

PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA ZONIFICACIÓN DE LA AMENAZA POR CAÍDA DE ROCAS EN PROYECTOS LINEALES

(Methodological approach for the zoning of the rock fall hazard in lineal projects)

Albeiro de Jesús Rendón Rivera*, Joan Manuel Vilaplana Fernández**

*Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Colombia, arendonr@unalmed.edu.co

**Universidad de Barcelona, Facultad de Geología, Barcelona, España, nue.vilaplana@ub.edu.es

(Recibido el 15 de julio de 2009 y aceptado el 01 de septiembre de 2009)

<p>Resumen: En esta comunicación se muestra una propuesta metodológica para la zonificación de la amenaza por caída de rocas, que puede ser aplicada en proyectos de infraestructura lineales o entornos urbanos. Se basa en un análisis multicriterio, apoyado por una sólida base de datos, que integrados en Arc-Gis/Arc-Info, a través de un índice de amenaza factores como la delimitación de corredores de tránsito de bloques, la cartografía geológico-geomorfológica, la cartografía del índice RMR, la cartografía de la susceptibilidad y el análisis volumétrico de los depósitos de talud, entre otros, permite calcular el índice de amenaza, para cada corredor de tránsito, logrando priorizarlos, para un proceso de gestión del riesgo a corto, mediano y largo plazo.</p> <p>La anterior metodología fue aplicada con buenos resultados en Vall de Nuria, dedicada al turismo de montaña, en los Pirineos Orientales de España, a la que se accede a través de un tren cremallera que recorre un valle glacial cuaternario, modelado en <i>gneises</i>, cuya vía ha sido afectada en varias ocasiones por caída de rocas, poniendo en riesgo a las personas que se movilizan en el tren y afectando el servicio comercial.</p>	<p>Abstract: In this communication it is showed a methodological approach for the zoning of the threat of rock falling, which may be applied in projects of lineal infrastructure or urban environments. It is based on a multicriteria analysis that is supported by a solid base of data and that integrated in Arc-Gis/Arc-Info by an index of threat factors like the delimitation of the corridors of block transit, geological-geomorphologic cartography, cartography of RMR index, cartography of the susceptibility, and the volumetric analysis of talus deposits amongst others, allows to calculate for each transit corridor the index of threat, prioritize achieving for a process of risk management in short, medium and long term.</p> <p>The above mentioned methodology was applied with good results in Vall de Nuria that is devoted to mountain tourism, located in the eastern Pyrenees of Spain, and has its access by rack railway that crosses a quaternary glacial valley modeled in gneisses, and whose railway line has been affected several times by rock falling, putting passengers in risk and affecting the commercial service.</p>
<p>Palabras clave: amenaza por caída de rocas, susceptibilidad, gestión del riesgo, cartografía geotécnica, Vall de Nuria.</p>	<p>Keywords: rock fall hazard, susceptibility, risk management, geotechnical cartography, Vall de Nuria.</p>

1. INTRODUCCIÓN

Vall de Nuria es un centro turístico de deportes de montaña, ubicado a 1.963 m.s.n.m., en un valle glacial de los Pirineos Orientales, en España (Ver figura 1), por donde circula un tren cremallera, único medio de transporte terrestre, que conduce a una estación de montaña.

Desde la década de los años ochenta, en el archivo de incidencias de la empresa Vall de Nuria se tienen registros de caídas de rocas sobre la vía del tren, que han interrumpido el servicio comercial, poniendo en riesgo no sólo a los usuarios, sino también a la infraestructura de la vía. Estos desprendimientos se hicieron más frecuentes a inicios de la década del 2000, siendo particularmente importantes los registrados en el año 2003, por los daños causados.

La estrategia para enfrentar esta problemática desde el momento en que empezó a presentarse, consistió en evaluaciones puntuales en los alrededores del sitio donde se producía el desprendimiento, lo que conducía -por lo general- a la construcción de obras para la mitigación del riesgo puntual, tipo pantallas dinámicas o mallas

metálicas, para el anclaje de los bloques en el sitio.

Esta estrategia para enfrentar la problemática, no permitía establecer un programa de gestión del riesgo con énfasis en la prevención, en el que se tuviera un panorama relativamente claro de cómo priorizar áreas para la intervención, teniéndose la posibilidad de distribuir los recursos a invertir en el corto, mediano y largo plazo.

