

Estimación de la eficacia de las protecciones contra la caída de bloques

Ramón Copons Llorens

Dr. en Ciencias Geológicas

Departament de Geodinàmica i Geofísica

(Universitat de Barcelona).

Técnico en Riesgos Geológicos en la empresa Euroconsult S.A.

Joan Manuel Vilaplana Fernández

Dr. en Ciencias Geológicas. *Profesor titular del Departament*

de Geodinàmica i Geofísica (Universitat de Barcelona)

Joan Altimir Planer

Licenciado en Ciencias Geológicas,

Director Gerent d'Euroconsult, S.A.,

Jordi Amigó Mitjana

Doctor en Ciencias Geológicas

Técnico en Riesgos Geológicos de la empresa

Eurogeotècnica, S.A.

RESUMEN

En el presente trabajo se expone un ejemplo de la metodología utilizada en Andorra, para estimar la eficacia de las protecciones que se pretenden instalar para proteger los edificios expuestos a la caída de bloques. Antes de la instalación de estas protecciones, cabe conocer si las energías máximas de absorción propuestas para las mismas retendrán con eficacia los desprendimientos. Las protecciones propuestas han sido barreras dinámicas y/o diques, según las condiciones del terreno y el espacio disponible en el lugar de instalación. Se ha evaluado la eficacia de una protección a partir del porcentaje de caída de bloques que puede llegar a retener, que depende de las energías de los bloques en el lugar de instalación y de la energía máxima de absorción de la protección. Para estimar la eficacia de una protección, hace falta saber la distribución volumétrica de los bloques rocosos que pueden llegar a la misma, y las energías cinéticas que éstos presentan. Para ello, se ha efectuado un análisis de los volúmenes de los bloques rocosos en su punto de salida y en el de llegada, y además se ha efectuado una simulación del proceso de caída de bloques mediante un programa analítico y numérico. Los resultados obtenidos demuestran que, frecuentemente, la instalación de protecciones con enormes energías de absorción no mejoran significativamente su eficacia respecto a otras más sencillas. No obstante, cuando el elemento a proteger presenta una elevada vulnerabilidad social (escuela, hospital o vivienda), es necesario la instalación de grandes protecciones, para llegar a obtener la mayor eficacia posible, y reducir al máximo el riesgo.

ABSTRACT

This paper describes an example of the methodology employed in Andorra to estimate the efficiency of intended protection installed to protect buildings exposed to falling rock. Prior to the installation of these protection systems, it is necessary to know whether the maximum proposed energies of absorption for the same will efficiently retain the spalling. The protection proposed was that of dynamic barriers and/or retainment according to the soil conditions and the space available in the place of installation. The efficiency of a protection has been evaluated according to the percentage retainment of falling rock, and which depends on the energies of the rock in the place of installation and on the maximum absorption energy of the protection. In order to evaluate the efficiency of a protection, it is necessary to know the volumetric distribution of the rock which may strike the same and the kinetic energies that these present. As such, an analysis was made of the volume of the rock at their point of falling and their point of arrival and a simulation of the fall of the rock was made by an analytical and numerical programme. The results obtained show that the installation of protection with enormous absorption energies do not always significantly improve efficiency when compared to other more simple methods. However, when the item to be protected is one of extreme vulnerability (school, hospital or housing) the installation of large scale protection is necessary in order to obtain the best possible efficiency and to reduce risk to a minimum.

INTRODUCCIÓN

Andorra es un pequeño país de 468 km² situado en la vertiente sur de los Pirineos Centrales (véase la figura 1). La capital del país, Andorra la Vella, de aproximadamente 20000 habitantes, se encuentra situada en el fondo del valle del río Valira. El fondo del valle, en donde se encuentra Andorra la Vella, se encuentra situado a uno 1.000 metros s.n.m., estando rodeado por montañas que superan los 2.000 metros, entre los que destaca el Pic de Carroi, 2.334 metros s.n.m., presentando vertientes muy inclinadas. La ladera orientada hacia el del valle del Valira, denominada Solà d'Andorra la Vella, presenta unas pendientes rocosas muy inclinadas e incluso verticales, que pueden llegar a presentar más de 1000 metros de desnivel, atravesadas por múltiples corredores que poseen entre 25 y 35 grados de inclinación.

El substrato rocoso del Solà d'Andorra la Vella está formado predominantemente por granodioritas afectadas por diferentes familias de discontinuidades (Altimir, Amigó y col., 1998a). Al pie de las paredes rocosas del Solà d'Andorra la Vella se encuentran grandes depósitos de bloques formando extensos canchales que enlazan inferiormente con los depósitos cuaternarios de origen fluvial del fondo del valle del río Valira. El proceso geomorfológico más frecuente en el Solà son los desprendimientos, representados básicamente por caídas de bloques (rockfalls) donde la masa involucrada se encuentra comprendida entre 1 y 1.000 m³, aunque también existen evidencias de antiguos desprendimientos de grandes dimensiones (rock avalanches) en donde el volumen de roca involucrada

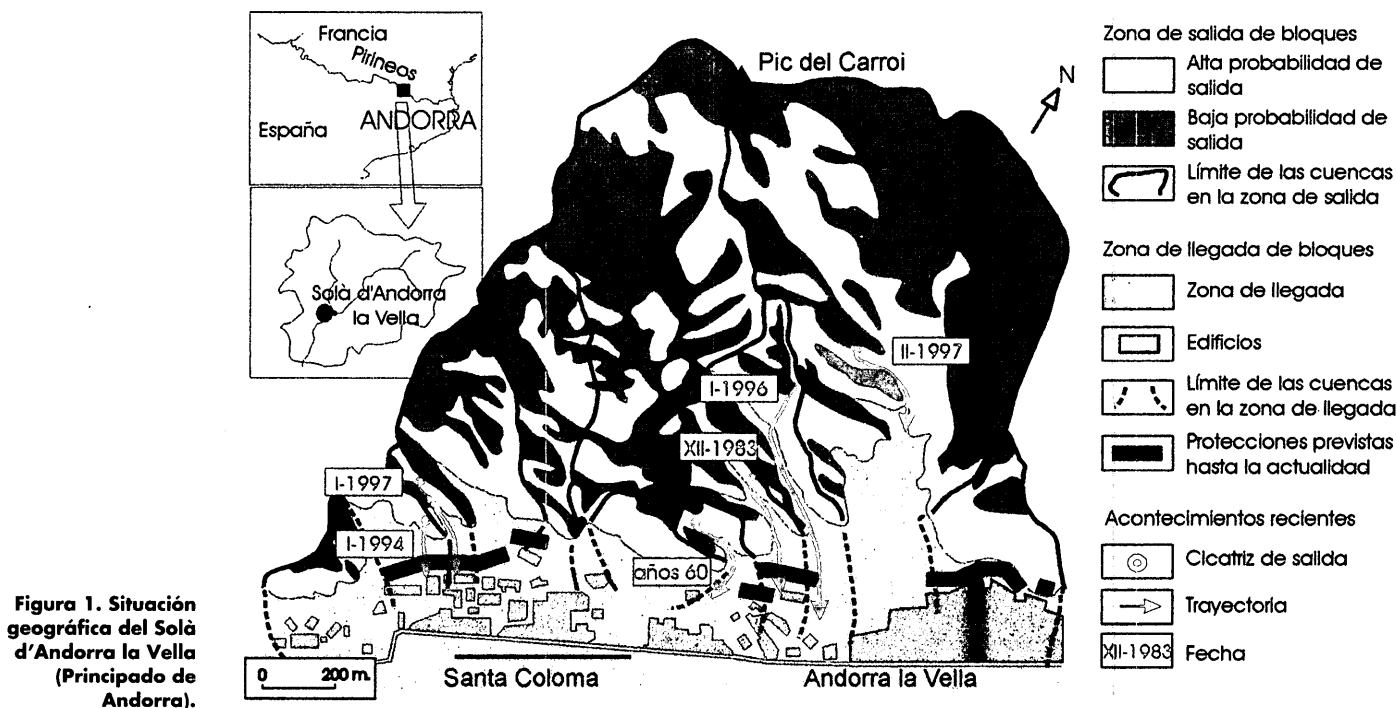
do en cada evento es mayor a 10³ m³, llegando en algunos casos a superar los 10⁶ m³.

