

Tendencias en técnicas para el análisis del riesgo por desprendimiento de rocas en taludes viales

Tendências em técnicas para análise de risco de desprendimento de rochas
em taludes rodoviários

Trends in techniques for analyzing the risk of rockfall
on road embankments

**Roberto José Torres Hoyer¹, Jackeline Coromoto Peña Suárez², Ricardo Picón Rodríguez³,
Wilmer José Barreto⁴ y Jesús Alberto Torres Hoyer¹**

¹ Universidad Católica de Temuco, Facultad de Ingeniería, Centro de Investigación GEOKIMÜN;
Universidad de Los Andes, Grupo de Investigación de Geología Aplicada (GIGA), Mérida, Venezuela

² Universidad Católica de Temuco, Facultad de Ingeniería, Depto de Obras Civiles y Geología, Temuco, Chile

³ Universidad Católica de Temuco, Facultad de Ingeniería, Centro de Investigación GEOKIMÜN; Universidad
Centro Occidental 'Lisandro Alvarado' (UCLA), Depto de Estructuras, Decanato de Ingeniería Civil
Barquisimeto, estado Lara, Venezuela

⁴ Universidad Católica de Temuco, Facultad de Ingeniería, Centro de Investigación GEOKIMÜN; Universidad
Centro Occidental 'Lisandro Alvarado' (UCLA), Depto de Hidráulica y Sanitaria, Decanato de Ingeniería Civil
Barquisimeto, estado Lara, Venezuela
Quito Ecuador

rtorres@uct.cl; jpena@uct.cl; rpicon@cct.cl; wbarreto@uct.cl; j.torres@uct.cl

Torres R: <https://orcid.org/0000-0002-3701-2561>

Peña: <https://orcid.org/0000-0001-6025-6428>

Picón: <https://orcid.org/0000-0001-6356-7360>

Barreto: <https://orcid.org/0000-0002-1861-0742>

Torres J.: <https://orcid.org/0000-0002-3573-8350>

Resumen

Los derrumbes o caídas de rocas son un problema constante para los ingenieros viales, es por ello que se realiza esta revisión de la literatura existente, en cuanto a la estimación y modelación del riesgo por impacto de rocas a vehículos en carreteras, abordando en primer lugar los temas referentes a la amenaza por desprendimiento de rocas, entre los que destacan las condiciones geotécnica; así como lo asociados con la vulnerabilidad, tanto de la infraestructura como de los vehículos. Para la realización de este estudio del estado del arte del riesgo, las metodologías analizadas utilizan diferentes tipos de mediciones en terreno, así como simulaciones numéricas y estadísticas que determinan el grado de amenaza. Las diferentes metodologías utilizadas para el análisis o estimación del riesgo se enfocan en la amenaza y pocas están orientadas a estimar la vulnerabilidad.

PALABRAS CLAVES: riesgo; amenaza; caída de rocas; vulnerabilidad.

Resumo

Os deslizamentos ou quedas de rochas são um problema constante para os engenheiros rodoviários; por isso, é realizada esta revisão da literatura existente sobre a estimativa e modelagem do risco de impacto de rochas em veículos nas rodovias. A revisão aborda inicialmente os temas relacionados à ameaça de desprendimento de rochas, destacando-se as condições geotécnicas, bem como os aspectos associados à vulnerabilidade, tanto da infraestrutura quanto dos veículos. Para a realização deste estudo do estado da arte sobre o risco, as metodologias analisadas utilizam diferentes tipos de medições em campo, bem como simulações numéricas e estatísticas que determinam o grau de ameaça. As diferentes metodologias utilizadas para a análise ou estimativa do risco concentram-se na ameaça, e poucas estão voltadas para a estimativa da vulnerabilidade.

PALAVRAS-CHAVE: risco; ameaça; queda de rochas; vulnerabilidade.

Abstract

Rockfalls or rock collapses are a constant problem for road engineers; this is why this review of the existing literature is carried out regarding the estimation and modeling of the risk of rock impacts on vehicles on highways. The review first addresses topics related to rockfall hazard, highlighting geotechnical conditions, as well as those associated with the vulnerability of both infrastructure and vehicles. For the development of this state-of-the-art study on risk, the methodologies analyzed use different types of field measurements, as well as numerical and statistical simulations that determine the level of hazard. The various methodologies used for risk analysis or estimation focus on the hazard, and few are oriented toward estimating vulnerability.

Keywords: risk; hazard; rockfall; vulnerability.

1. Introducción

La infraestructura vial es esencial para el desarrollo de un país, por lo que el estudio del desprendimiento de rocas (caídas o vuelcos) en las laderas adyacentes a las carreteras ha ido cobrando importancia debido al diseño o trazado de carreteras en áreas geomorfológicamente complejas, lo que representa riesgos tanto para la infraestructura como para los usuarios.

En los diseños geométricos de carreteras, los taludes tienen pendientes donde es común encontrar deslizamientos locales y procesos de degradación que describen una falla en el mismo, la cual puede verse afectada de diversas maneras dependiendo de la presencia o ausencia de agua, temperatura, actividad sísmica o parámetros geomecánicos de las rocas, aumentando el riesgo de desprendimiento de rocas.

Por ende, esta revisión bibliográfica se presenta para definir un estado del arte, que constituye una herramienta de análisis del riesgo en todos sus niveles, desde detectar la amenaza producida por taludes inestables, así como de la vulnerabilidad (Hernández y Ramírez, 2016), con el objetivo de establecer una línea base de las diversas metodologías existentes, junto con una revisión de antecedentes (Guevara, 2016) para el análisis del riesgo por desprendimiento de rocas en las pendientes de taludes o laderas a los costados de las carreteras.

En los últimos 10 años, no ha habido una revisión bibliográfica que recopile todos los métodos desarrollados hasta la fecha con respecto al análisis de riesgos (*Risk Analysis*) que consiste en el estudio del peligro (de la amenaza), tratando de cuantificar las informaciones, mediante la correlación de la probabilidad de ocurrencia de eventos peligrosos con la probabilidad de consecuencias indeseables, estimando los daños y realizando estudios de vulnerabilidad (Ogura y Macedo, 2002). Sin embargo, existen estudios relacionados con el análisis de riesgos en carreteras que, al ser recopilados, analizados y resumidos, pueden indicar el estado actual en cuanto a la modelización de riesgo de desprendimientos de rocas en carreteras, contribuyendo a identificar

las necesidades y tendencias relacionadas con este importante tema.

Ferrari *et al.* (2016) mencionan que los fenómenos de desprendimiento de rocas representan un gran peligro en áreas montañosas porque pueden causar daños graves a la infraestructura y edificaciones, así como lesiones graves o fatalidades. Aunque los desprendimientos de rocas no representan el mismo nivel de riesgo económico que los deslizamientos de tierra a gran escala, son responsables de una cantidad similar de accidentes y fatalidades. Por lo tanto, es necesaria una planificación adecuada del uso del suelo para proteger a las personas, edificaciones e instalaciones de los peligros de desprendimientos de rocas. En las últimas dos décadas, se han propuesto varias metodologías para analizar los peligros de desprendimientos de rocas, identificar áreas potencialmente peligrosas (es decir, acantilados con bloques propensos a fallar) y proporcionar pautas para la evaluación del riesgo.

