senda en zonas de peligrosidad baja, media, media-alta y alta (Fig. 2).

Este trabajo fin de máster se ha planteado analizar los desprendimientos de las zonas donde suceden con mayor frecuencia y peligrosidad identificadas por Álvarez García (2016). Los sectores clasificados como de “peligrosidad alta” son zonas de canchales de ladera cóncava próximas a las vaguadas, que canalizan preferentemente hacia su centro los bloques caídos, cuya mayor zona representativa es el paraje de Los Collados. Siendo el tramo de 6 kilómetros de la senda más próximo a Poncebos, el cual presenta la mayor concentración de canchales de la senda y se caracteriza por la presencia de laderas cóncavas, con pendientes entre 20 y 30°, que favorecen la acumulación de materiales. Aunque alternan zonas de “peligrosidad alta” y de “peligrosidad media-alta”, que son áreas de canchales de ladera convexa en las que la peligrosidad se ve reducida porque no canalizan los bloques caídos al ser zonas próximas a divisorias o lomas que no incluyen vaguadas, también se incluyen en esta categoría las zonas con circulación de canales fluviotorrenciales o de aludes, como por ejemplo la conocida como Canal de Saigu, que no han sido objeto de estudio en este trabajo. Es reseñable que en un tramo de media-alta peligrosidad con una ladera cóncava el día 29 de junio de 2019 en la zona de Los Collados hubo un nuevo herido por la caída de una roca en una ladera convexa, causándole un traumatismo torácico (fuente: La Nueva España) y demostrando que es un problema actual.

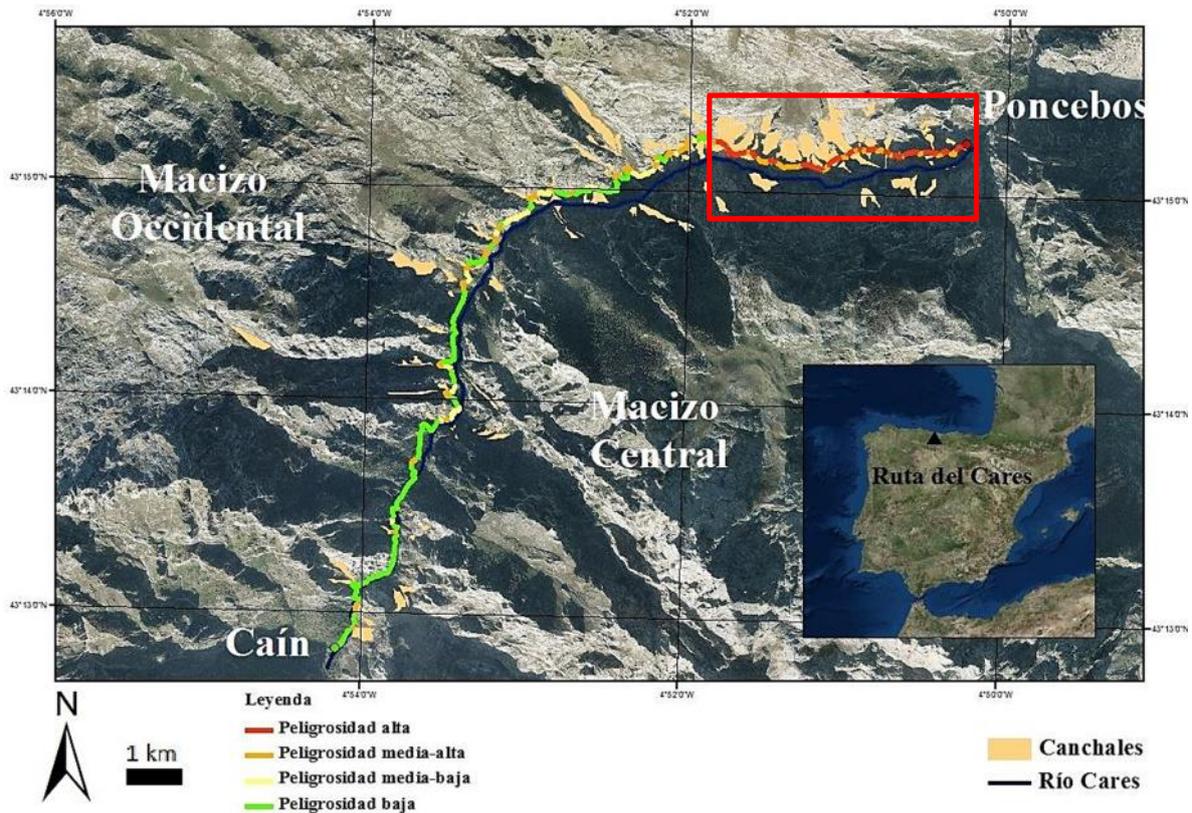


Figura 2. Mapa de peligrosidad por procesos de ladera en la senda del Cares. Tomado de Álvarez García (2016). El recuadro en rojo delimita la zona de mayor peligrosidad considerada en este estudio.

Como se ha indicado, el área objeto de estudio es una zona de montaña con evidente peligro por fenómenos de inestabilidad. Autores como Ramírez y Alejano (2004) afirman que, en estos casos, no suele ser viable estabilizar todas las zonas con posibles fenómenos de inestabilidad, tanto en términos económicos como en términos de impacto paisajístico. Además, el riesgo aumenta al tratarse de una senda con un elevado volumen de visitantes, ya que supera los 200.000 visitantes anuales según datos del sistema de aforo de peatones del propio Parque Nacional (Tabla 1), que contabiliza las entradas y salidas a la senda del Cares desde Poncebos y Caín.

Tabla 1. Registro de entradas y salidas de senderistas en la senda del Cares durante el periodo del 1 de diciembre de 2015 al 30 de noviembre de 2016. Tomada de la Memoria Anual del Parque Nacional de los Picos de Europa (2016).

	Poncebos		Caín	
	Entrada	Salida	Entrada	Salida
TOTAL	103,536	90,893	96,539	85,870
Media diaria	283	278	264	235

Objetivos

Este trabajo se ha fijado como objetivo genérico la modelización de los posibles desprendimientos rocosos en el entorno del tramo con mayor peligrosidad de la senda del Cares, centrándose en el estudio de las posibles trayectorias de caída de los bloques desprendidos desde los diferentes escarpes de la ladera.

Adicionalmente, se ha planteado como objetivo proponer posibles vías de trabajo futuras que vayan enfocadas a la caracterización y control de estos desprendimientos, teniendo como objetivo final la localización de áreas inestables y la creación de un sistema de alerta temprana.

Contexto geográfico

La Senda del Cares alcanza los 11 kilómetros de longitud y transcurre entre las localidades de Poncebos y Caín, pertenecientes, respectivamente, a los municipios de Cabrales y de Posada de Valdeón. El trazado de la misma discurre a lo largo de la garganta del río Cares, dentro del Parque Nacional de los Picos de Europa.

El clima de los Picos de Europa se caracteriza por unas precipitaciones anuales elevadas, constituyendo éstas -como se indicó anteriormente- uno de los factores desencadenantes de los desprendimientos. Las precipitaciones en este sector están influenciadas por un clima atlántico en su vertiente Norte y atlántico-continental en la Sur, aunque debido a su combinación con la propia estructura de montañas y valles hace que exista una estratificación de microclimas según la altitud. La proximidad al mar Cantábrico es un factor geográfico que influye en estos microclimas, debido al efecto barrera que ejercen las montañas reteniendo las nubes que originan las altas precipitaciones. Además, existen unos vientos irregulares de componente Sur, muy frecuentes durante el invierno, que pueden provocar aludes de nieve.

Si los microclimas mencionados se dividen en estratos paralelos al suelo, cada uno constituye un piso bioclimático distinto (Fig. 3). Éstos son, desde el de menor elevación al de mayor, el colino, montano, subalpino y alpino, caracterizados por sus temperaturas de control, evolucionando gradual y negativamente desde los de menor altura a los de mayor. De este modo, la temperatura media anual en el piso colino es superior a los 12º C, siendo en el alpino inferior a los 3º C; la temperatura media de las mínimas del mes más frío está en 2º C en el colino y en -7º C en el alpino, situándose la

temperatura media de las máximas del mes más frío en 10^o C en el colino, mientras que en el alpino no supera los 0^o C. Concretamente, en el valle del río Cares, situado por lo general entre los 300 y 800 metros de elevación, se reconoce el piso colino con un clima de mayor influencia mediterránea.

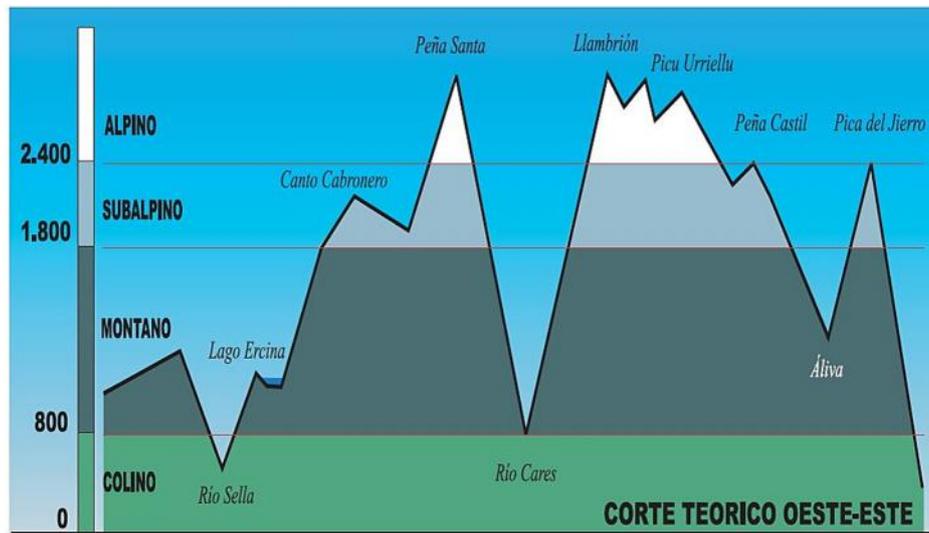


Figura 3. División de pisos bioclimáticos en función de la elevación. Tomada de Menéndez de la Hoz (1999).

Contexto geológico

El Parque Nacional de los Picos de Europa forma parte de la Cordillera Cantábrica y se sitúa dentro de la Zona Cantábrica del Macizo Ibérico (Lotze, 1945; Julivert, 1967; Alonso *et al.*, 2009) (Fig. 4), que es la zona más externa del Orógeno Varisco del noroeste de la Península Ibérica. Esta zona se encuentra limitada al Oeste por el Antiforme del Narcea, que la separa de la Zona Asturoccidental-leonesa, al Este por la Cuenca Cantábrica, al Sur por la Cuenca del Duero y al Norte por la costa cantábrica. Según Pérez-Estaún y Bea (2004) está caracterizada por una tectónica de piel fina con una deformación interna escasa en la que destaca la ausencia de metamorfismo y de foliaciones tectónicas. También es característica la presencia de cabalgamientos y de mantos de despegue con pliegues asociados que se formaron durante el Carbonífero en la Orogenia Varisca. Además, está dividida en unas unidades, basadas en las que ya describió Julivert (1967a, 1971a), que son: Unidades Occidentales y Meridionales, Cuenca Carbonífera Central, Unidad del Ponga, Unidad de Picos de Europa y Unidad del Pisuerga-Carrión. La unidad en la que se encuentra la zona de estudio es la Unidad de Picos de Europa, que limita al sur con la Unidad del Pisuerga-Carrión y al oeste con la Unidad del Ponga, está situada en el sector noreste de la Zona Cantábrica y consiste en

un sistema imbricado de cabalgamientos que, a diferencia de esta última, no contiene pliegues asociados debido probablemente al carácter masivo de las rocas. Hay unos cabalgamientos que cortan lateralmente la Unidad del Ponga desde la Unidad Picos de Europa y alguno de ellos junto a otro tipo de fallas cortan rocas posteriores a la Orogenia Varisca, lo que indica que la deformación de la Orogenia Alpina posterior causó su reactivación y desarrollo.

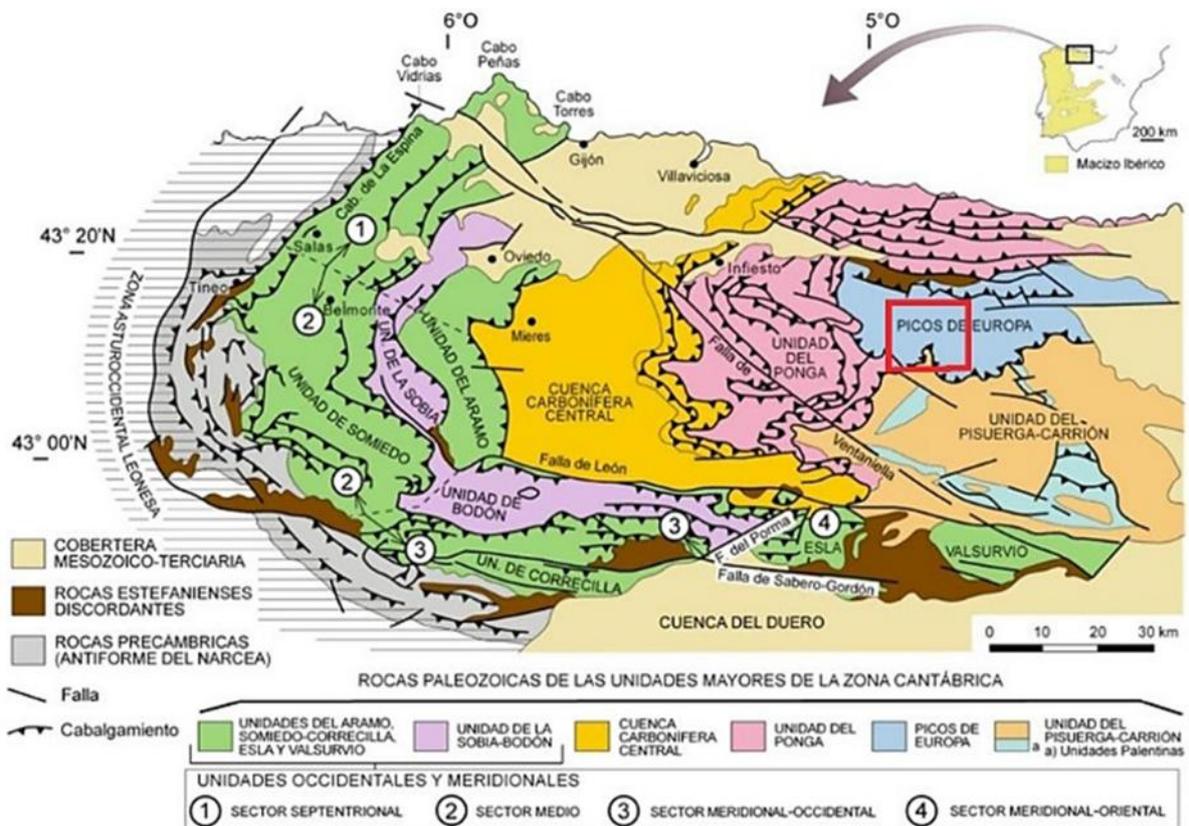


Figura 4. Mapa geológico de la Zona Cantábrica mostrando las principales unidades (basado en Julivert, 1971). Tomado de Pérez-Estaún y Bea (2004). La zona de estudio aparece marcada con un recuadro rojo.

Como se puede observar en la figura 5, al recorrer la senda desde Poncebos se pueden distinguir ordenadamente desde el Devónico Superior al Carbonífero Superior, las siguientes formaciones geológicas cortadas por cabalgamientos de orientación E-O o ESE-ONO: Fm. Ermita, Fm. Cándamo-Baleas, Fm. Barcaliente, Fms. Valdeteja y Picos de Europa, y Fm. Lebeña; además, como formaciones superficiales cuaternarias aparecen derrubios de ladera y canchales, y deslizamientos.

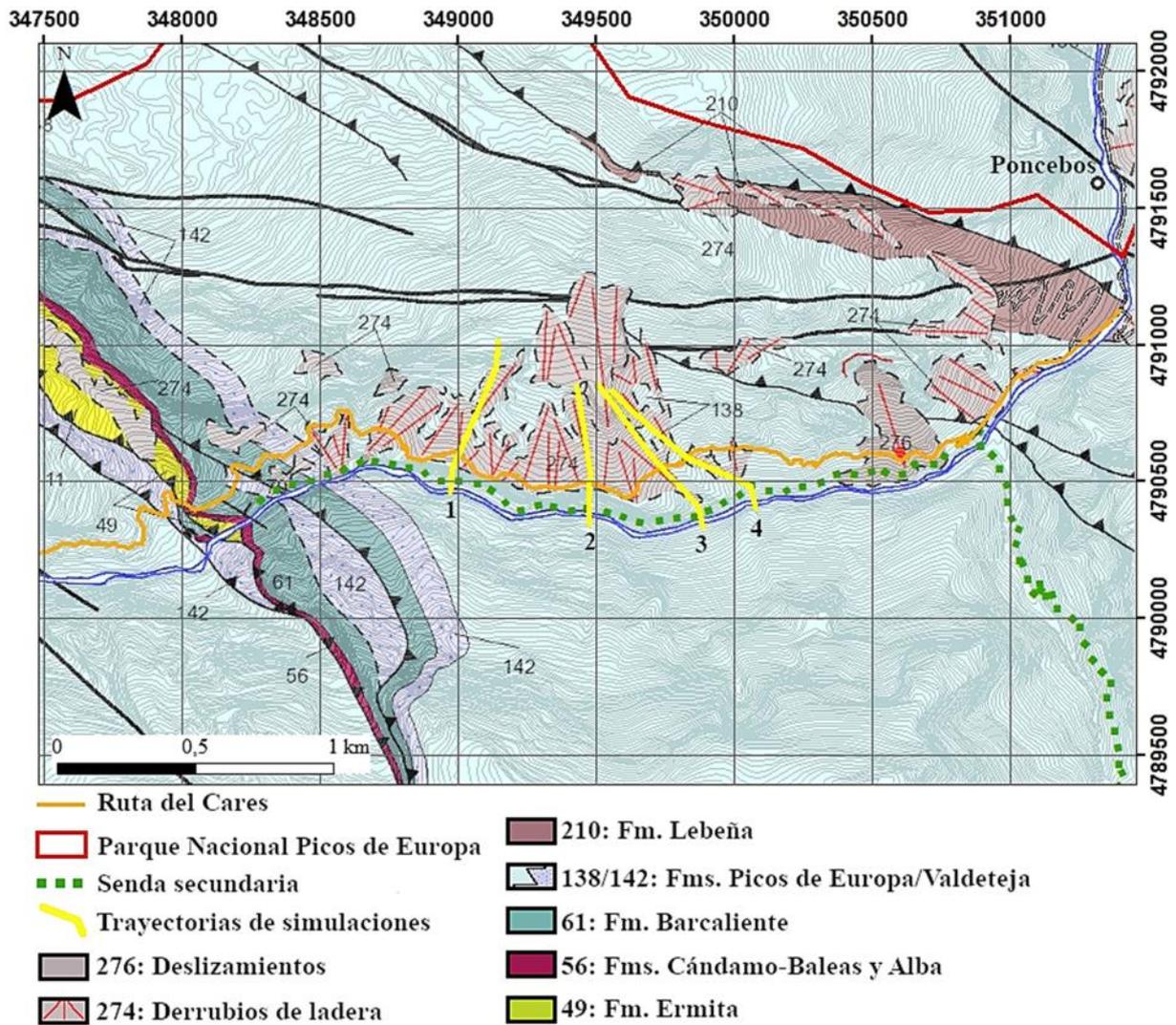


Figura 5. Mapa geológico del Instituto Geográfico Nacional, a escala 1:50.000 (Merino Tomé et al., 2013) en la zona objeto de estudio con las curvas de nivel cada 10 m. En amarillo están marcados los perfiles utilizados en las simulaciones, numerados del 1 al 4 de oeste a este.

A continuación, se describen las principales características de las formaciones presentes en la zona objeto de estudio, de más antiguas a más modernas (Fig. 6):

- Fm. Ermita: areniscas cuarcíticas, areniscas ferruginosas, y microconglomerados con limolitas, lutitas y calizas bioclásticas.
- Fm. Cándamo-Baleas: calizas encriníticas; Fm. Alba: calizas nodulosas y cherts.
- Fm. Barcaliente: calizas micríticas y microesparíticas negras y fétidas, a veces finamente laminadas. Localmente presentan evaporitas y moldes de evaporitas.
- Fm. Valdeteja: presenta un espesor variable entre 200-800 metros que incluye depósitos dominados por calizas claras y masivas de carácter marino somero, con fauna y flora marina variada, también contiene depósitos de talud con niveles de

brechas calcáreas y depósitos de medio marino profundo de calizas micríticas, oscuras y pobres en fauna (Aramburu y Bastida, 1995).

- Fm. Picos de Europa: sucesión carbonatada que alcanza hasta los 800 metros de espesor en la que se distinguen dos miembros: el inferior es el tableado, son calizas finamente estratificadas que pueden alternarse con margas en algunas localidades; el superior es el masivo, formado por calizas bioclásticas con intercalaciones en la parte superior de calizas rojas nodulosas (Aramburu y Bastida, 1995).
- Fm. Lebeña: lutitas, areniscas, conglomerados, brechas y olistolitos calcáreos.

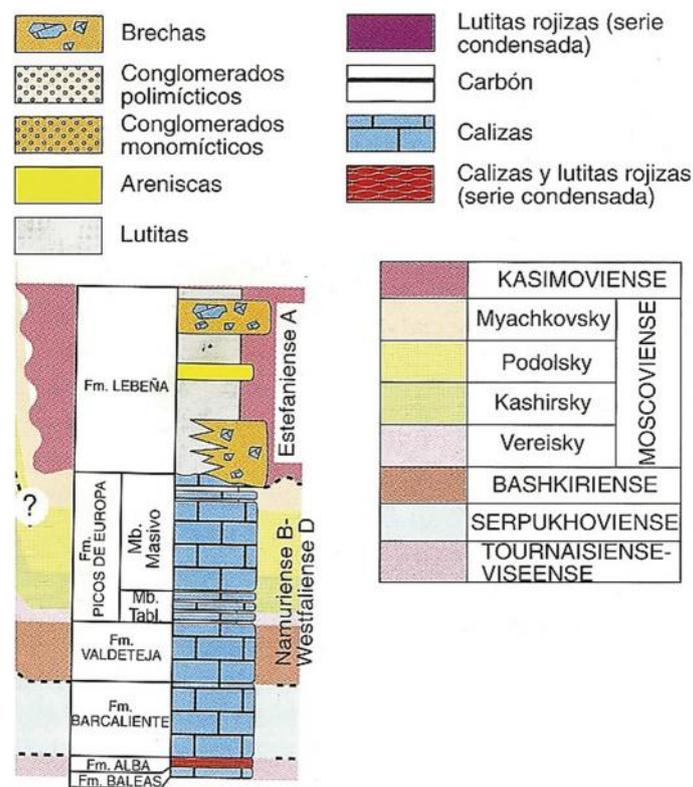


Figura 6. Columna estratigráfica sintética de la Región de Picos de Europa. Tomada de Aramburu y Bastida (1995), adaptada de Marquínez (1978) y Farias (1982).