Desde la década de los años 50, Andorra Andorra la Vella ha manifestado un gran crecimiento urbanístico. A partir de un antiguo núcleo urbano se ha ido ocupando todo el fondo del valle; más recientemente se han urbanizado los terrenos situados al pie de las laderas rocosas del Solà. Por consiguiente, los edificios más cercanos a la montaña han quedado expuestos al peligro de los desprendimientos.

A lo largo de los años 80 y 90 existe una abundante información de los acontecimientos de caídas de bloques, debido a que éstos suelen llegar hasta los alrededores de los terrenos edificados recientemente y, incluso, suelen llegar a impactar en ellos. Los desprendimientos más recientes que han afectado a edificios se han producido en diciembre del 83 y en enero del 94.

El 21 de enero de 1997 tuvo lugar uno de los acontecimientos más significativos, cuando un bloque de 25 m³ de volumen impactó en un edificio de Andorra la Vella, afectando cuatro de las cinco plantas del mismo hasta llegar al sótano, dañando a un habitante que tuvo que ser hospitalizado. En el mismo acontecimiento, otros bloques de volúmenes comprendidos entre 0'5 y 2 m³ llegaron hasta los jardines de dos chalets situados al lado del mismo edificio (Altimir, Amigó y col., 1998a).

Debido al alto riesgo de desprendimientos en este sector de Andorra la Vella, ha surgido la necesidad de instalar protecciones efectivas para evitar que los desprendimientos lleguen con facilidad a los terrenos edificados. Estas protecciones tienen que ser lo más efectivas posibles, en base a las posibilidades de protección existentes (energías de los bloques, condiciones del



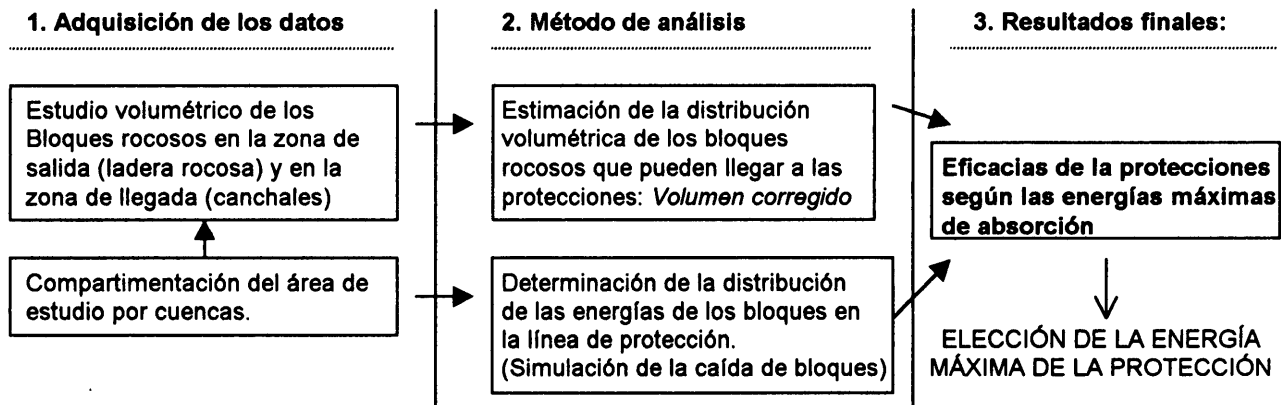


Figura 2. Metodología de trabajo utilizada para estimar la eficacia de las protecciones contra la caída de bloques y la elección de la energía máxima de absorción más conveniente.

terreno que permitan la instalación de protecciones, etc.). El lugar escogido para la instalación de protecciones ha sido en los terrenos situados al lado de los edificios a proteger. Estos terrenos presentan una buena accesibilidad y además los bloques presentan la menor energía de su trayecto antes de impactar en los edificios vulnerables. Así, estas protecciones se dispondrán de modo lineal entre los edificios a proteger y las vertientes rocosas, constituyendo una "línea de protección".

METODOLOGÍA

El principal objetivo del presente trabajo es estimar la eficacia de protecciones según sus energías máximas de absorción. Estas protecciones, de tipo pasivo, tienen como objetivo mitigar el riesgo de caída de bloques en un terreno expuesto (Wyllie and Norrish, 1996). La estimación de la eficacia de una protección ha consistido en determinar el porcentaje de caídas de bloques que puede llegar a retener y evitar así que lleguen al terreno a proteger, por tanto, esta eficacia dependerá de las energías de los bloques en el lugar en donde se prevee instalar la protección, y de la energía máxima de absorción de la protección propuesta. La energía máxima de absorción de la protección corresponde a la energía máxima que puede llegar a retener. Una vez estimada la eficacia de protecciones con diferentes energías máximas de absorción, se escoge la protección más idónea según su eficacia y teniendo en cuenta las posibilidades de su instalación según las condiciones del terreno (morfología, pendiente, espacio disponible,...).

Para determinar las energías de los bloques ha sido necesario obtener datos sobre los volúmenes de los bloques y sus velocidades en el lugar en donde se prevee instalar las protecciones. La estimación de la distribución volumétrica de los bloques que pueden llegar a las protecciones, se obtiene en base a un análisis volumétrico de los bloques rocosos en el lugar de salida (vertientes rocosas) y en el de llegada (canchales). Mientras que

las velocidades de los mismos se calculan mediante la simulación del proceso de caída de bloques en un modelo analítico y numérico (Hacar Benítez, 1988; Lopez Carreras et al., 1988, 97; Gili Ripoll y Gutierrez Montagut, 1992).

La metodología seguida para determinar la eficacia de una determinada protección consta de tres partes bien diferenciadas (figura 2). En la primera parte se efectúa una adquisición de datos sobre el terreno, que consiste en obtener los volúmenes de los bloques rocosos, tanto en el lugar de salida (vertientes rocosas) como en el de llegada (canchales), así como una individualización o compartimentación del área de estudio en cuencas, donde cada cuenca tendrá una distribución volumétrica de los bloques característica. En una segunda parte, se obtienen los datos necesarios para estimar la eficacia de las protecciones, éstos son la distribución volumétrica de los bloques rocosos que pueden llegar a las protecciones, denominada "volumen corregido", determinada en base al análisis volumétrico realizado sobre el terreno y a la compartimentación del área de estudio; otro dato necesario es la distribución de energías de los bloques en el lugar de la protección, calculado en base a un programa numérico que necesita de unos valores de entradas obtenidos durante la compartimentación del terreno. En la última parte se obtienen los resultados finales correspondientes a las eficacias de las protecciones con diferentes energías máximas de absorción y, por tanto, la elección del tipo de protección idónea.