A raíz del incremento en los desprendimientos durante la década del 2000, se ve la necesidad de tener una visión global de la problemática, por parte de la empresa, con el fin de formular y ejecutar un programa de gestión del riesgo, por etapas. Es así que se celebra un convenio de cooperación interinstitucional entre Vall de Nuria, la Universidad de Barcelona y el Ministerio de Ciencia y Tecnología de España, con el fin de adelantar un estudio del fenómeno de caída de rocas a lo largo del valle del río Nuria, que condujera a la elaboración de un instrumento técnico que permitiera la toma de decisiones en la orientación de la inversión disponible en la empresa para el componente de gestión del riesgo. Esta propuesta metodológica surge en el marco de ese convenio, a través de una tesis de doctorado en Ciencias de la Tierra en la Universidad de Barcelona.



Figura 1. Localización área de estudio, y subdivisión en zonas.

2. MARCO GEOLÓGICO

La zona de estudio se encuentra ubicada en la parte axial de los Pirineos Orientales, aflorando varias unidades de roca, depósitos de diferente tipología y trazas de algunas fallas (ver figura 2).

En el sector occidental afloran los ortogneises del Canigó y del Freser, con foliación irregular y ondulada, de aspecto granítico y edad Precámbrica. Por su parte, en el sector oriental, ocupando el 95% del área estudiada y descansando sobre los anteriores, se encuentran los paragneises de la Formación Carancá, bandeados de grano grueso y textura gneísica cataclástica, de edad Cámbrica. Finalmente, en el extremo norte afloran los micaesquistos de origen pelítico de la Formación Canavelles, con intercalaciones calcáreo-dolomíticas, niveles grafitosos y cuarcíticos, que descansan sobre la Formación Carancá y a los que se les atribuye una edad Cambro-Ordovícica por correlación lito-estratigráfica (Santanach, 1972).

A lo largo del Vall del río Nuria, reposando en las vertientes, se encuentran depósitos de talud, correspondiendo a acumulaciones de derrubios de gneises o esquistos, angulosos, heterométricos y heterogéneos, testimonio de la dinámica de caída de rocas en la zona. Por otra parte, también se encuentran depósitos poligénicos y mixtos, conformados por materiales aluviales, lacustres, de talud y antrópicos, que no es posible diferenciar.

Las rocas que afloran en Vall de Nuria y sus alrededores, han sido sometidas a varias fases de deformación, originando en las rocas cizallamiento, diaclasamiento y plegamiento. Para Santanach (1972), estas estructuras son de la tectónica pirenaica, reportando en el norte de la zona de estudio la Falla de Nuria, de tipo normal, con dirección noroeste-sureste y buzamiento medio hacia el noreste, que pone en contacto los gneises con los esquistos. Se observan, además, pequeñas estructuras de

cabalgamiento, generando zonas de cizalla entre 1 a 3 metros de ancho, originándose fracturamiento y plegamiento en las rocas. Las tres unidades de rocas existentes están afectadas por dos familias de diaclasas y la foliación, principalmente, que coinciden aproximadamente en dirección y buzamiento, controlando el desprendimiento de bloques.

Geomorfológicamente Vall de Nuria es un valle estrecho, con dirección predominante norte-sur y con vertientes escalonadas en escarpes. Es un valle en forma de “U”, en el extremo norte y sector central, y forma de “V” en el resto del valle. Además, se observan valles colgados en los afluentes que drenan sus aguas al río Nuria. Estas características morfológicas evidencian dos morfogénesis superpuestas: de un lado, los valles colgados y las secciones en “U” del valle evidencian una morfogénesis glacial, mientras que los grandes escarpes con control estructural son el resultado de los desprendimientos de bloques, proceso geomorfológico dominante en la actualidad.