Los perfiles modelizados en este trabajo se sitúan íntegramente dentro de la unidad compuesta por las formaciones Picos de Europa y Valdeteja. Éstas no aparecen diferenciadas en la figura 5 por el mismo motivo que exponen las memorias de la serie MAGNA de mapas geológicos 1:50.000 de la zona. En concreto, la memoria de la hoja 56 de Carreña-Cabrales (Martínez García y Rodríguez Fernández, 1984) define la Formación Valdeteja como la parte superior de la “Caliza de Montaña”, siendo más masiva, de color gris, grano más grueso y con mayor contenido fosilífero que la parte

inferior correspondiente a la Fm. Barcaliente. En la memoria de la hoja nº 55 de Beleño (Julivert y Navarro, 1984) indican que sólo es posible diferenciar cartográficamente la Caliza de Montaña y la Fm. Picos de Europa siendo delimitable el Miembro inferior de la Fm. Picos de Europa. Esta memoria pone de ejemplo el corte del río Cares en el que, como el Miembro inferior no es continuo, se ponen en contacto las calizas masivas de la Fm. Valdeteja con las también masivas de la Fm. Picos de Europa, siendo ambas de tonos blancos y bioclásticas, lo que complica enormemente su distinción cartográfica.

2. Metodología

En este apartado se describe la metodología seguida en este trabajo, que comprendió las siguientes fases: i) revisión de trabajos previos de la misma zona, de clasificación de movimientos de ladera, de métodos de estabilización y de prevención; ii) trabajo de campo, para seleccionar las zonas de mayor interés, recopilación de datos de desprendimientos y toma de muestras de roca; iii) ensayos de laboratorio, para determinar la densidad y la masa media de los bloques; iv) trabajo de gabinete, para procesar y analizar toda la información; v) recopilación y procesado de datos LIDAR; vi) análisis de trayectorias mediante un software específico

Revisión bibliográfica

La primera tarea abordada consistió en la búsqueda de trabajos desarrollados en el entorno de la senda del Cares y relativos al riesgo por procesos de ladera. También se recopiló bibliografía sobre la clasificación y definición de los procesos de ladera, los riesgos que conllevan, las posibles medidas preventivas y de estabilización y de los programas que permiten modelizar estos procesos.

Trabajo de campo

A partir del conocimiento previo de la zona, se abordó la fase de trabajo de campo, que consistió en visitar los tramos de la senda de mayor peligrosidad para seleccionar cuatro segmentos representativos de la zona y poder identificar el punto de origen y el posible recorrido de los procesos de ladera con ayuda de ortofotos. Además, se tomaron muestras de roca para analizar su densidad en laboratorio y se tomaron

medidas de los ejes de los bloques que formaban los canchales más próximos a la senda y de sus ángulos de reposo. En esta fase de campo también se diferenciaron los tipos de material existente a lo largo de los perfiles de modelización previstos, combinando las ortofotos y la comprobación directa en las zonas accesibles. De este modo, se ha diferenciado zonas de manto vegetal con y sin bloques, zonas de afloramiento de caliza que serán los escarpes, zonas de depósitos detríticos de talud que serán los canchales, camino de gravas que serán la senda del Cares y la senda secundaria, y, por último, el río Cares.

Trabajo de laboratorio

Para calcular la densidad aparente de las calizas características de la zona de estudio se siguió el procedimiento establecido en la Norma Europea EN 1936:2007 (Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la densidad real y aparente y de la porosidad abierta y total), si bien se utilizaron cinco fragmentos de morfología irregular en lugar de los seis bloques de geometría regular que establece la misma.

Las cinco muestras que aparecen numeradas en la figura 7 pasaron primero el proceso de secado para luego ser pesadas, obteniendo así la masa en seco (m_d). A continuación, en un recipiente de vacío se aplicó una disminución de presión para liberar el aire de los poros abiertos para dejar luego 24 horas sumergidas a presión atmosférica y hacer de nuevo las pesadas con la balanza hidrostática consiguiendo la masa sumergida (m_s), y, por último, secando la humedad superficial, la masa saturada (m_h).



Figura 7. Muestras preparadas para la determinación de su densidad.

Con estos tres datos medidos, se calculó mediante las siguientes fórmulas la densidad aparente ($\rho_b = \frac{m_d}{n_s - m_h} \cdot \rho_{rh}$) y la porosidad abierta ($\rho_o = \frac{n_s - m_d}{n_s - m_h} \cdot 100$). En la que ρ_{rh} es el valor de la densidad del agua igual a 1 g/cm³.

Trabajo de gabinete

La medida de la densidad de las rocas de la zona de estudio permite estimar la masa de los bloques que se desprenden por la ladera de la senda. Para ello, se midieron en cada perfil proyectado los tres ejes de 25 bloques que incluyesen principalmente bloques representativos y alguno por encima de la moda.

Estos datos se usaron para hacer una estimación del volumen de los bloques, empleando la fórmula de volumen de un elipsoide ($V = \frac{4}{3} \pi abc$) y multiplicándolos por la densidad media obtenida en laboratorio para obtener la masa de cada bloque medido. La estimación de la masa permite al programa de modelización estimar la energía cinética de los bloques durante la trayectoria.

Recopilación y procesamiento de datos LiDAR

Se descargaron los datos LiDAR, distribuidos en ficheros que abarcan un área de 2x2 km, de la zona de estudio desde el Centro Nacional de Información Geográfica (<http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/catalogo.do?Serie=LIDAR#>). Para cubrir toda la zona se descargaron los ficheros en formato LAZ “PNOA_2012_LOTE_AST_350-4792_ORT-CLA-COL” y “PNOA_2012_LOTE_AST_348-4792_ORT-CLA-CIR”, correspondientes a la primera cobertura entre 2008 y 2015. Estos datos proporcionan la información altimétrica del relieve con una resolución de 0,5 puntos/m².

Estos archivos se procesaron mediante las herramientas incluidas en el paquete *LAStools*, aplicación que fue implementada en el programa *ArcGIS* (v10.3, ESRI). Mediante la herramienta *3D Analyst* se elaboraron los perfiles topográficos a modelizar, los cuales se trazaron ortogonalmente a la senda, desde la parte anterior al escarpe principal (que actúa como área fuente de los desprendimientos) hasta el río Cares, donde finalizan las trayectorias de los bloques con mayor alcance.

El proceso de tratamiento de datos LiDAR incluyó los siguientes pasos: (i) extracción del archivo “.las” con la herramienta *laszip*, del archivo “.laz” y creación de un nuevo *LAS Dataset* desde ArcCATALOG en el que integrar el archivo “.las”; (ii) obtención de los modelos de elevaciones digitales (MDE) con una resolución de 25 cm con la herramienta *Las2DEM* (*step=0,25*) de cada archivo “.las” y fusión de todos ellos mediante *Mosaic to new Raster*; (iii) a partir del MDE resultante y las herramientas *interpolate line* y *profile graph* de *3D Analyst* se elaboraron los perfiles topográficos.

Análisis de trayectorias con el programa *RocFall*

Tal y como proponen Ramírez y Alejano (2004), existen dos modelos para analizar las trayectorias de bloques: (i) los modelos rigurosos que incluyen en sus modelizaciones el volumen y la forma del bloque y (ii) los modelos de partícula, que no consideran la forma ni el volumen del bloque, asumiendo que toda la masa del bloque se concentra en su centro de gravedad. El programa utilizado en este trabajo, *RocFall* (v.4.042 Rocscience), considera el modelo de partícula, reduciendo todos los bloques a puntos con una masa constante y una velocidad que, al impactar con la superficie, varía su dirección y reduce su velocidad normal por el coeficiente de restitución normal (R_n), manteniendo el signo de su velocidad tangencial, pero reduciéndola por el coeficiente de restitución tangencial (R_t). Aunque el modelo no considere la forma de las partículas, las propias ecuaciones de deslizamiento asumen una forma circular, matizando que no habrá interacción entre ellas debido a su tamaño infinitamente reducido.

Las limitaciones para una simulación próxima a la realidad de un desprendimiento son las ya mencionadas anteriormente de Giani *et al.* (2004) y son las relativas a la complejidad del propio movimiento de los bloques durante el desprendimiento. A ellas hay que sumar las restricciones del propio programa, que no tiene en cuenta el efecto del tamaño, de la forma, del momento angular y de la fragmentación de los bloques durante la caída. En cambio, *RocFall* es un *software* capaz de realizar las simulaciones de forma rápida y relativamente precisas, utilizando la geometría del talud y los coeficientes de restitución de la superficie del talud, que son los factores principales que controlan el movimiento de los bloques (Suárez, 2009). Además, este programa utiliza el ángulo de rozamiento de cada material que compone el talud, la velocidad angular, la velocidad mínima y la rugosidad.

Tal y como indica Suárez (2009), para poder realizar una simulación lo más realista posible es necesario considerar los siguientes criterios para elegir los valores de los parámetros que requiere el programa:

- Los coeficientes de restitución normal y tangencial, que varían de 0 a 1, se pueden estimar de varias formas, aunque son complejas y requieren un trabajo en profundidad, por lo que también es frecuente usar los valores medios de R_n y R_t del material más parecido a los que aparecen en la “*Rocsience Coefficiente of Restitution Table*”, pudiendo ajustarlos hasta tener un alcance aproximado a los desprendimientos ya ocurridos. Las superficies de laderas muy limpias son peligrosas, debido a que tienen un alto coeficiente de restitución y por lo tanto no retardan el movimiento del bloque que cae, mientras que las laderas de materiales sueltos o gravas tienen un bajo coeficiente de restitución y absorben una cantidad considerable de energía llegando en algunos casos, incluso, a parar este movimiento. Por lo general, los materiales duros tienen un coeficiente mayor que los materiales blandos, y la tendencia es que si el coeficiente de restitución normal aumenta también lo hace el tangencial.
- La velocidad angular ha de ser considerada, aunque sea un parámetro con una baja influencia en las trayectorias, y tiene que ser un valor 0 o próximo en los puntos de inicio del movimiento.
- La rugosidad de la superficie del talud media se estima al introducir los vértices de su perfil, pero su desviación estándar es la que marca la rugosidad (0, 2, 3, 5). Depende, no solo del material, sino de la comparación entre el tamaño de los bloques de la roca que caen y los de la superficie. La desviación estándar de la rugosidad será mayor cuanto menores sean los bloques que se desprenden en comparación con los de la superficie. Esto implica que, si los bloques que caen son de un tamaño menor que los bloques que están sobre la superficie, la desviación estándar de la rugosidad será alta (próxima a 5), causando cambios en la dirección de los bloques caídos, o que sean desacelerados o incluso detenidos por los ya depositados, mientras que en el caso contrario (0 ó 1) los bloques grandes caídos podrán rodar o deslizar sobre los pequeños depositados sin apenas ser desacelerados o cambiar su dirección. Como los únicos materiales que presentan bloques en su superficie son los depósitos detríticos

de talud y el camino de gravas, conteniendo en ambos casos bloques de un tamaño menor o similar a la mayoría de las rocas de desprendimientos, por lo que el valor de la desviación estándar de la rugosidad es 0.

- El ángulo de rozamiento, tal y como es considerado por el programa *RocFall*, es el ángulo crítico de los segmentos de la ladera a partir del cual un bloque lanzado sobre ellos continuará moviéndose ladera abajo, pero si el ángulo del segmento tiene menor inclinación el bloque debería perder velocidad. Este es un parámetro que está marcado por la forma de las rocas, por lo que si se trata de fragmentos planos y alargados se moverán por deslizamiento y su ángulo de rozamiento será mayor (más próximo a un ángulo de rozamiento estándar determinado mediante el ensayo *tilt test*); en cambio, si su forma es esférica, el movimiento será por rodamiento y el ángulo de rozamiento será menor (más próximo a 0). En este caso se ha otorgado un valor estándar de 30 grados, pero aun así, se han hecho pruebas con las tres opciones que permite la configuración del proyecto en *RocFall*: utilizando el ángulo de rozamiento del material, considerando el ángulo de rozamiento estimado mediante el R_t y empleando un ángulo de rozamiento igual a 0. El ángulo de rozamiento permite al programa considerar la forma de la roca y el tipo de movimiento de ésta. Tal y como se comprobó en campo, la mayoría de los bloques tienen una forma más próxima a la esférica que a la planar, por lo que su movimiento se presume principalmente de rodamiento. Por estos motivos, el ángulo de rozamiento debería ser cercano a cero.

Previamente a la simulación, es necesario ubicar las áreas fuentes de los desprendimientos con uno o varios puntos de tiro (*Point Seeder*) y/o una o varias zonas de tiro (*Line Seeder*), que se corresponden con los afloramientos de escarpes de caliza. A la hora de definirlos es necesario introducir los valores de velocidad horizontal, velocidad vertical, masa y velocidad angular. En este caso, se ha considerado una velocidad horizontal media de 1,5 m/s, con una desviación estándar de 0,15, situando la velocidad vertical y la angular en un valor 0, mientras en la masa se consideró el valor medio calculado para cada perfil con los datos de campo.

En el programa de modelización se han caracterizado los materiales ya observados en campo y con ayuda de la ortofoto del Plan Nacional de Ortofografía Aérea

de máxima actualidad. Se les asignaron los valores de coeficientes de restitución normal (R_n), tangencial (R_t), ángulo de rozamiento interno (ϕ) y la desviación estándar de la rugosidad que se indican en la tabla 2. Los coeficientes de restitución se basan en los valores para los materiales más similares de la “*Rocsience Coefficient of Restitution Table*”, variándolos levemente para acercar los resultados a la realidad, aumentando el R_n para la caliza de 0,315 a 0,415 y para los canchales de 0 a 0,2, lo que provoca que las simulaciones no se detengan tan rápido al entrar en contacto con los canchales, dado que el valor de 0 provoca que la trayectoria con cada impacto pierda más velocidad de lo que en realidad ocurre.

Tabla 2. Valores de coeficientes de restitución, ángulo de rozamiento y rugosidad considerados en las simulaciones.

Material		R_n	R_t	ϕ	Rugosidad
Caliza	Promedio	0,415	0,712	30	-
	Desviación estándar	0,064	0,116	0	0
Senda	Promedio	0,35	0,85	30	-
	Desviación estándar	0,04	0,04	0	0
Manto vegetal	Promedio	0,30	0,8	30	-
	Desviación estándar	0,02	0,02	0	0
Manto vegetal con bloques	Promedio	0,251	0,489	30	-
	Desviación estándar	0,029	0,141	0	0
Canchal	Promedio	0,2	0,24	30	-
	Desviación estándar	0	0	0	0
Río	Promedio	0	0	0	-
	Desviación estándar	0	0	0	0

3. Resultados y discusión

En este apartado se describen y discuten los resultados obtenidos en laboratorio, así como las simulaciones realizadas con el programa de análisis de trayectorias de caída.

Los resultados del trabajo de laboratorio relativos a la determinación de la densidad aparente y la porosidad abierta se presentan en la Tabla 3. Ambos valores tienen una baja dispersión y se considera que su valor medio resulta representativo, siendo unas calizas caracterizadas con una densidad aparente de 2699,81 kg/m³ y una porosidad abierta del 0,38 %.

Tabla 3. Resultados de laboratorio correspondientes a la determinación de la densidad aparente de las muestras de caliza.

MUESTRAS	m_d (g)	m_s (g)	m_h (g)	Densidad aparente (kg/m ³)	Porosidad abierta (%)
1	229,96	230,28	145,28	2705,41	0,38
2	220,79	221,11	139,00	2688,95	0,39
3	237,92	238,24	150,16	2701,18	0,36
4	251,00	251,35	158,51	2703,53	0,38
5	223,61	223,94	141,12	2699,95	0,40
Promedio				2699,81	0,38
Desviación estándar				6,42	0,01

A partir de los valores de densidad aparente y el volumen medio de los bloques, se ha calculado la masa media de los bloques de cada perfil, tal y como se recoge en la Tabla 4. Los resultados de volumen medio de cada perfil varían entre 0,005 y 0,28 m³, y los de masa media entre 12 y 744 kg, pero para ambos parámetros los cuatro perfiles tienen una desviación estándar muy alta provocando que no sean valores representativos. Esto viene marcado por el carácter altamente heterogéneo de las poblaciones de bloques que constituyen cada perfil.

Este hecho aconseja excluir los datos de los bloques más grandes, haciendo la media únicamente con los datos que están dentro del percentil 75. De esta forma se obtuvo una media de los datos más representativos, sin que los datos anómalos los falseen (Tabla 5). La desviación estándar elevada refleja el carácter heterogéneo de los desprendimientos, mayor en los perfiles 2 y 4, además de que cada perfil es diferente.

Tabla 4. Promedio y desviación estándar del volumen y la masa de los bloques de roca para cada perfil modelizado.

	PERFIL 1		PERFIL 2		PERFIL 3		PERFIL 4	
	Volumen (m ³)	Masa (kg)						
Promedio	0,04	121,15	0,28	744,80	0,005	12,86	0,02	45,33
Desviación estándar	0,16	422,26	0,88	2380,82	0,02	54,43	0,03	70,09

Tabla 5. Masa promedio del percentil 75 de los bloques de roca para cada perfil modelizado.

P75	Masa (kg)			
	PERFIL 1	PERFIL 2	PERFIL 3	PERFIL 4
Promedio	4,91	14,05	0,76	5,82
Desviación estándar	5,10	30,81	0,31	10,80

Dentro de las simulaciones realizadas, se ha tomado el perfil 3 como el ejemplo más representativo para exponer los distintos modos de simulación que se han probado hasta definir el escenario más ajustado a la realidad, presentando posteriormente la simulación más idónea para el resto de perfiles. Todas las modelizaciones efectuadas tienen en común la geometría del talud, los materiales y sus propiedades, así como el número de trayectorias considerado, 100 (Fig. 8). En cambio, sí difieren en el ángulo de rozamiento utilizado y el modo de inicio de las trayectorias.

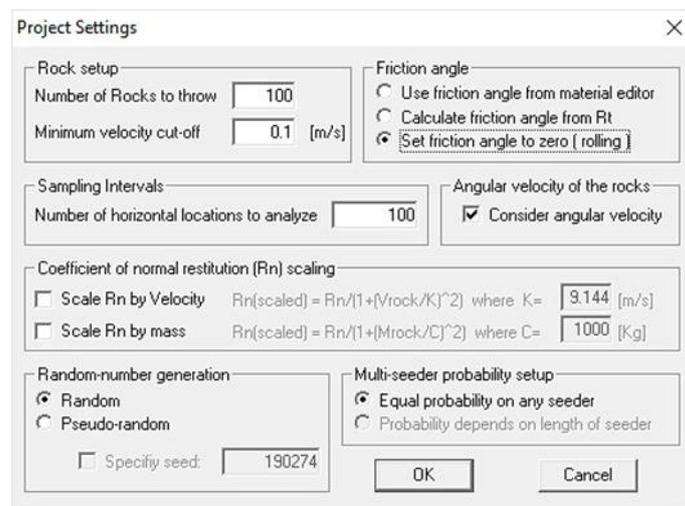


Figura 8. Ejemplo de cuadro de diálogo del programa RocFall para la configuración de las propiedades del proyecto

En la figura 9 se muestran seis simulaciones, de las cuales, las tres primeras (a, b y c) se utilizaron para comprobar de qué modo las trayectorias (representadas en rojo) se aproximan más a la realidad según el ángulo de rozamiento de los materiales de la ladera. Para ello, se fueron testando diferentes valores de ángulo de rozamiento para un único punto de tiro que inicia el desprendimiento en la parte más elevada del área fuente, representado mediante una cruz azul.

El resultado fue que, de estas tres simulaciones, la más ajustada a la realidad fue la “c”, con un valor de ángulo de rozamiento de 0° , dado que permite un mayor alcance a las trayectorias y no las detiene en los primeros rebotes al pasar a rodadura o deslizamiento, tal y como ocurren en las simulaciones “a” y “b”.

La simulación “d”, con una zona de tiro en el área fuente (indicada con rayado azul), permitió comprobar cómo podía ajustarse mejor variando la forma inicial del desprendimiento. Finalmente, se observó que el resultado es muy similar, a pesar de la complejidad de esta simulación.

Por último, en las simulaciones “e” y “f” se decidió incluir el resto de las áreas fuente, dado que no afectan a la senda principal, aunque sí al río y la senda que lo sigue a la misma altura. Éstas se hicieron, respectivamente, con varios puntos (e) y zonas de tiro (f) para corroborar la similitud de los resultados entre punto y zona de tiro, demostrando así que no tiene influencia ubicar en el área fuente un punto de tiro o una zona de tiro mientras estén situadas en su zona más elevada. Por tanto, el tipo de simulación más ajustado a lo observado en el campo es la “e”, seleccionada para aplicar en el resto de los perfiles.