ANÁLISIS VOLUMÉTRICO DE LOS BLOQUES ROCOSOS

El análisis volumétrico tiene como objetivo determinar los volúmenes de los bloques rocosos que se desprenden. Este análisis se realiza midiendo los volúmenes de los bloques caídos acumulados en los canchales (zona de llegada de bloques) y, estimando los volúmenes de los bloques que pueden desprenderse de la pared rocosa (zona de salida de bloques).

En la tabla I se presentan los resultados estadísticos de los volúmenes de los bloques medidos en su zona llegada, así como los estimados en su zona de salida.

Volúmen de los bloques rocosos en la zona de llegada

Los bloques caídos se acumulan al pie de las paredes rocosas formando grandes canchales. El análisis volumétrico de los bloques caídos se ha efectuado mediante muestreos de los volúmenes de los bloques depositados en los canchales, e inventariando los volúmenes de los bloques de dimensiones inusuales, los cuales se encuentran en los sectores más bajos de los canchales, colonizados por vegetación o urbanizados. Los muestreos en los canchales tiene como objetivo determinar la distribución volumétrica de los bloques que caen con mayor frecuencia, mientras que el inventario de los bloques mayores da información sobre los desprendimientos excepcionales.

El muestreo volumétrico ha consistido en medir los volúmenes de los bloques rocosos en diferentes sectores de los canchales. En cada sector de muestreo se delimita una parcela, de aproximadamente 25x25 metros de dimensión, trazándose en su interior una malla mediante cuerdas, midiéndose los bloques situados por debajo. También se han realizado parcelas lineales, trazándose una línea mediante cuerdas que siguen la máxima pendiente del canchal, midiéndose los volúmenes de los bloques que quedan en la traza de la línea marcadora.

Respecto al inventario de los bloques de dimensiones inusuales, los cuales se encuentran dispersos en el bosque o en los terrenos urbanizados, se ha realizado mediante su cartografía y la medida directa de sus volúmenes. El bloque mayor observado en Andorra la Vella presenta un volumen de 210 m³, otros bloques de dimensiones inusuales presentan volúmenes comprendidos entre los 100 y los 25 m³.

Volúmen de los bloques rocosos en la zona de salida

Paralelamente al estudio de los bloques caídos, se ha realizado la estimación de los volúmenes de los bloques en las vertientes rocosas. Esta estimación se ha efectuado mediante la separación de las familias de discontinuidades principales de la roca, a partir de las fotografías de detalle de las paredes rocosas y por último, midiendo directamente el volumen de los bloques separados del substrato que se encuentran en las vertientes rocosas.

La estimación volumétrica mediante la separación de las familias de discontinuidades, consiste en realizar un análisis estadístico previo de las discontinuidades medidas en diferentes estaciones, con el objetivo de determinar las familias más representativas. Las familias de discontinuidades son las responsables de descomponer el macizo rocoso en bloques poliédricos elementales, susceptibles a moverse (Jaboyedoff *et al.*, 1996; Rouiller *et al.*, 1997). Los planos de discontinuidad de la roca corresponden a las caras de los poliedros de

los bloques rocosos, mientras que las separaciones de las discontinuidades son iguales a los lados de los cuerpos rocosos a desprenderse. Mediante la distribución estadística del espaciado de cada una de las familias, se ha realizado una estimación de los volúmenes de los bloques que pueden salir de las vertientes rocosas, para simplificar los resultados se ha considerado que el ángulo entre los planos de las diferentes familias es de 90 grados. El cálculo se ha realizado mediante la combinación de los percentiles, en intervalos de 10, de las separaciones de las tres familias de discontinuidades, obteniéndose así una distribución volumétrica de bloques rocosos que pueden salir del substrato rocoso.

Mediante las fotografías de detalle de las vertientes rocosas, obtenidas en un vuelo de helicóptero (Altimir *et al.*, 1999), se estima el volumen de los bloques en los sectores de las vertientes rocosas de difícil acceso. En las fotografías obtenidas, se delimitan los cuerpos rocosos siguiendo las discontinuidades que afloran en la roca. Posteriormente se calculan los volúmenes de los cuerpos rocosos delimitados a partir de sus dimensiones y morfología, obteniéndose así una distribución volumétrica de los bloques rocosos que pueden desprenderse.

Por último, en los sectores de las vertientes rocosas de fácil acceso, se ha medido directamente el volumen de los bloques rocosos separados del substrato rocoso, los cuales son susceptibles a moverse. Los sectores escogidos son las paredes ruinosas y las crestas rocosas descompuestas, las cuales poseen un gran número de bloques, pudiéndose realizar un análisis estadístico de los volúmenes medidos.

INDIVIDUALIZACIÓN O COMPARTIMENTACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La individualización consiste en compartimentar el área de estudio en cuencas de caídas de bloques (Altimir, Amigó y col., 1998a). Estas cuencas de caídas de bloques suelen corresponder a las pequeñas cuencas de drenaje de los corredores (o canales) situadas en las vertientes rocosas, o bien a grandes paredes rocosas orientadas hacia el fondo de valle. Cada cuenca de caídas de bloques posee una zona de llegada de bloques que corresponde al área de acumulación de los mismos. La delimitación de las zonas de llegada se realiza en base a las observaciones realizadas sobre el terreno y, a la simulación de la caída de bloques mediante un modelo analítico-numérico. En la figura 1 se expone la individualización a modo de cuencas realizada en el área de estudio.

Un objetivo de la individualización es asignar a cada cuenca una distribución volumétrica característica de los bloques rocosos, agrupando las estaciones volumétricas (discontinuidades, fotografías y bloques separados de substrato rocoso) en la zona de salida, y las parcelas volumétricas (areales y lineales) en la zona de llegada realizadas en una misma cuenca (tabla I).

TABLA 1

Parcelas volumétricas	Mediana	Porcentajes acumulados de los volúmenes					Volumen máximo
		25%	50%	75%	90%	99%	
S1	0,5	0,037	0,125	0,37	0,76	13	17,1
S2	0,25	0,027	0,066	0,17	0,44	3,8	9,3
S3	0,2	0,037	0,084	0,23	0,38	2,4	3,4
S4	0,68	0,037	0,11	0,27	0,8	14,7	46,3
S5	0,57	0,069	0,17	0,47	1,15	7,1	11,6
S6	0,32	0,05	0,1	0,22	0,45	5	15,4
P1	12,6	0,54	2,5	11,8	33,2	116,2	116,2
P2	5,7	0,3	1,5	3	7,5	117	117
P3	14,7	2	6,7	17	33	115	115
P4	13,2	2,8	7	16,2	35	77	77
B1	1,3	0,07	0,3	1,3	3,2	15	15,1
D	9,7	2	9	10	20	100	250
Zona de llegada	0,42	0,04	0,1	0,2	0,63	6,8	46
Zona de salida	12	1,5	3,7	11	26,3	108	250
Volumen corregido	-	0,3	0,8	2,4	5,8	27	86,8

Datos estadísticos de las parcelas de medida de los volúmenes de los bloques en los canchales (S), de los estimados en el sustrato rocoso mediante la separación de las familias de discontinuidades (D), de las estaciones fotográficas (P) y de los medidos en los bloques separados del sustrato rocoso (B). También se representan las distribuciones volumétricas de los bloques en las zonas de salida y llegada, obtenidos a partir de la integración de los datos anteriores, así como la distribución de los bloques que pueden llegar al lugar en donde se prevee instalar las protecciones (volumen corregido). Los valores están dados en m³.