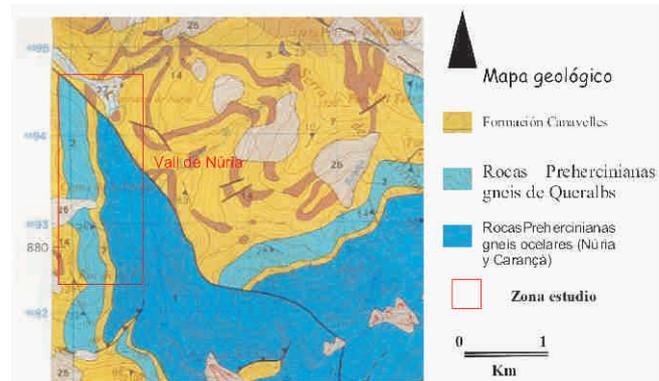


Figura 2. Mapa geológico de los alrededores de la zona de estudio (Instituto Geológico Geominero de España, 1994)

3. METODOLOGÍA

En los últimos años han aparecido, en la literatura, varias propuestas metodológicas para evaluar y cartografiar la peligrosidad de los desprendimientos en laderas naturales: Mateos *et al.* (2001) utiliza un análisis estadístico y de algoritmos para interpolar información recogida puntualmente en el campo y/o generada automáticamente a partir del modelo digital del terreno. Copons (2004), Rendón *et al.* (2004), Baillifard *et al.* (2003), Corominas *et al.* (2003), Parise (2002), Hearn y Griffiths (2001), Hoek (2000), Rouiller *et al.* (1998) y Rouiller y Marro (1997), proponen metodologías basadas en el análisis multicriterio.

Por su parte, Trujillo *et al.* (2004), Meibl (2001) y Budetta y Santo (1994) presentan varios análisis de peligrosidad basados en simulaciones de caídas de rocas. En esta comunicación se presenta una metodología basada en el análisis multicriterio, en el que el concepto del experto, a

través del trabajo de campo realizado, juega un papel preponderante. A continuación describiremos los principales elementos de la metodología, que se observan en las figuras 3 y 4.

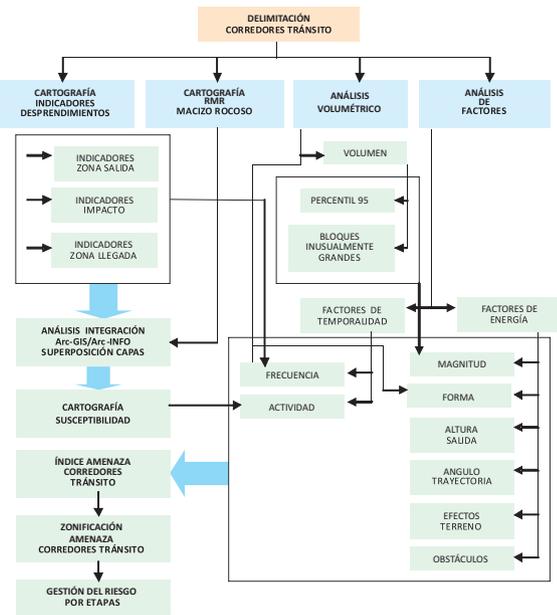


Figura 3. Síntesis de la metodología para la cartografía de la peligrosidad de las caídas de rocas y la priorización de corredores de tránsito para la gestión del riesgo.

La primera etapa de la metodología consiste en subdividir el área estudiada en corredores de tránsito (ver figura.1), que serán la unidad geomorfológica básica para la zonificación de la amenaza. El corredor de tránsito se define como una porción de la vertiente, claramente delimitable por sus características morfológicas, en la que se observan indicadores de desprendimientos recientes. Estas zonas deben tener como límites elementos morfológicos distintivos, que por lo general coinciden con vaguadas o vertientes homogéneas (p.e. escarpes).

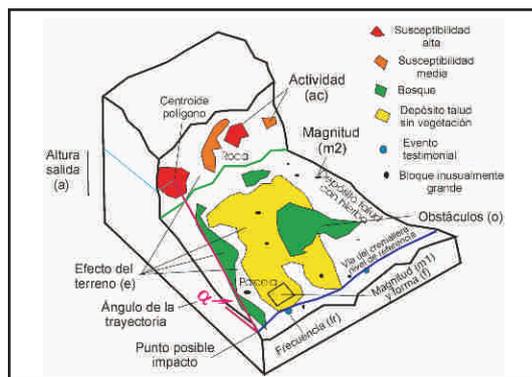


Figura 4. Bloque diagrama de los factores constitutivos de la amenaza por caída de rocas.

Una segunda etapa consiste en cartografiar como capas temáticas los indicadores de caídas recientes en las áreas fuente, que están representados por dos tipos: (a) los cambios de coloración de las paredes rocosas (colores

más claros o color salmón) y (b) la presencia de elementos morfológicos tales como diedros y techos desprovistos de líquenes. Estos indicadores de caídas recientes se interpretan como nichos de arranque reciente de bloques (ver figura5).