Briones *et al.* (2020), en 'Investigación sobre Desprendimientos de Rocas: Análisis Bibliométrico y Tendencias Futuras', llevaron a cabo un estudio cuantitativo de la literatura científica, utilizando métodos matemáticos y estadísticos para analizar la producción, difusión y uso de la información sobre desprendimientos de rocas, que involucró un total de 811 publicaciones, 1.293 autores, 267 revistas, 54 países, 158 instituciones y 1598 palabras clave de diferentes autores. Es por esto que procedimos a realizar este análisis del estado del arte con las diversas metodologías analizadas y generar la correspondiente hermenéutica para la revisión bibliográfica en profundidad.

Guevara (2016) señala que una indagación de nuevos sentidos, trasciende el nivel descriptivo de los datos para establecer nuevas relaciones de interpretación entre las categorías del objeto de estudio, en nuestro caso las tendencias de análisis de riesgo en vialidades. Con tal propósito, se esboza una aproximación conceptual del estado del arte, su génesis y su definición; y como planteamiento central se propone una

investigación alternativa. En este sentido, se sugiere avanzar en el campo teórico y metodológico del estado del arte como propuesta de una mirada crítica a estrategias metodológicas.

2. Metodologías

Uribe y Páramo (2013) realizan una propuesta metodológica que consiste en una revisión de lo publicado en el área de investigación que se alinea con procesos rigurosos de formulaciones lógicas y documentación relevante que, en nuestro caso, se limita a desprendimientos de rocas desde laderas de carreteras y su impacto en las vías, mediante procesos inductivos de recopilación y sistematización de datos, y una interpretación deductiva enmarcada bajo principios epistemológicos y metodológicos.

Elementos comunes en las metodologías analizadas incluyen, por un lado, la amenaza o peligro, que implica desprendimientos de rocas y, por el otro, la vulnerabilidad que tiene en cuenta el daño que los desprendimientos de rocas pueden causar a nivel humano, económico o de infraestructura vial, para consolidarse en la ecuación descrita por la ONU del riesgo asociado con los desprendimientos de rocas en pendientes de carreteras.

El análisis de las diferentes metodologías se lleva a cabo evaluando modelos existentes, relacionados con el peligro y la vulnerabilidad de desprendimientos de rocas en pendientes, estableciendo en última instancia, una sección sobre la modelización del riesgo de impacto de rocas en las carreteras.

2.1 Metodologías para analizar la amenaza por caída de rocas

Los autores consultados presentan un conjunto de clasificaciones y criterios empleados en la literatura para evaluar la amenaza por desprendimiento de rocas, de acuerdo con las características específicas de la pendiente analizada. Por ejemplo, Arango y Echeverri (2014) aplican en su estudio metodologías geomecánicas como el *Rock Mass Rating* (RMR) de Bieniawski (1973, actualizado en 1979 y 1989) y el índice Q propuesto por Barton (1974).

Belandria *et al.* (2017) incorpora además el índice geológico GSI de Hoek, Marinos y Benissi (1995), complementando el análisis con proyecciones estereográficas y el cálculo del factor de seguridad de las pendientes mediante el software *RocLab*. Este enfoque, respaldado por las leyes de la física que rigen los desprendimientos de rocas, permite una evaluación más objetiva de la estabilidad. Cabe señalar que varias de estas clasificaciones geomecánicas también se encuentran sistematizadas en el libro Ingeniería Geológica de Vallejo González *et al.* (2002), incluyendo el RQD de Deere (1964) y las recomendaciones de la ISRM (1981). Este análisis es respaldado por las leyes de la física que rigen los desprendimientos de rocas, ayudándose con el software *RocLab*. Amigó *et al.* (2005) parametriza todas las variables, asignando valores que reflejan el riesgo estimado para cada sección.

Anguas (2012) plantea como objetivo desarrollar un sistema de gestión de riesgos que identifique los sitios donde ocurren con mayor frecuencia los desprendimientos de rocas y las causas detrás de tales fallas. Esto implica reconocer las características de la sección, mostrar las características de los cortes de carretera mediante fotografías, anotar al técnico responsable del análisis y caracterizar variables hidrológicas (agua estancada, desagües sobre el talud, agua emanada) y geológicas (tipo de deslizamientos, material esfuerzos).

Suárez (1998), en 'Deslizamientos e Estabilidad de Laderas en Zonas Tropicales', basándose en el trabajo de Kanungo (1993), que propone una zonificación de peligros identificando áreas susceptibles a deslizamientos según la topografía, inventario de deslizamientos, pendientes y características geológicas, geomorfológicas y geotécnicas.

Este mismo autor también asigna calificaciones ponderadas a los parámetros geológicos, una práctica compartida por Hernández y Ramírez (2016), así como otros investigadores que, según su grado de influencia, es evaluado por ingenieros geólogos y geotécnicos. Proponen un sistema de calificación ponderada para la zonificación de peligros que

toma en cuenta varios elementos, como un inventario detallado de deslizamientos pasados y procesos de inestabilidad, una comprensión detallada de los factores que causan la inestabilidad y un análisis de la ocurrencia de la inestabilidad en relación con las condiciones ambientales en el área (Torres-Hoyer *et al.*, 2019).

Lee *et al.* (2021) realiza una clasificación de los datos de desprendimientos de rocas, modela la probabilidad de ocurrencia de desprendimientos de rocas y estima la magnitud de la reducción del riesgo mediante medidas de mitigación. El estudio utiliza 20 años de datos de desprendimientos de rocas recopilados por la Corporación de Autopistas de Corea en 1.215 cortes artificiales a lo largo de la red de carreteras en Corea del Sur. Propone una medida sintética de desprendimientos de rocas que permite comparaciones directas y cuantitativas del riesgo, entre diferentes cortes de pendiente en condiciones mitigadas y no mitigadas y, por otra parte, Li y otros (2019), en Sichuan, China, enfrenta peligros severos para las carreteras por desprendimientos de rocas o deslizamientos después del terremoto Jiuzhaigou Ms 7.0 de 2017. El estudio de campo emplea un vehículo aéreo no tripulado (UAV) e imágenes satelitales para identificar desprendimientos de rocas y deslizamientos de gran tamaño a lo largo de las carreteras. El peligro de desprendimiento de rocas se analiza cualitativamente utilizando la velocidad de vuelo y la altura del dron para el recuento de bloques, seguido de una simulación de desprendimiento de rocas local y regional en 3D. Luego se analiza cuantitativamente para diferentes clases de volúmenes de bloques utilizando la probabilidad de eventos de desprendimiento de rocas, la probabilidad de propagación y la probabilidad espacial.