Un segundo objetivo es diferenciar, en la zona de salida de cada cuenca, los sectores de las vertientes rocosas con mayor probabilidad de caer bloques (Figura 1). La identificación de estos sectores se realiza en base a la cartografía de los indicadores geomorfológicos de caída de bloques (cicatrices, bloques inestables, etc.) (Altimir, Amigó y col., 1998a) y del análisis de estabilidad de las vertientes (Hoek and Bray, 1981). La identificación de estos sectores más inestables es básico para los cálculos de la simulación de caída de bloques, ya que es necesario determinar con precisión los puntos de salida de los bloques rocosos.

LA DISTRIBUCIÓN VOLUMÉTRICA DE LOS BLOQUES ROCOSOS QUE PUEDEN LLEGAR A LA LÍNEA DE PROTECCIÓN

Gran parte de los edificios expuestos a la caída de bloques rocosos, se encuentran contruidos en los canchales o bien, en sectores de los canchales que anteriormente a su urbanización estaban colonizados por vegetación arbórea. La distribución volumétrica de los bloques rocosos que puede llegar a una protección, ha de ser similar a la que se encontraría en las acumulaciones de bloques situadas más abajo de la misma.

Como las protecciones se sitúan cerca de los edificios y terrenos a proteger, escasas son las ocasiones en que ha sido posible realizar parcelas volumétricas más abajo de las mismas, disponiendo solamente de los datos volumétricos de las parcelas realizadas más arriba.

Para saber si la distribución de los volúmenes de los bloques medidos más arriba de la línea de protección, puede ser la misma de la que puede haber más abajo, se han realizado las parcelas lineales volumétricas siguiendo la pendiente máxima de los canchales (véase la figura 3). Las parcelas lineales indican que, a grandes rasgos, los bloques aumentan de volumen hacia el fondo del valle, por lo que la distribución volumétrica de los bloques que pueden llegar a la línea de protección, puede ser ligeramente mayor a las distribuciones volumétricas de los bloques medidos en las parcelas realizadas más arriba. Por este motivo, hace falta corregir las distribuciones volumétricas de los canchales, correspondientes a los bloques caídos y detenidos antes de llegar a las protecciones.

Se ha definido como *volumen corregido* a la distribución volumétrica de los bloques que pueden llegar a las protecciones (Altimir, Amigó y col., 1998b). Esta distribución es ligeramente superior a los volúmenes caídos medidos en los canchales, con el objetivo de tener una seguridad en los cálculos volumétricos realizados, siempre teniendo en cuenta los volú-

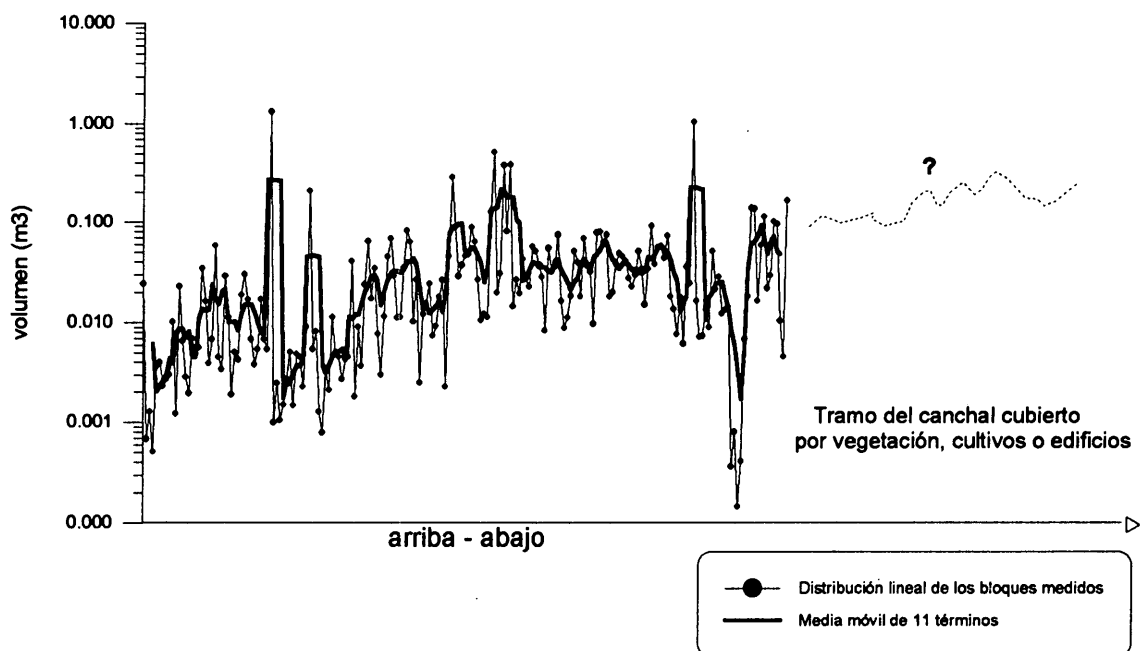


Figura 3. Volúmenes de los bloques medidos a lo largo de un trazado lineal que sigue la máxima pendiente de un canchal. Obsérvese como existe una ligera tendencia de aumentar el volumen de los bloques hacia el fondo del valle. Los puntos representan los volúmenes de los bloques medidos, mientras que la línea de trazado grueso es la mediana móvil de 11 términos.

menes de los bloques en su punto de partida. Esta corrección se realiza según la fórmula:

$$V_c = \frac{4V_t + V_v}{5}$$

en donde V_c es el volumen corregido, V_t es el volumen de los bloques de los canchales y V_v el volumen de los bloques estimados en el sustrato rocoso (zona de salida).

Aplicando esta corrección, la distribución volumétrica del volumen corregido estará situada entre la distribución volumétrica de los canchales y la observada en el sustrato rocoso (véase la figura 4). Dando un peso cuatro veces mayor a la distribución volumétrica de los canchales ($4V_t$) respecto a la distribución volumétrica de la vertiente rocosa (V_v), la distribución del volumen corregido es un 20% más grande que la de los canchales.

La distribución volumétrica corregida ha sido comparada con una parcela situada inusualmente por debajo de la línea de protección, observándose que la corrección realizada obtiene volúmenes ligeramente superiores a los que pueden pasar a través de la línea de protección, dando una cierta validez empírica a la fórmula aplicada.

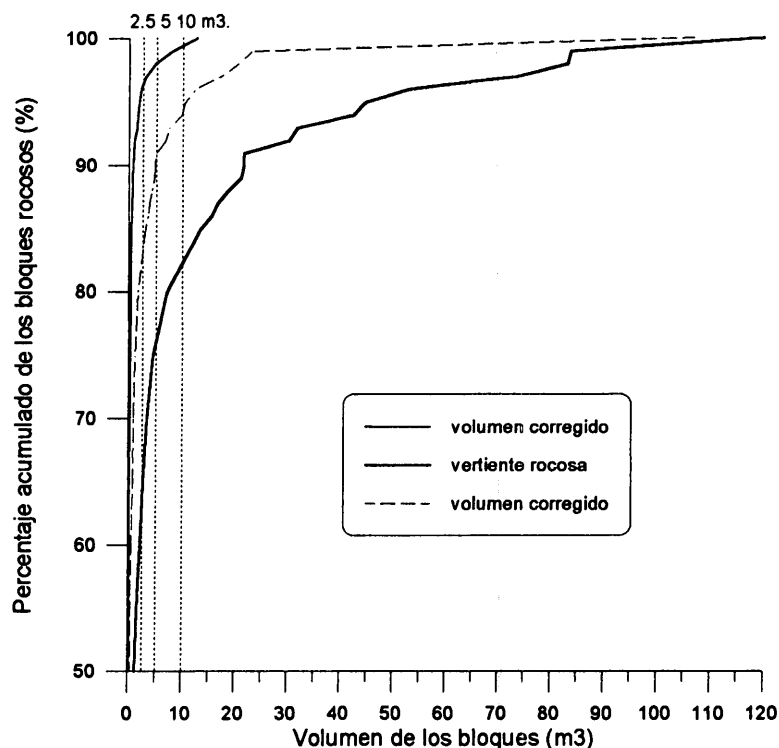


Figura 4. Curvas de las distribuciones volumétricas acumuladas de los bloques de los canchales, del sustrato rocoso y del volumen corregido de una determinada cuenca. La curva del volumen corregido se encuentra entre las curvas de los volúmenes de los canchales y del sustrato rocoso, estando más cerca de la curva de los canchales.