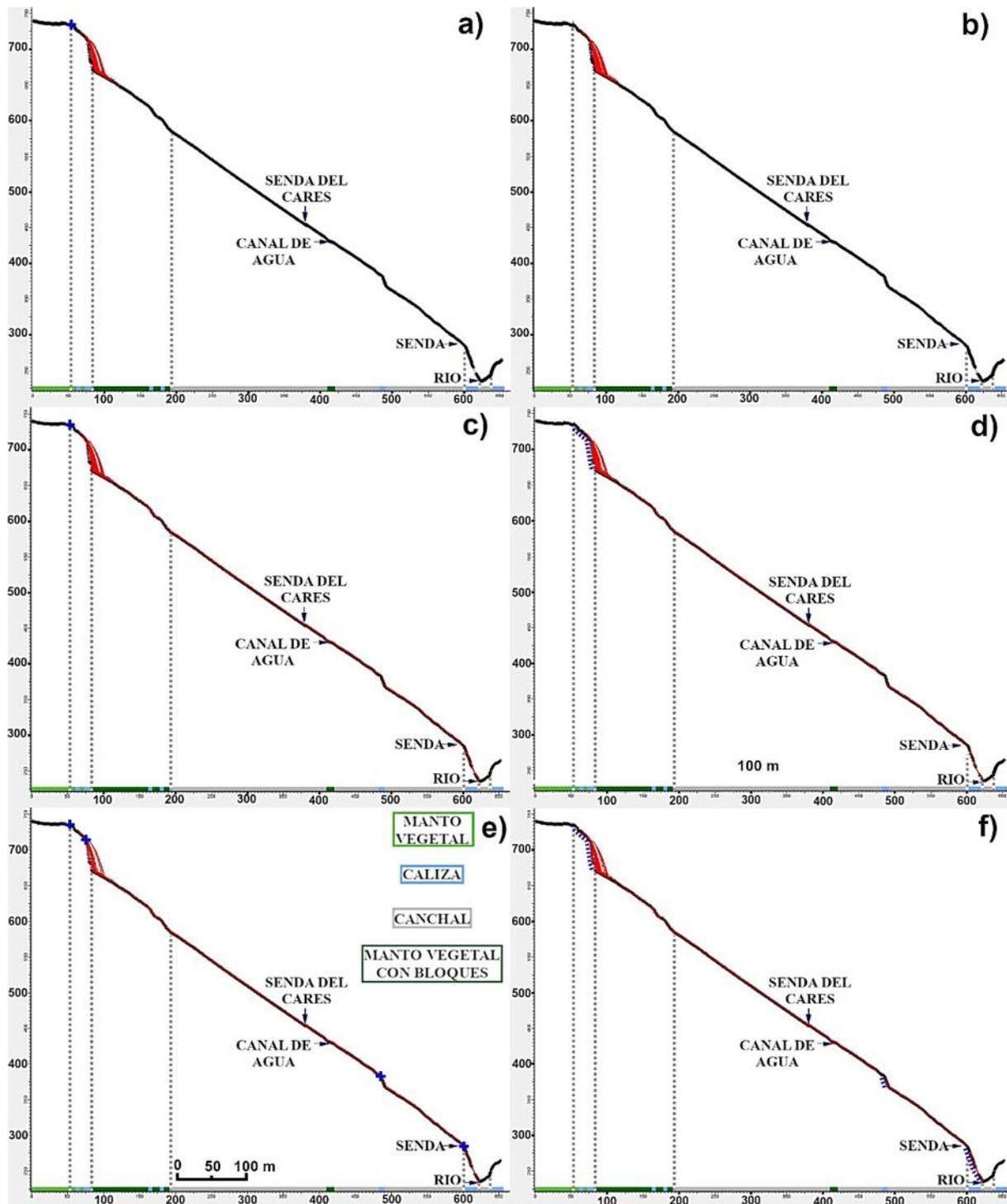


Figura 9. Cálculo de trayectorias de bloques en el programa RocFall sobre el perfil 3 con puntos de tiro representados por cruces azules y con zonas de tiro por líneas discontinuas azules: a) ángulo de rozamiento calculado mediante R_f y un punto de tiro; b) ángulo de rozamiento del material y un punto de tiro; c) ángulo de rozamiento 0° y un punto de tiro; d) ángulo de rozamiento 0° y una zona de tiro; e) ángulo de rozamiento 0° y varios puntos de tiro; f) ángulo de rozamiento 0° y varias zonas de tiro.

A continuación, se presentan los resultados de las modelizaciones correspondientes a cada perfil analizado. Éstas incluyen el análisis de altura de rebote máximo respecto a la ladera, la ubicación final de los bloques desprendidos y el valor

máximo por tramos de las energías cinética total, cinética traslacional y cinética rotacional, además del rango de estos parámetros en la intersección de cada perfil con la senda del Cares.

En todos los casos, los perfiles topográficos elaborados a partir del modelo de elevaciones LiDAR hubieron de ser suavizados para eliminar resaltes puntuales de casi 1 metro de altura, artefactos resultantes de la naturaleza del modelo digital de partida. Estos provocaban el frenado súbito de la simulación en esos puntos al comienzo de los canchales, impidiendo que los bloques desprendidos alcanzaran y/o sobrepasaran la senda.

Perfil 1

En el primer perfil se consideró un bloque característico de masa 4,91 kg, situando como punto de inicio del movimiento de bloques las coordenadas $X = 40$ y $X = 500$ m y fijando una velocidad inicial de 1,5 m/s. Esta forma de inicio del movimiento, junto a la geometría del perfil topográfico y el tipo de material de la ladera, condicionan el tipo de movimiento predominante de los bloques desprendidos en cada tramo.

La simulación correspondiente al perfil 1 se recoge en la figura 10, con una zona más elevada de manto vegetal a la que le sigue un escarpe de unos 100 m de caliza, un canchal de 400 m y otro escarpe de más de 150 m de caliza que acaba en un manto vegetal con bloques que alcanza el río Cares. Las trayectorias simuladas junto a la envolvente de altura de rebote (Fig. 11) permite diferenciar los tramos de trayectorias parabólicas de caída libre con rebotes entre las coordenadas $X = 40-150$ m, que abarcan zona de caliza e inicio del canchal adyacente, y entre las coordenadas $X = 500-590$ m, que incluye el segundo escarpe de caliza y el manto vegetal con bloques contiguo. Mientras que las trayectorias de deslizamiento y/o rodadura se desarrollan entre las las coordenadas $X = 150-500$, a lo largo del resto del canchal.

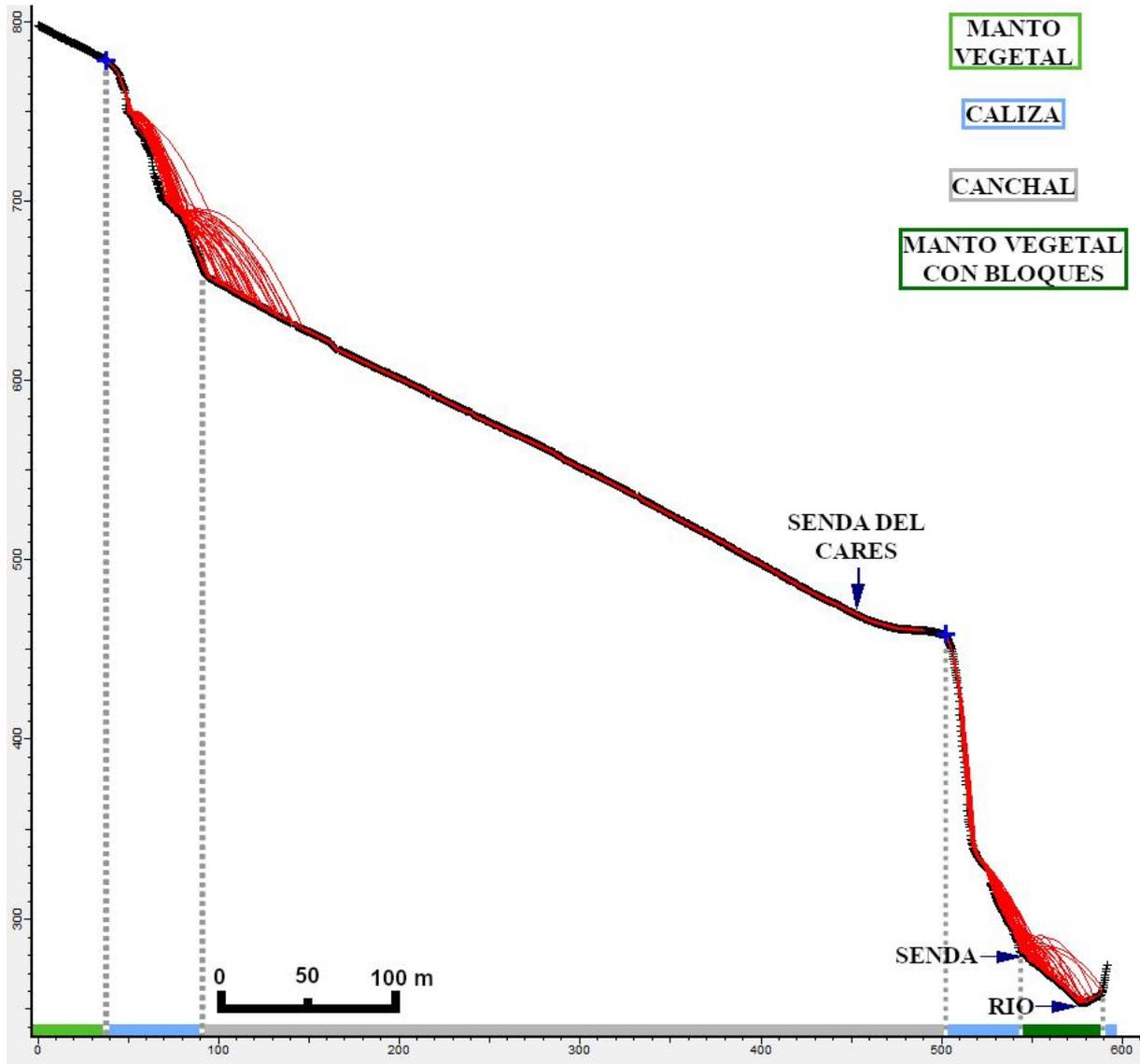


Figura 10. Simulación del perfil 1 con dos puntos de tiro situados en las coordenadas $X = 40$ y $X = 500$.

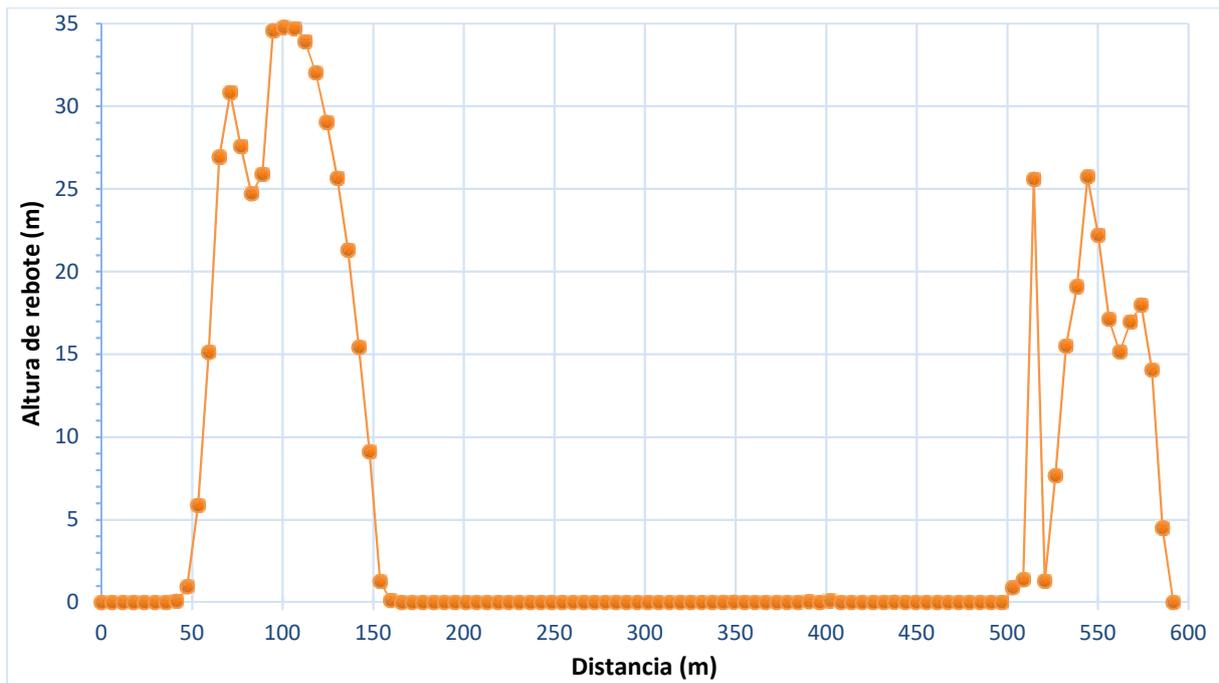


Figura 11. Altura de rebote de las rocas respecto a la ladera correspondiente al perfil 1.

Para discernir entre los tipos de movimiento es necesario analizar en detalle la simulación con las energías rotacionales y traslacionales. Para ello se han comparado las trayectorias simuladas con los gráficos de energías cinética total (Fig. 12), rotacional (Fig. 13) y traslacional (Fig. 14) máximas de entre los 100 bloques a lo largo del perfil.

Los segmentos de la ladera que tienen una mayor energía cinética son los tramos situados en las coordenadas $X = 40-150$ m y $500-590$ m, con máximos por encima de 4.500 y 5.500 J, respectivamente. Esto es debido a que presentan unos rebotes de hasta 35 y 25 m, que producen el aumento de la energía rotacional y, en mayor medida, de la traslacional. Estos tramos incluyen los escarpes de caliza y varios metros adyacentes, y tienen un tipo de movimiento predominante por caída libre, alternando con rebotes que van atenuando su altura y su energía al avanzar por el canchal, en el caso del primer tramo, o por el manto vegetal con bloques, en el caso del segundo tramo.

El tramo de la ladera entre las coordenadas $150-500$ m, que se distingue por el tipo de movimiento, se corresponde con el resto del canchal. A partir de aquí la energía traslacional disminuye de casi 5.000 J a valores generalmente inferiores a 10 J (lo que corresponde a una velocidad de avance de $1,6$ m/s), mientras la energía rotacional pasa de 800 J a valores menores a 1 J. Este descenso de energías, combinado con la presencia reducida de pequeños saltos, indica el paso de caída libre con rebotes a una combinación

de deslizamiento con un mínimo de rodadura. Los tramos de rodadura se aprecian en los pequeños picos de energía rotacional y en los saltos centimétricos aislados que se observan cuando se analiza en detalle el modelo y que, por su escala reducida, no se reflejan en el gráfico de altura de rebotes.

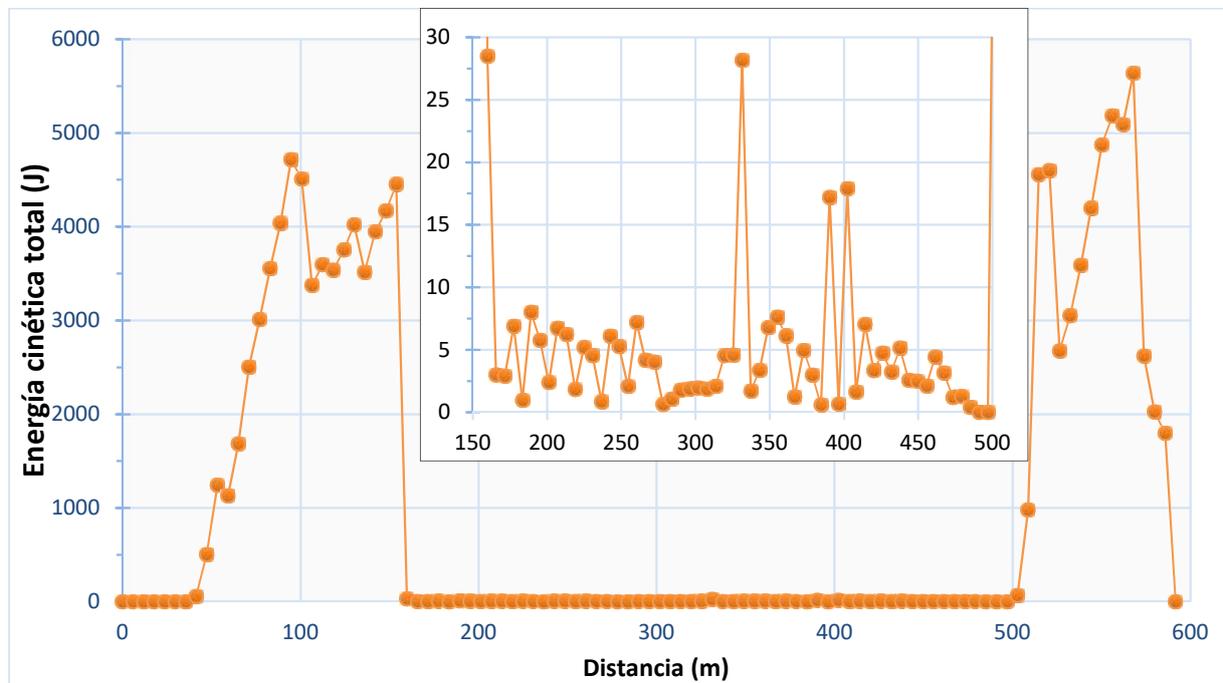


Figura 12. Energía cinética total a lo largo del perfil 1. En el gráfico interior aparece realizado el tramo que ofrece los valores más bajos, entre 150 y 500 m.

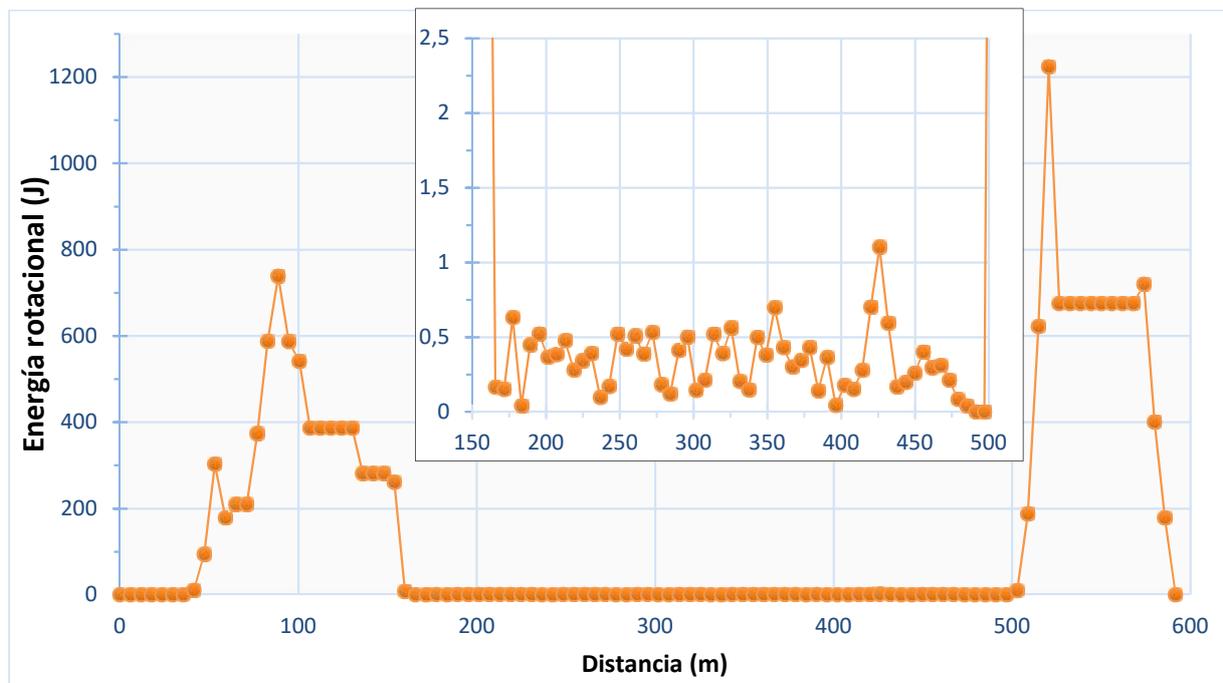


Figura 13. Energía rotacional a lo largo del perfil 1. En el gráfico interior aparece realizado el tramo que ofrece los valores más bajos, entre 150 y 500 m.

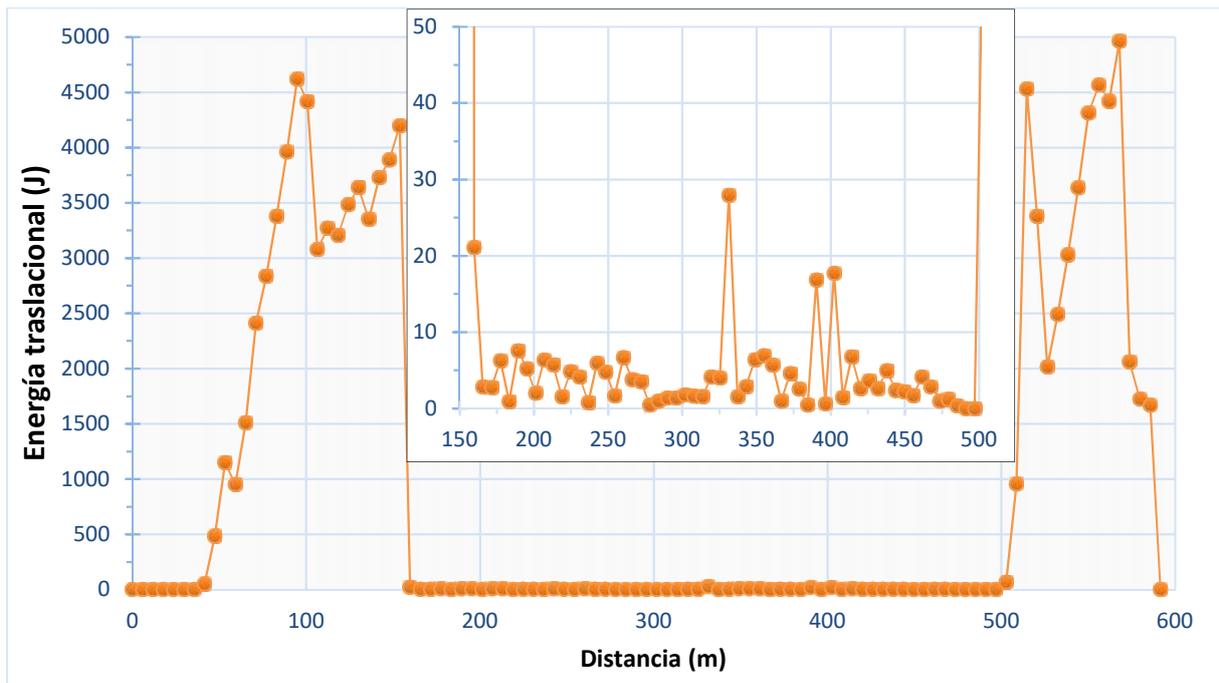


Figura 14. Energía traslacional a lo largo del perfil 1. En el gráfico interior aparece realizado el tramo que ofrece los valores más bajos, entre 150 y 500 m.

Por último, en la figura 15 se muestra la distancia final que alcanzan las rocas desprendidas en el perfil 1, pudiendo observarse que el desprendimiento simulado desde el escarpe superior finaliza generalmente al pie del canchal, mientras que el correspondiente al escarpe inferior finaliza en el cauce del río. Dado que el desprendimiento superior sobrepasaría la senda del Cares, se han analizado en detalle los intervalos de velocidad traslacional y energía cinética que tienen estos bloques en la coordenada $X = 439$, correspondiente a la senda. Mediante el colector de datos de *RocFall* ubicado en este punto y los histogramas que permite generar (recogidos en el Anexo I), es posible determinar que la velocidad de avance de los bloques oscila entre 1,8 y 2,3 m/s, aunque con una energía cinética reducida, entre 10,8 y 16,8 J. En cambio, el desprendimiento situado en el escarpe inferior alcanza la senda secundaria en la coordenada $X = 545$ con una energía cinética muy superior de 4.200 J.