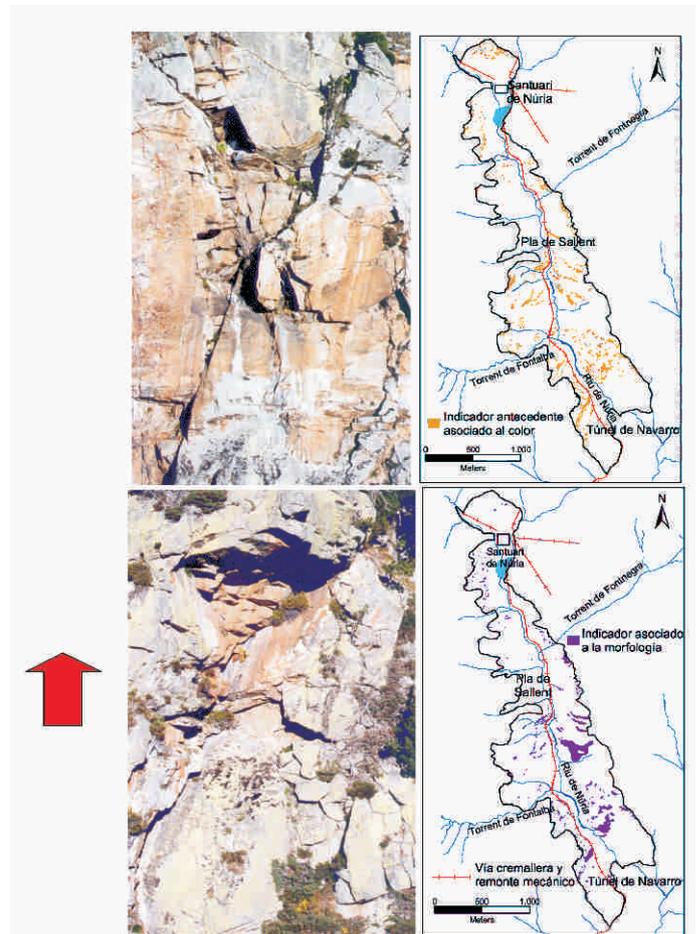


Figura 5. Indicadores geomorfológicos de desprendimientos recientes asociados al color (arriba) y a la morfología del escarpe (abajo).

También se cartografían otros indicadores de caídas recientes, como impactos en el suelo, árboles e infraestructuras, surcos, depósitos de talud sin vegetación, bloques individuales y eventos testimoniales, que sirven para validar la cartografía de susceptibilidad y la zonificación de la amenaza.

Las características geomecánicas del macizo rocoso se interpretan en esta metodología como un indicador de potencialidad de desprendimientos futuros. Se asume la metodología del RMR básico (*Rock Mass Rating*) propuesto por Bieniawski (1993) para determinar las diferentes categorías de calidad del macizo rocoso.

En la determinación del RMR básico, primero se hace una caracterización y cartografía visual de la calidad del macizo rocoso, estableciéndose varias categorías de acuerdo con los siguientes criterios geotécnicos de las discontinuidades: densidad de fracturación, abertura, meteorización, presencia de agua, evidencia de

movimientos antecedentes y bloques libres. Una vez se tenga esta zonificación de campo, para cada una de las categorías identificadas se selecciona al menos una estación geomecánica representativa de esa categoría, a la cual se le hace el cálculo del RMR básico, tal como lo propone Bieniawski (1993). Finalmente, una vez se tienen los cálculos del RMR básico de las estaciones geomecánicas piloto para cada una de las categorías identificadas en campo, se asigna a cada área de la misma categoría el valor del RMR básico de su estación geomecánica representativa. (ver figura. 6).