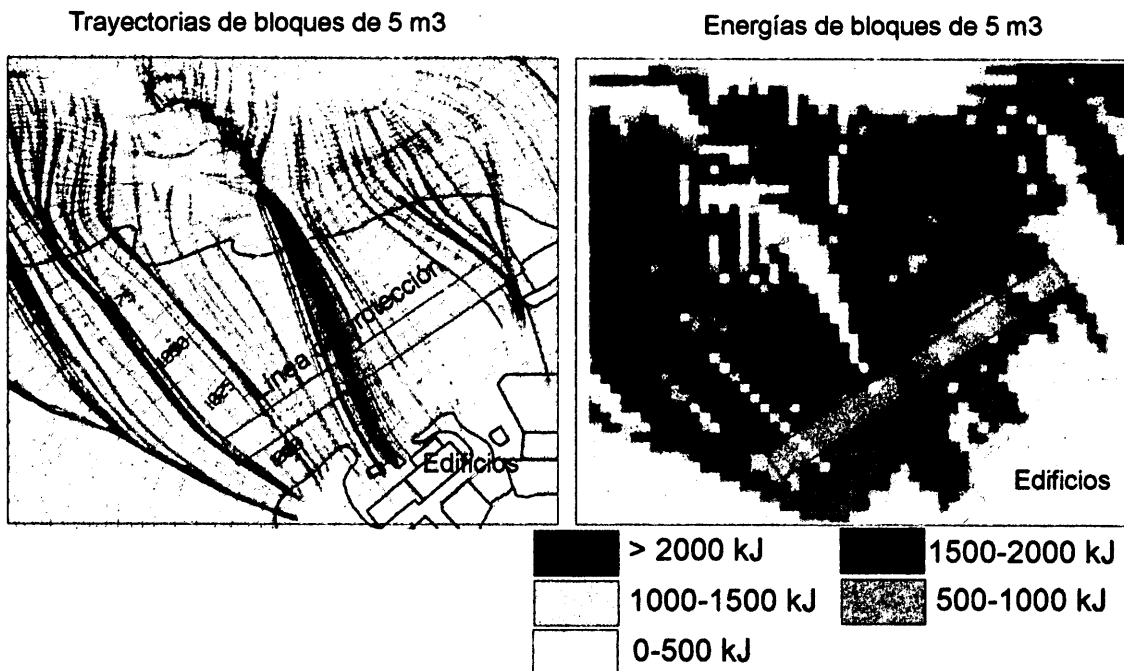


Figura 5. Ejemplo de la simulación de caída de bloques. Esta simulación está representada en 3-dimensiones en una base topográfica a escala 1:5000. Los resultados de la simulación son las trayectorias seguidas por los bloques, las energías y rebotes a lo largo de su recorrido.

En la tabla I se presenta la distribución estadística del volumen corregido a partir de las parcelas y estaciones volumétricas tomadas como ejemplo.

EL PROGRAMA DE SIMULACIÓN

El modelo de simulación de caída de bloques es un método de cálculo analítico y numérico, basado en las reglas físicas de la dinámica y la cinemática, que reproduce el proceso de la caída de bloques en una vertiente. Dados los complejos cálculos físicos que se utilizan para reproducir la caída de los bloques (Hacar Benítez, 1988; Lopez Carreras *et al.*, 1988; Gili Ripoll y Gutierrez Montagut, 1992), el modelo realiza sus cálculos mediante un programa informático, desarrollado por el ingeniero Javier Ruiz Gordillo, propiedad del Grupo Europrojet.

Para el correcto funcionamiento del modelo de simulación, es necesario que las condiciones naturales del terreno estén representados numéricamente. Por este motivo, el modelo necesita unos parámetros de entrada que son la base topográfica en formato digital (MDT), los volúmenes de los bloques a simular (que en este caso han sido de 0'5, 1, 2'5, 5 y 10 m³) (Altimir, Amigó y col. 1998b), la elección en el mapa topográfico de las zonas de salida de los bloques en base al análisis geomorfológico previo, las condiciones del terreno según su tipología (afloramiento de substrato rocoso, suelo poco potente, canchal y suelo muy potente), rugosidad y vegetación (Zinggeler, A. 1989; Gsteiger, 1989; Krummenacher B. y Keusen H.R., 1997), y la calibración del cálculo realizado a caídas de bloques reales acontecidas recientemente (Altimir, Amigó y col., 1988a).

Los resultados del modelo se han presentado en 3-dimensiones, en mapas topográficos a escala 1:5000, (Krummenacher B. y Keusen H.R., 1996, 97). Cada mapa representa las trayectorias de los bloques, las energías y los rebotes (saltos efectuados) a lo largo del recorrido, para un volumen de bloque determinado (ver ejemplo de la figura 5) (Altimir, Amigó y col., 1998b).

LAS ENERGÍAS DE LOS BLOQUES EN LA LÍNEA DE PROTECCIÓN

El lugar escogido para instalar las protecciones han sido en los terrenos situados al lado de los edificios a proteger, ya que éstos presentan una buena accesibilidad, y es el lugar en donde los bloques presentan una menor energía antes de llegar a los edificios vulnerables según la simulación (obsérvese la figura 5). De este modo, las protecciones se dispondrán de modo lineal entre los edificios a proteger y la zona de salida de bloques, formando así una línea de protección (véase la figura 1).

Cuando los bloques llegan a la línea de protección prevista, éstos pueden presentar diferentes energías dependiendo de su masa y de la velocidad a que llegan. El programa de simulación utiliza cinco valores diferentes de masa correspondientes a los bloques de 0'5, 1, 2'5, 5 y 10 m³ de volumen. Como la velocidad de los bloques depende de las condiciones del terreno, de la topografía, y de la altura a que se encuentran los diferentes puntos de salida de bloques respecto la línea de protección, para cada volumen simulado se obtendrá una distribución de energías en la línea de protección prevista.

TABLA II

Volumen de bloque simulado	Porcentajes acumulados de volúmenes corregidos (P_n)	Volúmenes corregidos cubiertos ($P_n - P_{n-1}$)	Casos retenidos según la simulación (R_n)	Estimación de las caídas retenidas
0,5 m ³	57%	57%	100%	57%
1 m ³	72%	15%	100%	15%
2,5 m ³	83%	11%	95,70%	10,53%
5 m ³	91%	8%	88,40%	7,10%
10 m ³	94,50%	3,50%	60,60%	2,12%
>10 m ³	100%	5,50%	0%	0%
Eficacia de la protección de 2000 kJ (E_p):				91,75%

Cálculo de la eficacia de una protección (E_p) de 2000 kJ tomada como ejemplo. En la primera columna se representan los cinco volúmenes utilizados para la simulación de la caída de bloques. En la segunda columna se presentan los porcentajes acumulados (o percentiles) (P_n) de volúmenes corregidos que tienen volúmenes inferiores o iguales a los volúmenes simulados. En la tercera columna se presentan los porcentajes de volúmenes corregidos que son representados por cada uno de los cinco volúmenes simulados ($P_n - P_{n-1}$). En la cuarta columna se presentan los porcentajes de casos retenidos por cada uno de los volúmenes simulados (R_n). Finalmente, en la quinta columna se obtiene la estimación de caídas retenidas para cada uno de los volúmenes, obtenidos a partir de la calibración de los resultados de la simulación (cuarta columna) mediante la distribución real de bloques rocosos (segunda y tercera columna).