Hernández y Ramírez (2016) proceden a identificar laderas y pendientes inestables, caracterizándolas mediante inspecciones geotécnicas. Los resultados se relacionan en una base de datos, se verifica la infraestructura que puede verse afectada y se describen los fenómenos en términos de morfología y geometría de la pendiente. El material en el sitio se clasifica, se verifica la presencia de agua y se

establecen los posibles mecanismos de falla de la masa. Esta metodología divide los factores desencadenantes en diferentes categorías y subcategorías, a cada una de las cuales se le asigna un valor que va de 1 a 5, donde 1 corresponde a la subcategoría menos importante como generadora de inestabilidad, y 5 a la más importante.

Londoño-Linares (2017) desarrolla un análisis de susceptibilidad a la ocurrencia de caídas de rocas, entendido como la facilidad con que un fenómeno puede ocurrir sobre la base de las condiciones locales del terreno. En este contexto, clasifica las pendientes como más o menos susceptibles de presentar inestabilidad considerando factores como la pendiente, la litología, el grado de fracturación, el grado de meteorización y la orientación de los planos de discontinuidad. Estos factores permiten zonificar áreas con mayor probabilidad de ocurrencia del fenómeno, lo que constituye un paso previo a los estudios de amenaza y riesgo. De esta manera, el estudio no cuantifica directamente el peligro, sino que aporta al conocimiento de las condiciones que predisponen al terreno a presentar desprendimientos de rocas.

Campero (2015) en 'Vulnerabilidad-Riesgo en Carreteras Locales' analiza el nivel de amenaza de áreas de ladera inestable verificando la frecuencia de caída de rocas de la zona inestable:

Alta frecuencia: 1 evento por año, en 10 años;
Frecuencia media: 2 eventos en 50 años;
Baja frecuencia: 1 evento en 50 años o ninguno.

Otro punto a considerar para el análisis es la energía del impacto de rocas desprendidas de la zona estable, basada tanto en la velocidad como en el volumen del material que cae. Para concluir la evaluación de amenazas, al igual que la Ecuación (1) que es un estudio de la distribución de las intensidades:

$$FAS = (FTPS)(FLPS)(FDPS) \quad Ec. \quad (1)$$

Donde:

FAS: es la evaluación de la amenaza sísmica

FTPS: es el factor de amenaza por tipo de suelo

FLPS: es la amenaza potencial de licuefacción
FDPS: es el factor de amenaza por deformación permanente del suelo.

Se consideran amenazas sísmicas bajas aquellos valores de (FAS) que sean inferiores a 2, moderadas entre 2 y 4, y altas iguales o superiores a 4.

Cees *et al.* (2008) proponen una metodología para la evaluación de la amenaza por desprendimientos de rocas que se organiza en tres pasos. El primero es la identificación de la amenaza, que consiste en determinar el escenario de inestabilidad más probable mediante la caracterización del macizo rocoso, la localización de nichos de desprendimiento y la estimación de volúmenes de roca involucrados. El segundo paso es el análisis de la trayectoria, en el cual se delimitan las áreas potencialmente afectadas por el tránsito de bloques de roca. Dependiendo de la escala de trabajo, se aplican métodos simplificados o simulaciones numéricas trajectográficas, obteniéndose parámetros como la velocidad, la altura de rebote, la energía cinética, la probabilidad de paso y la probabilidad de detención. Finalmente, en la evaluación de la amenaza, se integran la probabilidad temporal de ocurrencia, la probabilidad espacial de impacto y la magnitud definida a partir de la energía de impacto. Este enfoque es coherente con lo planteado por Corominas *et al.* (2003) en el Principado de Andorra y con los tres pasos sugeridos por Suárez (1998) para la gestión del riesgo: definición del alcance, identificación de la amenaza y estimación del riesgo.

Según Howald *et al.* (2017), en su metodología, se centran en el análisis de riesgos y consta de tres pasos:

a) Identificación de la amenaza: esto implica determinar el escenario de inestabilidad más probable, lo que requiere caracterizar la masa de rocas (a través de estudios geomecánicos, calidad de la roca, etc.), con aplicación de herramientas digitales como sistemas de información geográfica, procesamiento digital de imágenes, fotogrametría digital y sistemas de posicionamiento global. Las bases de datos de

inventario de deslizamientos de tierra se han vuelto más accesibles para muchos países y algunas ahora son accesibles a través de Internet. Un inventario de deslizamientos de tierra integral se considera esencial para cuantificar tanto la amenaza como el riesgo de deslizamientos de tierra.

b) En cuanto a los factores ambientales utilizados en la identificación de la amenaza de deslizamientos de tierra, hay una tendencia creciente a depender de capas de datos fácilmente disponibles de fuentes como Modelos Digitales de Elevación e imágenes de satélite. En contraste, se presta menos énfasis a capas de datos que requieren investigaciones detalladas en el campo. El artículo revisa las tendencias en la recopilación de información espacial relacionada con factores ambientales, centrándose en aspectos como Modelos Digitales de Elevación, geología, suelos, geomorfología, uso del suelo y elementos en riesgo, como se puede ver en la FIGURA 1 (Cees, 2008).

c) La zonificación de la amenaza de desprendimientos de rocas es esencial para garantizar la seguridad de las comunidades asentadas al pie de pendientes potencialmente inestables. Esta zonificación puede incluir el efecto de medidas de protección cuando las restricciones de uso de la tierra puedan no ser suficientes para mitigar los peligros. La efectividad real de las medidas debe evaluarse para asegurarse de que puedan cumplir su función, especialmente en aquellos casos en los que las medidas puedan haber estado instaladas en un sitio dado durante años. Este artículo evalúa la efectividad de las medidas de protección contra desprendimientos de rocas y cómo la zonificación de la amenaza puede influir en su correcto funcionamiento. El enfoque presentado se divide en cuatro etapas principales, que incluyen un procedimiento de dos pasos para evaluar la efectividad tanto de las protecciones existentes como de las nuevas. Se basa en una base de datos bastante completa de protección contra desprendimientos de rocas construida para el cantón de Vaud en Suiza, y en las Directrices Federales Suizas para la

zonificación de amenazas; sin embargo, todo el marco metodológico propuesto y las consideraciones relacionadas podrían en principio extenderse a cualquier otro contexto

regional o nacional en el que se utilice una combinación de intensidad y frecuencia para evaluar las amenazas de desprendimientos de rocas.