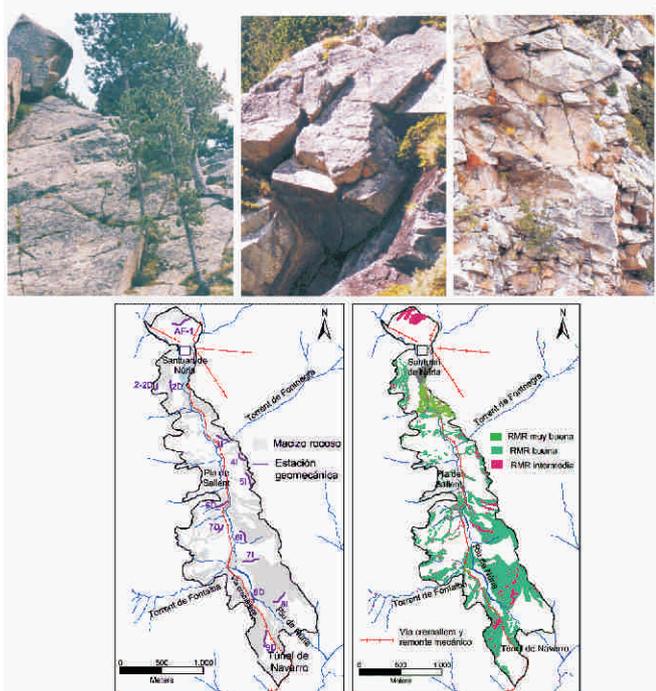


Figura 6. Clases de categorías de calidad del macizo rocoso, identificadas en Vall de Núria (arriba), selección estaciones para cálculo del RMR (abajo-izquierda) y cartografía RMR (abajo-derecha).

El análisis volumétrico de los depósitos de talud es la siguiente etapa, muy importante en la metodología propuesta (ver figura 3), ya que ellos contienen parte de la historia de los desprendimientos ocurridos en el área de estudio, sobre todo en lo relacionado con los volúmenes más frecuentes, que de cierto modo pueden ser una medida indirecta de la magnitud de los eventos.

Se selecciona para cada zona un depósito de talud que tenga su sector distal desprovisto de vegetación y sin alteración antrópica. Se realizan conteos de volúmenes y formas en parcelas que oscilan entre $25 \times 25 \text{ m}^2$ y $10 \times 10 \text{ m}^2$ de área. Se calcula para cada parcela el percentil 95 y la forma más frecuente. Posteriormente, se hace un inventario, en toda la zona, de los bloques mayores o iguales al percentil 95 de la parcela correspondiente; a dichos bloques los llamaremos “bloques inusualmente grandes”, a los cuales se les calcula la media aritmética, dato que utilizaremos en la evaluación de la amenaza (Rendón *et al.*, 2004) (ver figuras 3 y 4).

Posteriormente a las etapas ya descritas, se cartografían el resto de capas temáticas que tienen incidencia en el análisis de la amenaza (ver figura 7): tipo de material en la vertiente y zonas cubiertas con bosque; una vez desprendidos los bloques, éstos empiezan a descender por la vertiente, variando en todo momento su energía de impacto, debido a su interacción con los materiales constitutivos de la vertiente, donde actúan las fuerzas de fricción y de rebote. En Vall de Núria se identifican tres tipos de materiales de la vertiente, que inciden en la energía de los bloques: roca, suelo y depósitos de talud sin vegetación. Por otro lado, los bloques también encuentran obstáculos en su descenso por la vertiente, que inciden en su contenido energético. En Vall de Núria, el bosque es el principal obstáculo al movimiento de los bloques. Finalmente, las caídas que han afectado la vía del tren y que se encuentran en el archivo de la empresa se consideran un indicador de la frecuencia más reciente de desprendimientos en cada uno de los corredores de tránsito.

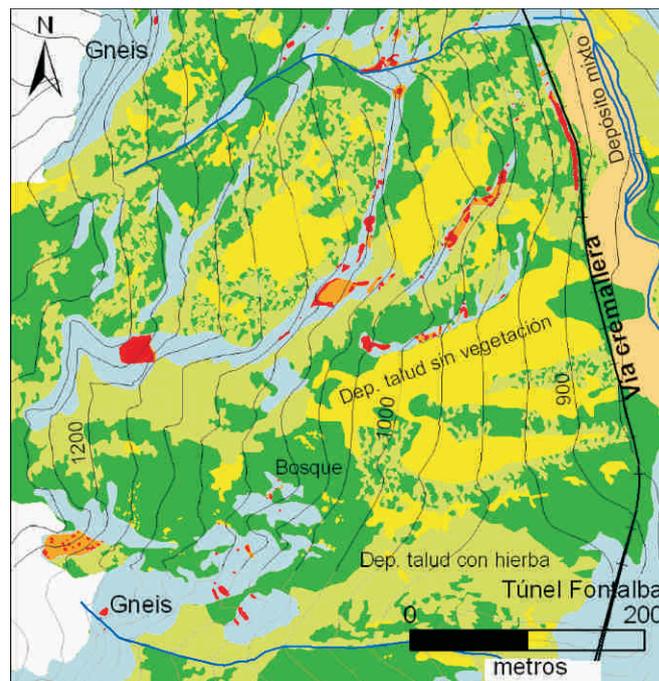


Figura 7. Cartografía temática como base para la zonificación de la amenaza.