En la figura 6 se presenta un ejemplo gráfico de la distribución de las energías de los bloques de 0,5, 1, 2,5, 5 y 10 m³ de volumen, en un segmento de la línea de protección de la zona de estudio, situadas en la calle Mestre Xavier Planas d'Andorra la Vella (Altimir i Amigó, 1999). Mediante este gráfico, se puede estimar el número de casos de caídas de bloques simulados, que por energías, pueden ser retenidos por una protección con una energía máxima de absorción determinada (línea vertical). Variando la energía máxima de absorción de la protección, i por tanto, la posición de la línea vertical en el gráfico, variará el porcentaje de casos retenidos.

En el caso presentado en la figura 6, que toma como ejemplo una protección de 2000 kJ de energía máxima de absorción, se puede observar que ésta retiene, por energías, todos los bloques de 0.5 y 1 m³ de volumen, ya que todos ellos presentan una energía menor a 2000 kJ. En cambio, un 95.7% de los bloques de 2.5 m³ tendrán una energía menor a 2000 kJ, mientras que el 4.3% restante tendrán una energía superior, por lo que no podrán ser retenidos por la protección propuesta. Para el caso de los volúmenes de 5 y 10 m³, serán retenidos el 88.4% y el 60.6%, respectivamente, de los casos simulados. Estos datos son presentados en la cuarta columna de la tabla II.

porcentajes retenidos según la simulación con la distribución volumétrica de los bloques que pueden llegar a ella (volumen corregido). Esta calibración tiene como objetivo tener en cuenta la distribución volumétrica real de los bloques rocosos que pueden llegar a las protecciones, ya que el programa de simulación solo tiene en cuenta la caída de cinco volúmenes de bloques, sin importar realmente la representación que tienen estos volúmenes con los bloques reales que pueden caer.

Para realizar esta calibración, primero se determinan los porcentajes de volúmenes corregidos que son representados para cada uno de los volúmenes simulados (0.5, 1, 2.5, 5 y 10 m³) y de los mayores a 10 m³, que se obtienen a partir de las diferencias entre los porcentajes acumulados (percentiles) de volúmenes corregidos que presentan los diferentes volúmenes simulados (véase en la tabla II un ejemplo). Posteriormente, se multiplican los porcentajes de volúmenes corregidos representados para cada uno de los volúmenes simulados, por los porcentajes, en tanto por uno, de los casos de cada volumen simulados que son retenidos por la protección. La suma de los porcentajes retenidos por la protección según los cinco volúmenes simulados es igual a la eficacia de la protección (véase en la tabla II un ejemplo de este cálculo). Numéricamente, la eficacia de la protección se obtiene según la expresión:

$$E_p = \sum_{n=0.5}^{10} ((P_n - P_{(n-1)}) \times R_n)$$

$$n = 0.5, 1, 2.5, 5 \text{ y } 10.$$

EL PORCENTAJE DE CAÍDAS DE BLOQUES QUE PUEDEN SER RETENIDAS POR LAS PROTECCIONES: EFICACIA DE UNA PROTECCIÓN

El porcentaje de caídas de bloques que pueden ser retenidos por una determinada protección se obtiene calibrando los

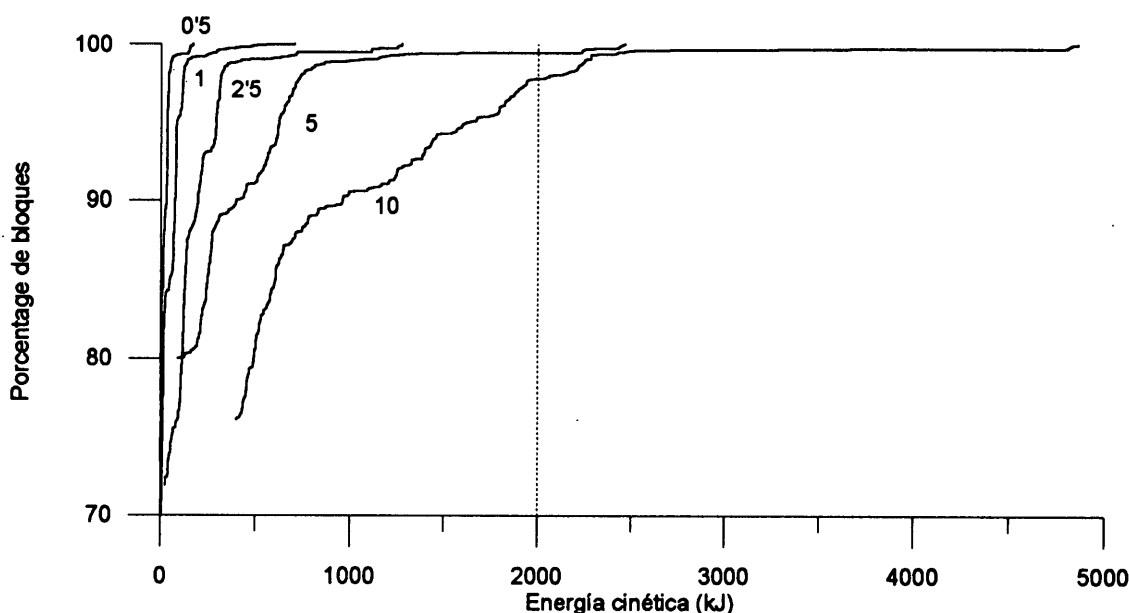


Figura 6. Gráfico en donde se expone las energías, según la simulación, que presentan los bloques de 0'5, 1, 2'5, 5 y 10 m³ en el lugar en donde se prevee instalar las protecciones (línea de protección). En ordenadas se tiene representados el porcentaje de caídas que llegan a las protecciones con unas determinadas energías, los valores de estas energías se encuentran representadas en el eje de abscisas.