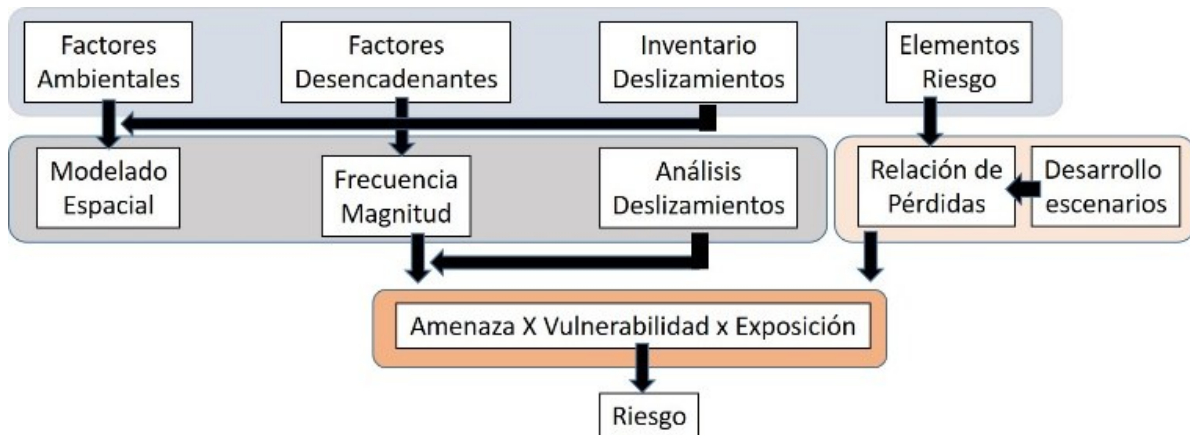


FIGURA 1. Esquema metodológico, modificado de Cees (2008)

2.2 Vulnerabilidad de la vía.

Para complementar el análisis de las diferentes metodologías en la revisión bibliométrica del análisis de riesgos, se examinan propuestas de vulnerabilidad. Por ejemplo, Arango y Echeverri (2014) determinan la vulnerabilidad, que corresponde al grado de pérdida potencial de determinado elemento o grupo de elementos, causada por la ocurrencia de un fenómeno natural de cierta magnitud en un conjunto de elementos, dentro de un rango de pérdida del 0% al 100%. En casos de vulnerabilidad en carreteras, se debe tener en cuenta la cantidad de tráfico vehicular (vehículos/día). Se establece la relación entre la amenaza y la vulnerabilidad para determinar el riesgo presente en las carreteras.

Según Finlay *et al.* (1997), la vulnerabilidad puede estimarse empíricamente mediante valores adimensionales entre 0 y 1, definidos a partir de información histórica sobre daños y respuesta ante eventos pasados. Este tipo de aproximaciones, aunque dependientes de la experiencia en el manejo de la amenaza, constituyen una forma inicial de cuantificación de la vulnerabilidad. En contraste, los enfoques actuales incorporan criterios físicos y

estructurales, considerando la tipología constructiva y las condiciones locales de emplazamiento. Amigó *et al.* (2005) realizan un análisis de carreteras, teniendo en cuenta el Tráfico Promedio Diario (TPD) de vehículos que circulan en cada segmento de la carretera. También se refiere a la probabilidad de impacto en vehículos, que depende del TPD y se clasifica en rangos de flujo según el sector de estudio.

Suárez (1998), por su parte, retoma los valores de vulnerabilidad propuestos por Finlay *et al.* (1997) para el caso de Hong Kong, aplicándolos al análisis del riesgo asociado a movimientos en masa. En su propuesta, el riesgo se escala de acuerdo con el grado de exposición de los elementos y se zonifican las áreas con riesgo crítico. Posteriormente, Anguas (2012) desarrolla una matriz de evaluación de vulnerabilidad, como se muestra en las TABLAS 1A, 1B, 2, 3 y 4, y clasifica la vulnerabilidad de la siguiente manera:

- ✓ Baja: Bajo tráfico vehicular, los conductores no son conscientes de las fallas.
- ✓ Media: Tráfico vehicular considerable, los conductores necesitan reducir la velocidad

en presencia de la falla y hay daños menores a las estructuras cercanas.

- ✓ Alta: Tráfico vehicular considerable, los conductores necesitan reducir la velocidad con frecuencia debido a la presencia de fallas

y las estructuras cercanas muestran cambios en la verticalidad y otras características.

- ✓ Muy alta: Tráfico vehicular continuo, los conductores se detienen por completo en presencia de fallas y hay daños significativos a las estructuras cercanas.

TABLA 1A. Valores de vulnerabilidad: personas en al aire libre

Caso	Rango	Valor	Comentarios
Golpeado por roca	0,1-0,7	0,50	Puede verse afectado rara vez muerte
Cubierto por flujo de detritos	0,8-1,0	1,00	Muerte por sofoco
No cubierto	0,1-0,5	0,10	Alta probabilidad de sobrevivir

TABLA 1B. Valores de vulnerabilidad: personas en vehículo

Caso	Rango	Valor	Comentarios
Cubierto por flujo de detritos	0,9 – 1,0	1,00	Muerte
Golpeado por roca	0,0 – 0,3	0,30	Alta probabilidad de vivir

TABLA 2. Vulnerabilidad en infraestructuras

Caso	Rango	Valor	Grado	
Estructuras intactas	0 %	0,00	I	Muy Bajo
Daños locales	1-25 %	0,25	II	Bajo
Daños que se pueden reparar	26-50 %	0,50	III	Medio
Daños que no se pueden reparar	51-75 %	0,75	IV	Alto

TABLA 3. Vulnerabilidad social o humana

Caso	Rango	Valor	Grado	
Sin personas afectadas	0 %	0,00	I	Muy Bajo
Se requiere evacuación de personas	1-25 %	0,25	II	Bajo
Alerta de personas puede continuar	26-50 %	0,50	III	Medio
50% de las personas pueden verse afectadas	51-75 %	0,75	IV	Alto
Personas muertas 50% o más de afectación	76-100 %	1,00	V	Muy Alto

Campero (2015) en 'Vulnerabilidad-Riesgo en Carreteras Locales' sigue una metodología general para el análisis de vulnerabilidad. Involucra la investigación y recopilación bibliográfica de información básica, luego el

estudio de los mecanismos de ocurrencia del evento para determinar los factores involucrados. La información se analiza y clasifica según la evaluación de la amenaza o la vulnerabilidad. Siguiendo estas fases, se lleva a cabo el desarrollo

de planes, lo que permite la mitigación radical de los riesgos presentes.

Después del análisis de la amenaza, se realiza la evaluación de los niveles de amenaza en áreas inestables de laderas.