Toda la información cartográfica y numérica de las etapas anteriores se integra en ArcGis/ArcInfo, para iniciarse posteriormente el análisis mediante operaciones algebraicas, a través de algoritmos.

4. RESULTADOS OBTENIDOS

El primer resultado importante al aplicar la metodología propuesta consiste en generar el mapa de susceptibilidad a los desprendimientos de rocas (Ver figura. 8), que se construye mediante una suma algebraica de las capas temáticas correspondientes a indicadores de desprendimientos recientes, asociados al color y

morfología del escarpe, con las capas del RMR del macizo rocoso. En este análisis se le asigna un peso mayor (el doble) al RMR del macizo rocoso, con respecto a los indicadores geomorfológicos de caídas recientes, estableciéndose tres rangos de susceptibilidad: alta, media y baja (Rendón y Vilaplana, 2004).

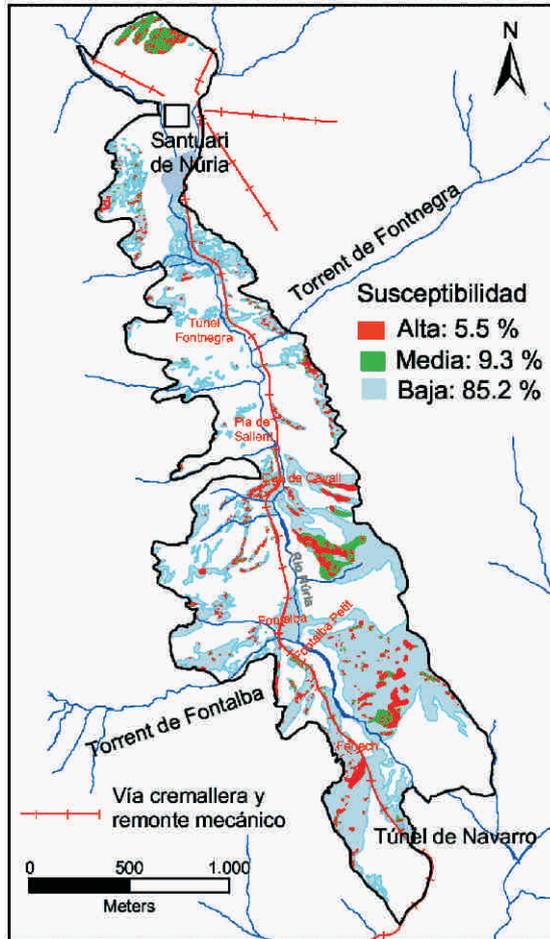


Figura 8. Cartografía de la susceptibilidad a los desprendimientos de rocas.

La cartografía de la susceptibilidad a los desprendimientos del macizo rocoso se utiliza para calcular otros factores necesarios de la metodología: (a) La sumatoria de las áreas de alta y media susceptibilidad se considera la actividad de las áreas fuente de los desprendimientos y (b) Los centroides de los polígonos de alta y media susceptibilidad se utilizan para calcular la altura de salida del material y el ángulo de la trayectoria de los bloques, que es una simplificación de la pendiente media de los corredores de tránsito (Ver figura 4). Para cada corredor de tránsito, y mediante un algoritmo que se diseña en ArcInfo, se hace un cálculo del valor de sus respectivos factores.