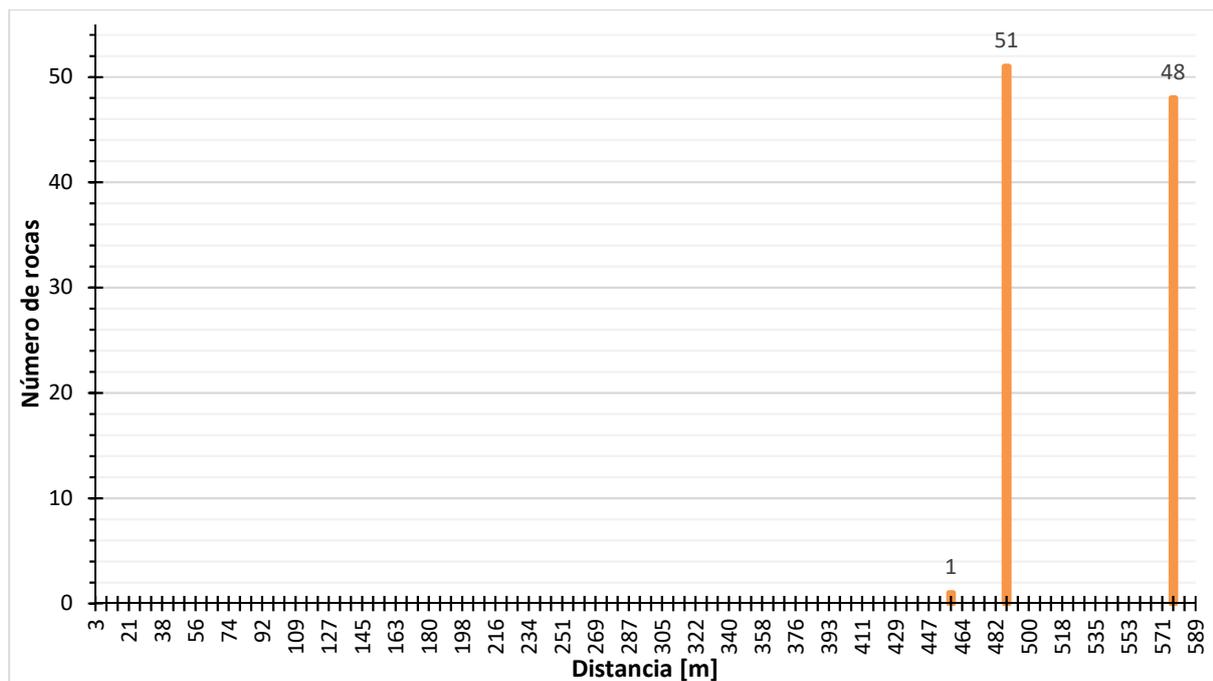


Figura 15. Distancia final horizontal alcanzada por las 100 rocas simuladas en el perfil 1.

Perfil 2

En este perfil se ha considerado una masa media de bloque de 14,05 kg, con un punto de inicio del movimiento en la coordenada X = 12,5 y otra en la coordenada X = 380, fijando una velocidad inicial de 1,5 m/s.

El perfil 2 (Fig. 16) es muy similar al perfil 1 en cuanto a materiales y a su distribución. Desde la zona de mayor altura, en este perfil se observa un escarpe inicial de 20 metros, un manto vegetal de otros 20 metros de longitud, un canchal de más de 300 metros de extensión que conecta con el siguiente escarpe y el manto vegetal con bloques contiguo que llega hasta el río Cares. Analizando la simulación junto a la envolvente de altura de rebote (Fig. 17) se distinguen las trayectorias parabólicas de caída libre y de rebotes entre las coordenadas X = 15-45, que abarcan la zona de caliza, de manto vegetal y el inicio del canchal, y entre las coordenadas X = 380-500, tramo correspondiente a otro escarpe de caliza y al manto vegetal con bloques adyacente. Mientras, los movimientos de deslizamiento y/o rodadura se dan entre las coordenadas X = 45-380, abarcando el resto del canchal, siendo este un tramo que requiere un análisis en detalle de la simulación con las energías rotacionales y traslacionales.

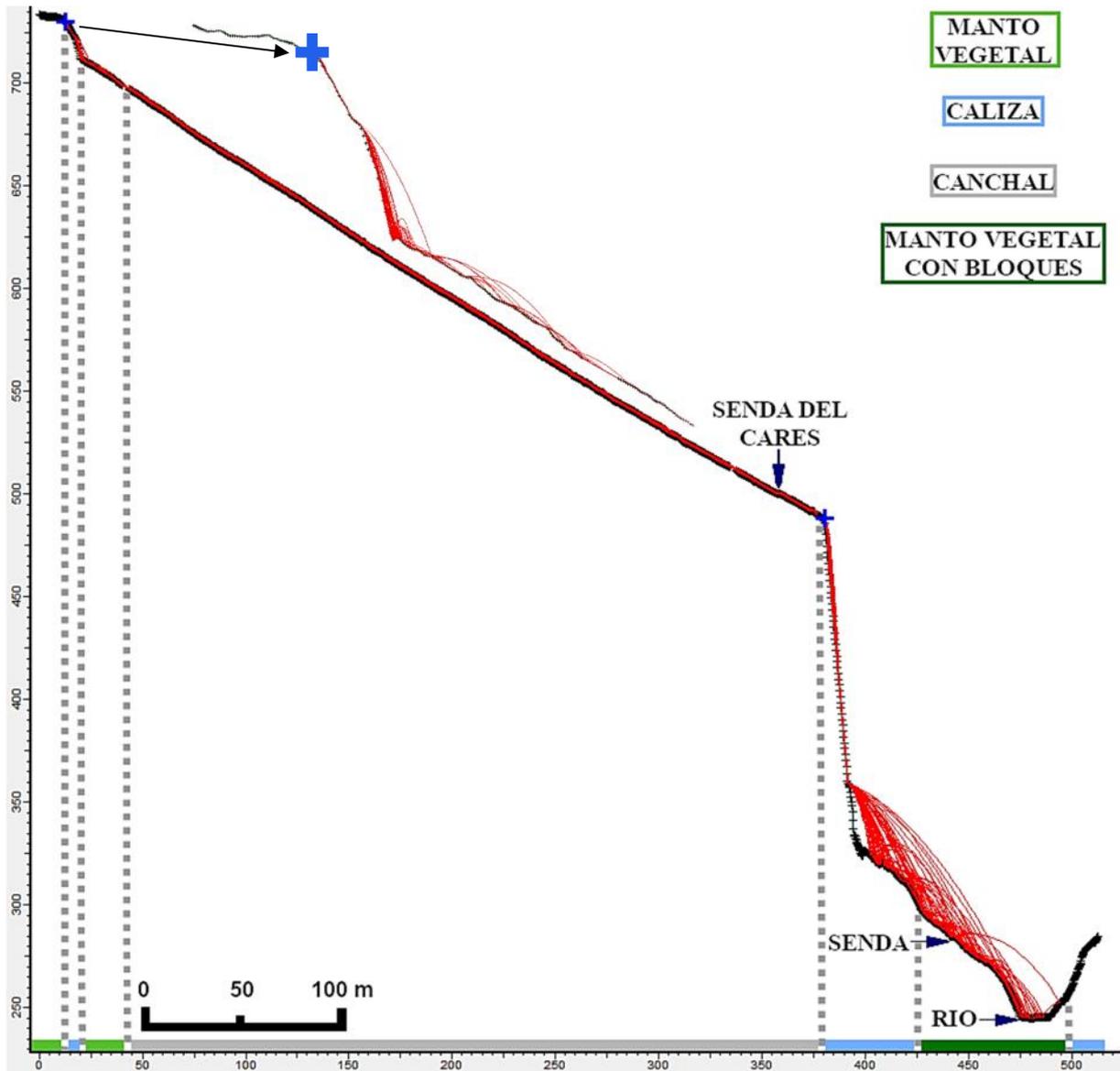


Figura 16. Simulación del perfil 2 con dos puntos de tiro, representados mediante una cruz azul. Incluye, en la parte superior, una ampliación de las trayectorias desde el punto de tiro superior.

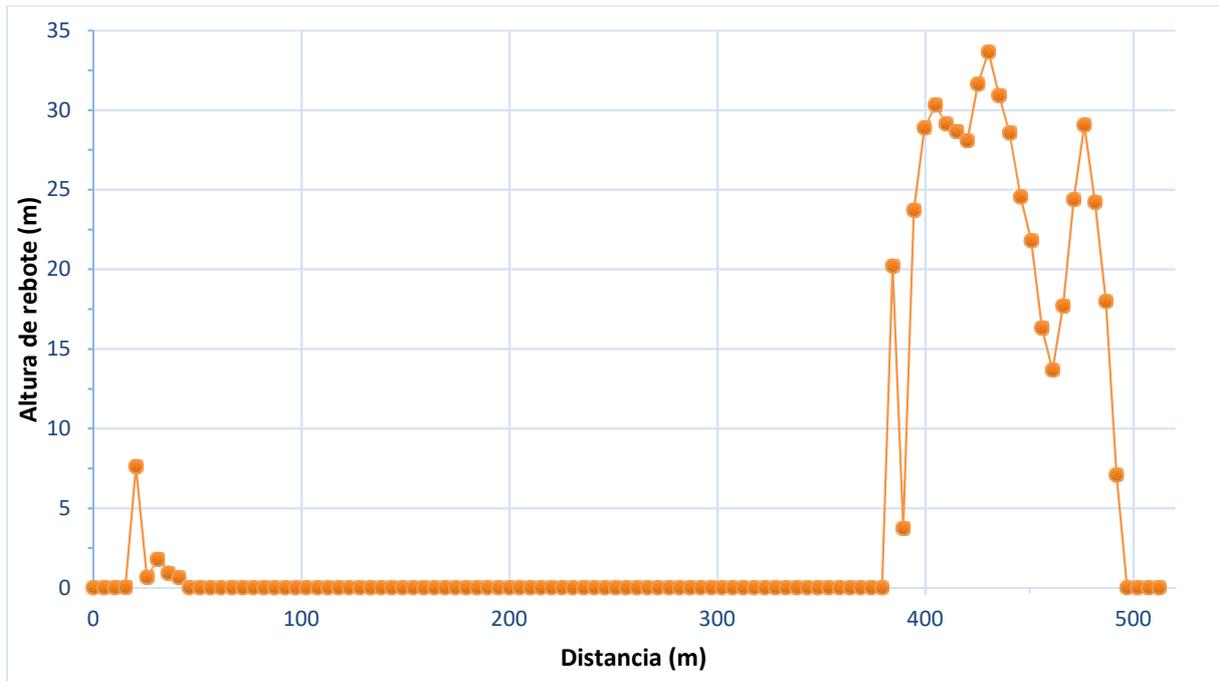


Figura 17. Altura de rebote de las rocas respecto a la ladera en el perfil 2.

Para hacer este análisis se han comparado las trayectorias simuladas del perfil con los gráficos de energías cinética total (Fig. 18), rotacional (Fig. 19) y traslacional (Fig. 20) máximas entre los 100 bloques a lo largo del perfil.

Los segmentos de la ladera que tienen una mayor energía cinética son los tramos de coordenadas $X = 15-45$ m y $380-500$ m, con picos por encima de 2.000 y 22.000 J, respectivamente. Esto es debido a que cada tramo tiene una altura máxima de rebote de 7 y 34 m, que produce el aumento de la energía rotacional y, en mayor medida, de la traslacional. Estos tramos incluyen los escarpes de caliza y varios metros adyacentes, y tienen un tipo de movimiento predominante por caída libre alternando con rebotes que van atenuando su altura y su energía al avanzar por el manto vegetal y el canchal, en el caso del primer tramo, o por el manto vegetal con bloques, en el caso del segundo tramo.

El otro tramo de la ladera en $X = 45-380$ m se corresponde con el canchal, a partir de aquí la energía traslacional disminuye de 2.000 J a unos 20 J (lo que corresponde a una velocidad de avance de 1,4 m/s), mientras la energía rotacional pasa de 250 J a estar por debajo de 2 J. Este descenso de energías combinado con la presencia reducida de pequeños saltos indica el paso de caída libre y rebotes a una combinación de deslizamiento, predominantemente, con un mínimo de rodadura. Los tramos de

rodadura se aprecian en los pequeños picos de energía rotacional y en los saltos centimétricos aislados.

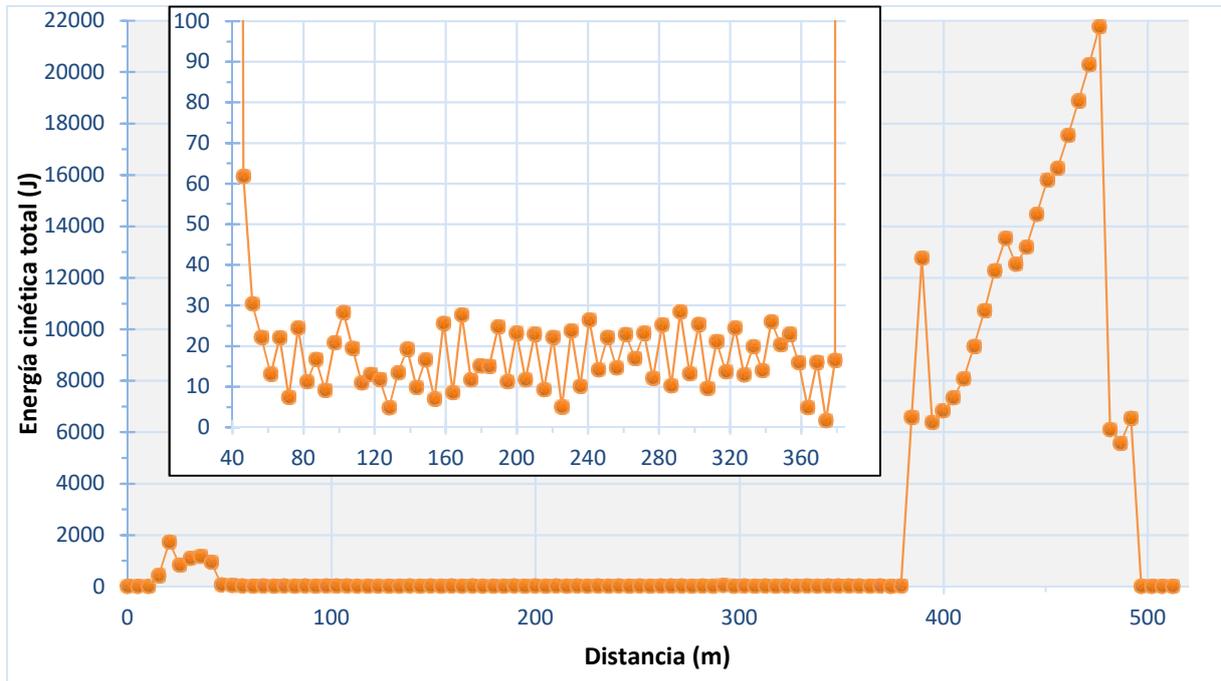


Figura 18. Energía cinética total a lo largo del perfil 2. En el gráfico interior aparece realizado el tramo que ofrece los valores más bajos, entre 40 y 385 m.

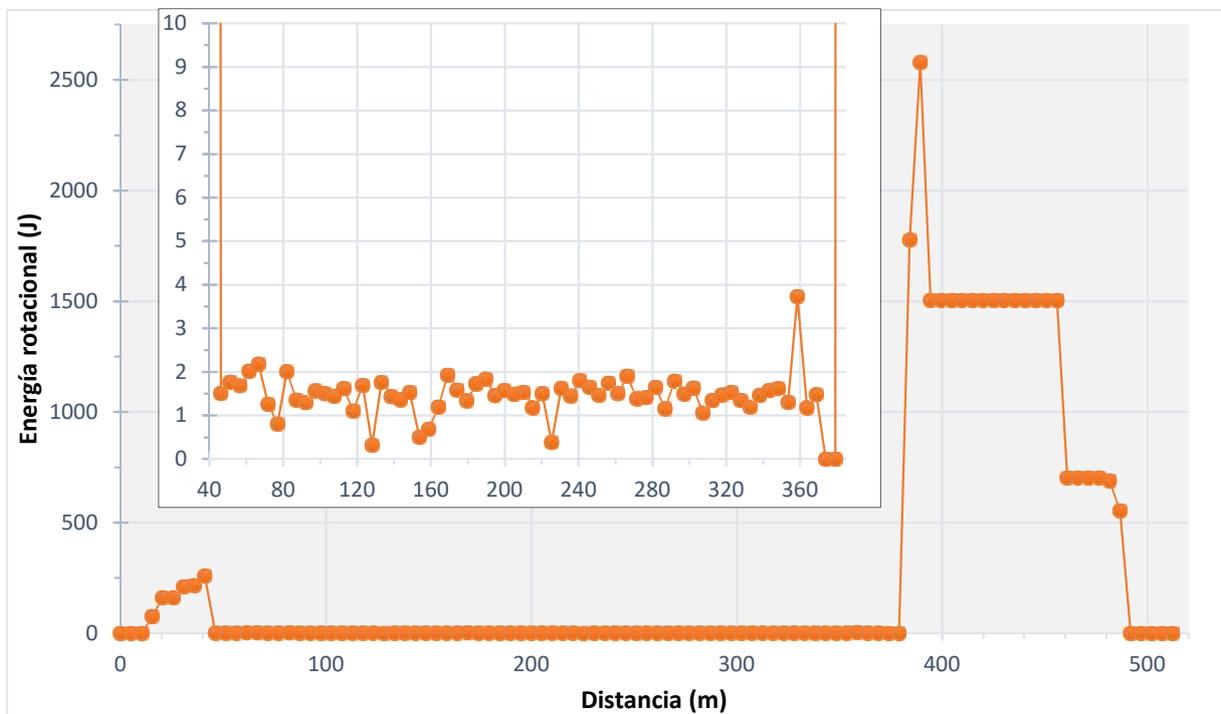


Figura 19. Energía rotacional a lo largo del perfil 2. En el gráfico interior aparece realizado el tramo que ofrece los valores más bajos, entre 40 y 385 m.

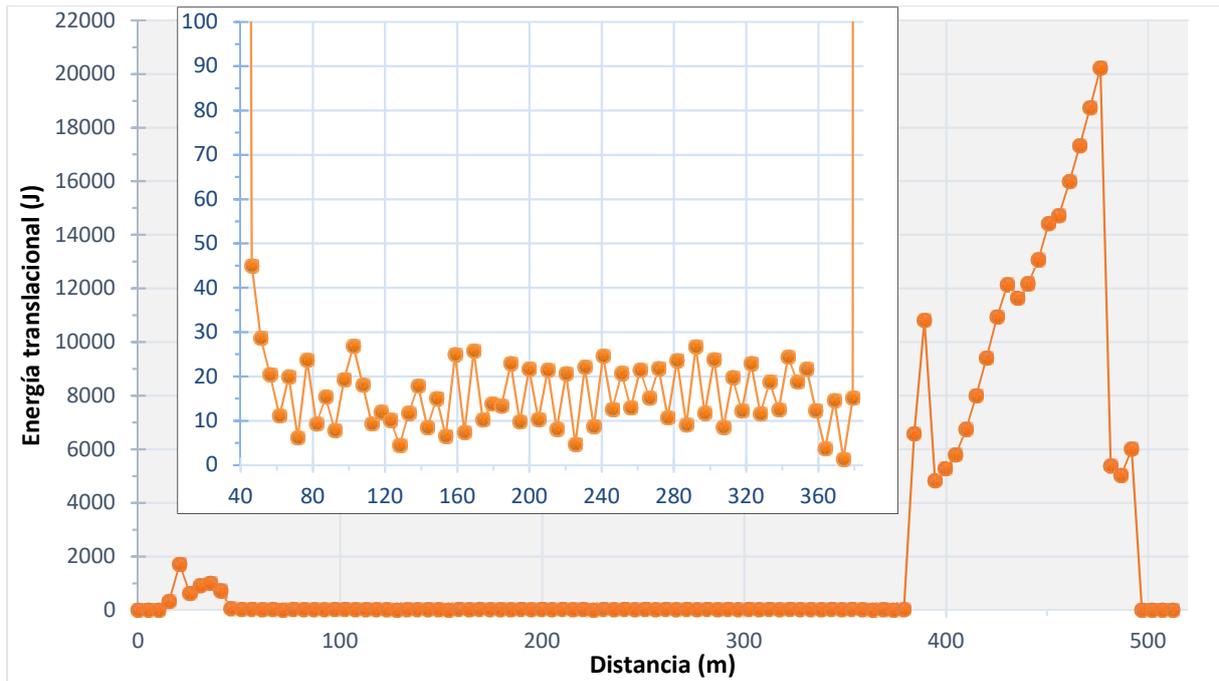


Figura 20. Energía traslacional a lo largo del perfil 2. En el gráfico interior aparece realzado el tramo que ofrece los valores más bajos, entre 40 y 385 m.

Finalmente, en la figura 21 se recoge la distancia final que alcanzan las rocas desprendidas, pudiendo observarse que el desprendimiento simulado desde el escarpe superior finaliza, en parte, al inicio del canchal, donde existe un tramo de pendiente positiva que frena los bloques. Aun así, la mayoría de los bloques desprendidos desde este escarpe sobrepasan la senda del Cares, por lo que se han analizado en detalle los intervalos de velocidad traslacional y energía cinética que tienen estos bloques en la zona correspondiente a la senda. Esta velocidad de avance de los bloques varía entre 0,9 y 1,2 m/s, pero con una energía cinética reducida, entre 8,2 y 13,9 J (Anexo II). Las rocas que parten del segundo escarpe comienzan a frenarse en los resaltes que aparecen en la zona de calizas y en la zona de cobertera vegetal con bloques; sin embargo, un elevado número atraviesa la senda secundaria con una energía cinética entre 12.000-13.000 J llegando a depositarse a lo largo del manto vegetal con bloques o, incluso, llegando al río.