Para hacer esto, es necesario evaluar la frecuencia de ocurrencia en la zona inestable:

Alta Frecuencia: 1 evento por año en 10 años

Frecuencia Media: 2 eventos en 50 años

Baja Frecuencia: 1 evento en 50 años o ninguno

TABLA 4. Vulnerabilidad económica

Caso	Rango	Valor	Grado	
Sin interrupciones de actividades económicas	0 %	0,00	I	Muy Bajo
Corta interrupción de actividades económicas. Menos de un día	1-25 %	0,25	II	Bajo
Corta interrupción de actividades económicas. Menos de un semana	26-50 %	0,50	III	Medio
Larga interrupción de actividades	51-75 %	0,75	IV	Alto
Interrupción permanente	76-100%	1,00	V	Muy Alto

La metodología de Cees *et al.* (2008) se enfoca en el análisis de la vulnerabilidad de los elementos en riesgo. El nivel de vulnerabilidad (típicamente en la escala de 0 a 1) se puede definir como el grado de pérdida esperada dentro del área afectada por la amenaza. Esta vulnerabilidad se puede evaluar para diferentes tipos de elementos en riesgo, como población, edificaciones, estructuras de ingeniería, infraestructuras, patrimonio ambiental e histórico, servicios públicos, y actividades económicas. Para hacer esto, se requiere conocimiento de las propiedades cinemáticas de los bloques de roca que caen y, en el caso de elementos estructurales, las propiedades geométricas y mecánicas de la estructura.

TABLA 5. Valores asignados basados en el nivel de Amenaza

Peligro	Puntos
Alto	4
Medio	3
Bajo	2
Muy Bajo	1

2.3 Riesgo

Hernández y Ramírez (2016) identifican al riesgo como el producto de la amenaza, la vulnerabilidad física y la probabilidad de ocurrencia, y da como resultado el parámetro RVF (riesgo asociado a vulnerabilidad física).

Amigó *et al.* (2005) calcula un valor de riesgo según la Ecuación 2 basado en la amenaza y vulnerabilidad del segmento de carretera estudiado (TABLA 5 y TABLA 6, respectivamente), y tomando en consideración la TABLA 7 como elemento de análisis final para el cálculo definido del riesgo sectorizado por rangos cuantitativos el riesgo.

$$R = (A) \times (V)$$
 Ec. (2)

TABLA 6. Valores asignados en función del número de vehículos

Vulnerabilidad IDM	Flujo de Vehículos	Valor acción
Muy Alto	> 15 000	5
Alto	10 000 – 15 000	4
Medio	5 000 – 10 000	3
Bajo	1 000 – 5 000	2
Muy Bajo	<1 000	1

Para el análisis de la amenaza, se utiliza el método RHRSR, dependiendo de la historia de las carreteras según observaciones en el sitio,

clasificando el nivel de amenaza del área bajo estudio según la TABLA 7.

Tabla 7. Riesgo, Vulnerabilidad y Amenaza (%)

		Peligro			
		100,00	75,00	50,00	25,00
Vulnerabilidad	100,00	100,00	75,00	37,50	9,38
	75,00	75,00	56,25	37,50	18,75
	50,00	50,00	37,50	25,00	12,50
	25,00	25,00	18,75	12,50	6,25
Riesgo					

Amigó *et al.* (2005) analizan el riesgo en cada segmento de carretera mediante el cruce de los valores de amenaza y vulnerabilidad, obteniendo valores que varían entre 1 y 20. Con base en estos resultados, el riesgo se clasifica en cinco niveles: muy alto, alto, medio, bajo y muy bajo.

De acuerdo con Suárez (1998), el análisis del riesgo corresponde al uso sistemático de la información disponible para estimar el nivel de riesgo al que están expuestos los individuos, las propiedades o el ambiente frente a una amenaza, e incluye la definición del alcance, la identificación de la amenaza y la estimación del riesgo. Por su parte, la evaluación del riesgo, según Fell *et al.* (2008), consiste en determinar si los riesgos estimados son tolerables y si las medidas de control existentes son adecuadas o requieren mejoras. En este sentido, la valoración del riesgo comprende tanto el análisis como la evaluación.

De manera complementaria, Cees *et al.* (2008) señalan que la estimación del riesgo puede obtenerse combinando la probabilidad del evento, la probabilidad espacial y temporal, la vulnerabilidad y el valor del elemento en riesgo.

Scavia *et al.* (2020), sobre desprendimientos de rocas en entornos montañosos, afirman que son altamente impredecibles y pueden resultar en daños significativos a la sociedad, la infraestructura, la economía y hitos naturales e históricos. Analizar y gestionar el riesgo asociado con los desprendimientos de rocas es un proceso

complejo que involucra diversas disciplinas y técnicas. La complejidad surge de la variabilidad de los fenómenos de desprendimientos de rocas en términos de ubicación y tiempo. A pesar de los métodos disponibles para la protección de tierras y la evaluación de riesgos, muchas preguntas aún quedan sin respuesta en cada fase del proceso de evaluación de amenazas y riesgos.

Sazid (2019) investigó la inestabilidad de rocas de granodiorita en una carretera crucial que conecta La Meca y Al-Taif. Ocho sitios vulnerables fueron analizados para el riesgo de desprendimientos de rocas. Las laderas empinadas con rocas fracturadas indicaron inestabilidad. El estudio identificó fallas planares, de cuña y vuelos como las principales causas de la inestabilidad de las rocas. Se modelaron trayectorias y alturas de rebote de las rocas que caen, con el propósito de caracterizar la amenaza por caída de rocas en el sector estudiado, y en conjunto a la vulnerabilidad de la infraestructura se analiza el riesgo. Los hallazgos resaltan la necesidad de medidas preventivas para mitigar los riesgos de desprendimientos de rocas en la zona y pueden ser una referencia para prever riesgos similares en otros lugares.

Ferrari *et al.* (2016) ofrecen una revisión exhaustiva de las metodologías existentes para la análisis de la amenaza de desprendimientos de rocas.

En particular, la revisión se centra en los métodos cualitativos que permiten una

evaluación rápida de la amenaza por desprendimientos de rocas, evitando simulaciones numéricas costosas y prolongadas. Ferrari *et al.* (2016) examinan las metodologías más empleadas en Europa y América del Norte, destacando la coexistencia de enfoques cualitativos y semi-cuantitativos basados en criterios geomorfológicos, estructurales y de exposición.

De su revisión se desprenden tendencias claras hacia la integración de modelos empíricos y numéricos simplificados, así como la incorporación de herramientas SIG para sistematizar los análisis de peligro y exposición. Sin embargo, los autores identifican necesidades relevantes, entre ellas: la falta de estandarización de los parámetros de vulnerabilidad, la escasa validación de resultados frente a eventos observados, y la limitada transferencia de metodologías entre contextos geológicos distintos.

En términos de ventajas, Ferrari *et al.* (2016) subrayan que los métodos cualitativos permiten una rápida priorización de tramos críticos y una aplicabilidad amplia en etapas preliminares de planificación. No obstante, sus principales limitaciones radican en la subjetividad de los criterios utilizados y en la dificultad para cuantificar el riesgo de forma reproducible. Su campo de aplicación más eficaz se encuentra en zonificaciones de amenaza a escala regional y en la evaluación inicial de infraestructuras lineales, como carreteras y ferrocarriles en zonas de montaña..