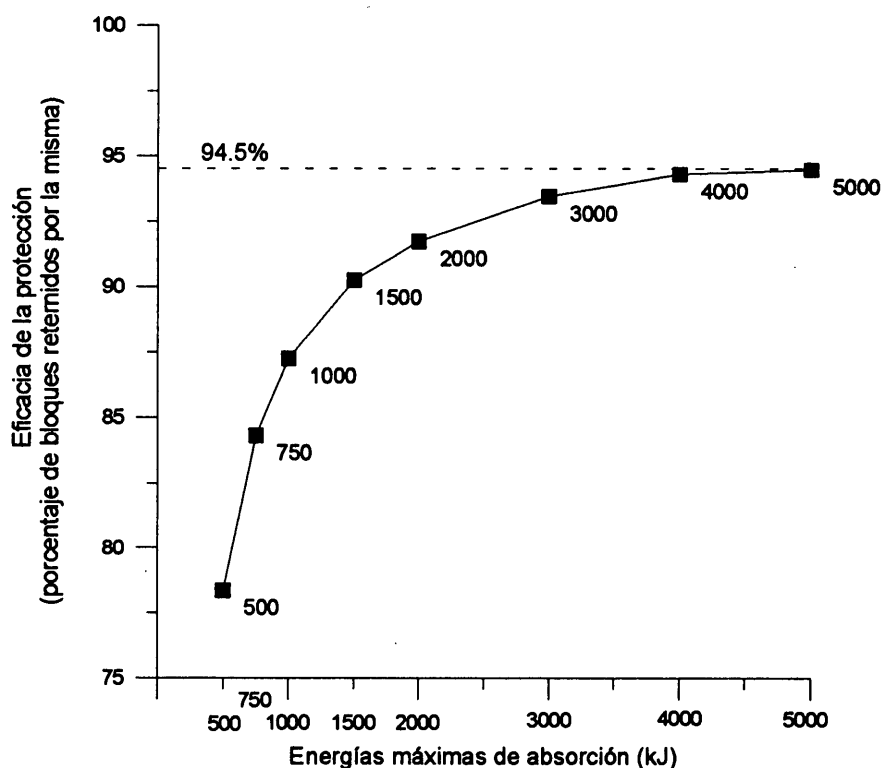


Figura 7. Gráfico de las eficacias de las protecciones (eje de ordenadas) según las energías máximas de absorción de 500, 750, 1000, 1500, 2000, 3000, 4000 y 5000 kJ (eje de abscisas). La eficacia de la protección es el porcentaje de caídas de bloques que pueden ser detenidos por la protección antes de llegar a un terreno protegido. La línea discontinua que indica el 94.5 % representa el limite en la estimación de la eficacia, ya que el 5.5% restante corresponde a volúmenes superiores a 10 m³, los cuales no pueden ser simulados mediante el programa de simulación de caída de bloques.

en donde E_p es la eficacia de la protección, P_n es el porcentaje acumulado, o percentil, de volúmenes corregidos representados por el volumen simulado n , y R_n es el porcentaje de casos simulados de un determinado volumen (0.5, 1, 2.5, 5 y 10 m³) detenidos por la protección. P_n se obtiene mediante cálculos estadísticos. R_n se obtiene a partir de la simulación, contabilizando las caídas simuladas que presentan una energía inferior a la energía de absorción de la protección en el lugar en donde se prevee instalar la misma.

Para el caso de caídas de bloques superiores a 10 m³, la simulación efectuada no presenta datos suficientemente precisos, debido a que la simulación se efectúa mediante un bloque de masa puntual, por lo que los bloques con volúmenes mayores a 10 m³ poseen un radio excesivamente grande para obtener datos precisos. Por tanto, la eficacia estimada de una protección no tendrá en cuenta la caída de bloques con volúmenes superiores a 10 m³, siendo ligeramente inferior a la real.

LA ELECCIÓN DE LA ENERGÍA MÁXIMA DE ABSORCIÓN PARA LA PROTECCIÓN

Para elegir la conveniente energía máxima de absorción de una protección situada en una determinada cuenca y posición, se han calculado las eficacias de diferentes tipos de protecciones con diferentes energías de absorción (Figura 7).

Las energías máximas de absorción representadas son las correspondientes a 500, 750, 1000, 1500, 2000, 3000 kJ. Estas energías corresponden a las energías utilizadas por los ensayos de campo (Duffi, J.D., 1992; Gerger und Boll, 1993) realizados en suiza por empresas diseñadoras de barreras dinámicas, bajo la supervisión de las autoridades (Baumann, 1999). En el caso de Andorra la Vella, en algunos sectores, la línea de protección presenta suficiente espacio disponible en el terreno para poder instalar diques, los cuales pueden aumentar la energía de absorción de hasta 10000 kJ (Descœudres, 1997; Altimir, Amigó y col. 1998b), o bien, dos líneas de barreras dinámicas que aumentan la energía de absorción del sistema de protección (Altimir, Amigó y col., 1999), por tanto, se ha representado también las eficacias para protecciones con energías máximas de absorción de 4000 i 5000 kJ. Las estimaciones de las eficacias realizadas en protecciones con energías de absorción mayores a 5000 kJ han sido muy imprecisas, ya que los bloques con volúmenes superiores a 10 m³ son los que suelen pasar a través de las mismas, las energías y los rebotes de los mismos no han podido ser efectuados con suficiente exactitud mediante el programa de simulación.

En la figura 7 se representa la eficacia de protecciones con las ocho energías anteriormente expuestas (500, 750, 1000, 1500, 2000, 3000, 4000 y 5000 kJ). En este gráfico se puede observar que, para barreras con energías máximas de absorción inferiores a 2000 kJ, sus eficacias aumentan notablemente al aumentar sus energías máximas de absorción. No obs-

tante, para barreras con energías máximas de absorción superiores a 2000 kJ, sus eficacias no difieren en grandes valores entre unas barreras y otras con diferentes energías máximas de absorción.

Obsérvese también que la eficacia de la protección tiende a un valor límite, que en el caso presentado es alrededor del 94.5%, ya que es el umbral límite de la eficacia estimada, ya que el 5.5% restante corresponde a bloques superiores a 10 m³, los cuales no pueden ser calculados mediante el programa de simulación.

La energía de absorción adecuada de la protección a instalar se obtiene a partir de un gráfico de eficacias para diferentes energías máximas de absorción. La energía máxima de absorción adecuada es la que todas las energías mayores a ella no presentan una mejora significativa en la eficacia, en cambio, para energías menores se observa una pérdida significativa en la eficacia. En el ejemplo de la figura 7, esta inflexión entre el aumento notable y poco notable de la eficacia, estaría situado entre los 1500 y 2000 kJ de energía, por lo que éstas serían las energías máximas de absorción adecuadas para las barreras a instalar.

En el caso de Andorra la Vella, cuando el elemento a proteger presenta una gran importancia económica y social, como son viviendas, colegios u hospitales, si las condiciones del terreno lo permiten, se han instalado protecciones con energías máximas de absorción lo más grandes posibles, que llegan a ser de 5000 y 6000 kJ. Estas energías se obtienen construyendo diques o instalando dos líneas de barreras dinámicas. Mediante la metodología propuesta en el presente trabajo, la eficacia estimada en estas protecciones de gran energía de absorción (>5000 kJ), será significativamente menor a la eficacia real que éstas puedan tener.

CONCLUSIONES

Se ha definido como eficacia de una protección contra la caída de bloques al porcentaje de caídas que pueden ser retenidas por la misma. Este porcentaje depende de la energía que presentan los bloques rocosos en el lugar en donde se prevee instalar la protección y de la energía máxima de absorción de la protección. Las energías de los bloques dependen de la masa de los bloques (o volumen) y de la velocidad que éstos presentan en el lugar en donde se prevee instalar la protección.

La distribución volumétrica de los bloques que pueden llegar a las protecciones, al que se ha denominado volumen corregido, se obtiene aplicando un factor de corrección a la distribución volumétrica de los bloques medidos en los canchales (zona de llegada de bloques), según la distribución de los bloques estimados en las vertientes rocosas (zona de salida). Aplicando esta corrección, la distribución volumétrica del volumen corregido será ligeramente mayor a la distribu-

ción volumétrica de los bloques en los canchales (un 20%) y claramente inferior a la de las vertientes rocosas (un 80%).

Para determinar la energía cinética de los bloques rocosos en el lugar en donde se prevee instalar las protecciones (línea de protección), se ha utilizado el modelo analítico-numérico de simulación de caída de bloques del Grupo Europrojet. Este modelo calcula las trayectorias de los bloques, las energías y los saltos de los bloques de 0.5, 1, 2.5, 5 y 10 m³ de volumen, en una base topográfica (MDT) a escala 1:5000.