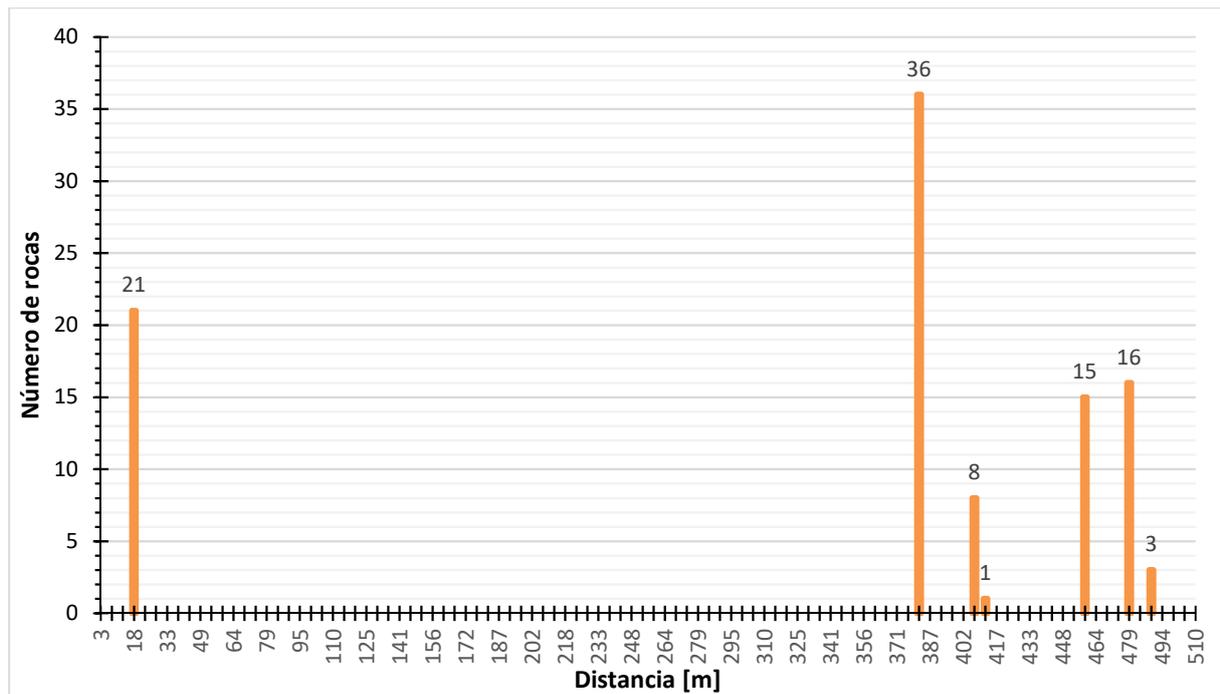


Figura 21. Distancia final horizontal alcanzada por las 100 rocas simuladas en el perfil 2.

Perfil 3

En este perfil se considerado una masa media de bloque de 0,76 kg, con cuatro puntos de inicio en las coordenadas X= 53, 76, 485 y 600, fijando una velocidad inicial de 1,5 m/s.

El perfil 3 (Fig. 22) consta en su parte más elevada de un tramo de manto vegetal que pasa a alternarse con pequeños tramos de caliza hasta el escarpe de caliza que actúa como área fuente. A pie de este escarpe hay un tramo de manto vegetal con bloques, que tiene dos pequeños escarpes de caliza, y que llega hasta el inicio del canchal, el cual contiene la senda del Cares, el canal de agua, otro escarpe de caliza que alimenta el propio canchal y la senda secundaria, además antes del río Cares hay otro escarpe de caliza que actúa como área fuente. Analizando esta simulación junto a su envolvente de altura de rebote (Fig. 23) se distinguen las trayectorias parabólicas de caída libre y de rebotes en las coordenadas X = 60-120, que abarcan los tramos iniciales de manto vegetal, escarpe de caliza y la parte superior del manto vegetal con bloques, también entre las coordenadas X = 600-620 donde hay otro escarpe de caliza junto al río Cares. Además, hay caídas libres y rebotes de menor escala en los tramos pequeños de calizas dentro del manto vegetal con bloques, entre los metros 165-190, estas calizas ni siquiera se han considerado como un área fuente debido a su menor volumen relativo. Por

otro lado, los movimientos de deslizamiento y/o rodadura en las coordenadas X = 120-600 abarcan el resto del manto vegetal con bloques y el canchal, siendo un tramo que requiere un análisis en detalle de la simulación con las energías rotacionales y traslacionales.

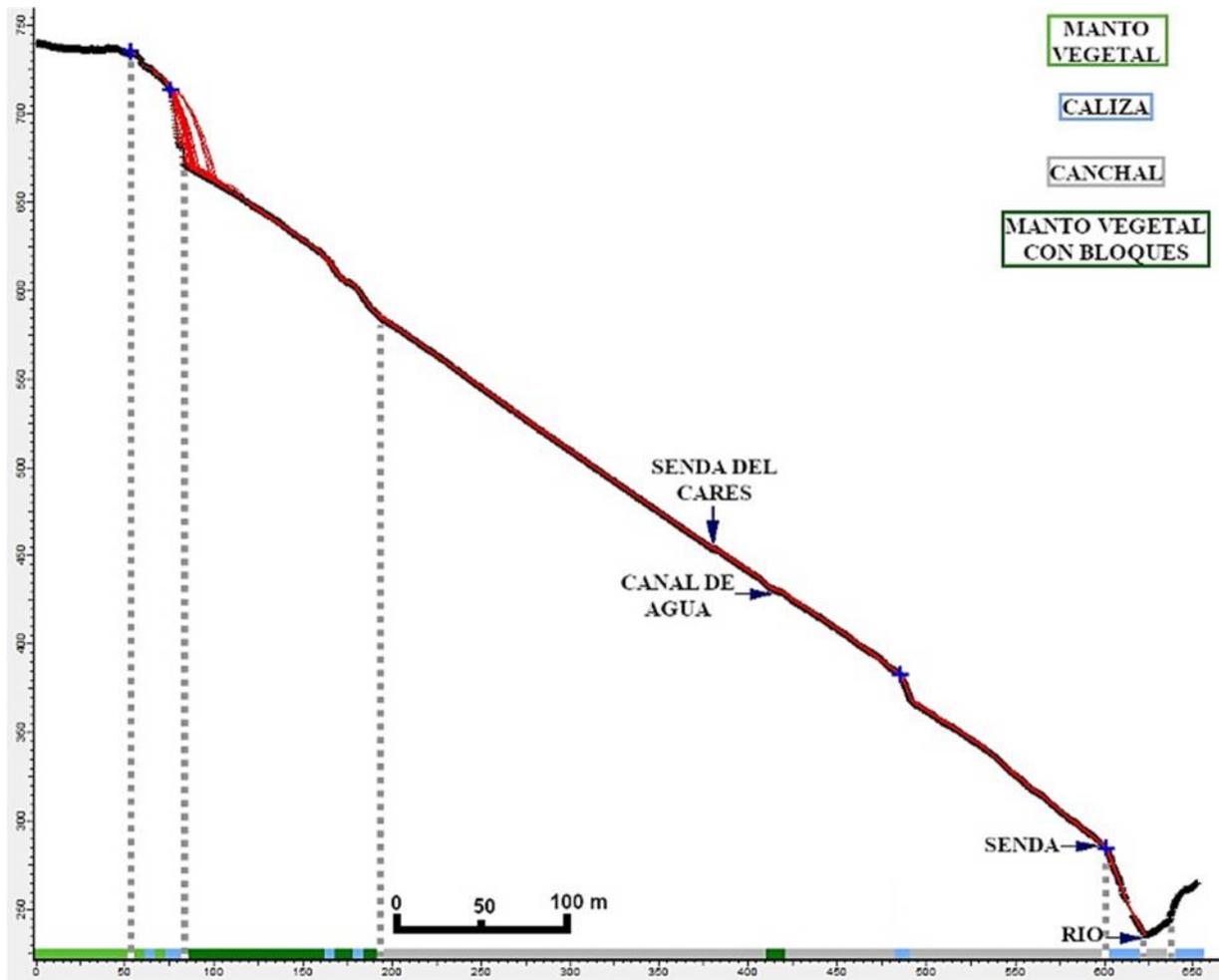


Figura 22. Perfil topográfico 3 con cuatro puntos de tiro simbolizados mediante cruces en tono azul.

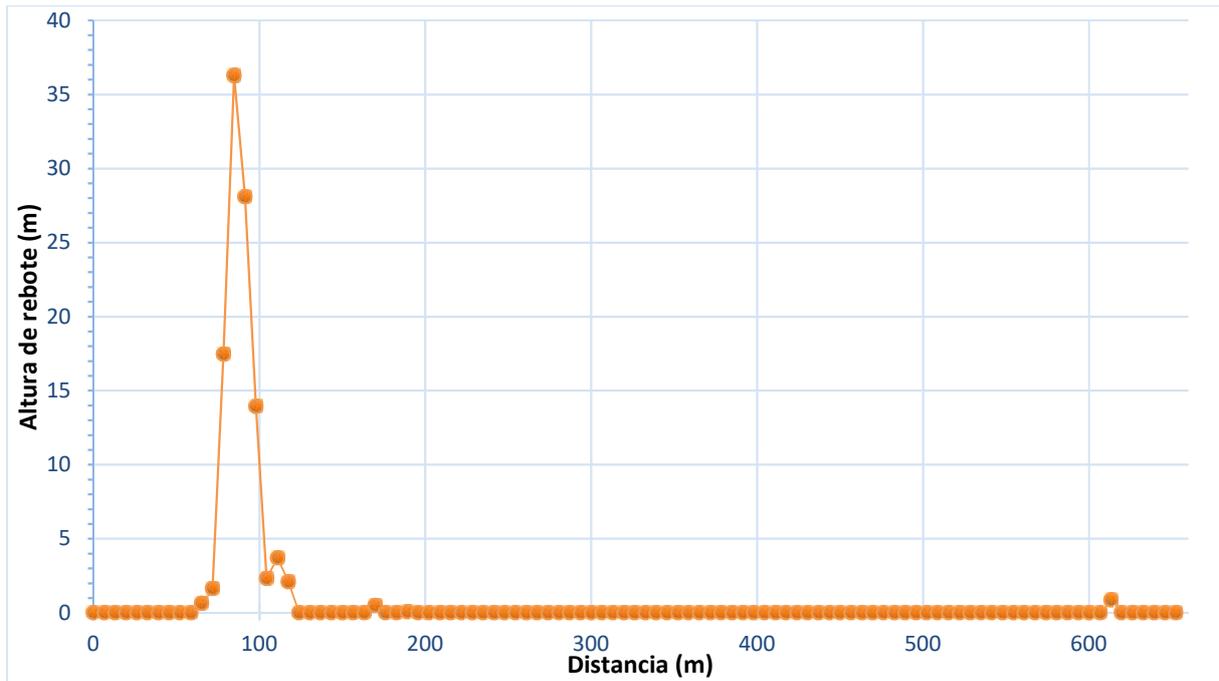


Figura 23. Altura de rebote de las rocas respecto a la ladera en el perfil 3.

Para hacer este análisis se han comparado las trayectorias simuladas del perfil con los gráficos de energías cinética total (Fig. 24), rotacional (Fig. 25) y traslacional (Fig. 26) máximas de los 100 bloques a lo largo del perfil.

El tramo de la ladera en el que los bloques alcanzan una mayor energía cinética es en las coordenadas $X = 60-120$, llegando hasta los 400 J, provocado por una altura de rebote de hasta 36 m que aumenta la energía rotacional y, en mayor medida, la traslacional. Este tramo incluye el escarpe de caliza que actúa como área fuente y varios metros adyacentes, tiene un tipo de movimiento predominante por caída libre alternando con rebotes que van atenuando su altura y su energía al avanzar por el manto vegetal con bloques. Otros tramos puntuales en los que existen trayectorias de caída libre, pero con rebotes inferiores al metro, se dan en escarpes de caliza de menor entidad en los metros 170, 185, 490 y 600.

El otro tramo de la ladera en $X = 120-600$ m se corresponde con el final del manto vegetal con bloques y con el canchal, a partir de aquí la energía traslacional disminuye de 400 J a 2 J (lo que corresponde a una velocidad media de avance de 2 m/s), mientras la energía rotacional pasa de 20 J a valores cercanos a 0,1 J. Este descenso de energías combinado con la ausencia casi total de rebotes indica el paso de caída libre y rebotes a una combinación de rodadura, predominantemente, con deslizamiento. Los momentos

de rodadura para esta simulación se aprecian mejor en los pequeños picos de velocidad rotacional, ya que las energías son muy bajas con la masa utilizada, y en los frecuentes saltos centimétricos que se observan al hacer zoom con *RocFall*. Así, analizando las velocidades se considera que el movimiento predominante es por rodadura porque la velocidad rotacional oscila entre 15-20 rad/s (Fig. 27), siendo mucho mayor que las anteriores simulaciones, mientras la velocidad traslacional (Fig. 28) es similar entorno a los 2 m/s.

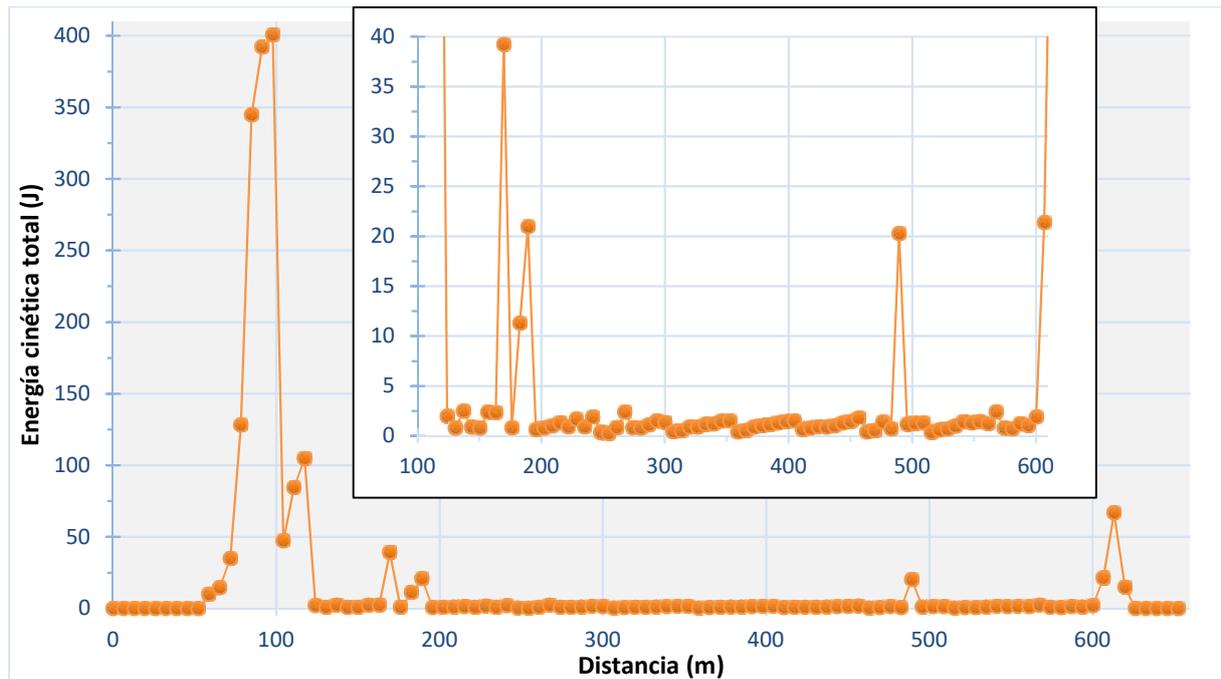


Figura 24. Energía cinética total a lo largo del perfil 3. En el gráfico interior aparece realizado el tramo que ofrece los valores más bajos, entre 100 y 610 m.

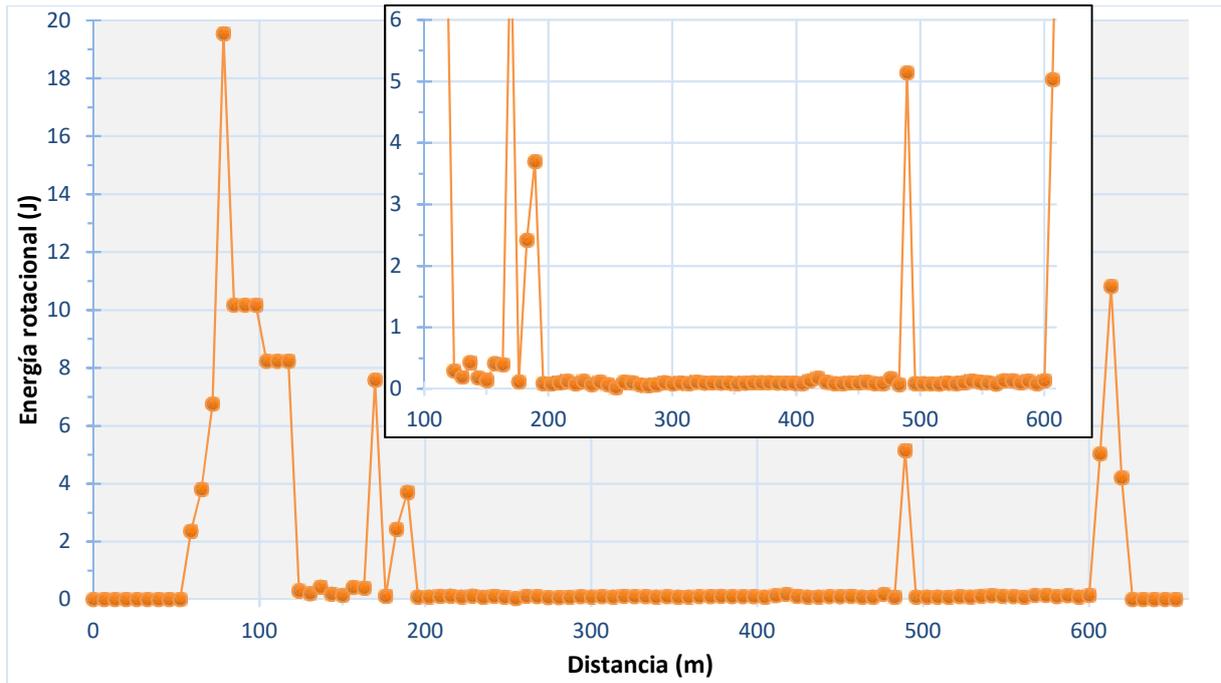


Figura 25. Energía rotacional a lo largo del perfil 3. En el recuadro interior aparece realzado el tramo que ofrece los valores más bajos, entre 100 y 610 m.

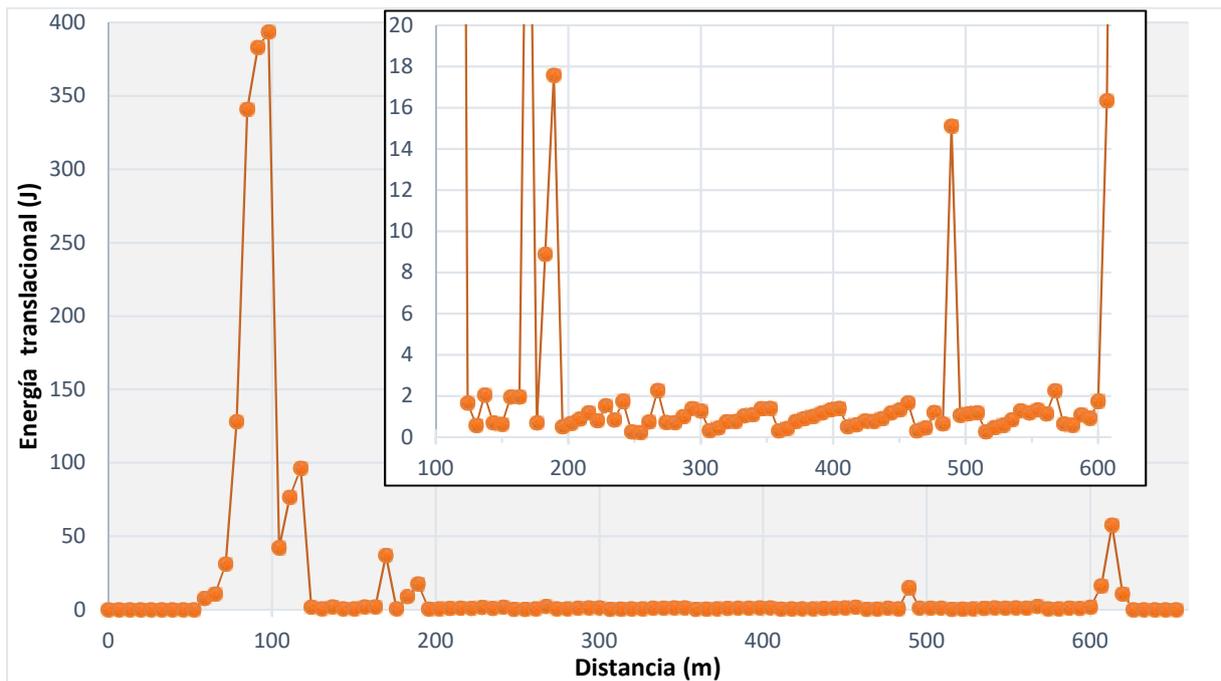


Figura 26. Energía traslacional a lo largo del perfil 3. En el gráfico interior aparece realzado el tramo que ofrece los valores más bajos, entre 100 y 610 m.

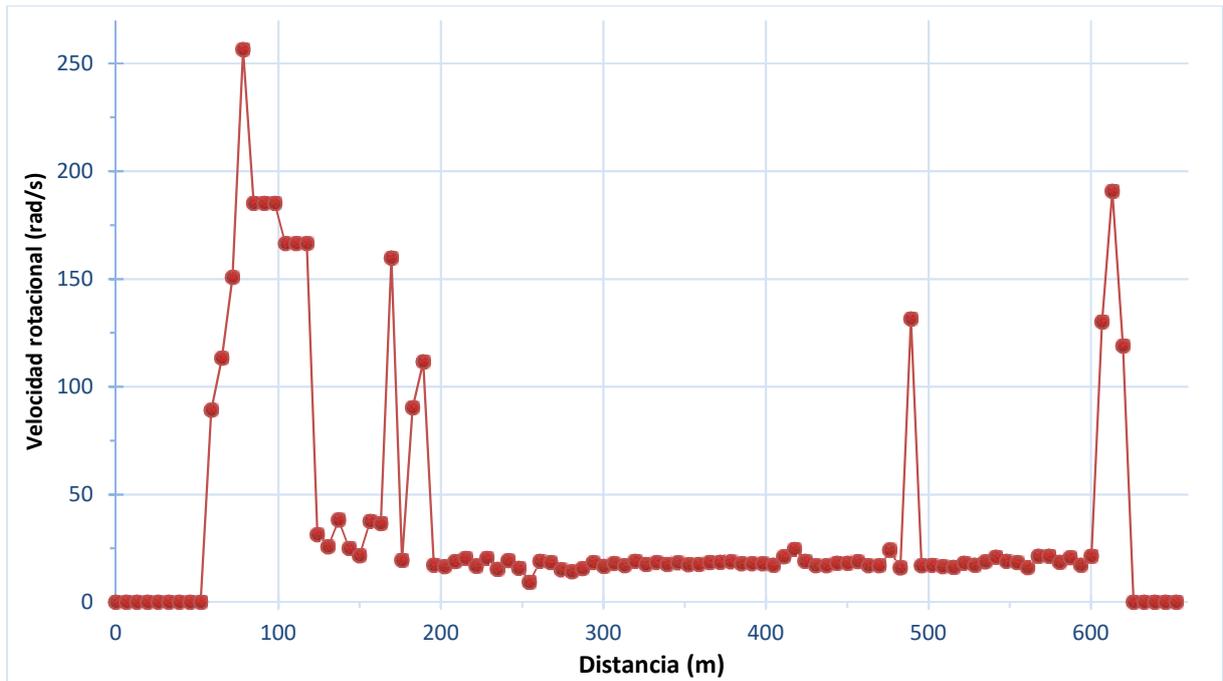


Figura 27. Velocidad rotacional (expresada en radianes por segundo) a lo largo del perfil 3.