Una vez calculados todos los factores para cada uno de los corredores de tránsito, se procede a evaluar la amenaza, según un índice de amenaza (Ia), construido con base en el conocimiento del fenómeno del área de estudio:

$$Ia = [\text{Factores asociados a la energía}] + [\text{Factores asociados a la temporalidad}]$$

$$Ip = [m1 + m2 + f + a + a - e - o] + [ac + fr]$$

Donde m1 corresponde al percentil 95 del volumen de los bloques medidos en la parcela del corredor de tránsito; m2, al promedio aritmético de los bloques inusualmente grandes en el corredor de tránsito; f, a la forma de los bloques (cúbicos, irregulares, tabulares); a, a la altura de salida de los bloques (centroide de los polígonos de alta y media susceptibilidad; a, al ángulo de la trayectoria de los bloques en la vertiente; e, al material constitutivo de la vertiente (roca, suelo, pastos); o, a los obstáculos (bosque); ac, a la actividad total de área, con susceptibilidad media y alta, del corredor de tránsito, y fr, a la frecuencia de caída de rocas sobre la vía.

La conversión del índice de amenaza en un algoritmo en ArcGis, así como el establecimiento de cuatro rangos de categorías, aplicado a los diferentes corredores de tránsito, da como resultado la zonificación de la amenaza, lo que se convierte en el criterio técnico que permite formular un plan de gestión del riesgo por etapas (Ver figura 9).

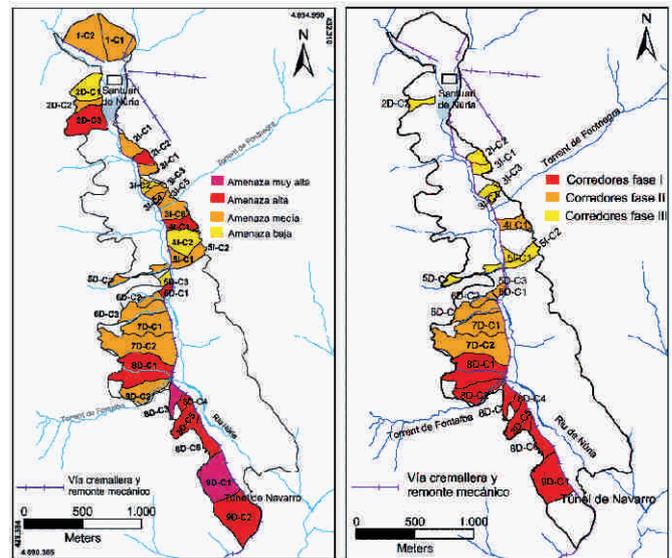


Figura 9. Zonificación de la amenaza por caída de rocas, a lo largo de la vía del tren cremallera de Vall de Nuria (izquierda) y priorización de áreas para la gestión del riesgo (derecha).

5. CONCLUSIONES

La evaluación y zonificación de la amenaza según el $Ia = [m1 + m2 + f + a + a - e - o] + [ac + fr]$ da resultados coherentes con la problemática de caída de rocas observada en Vall de Nuria en los últimos años, y puede ser la base para la priorización de áreas para la gestión de la prevención y mitigación del riesgo. Los pesos que se asignan a los factores constitutivos de peligrosidad dependen del detalle del trabajo de campo, por lo que son específicos para cada zona de estudio.

El concepto del índice de amenaza (Ia) es una herramienta conceptual útil, en la primera fase de recolección y análisis de información básica, para comprender mejor el fenómeno de desprendimientos en una región y proyectar, en el tiempo, acciones posteriores con un adecuado soporte técnico. La metodología posee como limitaciones: (a) La dificultad, en algunos casos, para acceder a las diferentes zonas de interés, en la toma de los datos necesarios al cálculo del RMR; (b) El análisis volumétrico de los depósitos de talud no se corrige por fragmentación del volumen inicialmente desprendido; (c) No se conoce la edad relativa, de los indicadores de desprendimientos recientes asociados al color de la pared; (d) Se reemplaza el factor de la pendiente del corredor de tránsito, por el factor del ángulo de la trayectoria, y (e) No se considera la susceptibilidad al alcance. Como fortalezas de la metodología, se pueden anotar: (a) Requiere una recolección detallada de toda la información, generando una sólida base de datos; (b) La evaluación y cartografía de la susceptibilidad se sustenta en un gran volumen de información de campo, y (c) La formulación conceptual en la evaluación de la amenaza con el índice de amenaza (Ia) es de fácil aplicación.

6. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha financiado en el marco de los proyectos REN-RIES 2000-0518 del Ministerio de Ciencia y Tecnología de España y del SGR 2001-00081 de la Generalitat de Catalunya. Los autores agradecen el apoyo logístico, humano y técnico recibido en todo momento por la empresa Vall de Nuria.