Toe *et al.* (2018), realizaron un artículo con un enfoque novedoso para evaluar la eficacia de las barreras de protección contra desprendimientos de rocas teniendo en cuenta las diversas condiciones de impacto observadas en entornos naturales. Este enfoque utiliza meta-modelos derivados de resultados de simulaciones de elementos finitos y se centra en un tipo común de barrera contra desprendimientos de rocas. Los autores consideraron seis parámetros de entrada relevantes para las condiciones de impacto del bloque. Se desarrollaron dos meta-modelos, uno evaluando la capacidad de la barrera para detener el bloque o reducir su energía cinética.

Los resultados del estudio demuestran que estos meta-modelos son altamente efectivos para replicar con precisión la respuesta de la barrera bajo diversas condiciones de impacto, convirtiéndolos en una herramienta valiosa para el diseño de barreras. Además, al tener en cuenta los efectos de las condiciones de impacto en la predicción de la interacción bloque-barrera, este enfoque se puede combinar con herramientas de simulación de trayectorias de desprendimientos de rocas para mejorar la evaluación cuantitativa del riesgo de desprendimientos de rocas y optimizar estrategias de mitigación.

Coulibaly *et al.* (2019) señalan que las barreras flexibles contra desprendimientos de rocas son estructuras de protección utilizadas para mitigar los riesgos asociados con eventos de desprendimientos de rocas en regiones montañosas. Estas estructuras exhiben un comportamiento mecánico complejo y no lineal cuando se someten a impactos, lo que requiere herramientas de modelado robustas para el análisis estructural. Este artículo presenta un enfoque computacional genérico para analizar barreras contra desprendimientos de rocas. Primero, describe la formulación genérica e implementación numérica en el software *GENEROCK*. Luego, el estudio considera y valida dos modelos de barreras mediante pruebas experimentales a escala real que involucran dos tecnologías de barreras diferentes. Esta investigación numérica proporciona información valiosa sobre el comportamiento de las barreras contra desprendimientos de rocas. Se realizaron simulaciones numéricas exploratorias para resaltar las fortalezas y aplicabilidad del enfoque propuesto. El artículo también explora la influencia de la modelización del efecto de cortina en los resultados de la simulación. Además, investiga los efectos de impactos repetidos en las barreras contra desprendimientos de rocas, arrojando nueva luz sobre el comportamiento y las prácticas de gestión de las barreras. Se emplean métodos de modelado estocástico para examinar cómo la incertidumbre y la variabilidad en la estructura se propagan en su respuesta dinámica.

En regiones montañosas, analizar con precisión el riesgo de desprendimientos de rocas es esencial para reducir las víctimas y los costos. Los métodos actuales de análisis del riesgo de desprendimientos de rocas son limitados, centrándose principalmente en los elementos vulnerables existentes y midiendo el riesgo únicamente en términos de daño esperado. Este estudio presenta un enfoque novedoso que analiza la distribución de daños como una función espacial continua sobre una base individual. La evaluación del riesgo de desprendimientos de rocas se basa en tres factores clave: daño esperado, valor en riesgo (VaR), déficit esperado (ES).

VaR y ES son medidas de riesgo que ofrecen una comprensión más completa del riesgo asociado con eventos extremos y consideran diversas restricciones a corto y largo plazo enfrentadas por las partes interesadas. (Farvacque *et al.*, 2021).

El procedimiento propuesto se aplica a la ladera de Le Brocey en los Alpes franceses, un lugar frecuentemente afectado por eventos de desprendimientos de rocas. Este estudio de caso ilustra el potencial del enfoque en la planificación del uso del suelo. Los valores individuales de riesgo obtenidos pueden compararse con umbrales de aceptabilidad para establecer regulaciones de zonificación legalmente sólidas. Además, estos valores permiten la comparación de diferentes estrategias de gestión de riesgos según la tolerancia al riesgo, restricciones presupuestarias o marcos temporales variables. Por lo tanto, este enfoque proporciona herramientas valiosas para la planificación futura del uso del suelo y los procesos de toma de decisiones. También puede adaptarse a otras amenazas, contribuyendo a encontrar el equilibrio óptimo entre seguridad y sostenibilidad (Farvacque *et al.*, 2021).

3. Discusión y resultados sobre las tendencias

Algunas metodologías incluyen factores relacionados con la vulnerabilidad de la vía (carretera, la geometría vial y del tráfico, así como la evaluación visual). Otros analizan diversas metodologías de análisis aceptadas a nivel

mundial asociadas con riesgos, como la estabilidad cinemática de las pendientes de laderas o taludes y la clasificación de macizos rocosos. El aspecto más importante es cómo llegar a un consenso sobre las diferentes matrices de amenazas, ya que no existe un solo criterio que abarque las condiciones geotécnicas descritas y discriminadas en cada metodología.

Los diversos artículos y libros revisados nos permiten ver los métodos utilizados para mantener la seguridad vial, dependiendo del clima, diversos datos geotécnicos, y teniendo en cuenta los diferentes tipos de terreno para controlar el riesgo que pueden representar los desprendimientos de rocas en diferentes redes viales.

Existen diferentes parámetros determinísticos a considerar en el análisis del riesgo de desprendimientos de rocas. La vulnerabilidad implica parámetros cualitativos ordinales y depende completamente de la percepción del ejecutor del estudio. Por otro lado, la amenaza tiene en cuenta variables mixtas y se centra en la geometría del talud, considerando principalmente la pendiente, inclinación y la altura, asignando rangos para estos parámetros, pero en base a estos datos, asigna un valor cualitativo a la amenaza.

Briones *et al.* (2020), en su artículo 'Investigación sobre Desprendimientos de Rocas: Un Análisis Bibliométrico y Tendencias Futuras', apuntan que los resultados indican una tendencia creciente en las publicaciones anuales sobre desprendimientos de rocas. Este análisis revela los temas principales, países e instituciones influyentes en todo el mundo que han realizado investigaciones relevantes en publicaciones científicas. También muestra las revistas con más publicaciones sobre el tema. Actualmente, los problemas de desprendimientos de rocas en puntos críticos incluyen principalmente el análisis de riesgos, incluyendo la teledetección y el monitoreo de desprendimientos de rocas. Finalmente, este artículo analiza las limitaciones de la investigación actual y propone una dirección futura para nuevas investigaciones.

Para el desarrollo de un sistema confiable y automático de monitoreo de desprendimientos

de rocas, se han combinado técnicas de teledetección como LiDAR o fotogrametría.

En cuanto al análisis de la susceptibilidad y la amenaza, se han aplicado ampliamente algoritmos de aprendizaje automático que permiten identificar zonas propensas a la inestabilidad del talud y estimar la probabilidad de ocurrencia de desprendimientos. El análisis del riesgo -que considera la interacción entre la amenaza, la vulnerabilidad y los elementos expuestos- se desarrolla posteriormente, una vez definida la zonificación de susceptibilidad. Para determinar trayectorias, posibles recorridos y energías de impacto, se ha extendido el uso de modelos numéricos y simulaciones 2D-3D, que permiten estimar los parámetros de peligro requeridos para la posterior evaluación del riesgo (Ferrari *et al.*, 2016).