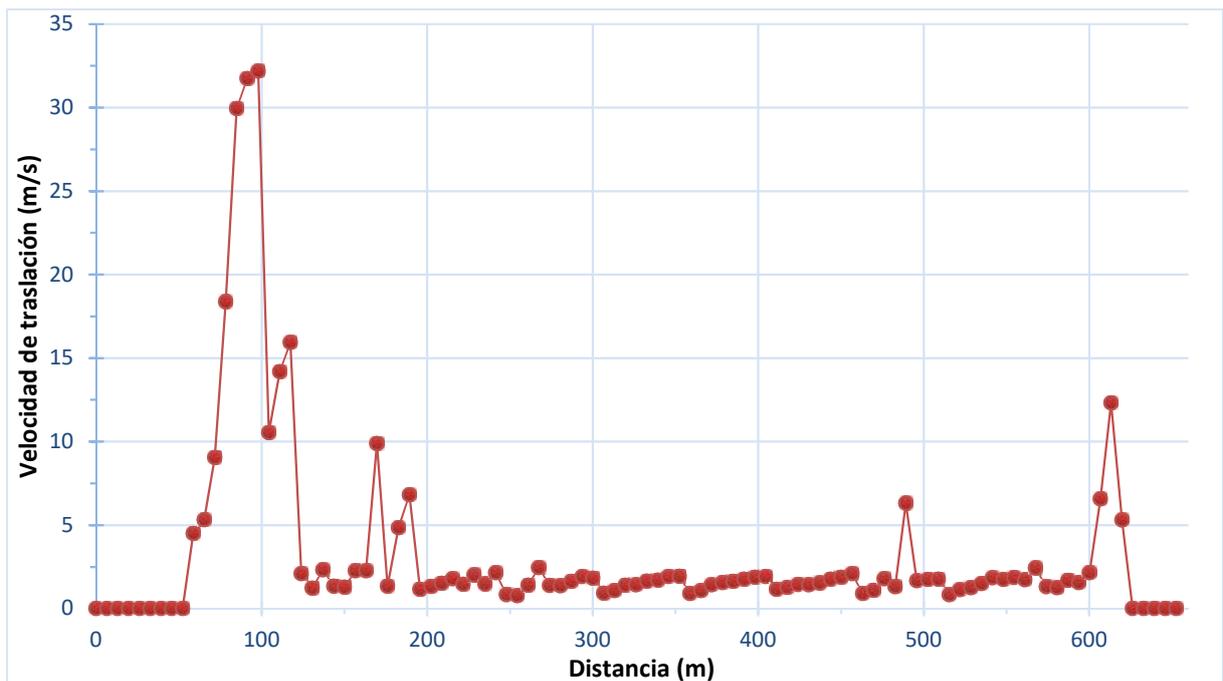


Figura 28. Velocidad de traslación (expresada en metros por segundo) a lo largo del perfil 3.

Finalmente, en la figura 29 se muestra la distancia final que alcanzan las rocas desprendidas, pudiendo observarse que el desprendimiento simulado desde el escarpe superior finaliza, en parte, en los resaltes del propio escarpe. El resto de los bloques desprendidos desde este escarpe sobrepasan la senda del Cares, por lo que se han analizado en detalle los intervalos de velocidad traslacional y energía cinética que tienen

estos bloques en el metro 380. Mediante el colector de datos de *RocFall* ubicado en este punto y los histogramas que permite generar (recogidos en el Anexo III), es posible determinar que la velocidad de avance de los bloques oscila entre 1,2 y 1,5 m/s, pero con una energía cinética muy reducida entre 0,7 y 1,1 J. Por este motivo algunos se detienen aquí, otros acaban en el canal de agua que pasa justo por debajo y otros avanzan hasta 80 metros más por el canchal. Por otro lado, las rocas que parten del siguiente escarpe en X = 600 m atraviesan la senda secundaria con una energía cinética de 2 J, pero alcanzan el río Cares sumándose a las del escarpe siguiente.

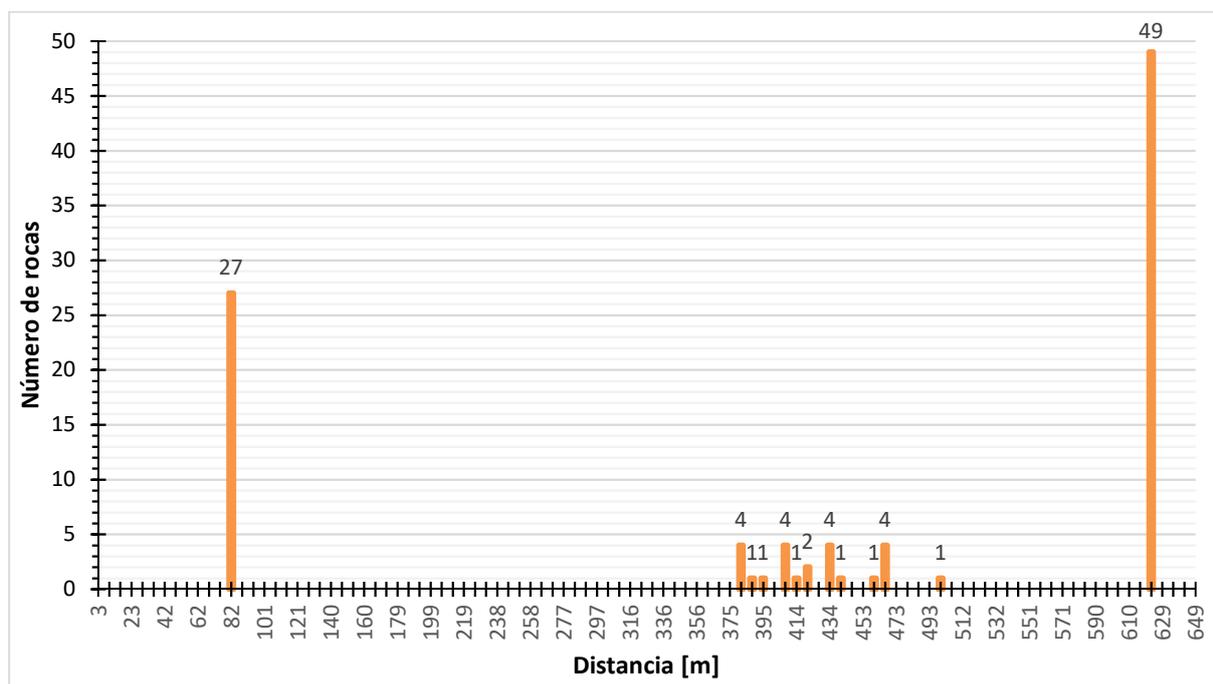


Figura 29. Distancia final horizontal alcanzada por las 100 rocas simuladas en el perfil 3.

Perfil 4

Este perfil tiene una mayor longitud y una menor inclinación que los anteriores, por lo que no ha necesitado ningún suavizado topográfico. Se ha considerado una masa media de los bloques de 5,82 kg, y con dos puntos de inicio en las coordenadas X = 6 y 155 metros, fijando una velocidad inicial de 1,5 m/s.

El perfil 4 (Fig. 30) consta en la parte más elevada de un tramo de manto vegetal que da paso al escarpe de caliza que actúa como área fuente principal. A pie de este escarpe hay un tramo de manto vegetal que conecta con el inicio del canchal que llega hasta el final de la ladera. Este canchal contiene tramos de manto vegetal de escala reducida junto a otro escarpe de caliza que lo alimenta, la senda del Cares y la senda

secundaria. Además, antes del río Cares hay un pequeño tramo de manto vegetal con bloques, mientras en la otra margen hay un canchal de escaso desarrollo y, de nuevo, un escarpe de caliza. Analizando esta simulación junto a su envolvente de altura de rebote (Fig. 31) se distinguen las trayectorias parabólicas de caída libre cortas y con rebotes de poca altura, en el tramo del escarpe principal de caliza y el primer metro del manto vegetal adyacente, existiendo también trayectorias de estas características en el escarpe de caliza situado en $X = 155$. Por otro lado, se distinguen los movimientos de deslizamiento y/o rodadura entre las coordenadas $X= 25-623$ que abarcan el resto del manto vegetal y casi todo el canchal, es un tramo en el que se aprecia algún salto por rodadura pero que requiere un análisis en detalle con las energías rotacionales y traslacionales.

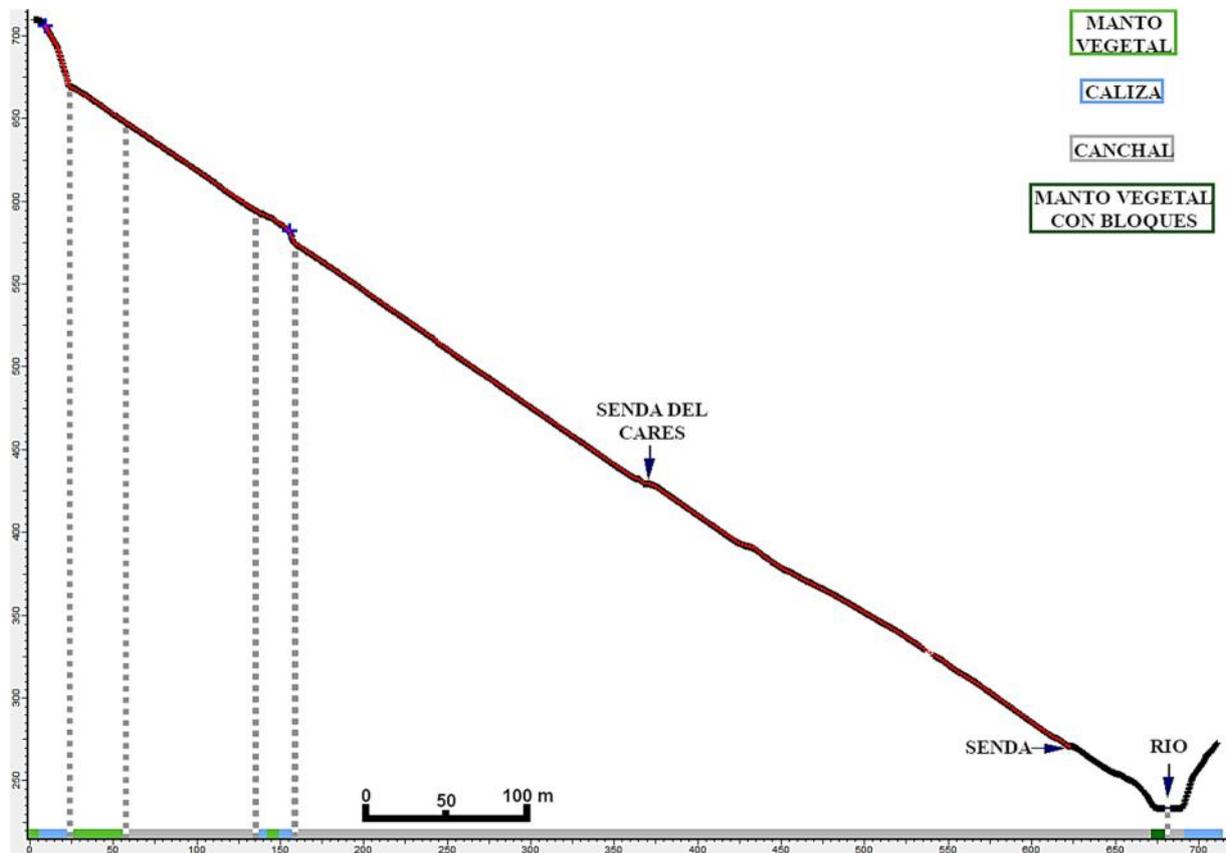


Figura 30. Simulación del perfil 4 con dos puntos de tiro simbolizados mediante cruces en tono azul.

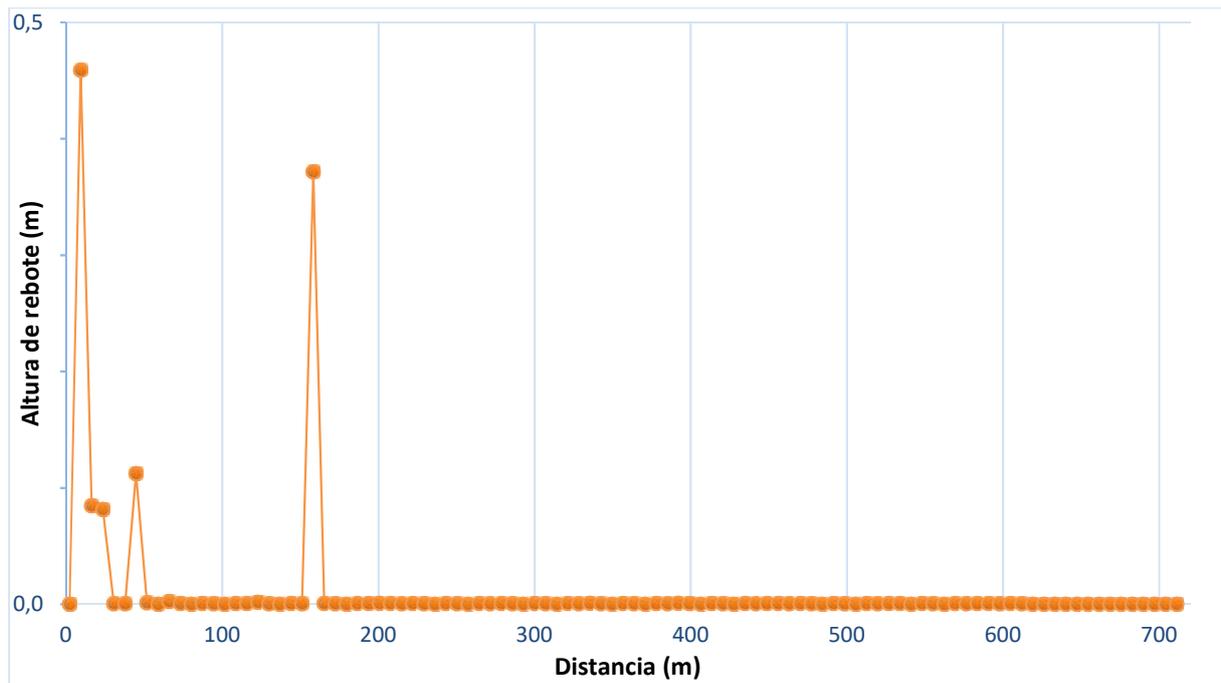


Figura 31. Altura de rebote de las rocas respecto a la ladera en el perfil 4.

Para hacer este análisis se han comparado las trayectorias simuladas del perfil con los gráficos de energías cinética total (Fig. 32), rotacional (Fig. 33) y traslacional (Fig. 34) máximas de los 100 bloques a lo largo del perfil.

En general es una simulación que arroja una energía cinética baja por los rebotes de poca altura, pero el tramo de la ladera en el que los bloques alcanzan una mayor energía cinética se corresponde al de las coordenadas $X = 9-55$, llegando hasta los 150 J, provocado por una altura de rebote que no supera los 0,5 m. Este tramo incluye el escarpe de caliza que actúa como área fuente y tiene un tipo de movimiento predominante por caída libre alternando con rebotes, que van atenuando su altura y su energía al avanzar por el manto vegetal adyacente. Otro tramo en el que existen pequeños rebotes por saltos de rodadura y trayectorias de caída libre menores, es el manto vegetal y el escarpe de caliza de menor entidad en $X = 140-160$.

Los otros tramos de la ladera entre las coordenadas $X = 55-140$ y $160-620$ coinciden con la extensión del canchal, a partir de aquí la energía traslacional disminuye de 260 J a 10 J (lo que corresponde a una velocidad media de avance de 1,5 m/s), mientras la energía rotacional pasa de 65 J a valores cercanos a 1 J. Este descenso de energías combinado con la práctica ausencia de saltos indica el paso de caída libre y rebotes a una combinación de deslizamiento, predominantemente, con rodadura. Los

momentos de rodadura son aislados, apreciándose en los pequeños picos de energía rotacional y en los saltos centimétricos aislados.

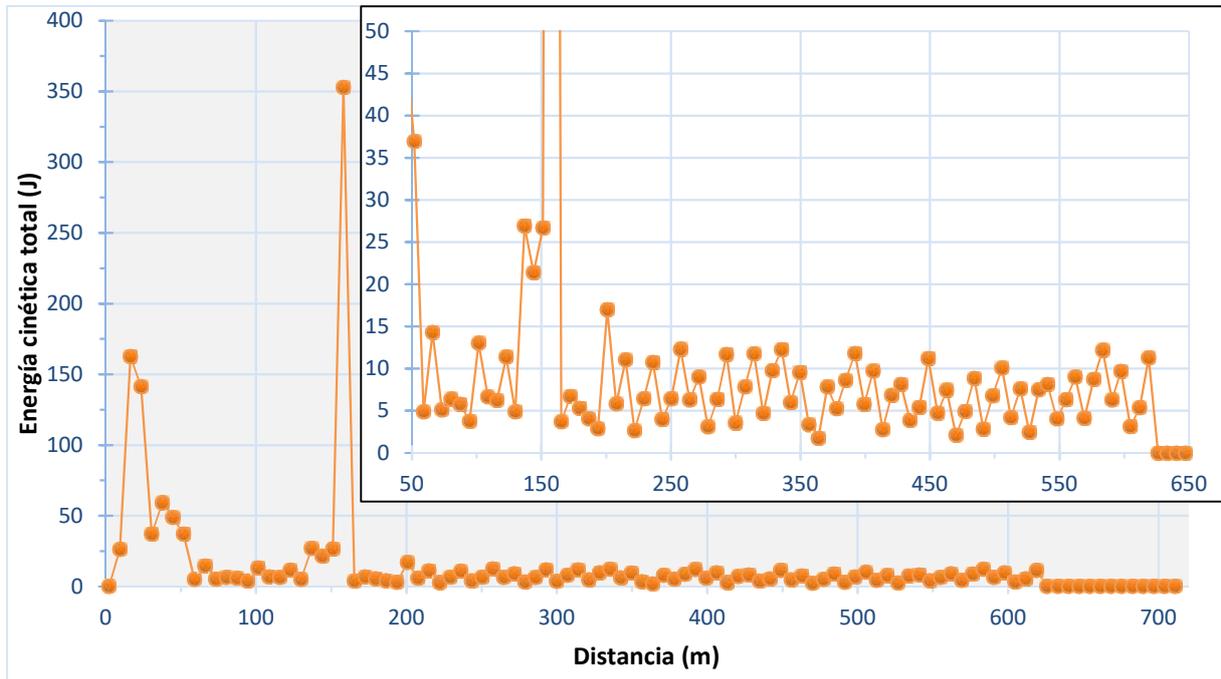


Figura 32. Energía cinética total a lo largo del perfil 4. En el gráfico interior aparece realizado el tramo que ofrece los valores más bajos, entre 50 y 650 m.

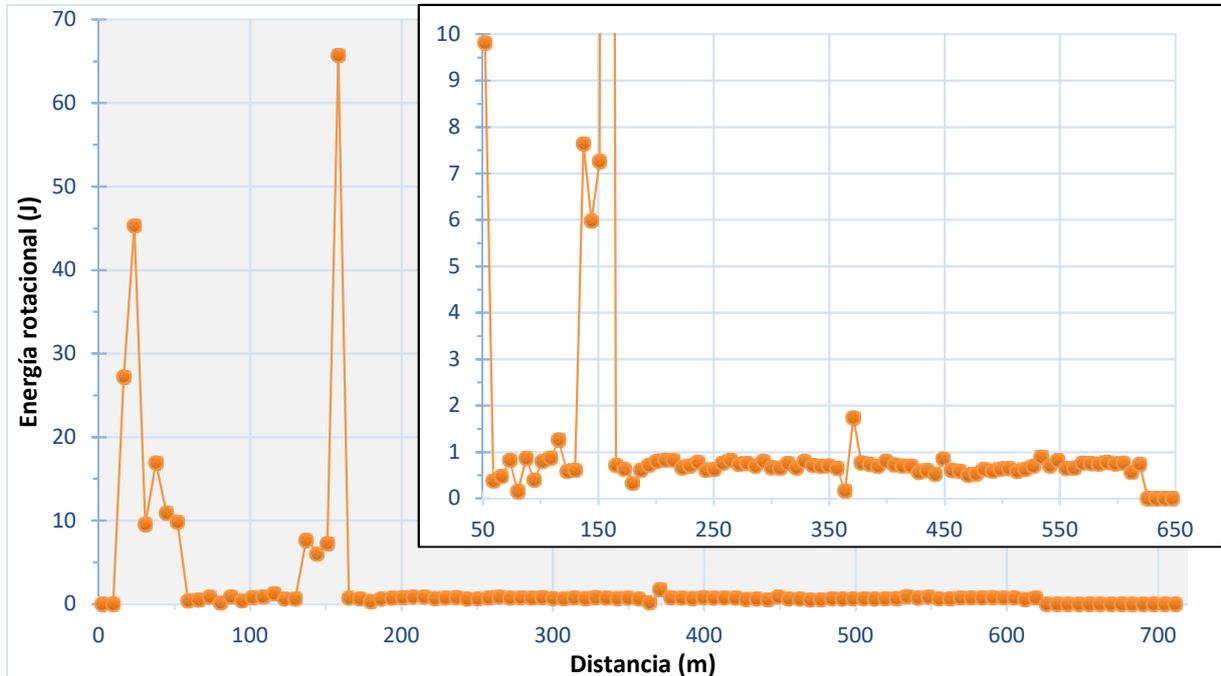


Figura 33. Energía rotacional a lo largo del perfil 4. En el gráfico interior aparece realizado el tramo que ofrece los valores más bajos, entre 50 y 650 m.