7. REFERENCIAS

- Baillifard, F.; Jaboyedoff, M., y Sartori, M. (2003). Rockfall hazard mapping along a mountainous road in Switzerland using a GIS-based parameter rating approach. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 3, pp. 431-438.
- Bieniawski, Z. T. (1993). Classification of rock masses for engineering. The RMR system and future trends. En: J. Hudson (ed.), *Comprehensive rock engineering*, Pergamon. Vol. 3, pp. 553-574.
- Budetta, P. y Santo, A. (1994). Morphostructural evolution and related kinematics of rock falls in Campania (southern Italy): a case study. *Engineering Geology*, 36, pp. 197-210.
- Copons, R. (2004). *Avaluació de la perillositat de caigudes de blocs a Andorra la Vella (Principal d'Andorra)*. Tesis doctoral, Universitat de Barcelona, 244 p.
- Corominas, J.; Copons, R.; Vilaplana, J. M.; Altimir, J., y Amigó, J. (2003). Integrated landslide susceptibility analysis and hazard assessment in the Principality of Andorra. *Natural Hazards*, 30, pp. 421-435.
- Hearn, G. I. y Griffiths, J. S. (2001). Landslide hazard mapping and risk assessment. En: J. S. Griffiths (ed.), *Land surface evaluation for engineering practice*. The Geological Society Special Publication 18, London, pp. 43-52.
- Hoek, E. (2000). Analysis of rockfall hazards. En: E. Hoek, *Practical rock engineering*, course notes chapter 9, University of Toronto, www.rockeng.utoronto.ca/hoek-corner.htm. pp. 115-136.
- Instituto Geológico Geominero de España (1994). Mapa geológico de España: Molló 218. 37-10 (1: 50000). Ed. Master's Gráfico S.A, Madrid.
- Meibl, G. (2001). Modelling the run out distances of rock falls using a geographic information system. *Zeitschrift für geomorphologie, suppl. Bull.*, 125, pp. 129-137.
- Mateos, R. M.; Ferrer, M., y González de Vallejo, L. J. (2001). Metodología para el análisis de la peligrosidad por movimientos de ladera. Aplicación en la zona de Sóller (Mallorca). *Memorias del V Simposio Nacional sobre taludes y laderas inestables*, Madrid, 2001, Vol. I., pp. 355-366.
- Parise, M. (2002). Landslide hazard zonation of slopes susceptible to rock falls and topples. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2, pp. 37-49.
- Rendón, A. y Vilaplana, J. M. (2004). Propuesta para evaluar y cartografiar la susceptibilidad a los desprendimientos en laderas naturales. *Geotemas*, 6(1), pp. 359-362.
- Rendón, A.; Vilaplana, J. M., y Copons, R. (2004). El análisis volumétrico de los depósitos de talud: una etapa en la evaluación de la peligrosidad por desprendimientos. En: G. Benito y A. Díez Herrero (Ed). *Riesgos naturales y antrópicos en geomorfología*. Memorias de la VIII Reunión Nacional de Geomorfología, Toledo-España, 2004, Vol. II., pp. 413-421.
- Rouiller, J. D.; Jaboyedoff, M.; Marro, Ch.; Philippossian, F., y Mamin, M. (1998). *Pentes instables dans le penique valaisan*. Ed. Hochschulverlag AG an der ETH, Zurich, 239 p.
- Rouiller, J. D. y Marro, Ch. (1997). Application de la méthodologie «MATTEROCK» á l'évaluation du danger lié aux falaises. *Eclogae Geologiae Helveticae*, 90, pp. 393-399.
- Santanach, P. (1972). Estudio tectónico del Paleozoico Inferior del Pirineo, entre La Cerdeña y el río Ter. Tesis doctoral, Facultad de Ciencias, Universitat de Barcelona, 238 p.
- Trujillo, J.; Hernández, I.; Martínez, A. y Durán, G. (2004). Análisis del riesgo por desprendimiento en el municipio de Santa Cruz de Tenerife. En: G. Benito y A. Díez Herrero (Ed). *Riesgos naturales y antrópicos en geomorfología*. Memorias de la VIII Reunión Nacional de Geomorfología, Toledo-España, 2004, Vol. II, pp. 347-354.