Técnicas basadas en SIG, enfoques físicos y nuevas tecnologías podrían desempeñar un papel significativo en la gestión futura de eventos de desprendimientos de rocas.

Lee *et al.* (2021) se centran en el análisis cuantitativo del riesgo para identificar el nivel de riesgo de desprendimientos de rocas. Se demostró que estrategias de mitigación apropiadas pueden diseñarse según el número de barreras de protección, el intervalo para el mantenimiento periódico y la proporción de cobertura horizontal para reducir el riesgo de diferentes laderas artificiales por debajo de una probabilidad objetiva de falla de taludes. El enfoque mostrado en este estudio puede proporcionar ideas sobre cómo mejorar la gestión general del riesgo para prevenir pérdidas por desprendimientos de rocas, con la instalación de barreras dinámicas en puntos predefinidos.

Li *et al.* (2019), en este caso, tanto la amenaza como la vulnerabilidad son discretas y cuantitativas, y dentro de las amenazas, se considera la velocidad y el volumen de material propenso a causar el daño estudiado, así como la frecuencia de la ocurrencia de los eventos. La vulnerabilidad solo considera la infraestructura vial con parámetros económicos.

Scavia *et al.* (2020) señaló la complejidad de analizar y gestionar los riesgos de desprendimientos de rocas debido a la

variabilidad de estos fenómenos en términos de ubicación y tiempo. Ferrari *et al.* (2016) proporcionan una revisión exhaustiva de las metodologías de análisis de la amenaza de desprendimientos de rocas, con un enfoque en métodos cualitativos que permiten un análisis rápido sin simulaciones numéricas costosas y prolongadas, donde persiste una falta de estandarización en la definición de parámetros de vulnerabilidad y exposición.

Toe *et al.* (2018) introdujeron un enfoque para evaluar la eficacia de las barreras de protección contra desprendimientos de rocas, utilizando modelos derivados de resultados de simulaciones de elementos finitos. Estos modelos evalúan la capacidad de las barreras para detener los bloques o reducir su energía cinética.

Coulibaly *et al.* (2019) desarrollaron un enfoque computacional genérico para analizar el comportamiento mecánico de barreras flexibles frente a impactos repetidos de bloques rocosos, mediante modelos numéricos avanzados que reproducen su respuesta dinámica. Este estudio representa una tendencia relevante hacia la simulación detallada de medidas de mitigación como parte del análisis del riesgo, al incorporar no solo la probabilidad del evento, sino también la eficacia estructural de los sistemas de protección. Sin embargo, se evidencia la necesidad de estandarizar criterios de desempeño y validación experimental que permitan comparar resultados entre diferentes configuraciones y condiciones topográficas.

Por su parte, Farvacque *et al.* (2021) propusieron una metodología innovadora para la evaluación del riesgo de desprendimientos, integrando indicadores cuantitativos de toma de decisiones como el Valor en Riesgo (VaR) y el Déficit Esperado (ES). Esta aproximación representa una tendencia emergente hacia la cuantificación probabilística del riesgo residual, orientada a respaldar la planificación territorial y la priorización de intervenciones. No obstante, los autores reconocen que la aplicación práctica de estas métricas requiere bases de datos históricas extensas y modelos de incertidumbre calibrados, lo que plantea una necesidad de mayor disponibilidad de información empírica y

estandarización de umbrales de aceptabilidad del riesgo en contextos aplicados, como las infraestructuras viales.

4. Conclusiones y recomendaciones

Las pautas propuestas en las diversas metodologías sintetizan un procedimiento vital en la vida cotidiana. Contribuyen a mejorar el análisis de riesgos en las redes viales, aportando tanto a la seguridad social como a la economía al reducir el riesgo de daños a la infraestructura. Podemos observar en cada uno de estos métodos las especificaciones técnicas que abordan tanto las pendientes de las laderas como las de los taludes, susceptibles a la inestabilidad.

Los riesgos geológicos relacionados con desprendimientos de rocas pueden ocurrir extensamente en cualquier región del mundo. Cuando estos fenómenos afectan las actividades humanas y las construcciones, el riesgo de accidentes es muy alto. Por lo tanto, las medidas estudiadas en cada una de las metodologías deben tomarse en serio. Se trata de vidas humanas, por lo que la recopilación y análisis de datos deben ser realizados por uno o más expertos, según la magnitud del proyecto vial en estudio. El enfoque de cada una de estas metodologías es establecer una clasificación de riesgos, permitiendo la priorización de las áreas más críticas y la optimización de recursos.

Las diferentes metodologías revisadas abarcan estudios desarrollados en regiones como Andorra, México, Colombia, Perú, Venezuela, China y Corea del Sur. Cada una de ellas se adapta a las condiciones específicas de su entorno, considerando factores climáticos, geológicos y sísmicos particulares. En la mayoría de los países mencionados, los principales factores desencadenantes de los desprendimientos de rocas son la sismicidad y las precipitaciones intensas, los cuales deben ser analizados de manera conjunta al momento de evaluar la amenaza. Asimismo, la acción humana, como las excavaciones en laderas, la construcción

de carreteras o la deforestación, puede actuar como un detonante adicional que modifica la estabilidad del talud.

Si bien existen factores comunes entre metodologías -como la geometría de la pendiente y las condiciones geotécnicas y geológicas-, el análisis y la aplicación de cada enfoque dependen de los factores predominantes en la zona de estudio. Por esta razón, se requiere precaución al seleccionar las variables y al definir los umbrales de amenaza y vulnerabilidad, de modo que la metodología se mantenga representativa del contexto local. Una consideración importante es que diversas metodologías pueden complementarse entre sí para lograr un análisis más integral y preciso del riesgo. La combinación de enfoques cualitativos, semi-cuantitativos y numéricos permite integrar tanto la evaluación de la amenaza como la estimación de la vulnerabilidad y la exposición, lo que favorece la definición de prioridades en la gestión del riesgo.

Es relevante destacar que la mayoría de estas metodologías están orientadas a evaluar secciones de la red vial y a proporcionar recomendaciones prácticas para prevenir o mitigar incidentes de desprendimientos de rocas. Así, su aplicación no solo permite identificar tramos críticos, sino también optimizar la planificación de medidas estructurales y no estructurales.

En conjunto, las discusiones y estudios revisados ofrecen una visión integral de la evaluación y gestión del riesgo de desprendimientos en entornos montañosos, haciendo hincapié en la necesidad de armonizar criterios entre metodologías, fortalecer la validación de resultados mediante monitoreo continuo y avanzar hacia modelos predictivos que integren variables geotécnicas, climáticas y antrópicas. Estas tendencias reflejan la evolución hacia sistemas de gestión del riesgo más dinámicos, adaptativos y basados en evidencia.