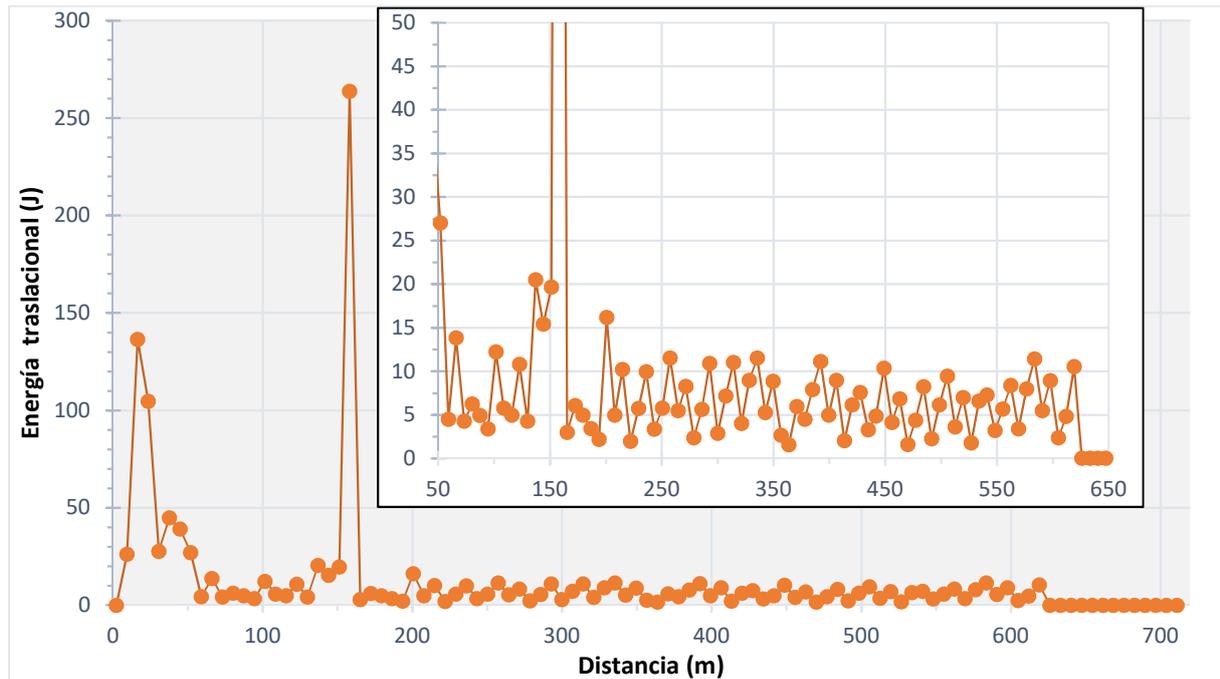


Figura 34. Energía traslacional a lo largo del perfil 4. En el gráfico interior aparece realizado el tramo que ofrece los valores más bajos, entre 50 y 650 m.

Finalmente, en la figura 35 se recoge la distancia final que alcanzan las rocas desprendidas, pudiendo constatar que el desprendimiento simulado desde el escarpe superior finaliza, en gran parte, en la zona superior del canchal previa a un escarpe menor. El resto de los bloques desprendidos desde este escarpe y el siguiente sobrepasan la senda del Cares, por lo que se han analizado en detalle los intervalos de velocidad traslacional y energía cinética que tienen estos bloques en la coordenada $X = 368$. Esta velocidad de avance de los bloques oscila entre 0,7 y 1,4 m/s, pero con una energía cinética reducida entre 1 y 8 J (Anexo IV). Estos bloques pueden acabar su trayectoria frenándose en la senda secundaria en $X = 622$, o en menor medida, de forma anterior a lo largo del canchal. Además, es interpretable que parte de los bloques que frenan su trayectoria en la zona superior del canchal, antes del escarpe menor en el metro 140, en realidad rodeen este resalte y sigan cayendo por el canchal. Tampoco es fiel a la realidad que se detengan el resto de los bloques en la senda secundaria, ya que a continuación sigue el canchal a cotas más bajas hasta llegar al río Cares, esto se debe a que hay un tramo de pendiente positiva en el perfil que reduce la velocidad de las trayectorias hasta frenarlas.

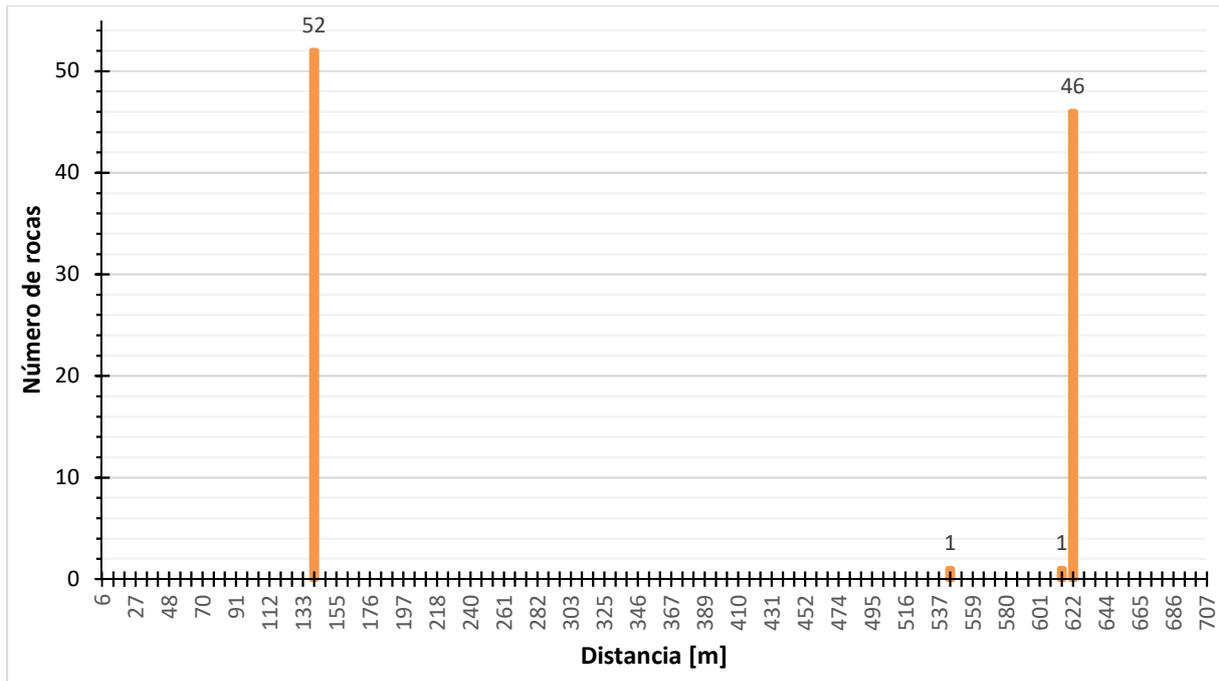


Figura 35. Distancia final horizontal alcanzada por las 100 rocas simuladas en el perfil 4.

Comparación de perfiles

Los cuatro perfiles modelizados cumplen con la secuencia teórica de tipos de movimiento para una caída de bloques que, en orden secuencial, está compuesta por movimientos de caída libre, rebotes, rodadura y deslizamiento, pudiendo darse alternancias entre ellos. Las simulaciones de los perfiles 1, 2 y 4 atraviesan la senda del Cares con un movimiento predominante de deslizamiento, mientras que en el caso del perfil 3 los bloques siguen una trayectoria de caída libre reducida, con el consecuente rebote desde la estructura que recubre el canal de agua situada 30 cm por encima (Anexos I, II, III y IV).

En la tabla 6 se resumen los resultados más relevantes de este estudio. Considerando que los cuatro perfiles se sitúan dentro de zonas de alta peligrosidad, se aprecia que el perfil 1 implica un mayor riesgo para los usuarios de la senda, considerando que la mayoría de los bloques tienen una masa próxima a 5 kg y que alcanzan la senda con una velocidad y una energía cinética mayores. Para el perfil 3 la mayoría de los bloques presentan una masa inferior a 1 kg y alcanzan la senda con una energía cinética muy baja; a pesar de ello, el factor que aumenta el riesgo en este tramo es que puedan llegar a los senderistas por caída libre desde la estructura que cubre el canal de agua superior, en vez de por deslizamiento o rodadura, tal y como ocurre en el

resto de los perfiles. Por otro lado, las trayectorias de los bloques en el caso de los perfiles 2 y 4 a la altura de la senda del Cares son de tipo deslizamiento, llegando a una velocidad relativamente baja. En este caso, el riesgo se incrementa por impacto dado que tienen una masa media de bloque mayor, sobre todo en el caso del perfil 2.

Tabla 6. Resumen de resultados para los cuatro perfiles modelizados.

Perfil	Masa media (kg)	Coordenada X Senda del Cares (m)	Velocidad traslacional (m/s)	Energía cinética (J)
1	4,91	439	1,8-2,3	10,8-16,8
2	14,05	358	0,9-1,2	8,2-13,9
3	0,76	380	1,2-1,5	0,7-1,1
4	5,82	368	0,7-1,4	1-8

Limitaciones de las modelizaciones

El programa de análisis de trayectorias presenta diversas limitaciones, que se describen brevemente a continuación. La primera de ellas es que los gráficos de altura de rebote no permiten, en primera instancia, reflejar los pequeños saltos centimétricos que se dan en el mecanismo de rodadura. Esta restricción viene dada por la resolución de los puntos de análisis que, en este caso son 100 repartidos equidistantemente en la horizontal (con distancias de entre 5 y 7 metros). Esto no permite caracterizar saltos por rodadura de entidad centimétrica, siendo necesario para ello ir a modelos con una resolución aproximada de 5-10 cm. Esta resolución implicaría modelos con más de 10.000 puntos de análisis, muy por encima del máximo de 1.000 que actualmente permite este software.

Para interpretar los resultados obtenidos en las modelizaciones es necesario considerar la gran extensión actual de los canchales, que son un reflejo del alcance de los desprendimientos reales. Esta longitud de aproximadamente 400 metros en los cuatro perfiles demuestra que se desarrollan desprendimientos de distinta magnitud. Estos están controlados, además de por los parámetros incluidos en la simulación, tanto por la geometría, tamaño y masa de los bloques, como por las irregularidades del propio terreno de pequeña escala que no quedan fielmente reflejados en estos perfiles. Todos estos factores, en el caso de un desprendimiento real, pueden provocar variaciones importantes en el lugar de depósito y, por tanto, diferentes escenarios: desde que los bloques desprendidos queden retenidos en algún punto del canchal (debido a las irregularidades del propio depósito y del propio bloque), hasta que la trayectoria sea de

mayor longitud por rodadura para bloques de gran tamaño y masa llegando a alcanzar el río Cares, los cuales tienen una presencia muy reducida en los canchales.

Las simulaciones presentan, además, otra limitación importante a la hora de interpretar un desprendimiento real en la zona de estudio. Ésta se da cuando un canchal, sobre todo en sus partes más distales, está alimentado desde distintas trayectorias por el mismo área fuente, o incluso por otras. Esto aumenta la probabilidad de que, por ejemplo, en los perfiles 1 y 2 los bloques desprendidos de sus áreas fuente más próximas no se detengan en su totalidad antes del límite del canchal, sobrepasándolo y alcanzando el segundo escarpe, llegando a la senda inferior e, incluso al cauce del río.

Asimismo, mediante este software no es posible simular que cada desprendimiento, aunque no alcance la senda, puede movilizar los bloques sueltos de los canchales que permanezcan sin cementar, ocasionando un incremento efectivo del volumen de material movilizado en cada desprendimiento. Otros motivos de movilización de los bloques sueltos de los canchales pueden ser los mismos factores desencadenantes de un desprendimiento, como la lluvia, los aludes y, de forma menos significativa, el paso de animales a través de los canchales.

Aunque en este trabajo se ha conseguido una aproximación muy cercana a los desprendimientos reales que se dan en la zona, es necesario tener en cuenta las diferentes limitaciones descritas a la hora de efectuar interpretaciones. Por ejemplo, las simulaciones indican que los bloques caídos desde los escarpes superiores alcanzan el río o se detienen hacia el final del canchal. Estos resultados son ciertos, pero el propio desarrollo del canchal hace que en su evolución la situación vaya sufriendo modificaciones, deteniéndose bloques a lo largo de toda su longitud.

En todos los casos, para cada perfil se ha utilizado un valor medio de masa de bloques, aunque el aporte al perfil procediera de varias áreas fuente. Dicho valor fue determinado a partir del análisis de los bloques acumulados en el entorno de la senda del Cares, por lo que no se corresponde con las áreas fuente inferiores a esta. En cambio, sí ha permitido valorar la posibilidad de que en las simulaciones de los perfiles 1 y 2 los bloques que atraviesan la senda del Cares, pero luego se detienen, puedan caer por el escarpe inferior hacia la senda secundaria y hacia el cauce fluvial, como se intuye que ocurre en realidad. En todo caso, no fue considerada la contribución de los bloques que parten realmente del escarpe inferior, cuya masa media será diferente.

También hay que tener en cuenta que los perfiles son representativos del movimiento de los bloques durante los desprendimientos, pero son en 2D y no engloban los desprendimientos de toda el área fuente, por lo que en realidad llegan a la senda más bloques con otras trayectorias. Esto evidencia la necesidad de un sistema de auscultación para obtener todos los parámetros que requiere un software de modelización 3D que permita una evaluación más exacta de la peligrosidad y el riesgo de la senda del Cares.

Por otra parte, en los distintos sectores modelizados se observan volúmenes de bloques muy diferentes, como por ejemplo ocurre en los perfiles 3 y 4. Este hecho puede explicarse mediante diferentes hipótesis, desde que las áreas fuente presenten una red de diaclasado con un espaciado diferente hasta que los bloques sufran una mayor fracturación por seguir un mayor recorrido, pudiendo incluso concurrir un factor diferente, relacionado con la pendiente de la ladera.

Líneas de trabajo futuras

En relación a este trabajo fin de máster, es posible plantear algunas líneas de trabajo que podrían abordarse en el futuro. Entre ellas destaca la auscultación con LiDAR terrestre (ej. Royán, 2015) que, entre otros aspectos, permitiría un análisis detallado de las discontinuidades, caracterizar volumétricamente los desprendimientos, analizar su evolución temporal, determinar la relación magnitud-frecuencia, detectar desprendimientos precursores y deformaciones superficiales, que en conjunto son indicadores de eventos mayores, modelizar tridimensionalmente potenciales caídas, y, con todo ello, poder establecer sistemas de alerta temprana.

Asimismo, se podría abordar un estudio basado en la auscultación con geófonos (ej. Hürlimann *et al.*, 2013). Estos sistemas se basan en el despliegue de una red de geófonos con módem, una estación de grabación de vídeo y una estación meteorológica. A partir de estos equipos es posible obtener relaciones magnitud-frecuencia-probabilidad de desprendimientos, condiciones meteorológicas previas al desprendimiento, variables de velocidad y fragmentación de los bloques, y el posible desarrollo de sistemas de alerta temprana con un filtro adecuado en los geófonos.

4. Conclusiones

Del análisis de trayectorias de caída de rocas en la senda del Cares llevado a cabo en este trabajo es posible extraer las siguientes conclusiones metodológicas y de resultados.

Metodológicas:

- Para lograr una simulación más representativa de los desprendimientos ya ocurridos en la zona es necesario considerar un ángulo de rozamiento de cero grados, no debiendo considerarse ni el propio del material, ni el estimado a partir del coeficiente Rt. Así, se evita que las trayectorias finalicen en los primeros impactos, despreciando los mecanismos de rodadura y/o deslizamiento, contrariamente a lo que se observa en campo.
- El programa muestra únicamente el recorrido máximo de los bloques desprendidos, no considerando la fragmentación de los mismos ni las irregularidades que se dan a menor escala. Este aspecto obvia aquellos recorridos correspondientes a los bloques de mayor tamaño que, en este caso, puedan alcanzar el río Cares mediante rodadura.

De resultados:

- Con este estudio se ha comprobado que el mapa de peligrosidad por procesos de ladera en la senda del Cares de Álvarez García (2016) otorga el calificativo de “alta peligrosidad” a sectores en los que se constata la posibilidad de que la senda sea alcanzada por bloques desprendidos.
- Para una evaluación en mayor detalle de la peligrosidad y riesgo por desprendimientos en la senda del Cares, es necesario desarrollar un procedimiento de auscultación que permita su caracterización y control adecuados, además del empleo de software de modelización 3D. Ello permitirá, a su vez, explorar una nueva vía para implementar un sistema de alerta temprana y una reducción de accidentes provocados por este tipo de procesos.

5. Referencias

- Alonso, J. L., Marcos, A., y Suárez, A. (2009). *Paleogeographic inversion resulting from large out of sequence breaching thrusts: The León Fault (Cantabrian Zone, NW Iberia). A new picture of the external Variscan Thrust Belt in the Ibero-Armorican Arc*. *Geologica Acta*, 7(4), 451-473.
- Álvarez García, L. (2016). *Zonificación y evaluación de la peligrosidad por procesos de ladera en la Ruta del Cares*. Trabajo Final de Máster, Universidad de Oviedo, 87 pp.
- Aramburu, C. E., y Bastida, F. (Editores.). (1995). *Geología de Asturias*. Ediciones Trea, 314 pp.
- Cruden, D.M. (1991). *A simple Definition of a Landslide*. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 43, 27-29.
- Cruden, D.M., y Varnes, D.J. (1996). *Landslide Types and Processes*. Transportation Research Board, U.S. National Academy of Sciences, Special Report, 247: 36-75.
- Davies, M. C., Hamza, O. y Harris, C. (2001). The effect of rise in mean annual temperature on the stability of rock slopes containing ice-filled discontinuities. *Permafrost and periglacial processes*, 12(1), 137-144.
- De Graff J. y Gallegos J. (2012). *The challenge of improving identification of rockfall hazard after wildfires*. *Environmental & Engineering Geoscience*, Vol XVIII, 389-397.
- Farias, P. (1982). *La estructura del sector central de los Picos de Europa*. *Trabajos de Geología*, 12, 63-73.
- Fernández, M., y Vilaplana, J.M. (2004). *Factores meteorológicos que desencadenan desprendimientos de rocas en Vall de Núria*. Riesgos naturales y antrópicos en geomorfología. *Actas de la VIII Reunión Nacional de geomorfología*, Toledo, 2, 389-401.

- Giani, G. P., Giacomini, A., Migliazza, M., Segalini, A. (2004). *Experimental and Theoretical Studies to Improve Rock Fall Analysis and Protection Work Design*. *Rocks Mechanics and Rock Engineering*, 37 (5), 369–389.
- Gutiérrez Elorza, M. (2008). Laderas y movimientos de masas. En: *Geomorfología*. Pearson Educación, Madrid, 229-274.
- Hurlimann Ziegler, M., Moya Sánchez, J., Abanco Martínez de Arenzana, C., y Vilajosana Guillen, I. (2013). *Auscultación de movimientos de ladera para la implementación de sistemas de alerta: ejemplos del Pirineo y Prepirineo central y oriental*. In VIII Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables (51-82). Centre Internacional de Mètodes Numèrics en Enginyeria (CIMNE).
- Jordan, P., y Curran M. (2009). *Terrace Mountain fire, 2009, K50720 Post-wildfire risk analysis*. BC Ministry of Forests and Range, Southern Interior Forest Region, 21 pp.
- Julivert, M. (1967a). *La ventana tectónica del río Color y la prolongación septentrional del Manto del Ponga (Cordillera Cantábrica, España)*. *Trabajos de Geología*, 1, 1-26.
- Julivert, M. (1971). *Décollement tectonics in the Hercynian Cordillera of northwest Spain*. *American Journal of Science*, 270(1), 1-29.
- Julivert, M., y Marcos, A. (1971a). *Mapa Geológico de España E. 1: 200,000, Hoja n 10 (Mieres)*. Memoria explicativa por Julivert, M., Truyols, J. y García-Alcalde, J. IGME.
- Julivert, M. y Navarro, D. (1984). *Mapa y memoria explicativa de la hoja 55 (Beleño) del Mapa Geológico de España E. 1:50.000*, IGME, Madrid.
- La Nueva España (29 de junio de 2019). *Herido un hombre tras ser golpeado por una piedra en la Ruta del Cares*. Recuperado de <https://www.lne.es/sucesos/2019/06/29/herido-hombre-golpeado-piedra-ruta/2495655.html>
- Lotze, F. (1945). *Zur Gliederung der Varisziden der Iberischen Meseta*. *Geotekt. Forschg.*, 6, 78-92.