Mediante cada uno de los cinco volúmenes simulados se ha obtenido una distribución de valores de energía en el lugar en donde se prevee instalar las protecciones. Mediante estos rangos de energías se ha determinado el número de casos simulados que pueden ser retenidos por una protección de energía máxima de absorción determinada. Los casos simulados retenidos por la protección son calibrados a partir de la distribución volumétrica de los bloques que pueden llegar a las protecciones (volumen corregido), con la finalidad de obtener el porcentaje de casos de caídas de bloques que pueden ser retenidos por la protección, siendo este porcentaje la eficacia de la protección.

La estimación de la eficacia de la protección, o porcentaje de caídas de bloques retenidas por la misma, será siempre inferior o igual a la real. Como el programa de simulación de caídas de bloques no puede simular bloques con volúmenes superiores a 10 m³, se ha considerado que todos ellos pasan a través de la protección, sea cual sea su energía máxima de absorción. Con esta simplificación, los resultados de la eficacia estimada se acercaran más al lado de la seguridad.

La elección de la energía de la protección se obtiene mediante la representación de las eficacias para diferentes energías máximas de absorción de las protecciones. Las eficacias estimadas han sido para las energías de 500, 750, 1000, 1500, 2000, 3000, 4000 y 5000 kJ. La energía máxima de absorción idónea de la protección es la que no hay una mejora significativa de la eficacia para energías de absorción mayores, por otro lado, para energías de absorción menores existe una pérdida significativa de la eficacia. Para proteger elementos con un alto grado de importancia económica y social, tales como viviendas, colegios u hospitales, se aconseja que las energías máximas de absorción de las barreras sean lo más altas posibles, estas energías dependerán del espacio disponible para su instalación y de las condiciones del terreno. En el caso de Andorra la Vella, se ha propuesto instalar barreras dinámicas con energías máximas de absorción situadas entre los 1500 y 2000 kJ, cuando el elemento a proteger ha sido una vivienda o colegio, se ha propuesto instalar una barrera con una energía máxima de absorción lo más alta posible, mediante diques o dos líneas de barreras dinámicas, según las condiciones y espacio de terreno disponible, llegando a obtener entre los 5000 y 6000 kJ de energía máxima de absorción.

AGRADECIMIENTOS

El presente artículo ha sido posible gracias a los estudios sobre la caída de bloques y a los proyectos de protecciones en Andorra la Vella, realizados a petición del Ministeri d'Ordenament Territorial (Govern d'Andorra) y del Honorable Comú d'Andorra la Vella.

Bibliografía

- Altimir, J., Amigó, J. i col·laboradors (1998a): *Pla Director enfront la caiguda de blocs rocosos a la Solana d'Andorra la Vella*. Estudi pel Comú d'Andorra la Vella (Andorra). Euroconsult, S.A., Eurogeotècnica, S.A., Universitat de Barcelona, 350p. + 151 mapes.
- Altimir, J., Amigó, J. i col·laboradors (1998b): *Proteccions enfront la caiguda de blocs rocosos a la Solana d'Andorra la Vella* (Estudi de vessant), zona Bon Repós-col·legi Janer-Abocador comunal. Estudi pel Govern d'Andorra. Euroconsult S.A., Eurogeotècnica, S.A., 125 pp. + 21 mapes.
- Altimir, J., Amigó J. i col·laboradors (1999): *Proteccions enfront la caiguda de blocs rocosos a la Solana d'Andorra la Vella* (Estudi de vessant), zona carrer Mestre Xavier Plana – carrer Font del Puial. Estudi pel Govern d'Andorra. Euroconsult S.A., Eurogeotècnica, S.A., 131 pp. + 21 mapes.
- Altimir, J., Amigó, J., Vilaplana, J.M., Copons, R. (1999): *Informe de la inspecció de la Solana d'Andorra la Vella amb helicòpter, vol nº2 (2/2/99)*. Informe pel Govern d'Andorra. Euroconsult S.A., Eurogeotècnica S.A., Universitat de Barcelona, 73 pp. + 1 mapa.
- Baumann, R. (1999): Homologation of rockfall protection systems in Switzerland. *Seminar on rockfall test and standardization* (Geobruigg Switzerland, org.), Davos, Suiza, 25-26 enero.
- Descoeudres, F. (1997): Aspects géomécaniques des instabilités de falaises rocheuses et des chutes de blocs. En: *Instabilités de falaises rocheuses, chutes de blocs et ouvrages de protection*, Publications de la Société suisse de Mécanique des Sols et des Roches, Réunion d'automne, Montreux.
- Duffi, J.D. (1992): Field tests of flexible rockfall barriers, Report for Geobruigg Fatzer AG, Romanshorn, 135 pp..
- Gerber, W.; Boll A. (1993): Massnahmen zum Schutz gegen Rutschungen und Steinschlag. In: Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (Hrsg.): *Naturgefahren*, Forum für Wissen: 33-38.
- Gili Ripoll, J y Gutierrez Montagut, J. (1992): Aplicación de un modelo de simulación de caída de bloques rocosos a casos reales, III Simposio Nacional sobre taludes y laderas inestables, La Coruña, 20-23 octubre: 15-27
- Gsteiger P. (1989): Steinschlag – Wald – Relief, Empirische Grundlagen zur teinschlagsimulation. Geographischen Institut der Universität Bern. Trabajo de diplomatura.

- Hacar, M.A., Hacar, F. y García-Arango, I. (1988): Estudio dinámico de los desprendimientos y bases de cálculo de los sistemas de protección, II Simposio nacional sobre taludes y laderas inestables: 235-255.
- Hoek, E. and Bray (1981): Rock Slope Engineering (third edition). Institution of Mining and Metallurgy. London: 309pp.
- Jaboyedoff, M., Philipposian, F., Mamin, M., Marro, Ch. Et Rouiller, J.D. (1996): *Distribution spatiale des discontinuités dans une falaise. Approche statistique et probabilistique*. Rapport de travail PNR31. Hochschulverlag AG, ETH Zurich.
- Krummenacher, B. und Keusen H.R. (1997): Steinschlag-Sturzbahnen – Modell und Realität, Steinschlagmodellierung mit Hilfe der Computersimulation, En: *Instabilités de falaises rocheuses, chutes de blocs et ouvrages de protection*, Publications de la Société suisse de Mécanique des Sols et des Roches, Réunion d'automne, Montreux.
- Krummenacher, B y Keusen, H.R. (1996): Rockfallsimulation and Hazard Mapping based on Digital Terrain Model (DTM), *European Geologist*, 12/1996.
- Lopez, C., Ruiz J. y Riera, M. (1988): Análisis del movimiento de bloques y optimización de las posibilidades de protección. II Simposio sobre taludes y laderas inestables, Andorra la Vella, pp. 269-281.
- Lopez, C., Ruiz, J., Amigó, J. y Altimir, J. (1997): Aspectos metodológicos del diseño de sistemas de protección frente a las caídas de bloques mediante modelos de simulación cinemáticos, IV Simposio nacional sobre taludes y laderas inestables, Granada, pp. 811-823.
- Rouiller, J. D. et Marro C. (1997): Application de la méthodologie "MATTEROCK" à l'évaluation du danger lié aux falaises, *Eclogae geol. Helv.*: 393-399.
- Wyllie, D. and Norrish, N. (1996): Stabilization of rock slopes, En: *Landslides, investigation and mitigation* (Turner, A.K. and Schuster, R., Eds.), Special report 247, Transportation Research Board, National Academy Press, Washington.
- Zinggeler, A. (1989): Die Modellierung der Steinschlaggefahr in Gebirgswäldern. Geographischen Institut der Universität Bern. Trabajo de diplomatura. ■