5. Referencias citadas

- AMIGÓ J.; ALTIMIR J.; TORREBADELLA J. y EURO GEOTECNICA S.A. SANT CUGAT DEL VALLÉS. 2005. *Metodología para la determinación del riesgo geológico por caída de bloques rocosos en la red de carreteras de Andorra*. Disponible en: <https://euroconsult.ad/Uploads/>
- ANGUAS, P. 2012. *Metodología para la gestión de cortes carreteros*. Publicación Técnica. Sanfandila. Querétaro, México.
- ARANGO, I. y G. ECHEVERRI. 2014. *Desprendimiento de rocas en laderas una guía para la evaluación del riesgo en vías*. Universidad EAFIT Medellín, Colombia. Trabajo de Grado (Maestría).
- BELANDRIA N.; FERNÁNDEZ A. y F. BONGIORNO. 2017. "Análisis del riesgo geotécnico en la carretera Tovar-Zea, sector la Roca, estado Mérida, Venezuela". *Geominas*, 45(74): 173-181.
- BRIONES B, J.; CARRIÓN-MERO, P.; MONTALVÁN-BURBANO, N. & F. MORANTE-CARBALLO. 2020. "Rockfall research: A bibliometric analysis and future trends". *Geosciences*, 10(10): 403.
- CAMPERO J. 2015. *Vulnerabilidad-riesgo caminos vecinales. Gestión del Mantenimiento Distrito Vilcabamba, Perú*. Banco Mundial (1era. Edición). Biblioteca Nacional del Perú.
- CEES, J.; CASTELLANOS, E. & L. SEKHAR. 2008. "Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: An overview". *Engineering Geology*, 102(3-4): 112-131. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.010>
- COROMINAS, J.; COPONS, R.; VILAPLANA, J.; ALTIMIR, J. & J. AMIGÓ. 2003. "Integrated landslide susceptibility analysis and hazard assessment in the Principality of Andorra". *Natural Hazards*, 30: 421-435. Disponible en: <https://doi.org/10.1023/B:NHAZ.0000007094.74878.d3>
- COULIBALY, J.; CHANUT, M. A. & S. LAMBERT. 2019. "To-ward a generic computational approach for flexible rockfall barrier modeling". *Rock Mech Rock Eng*, 52: 4.475-4.496. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s00603-019-01878-6>
- FARVACQUE, M.; ECKERT, N.; BOURRIER, F.; CORONA, C.; LOPEZ-SAEZ, J. & D. TOE. 2021. "Quantile based individual risk measures for rockfall-prone areas". *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 53. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2020.101932>
- FELL, R.; COROMINAS, J.; BONNARD, C.; CASCINI, L.; LEROI, E. & W. SAVAGE. 2008. "Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning". *Engineering Geology*, 102(3-4). Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.022>
- FERRARI, F.; GIACOMINI, A. & K. THOENI. 2016. "Qualitative rock-fall hazard assessment: A comprehensive review of current practices". *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 49: 2.865-2.922. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s00603-016-0918-z>

- FINLAY, P.; MOSTYN, G. & R. FELL. 1997. "Vulnerability to landsliding". *Geotechnical Society. Quarterly Journal of Engineering Geology*, 1: 307-324.
- GUEVARA, R. 2016. "El estado del arte en la investigación: análisis de los conocimientos acumulados o indagación por nuevos sentidos". *Rev Folios*, (44): 165-79.
- HERNÁNDEZ Y. & H. RAMÍREZ. 2016. "Risk assessment of physical vulnerability due to hillside and unstable slopes in the cay creek watershed, Ibagué, Tolima, Colombia". *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 26(2): 111-128. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.18359/rcin.1800>
- HOWALD, E.; ABBRUZZESE, J. M. & C. GRISANTI. 2017. "An approach for evaluating the role of protection measures in rockfall hazard zoning based on the Swiss experience". *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 17: 1.127-1.144. Disponible en: <https://doi.org/10.5194/nhess-17-1127-2017>
- DE VALLEJO GONZÁLEZ., L.; FERRER, M.; ORTUÑO, L. y C. OTEO. (2002). *Ingeniería geológica*. Pearson Educación. Madrid, España.
- LEE, J.; BARBATO, M. & D. LEE. 2021. "Rockfall hazard analysis based on the concept of functional safety with application to the highway network in South Korea". *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 54(12): 6.633-6.647. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1007/s00603-021-02490-3>
- LI, XN.; LING, SX. & C. SUN. 2019. "Integrated rockfall hazard and risk assessment along highways: An example for Jiuzhaigou area after the 2017 Ms 7.0 Jiuzhaigou earth-quake, China". *J. Mt. Sci.* 16, 1.318-1.335. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11629-018-5355-x>
- LONDOÑO-LINARES, J. 2017. "Cálculo de susceptibilidad a deslizamientos mediante análisis discriminante. Aplicación a escala regional". *DYNA* 84, 201: 278-289. Disponible en: <https://doi.org/10.15446/dyna.v84n201.61385>
- OGURA, A. y E. S. MACEDO. 2002. Procesos y riesgos geológicos. *II Curso internacional de aspectos geológicos de protección ambiental: notas de clases*. Cap. 8, p. 114-137. UNESCO. Montevideo, Uruguay.
- SAZID, M. 2019. "Analysis of rockfall hazards along NH-15: a case study of Al-Hada road". *Geo-Engineering*, 10: 1. Disponible en: <https://doi.org/10.1186/s40703-019-0097-3>
- SCAVIA, C.; BARBERO, M.; CASTELLI, M.; MARCHELLI, M.; PEILA, D.; TORSELLO, G. & G. VALLERO. 2020. "Evaluating rockfall risk: Some critical aspects". *Geosciences*, 10(3): 98. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/geosciences10030098>
- SUÁREZ, J. 1998. *Deslizamientos y estabilidad en Zonas Tropicales*. Universidad Industrial de Santander. Publicaciones Bucaramanga. Colombia.

TOE, D.; MENTANI, A. & L. GOVONI. 2018. "Introducing metamodels for a more efficient hazard mitigation strategy with rockfall protection barriers". *Rock Mech Rock Eng*, 51: 1.097-1.109. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s00603-017-1394-9>

TORRES-HOYER R.; TORRES-HOYER J.; BONGIORNO F.; PEÑA J.; PEÑA O.; GONZÁLEZ L.; ... & W. BARRETO. 2019. "Evaluation of vehicular risk of rockfalls in Rafael Caldera Road, Mérida, Venezuela". *Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia. (Volumen Especial)* , (1): 203-208. Disponible en: <https://doi.org/10.22209/rt.ve2019a08>

URIBE-ROLDAN, J. y P. PÁRAMO. 2013. *La investigación en ciencias sociales: estrategias de investigación Colombia*. Universidad Piloto de Colombia. ISBN: 978-958-8537-25-2.

Lugar y fecha de finalización del artículo:
Temuco, La Araucanía, Chile; noviembre, 2025