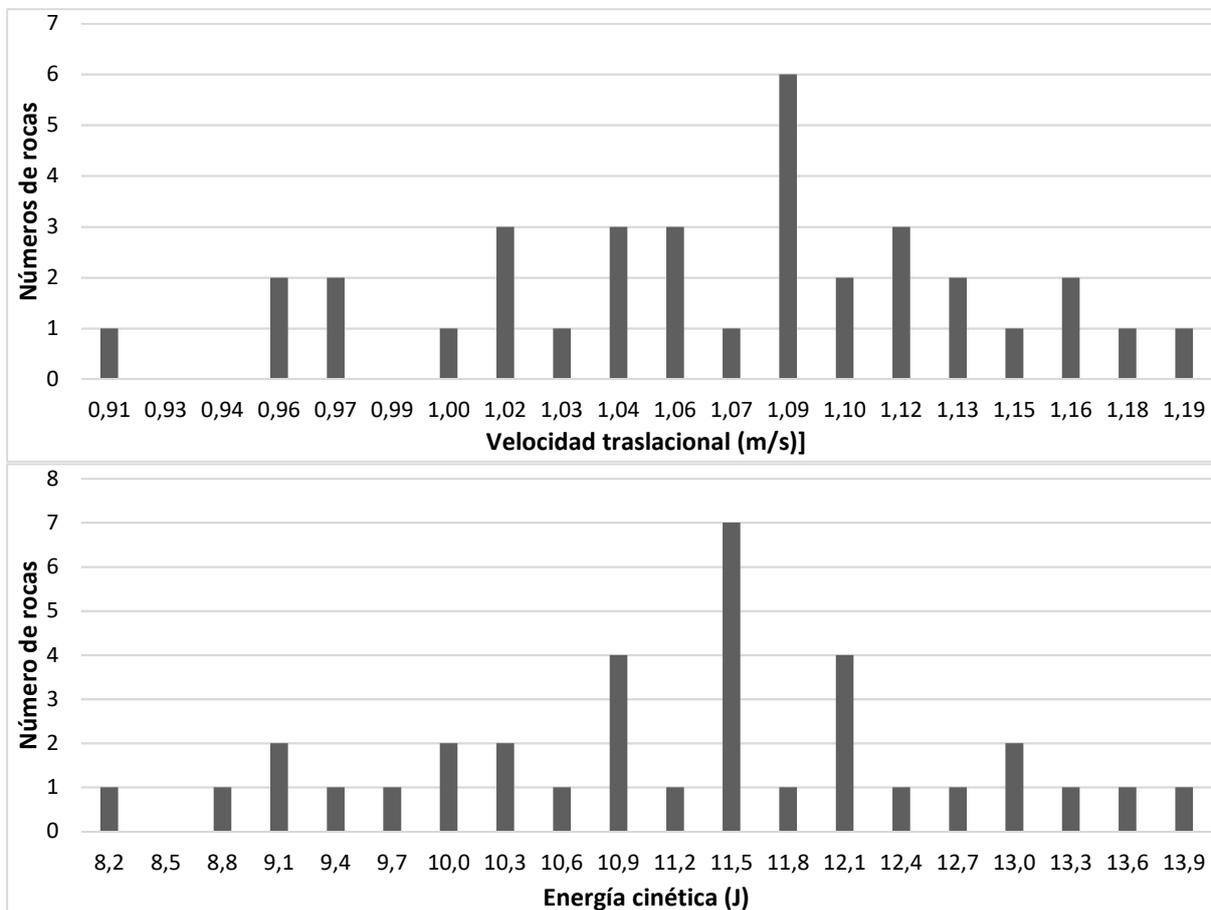
- Marquínez, J. (1978). *Estudio geológico del sector SE de los Picos de Europa (Cordillera Cantábrica, NW de España)*. Trabajos de Geología, 10, 295-317.
- Martínez-García, E., Marquínez, J., Navarro, D., Heredia, N. y Rodríguez Fernández, L.R. (1984). *Mapa Geológico de España E. 1:50.000, hoja nº 56. (Carreña-Cabrales)*. Memoria explicativa por Martínez García, E. y Rodríguez Fernández, L.R. IGME. Madrid. 45 pp.
- Matsuoka N., Sakai H. (1999). *Rockfall activity from an alpine Cliff during thawing periods*. Geomorphology, 28, 309-328.
- Memoria Parque Nacional Picos de Europa, 2016.
- Menéndez de la Hoz, M. (1999). Guía de visita: Parque Nacional de los Picos de Europa.
- Merino Tomé, O., Suárez Rodríguez, A., Alonso, J. L., y GEODE. (2013). *Mapa Geológico Digital continuo E. 1: 50.000, Zona Cantábrica (Zona-1000)*. Mapa Geológico Digital continuo de España. Sistema de Información Geológica Continua (SIGECO). IGME. Consultado en: <http://info.igme.es/cartografiadigital/geologica/Geode.aspx?language=es> (acceso marzo 2019).
- Ministerio de Fomento. (2002). *Norma de Construcción Sismorresistente: Parte General y Edificación (NCSE-02)*.
- Pérez-Estaún, A. y Bea, F. (editores). (2004). Macizo Ibérico. En: *Geología de España* (Vera, J.A. Ed.), SGE-IGME, Madrid, 19-230.
- Ramírez Oyanguren, P., y Alejano Monge, L. (2004). Desprendimientos: análisis de trayectorias, evaluación del riesgo y medidas de protección. En: *Mecánica de rocas: Fundamentos e ingeniería de taludes*. Red DESIR, 460-559.
- RocFall (Versión 4.042) [Rocscience]. (2005). Recuperado de: <https://www.rocscience.com/software/rocfall>

- Royán, M. J. (2015). *Caracterización y predicción de desprendimientos de rocas mediante LiDAR Terrestre* (Doctoral dissertation, PhD Thesis, Universitat de Barcelona).
- Sass, O. (2005). *Temporal of rockfall in the Bavarian Alps, Germany*. *Artic, Antartic, and alpien Research*, 37, 564-573.
- Suárez, J. (2009). *Deslizamientos: Técnicas de Remediación*. Universidad Industrial de Santander, vol. 2, 417 pp.
- UNE-EN 1936 (2006). *Métodos de ensayo para Piedra natural: Determinación de la densidad real y aparente y de la porosidad abierta y total*. AENOR, 13 pp.
- Varnes, D.J. (1978). *Slope Movement Types and Processes*. In: Schuster, R.L. and Krizek, R.J., Eds., *Landslides, Analysis and Control*, Transportation Research Board, Special Report No. 176, National Academy of Sciences, 11-33.
- Zaruba, Q., y Mencl, V. (1982). *Lanslides and Their Control*. Elsevier, Ámsterdam, 324 pp.

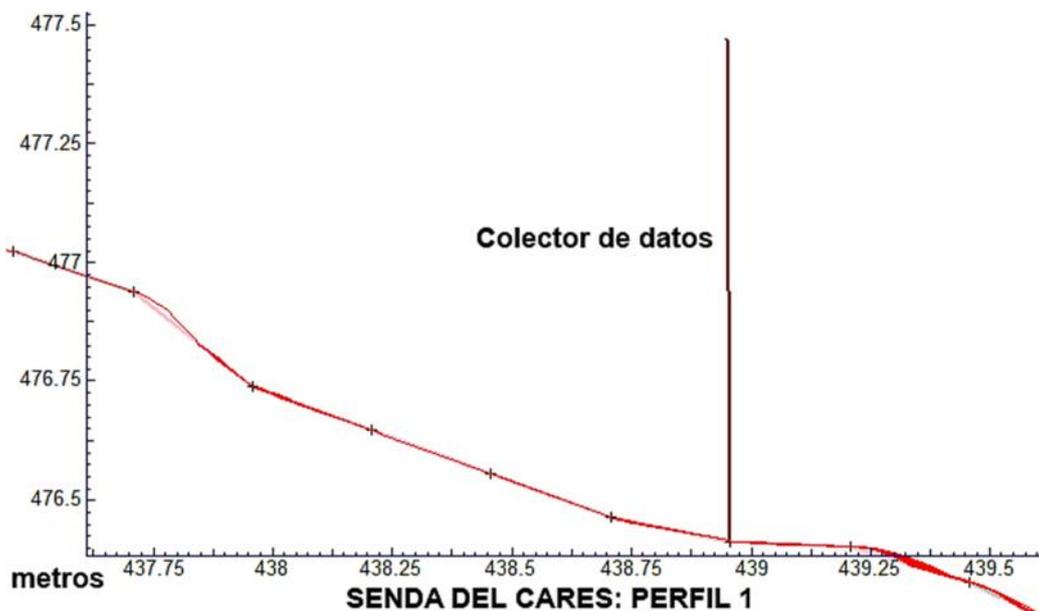
ANEXOS

ANEXO I: Perfil 1

Histogramas de frecuencia de rocas para los intervalos de velocidad traslacional y energía cinética en la senda del Cares para el perfil 1 en el metro 439.



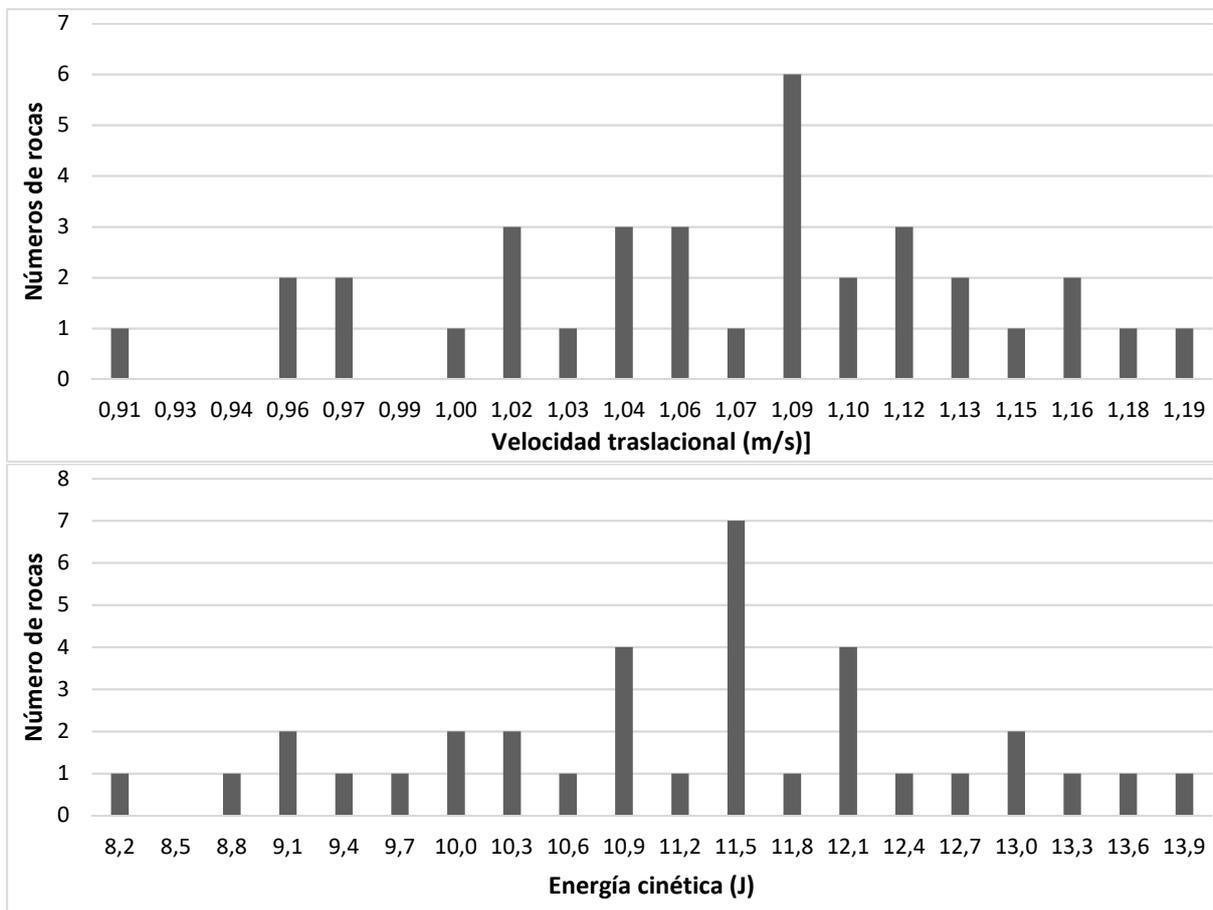
Sector de la senda del Cares en la modelización del perfil 1 con su colector de datos, acompañado de una fotografía con la ubicación del perfil en campo.



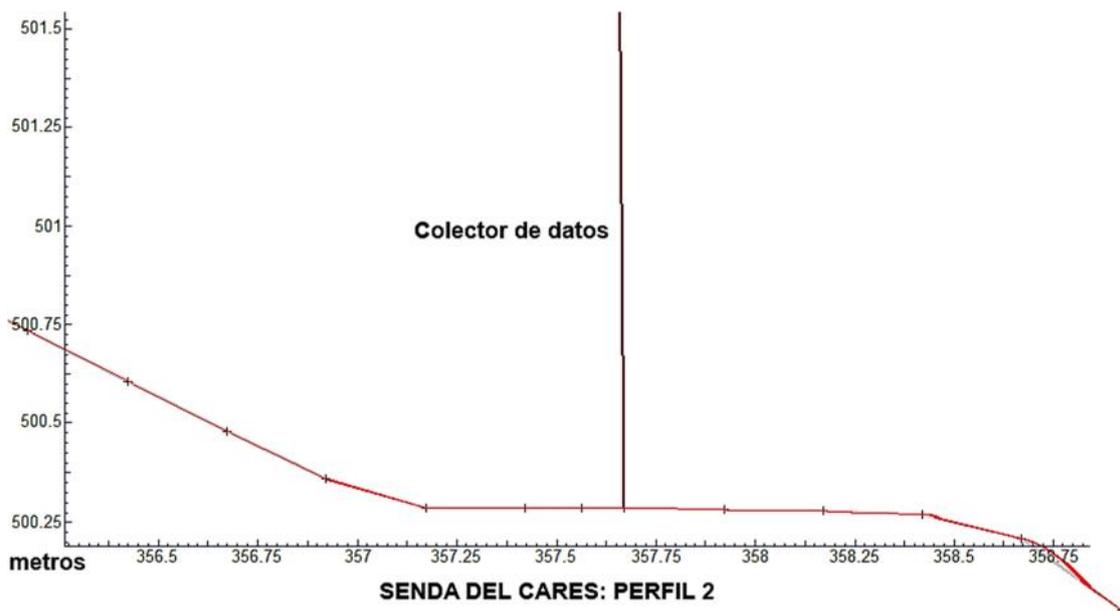


ANEXO II: Perfil 2

Histogramas de frecuencia de rocas para los intervalos de velocidad traslacional y energía cinética en la senda del Cares para el perfil 2 en el metro 358.



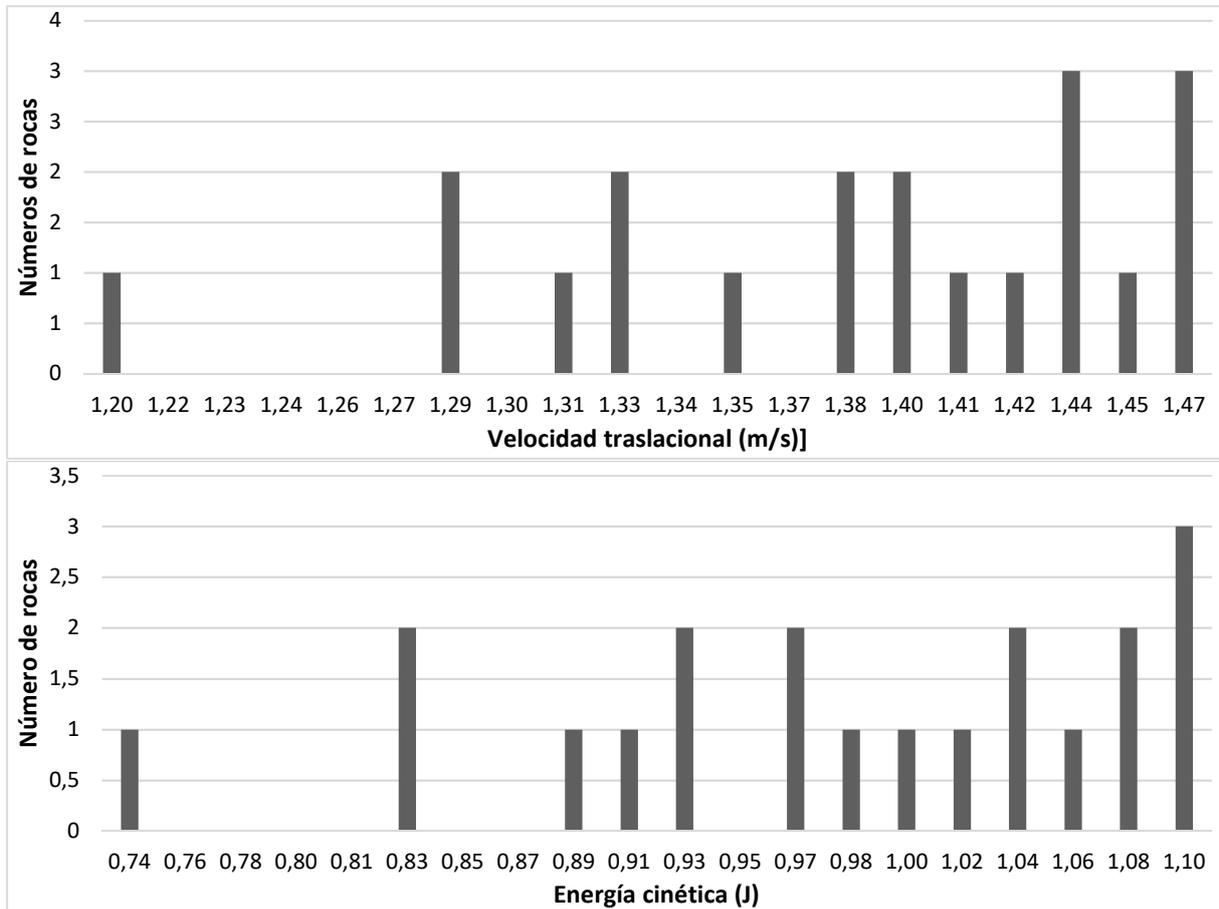
Sector de la senda del Cares en la modelización del perfil 2 con su colector de datos, acompañado de una fotografía con la ubicación del perfil en campo.



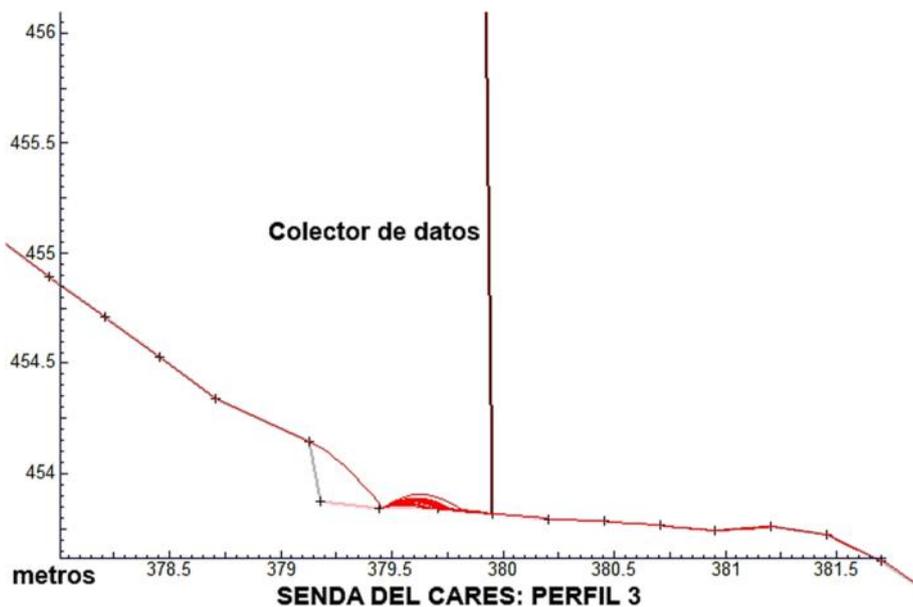


ANEXO III: Perfil 3

Histogramas de frecuencia de rocas para los intervalos de velocidad traslacional y energía cinética en la senda del Cares para el perfil 3 en el punto 380.



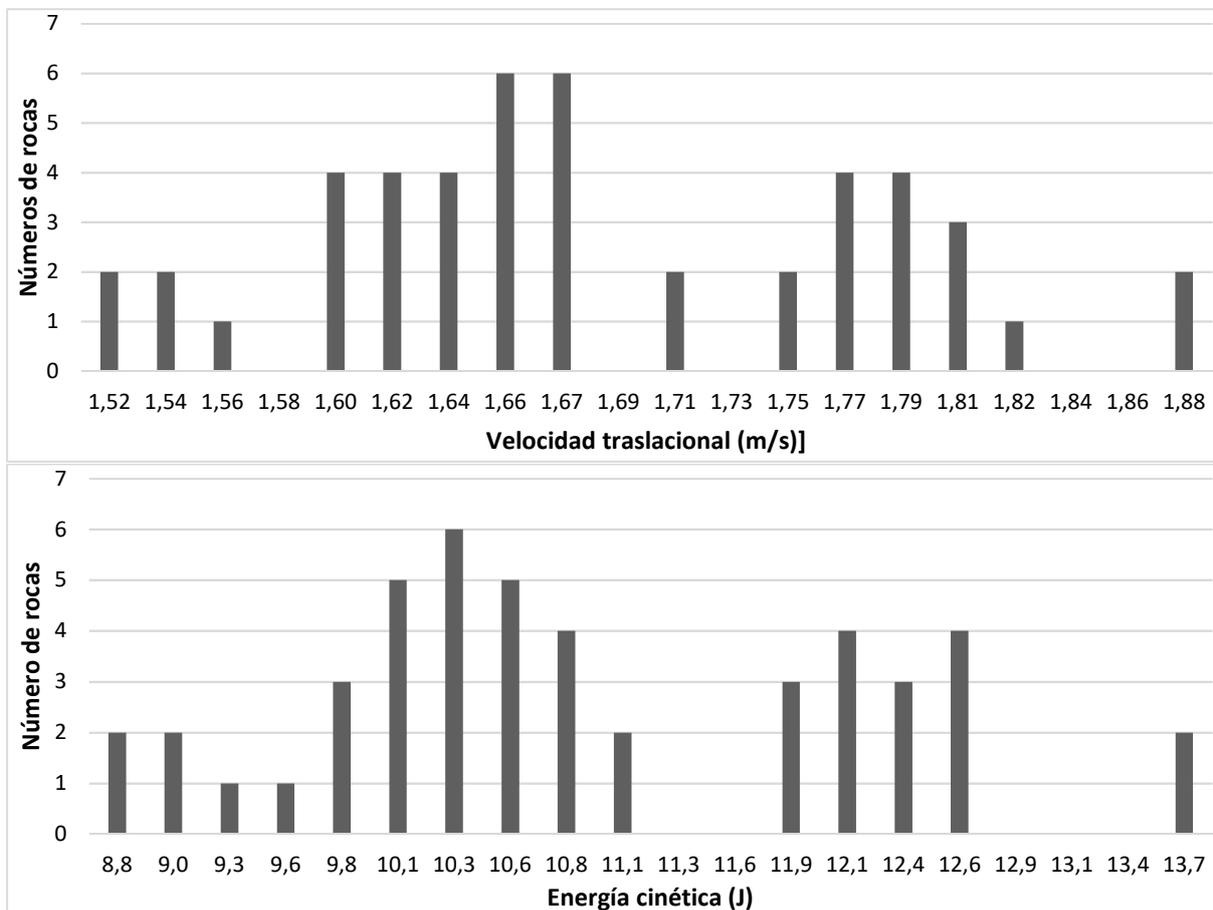
Sector de la senda del Cares en la modelización del perfil 3 con su colector de datos, acompañado de una fotografía con la ubicación del perfil en campo.





ANEXO IV: Perfil 4

Histogramas de frecuencia de rocas para los intervalos de velocidad traslacional y energía cinética en la senda del Cares para el perfil 4 en el punto 368.



Sector de la senda del Cares en la modelización del perfil 4 con su colector de datos, acompañado de una fotografía con la ubicación del perfil en campo.

