



**CONTRIBUCIÓN DE LAS HERRAMIENTAS DE TELEDETECCIÓN Y
PROCESAMIENTO COMPUTACIONAL EN LA ESTIMACIÓN DE CAÍDAS DE
ROCAS EN PROYECTOS VIALES**

Contribution of remote sensing and computational processing tools in the estimation of rockfalls in
roadway projects

JUAN DIEGO LÓPEZ RODRÍGUEZ

Monografía investigativa para optar por el título de
geólogo

Evaluador:

Dr. Daniel Felipe Ruiz Restrepo

UNIVERSIDAD EAFIT
ESCUELA DE CIENCIAS
GEOLOGÍA
MEDELLÍN

2024

Contenido

1. Introducción	1
2. Caídas de rocas.....	2
3. Técnicas de adquisición remota	5
3.1 Fotogrametría digital	6
3.1.1 Fotogrametría Terrestre.....	7
3.1.2 Fotogrametría Aérea.....	7
3.2 LiDAR (Light Detection and Ranging).....	8
3.2.1 Láser escáner aéreo (ALS).....	8
3.2.2 Láser escáner terrestre (TLS).....	9
3.3 Toma de datos mediante fotogrametría (SfM).....	10
3.4 Toma de datos mediante LiDAR	11
4. Procesamiento y análisis de datos	11
4.1 Identificación de discontinuidades mediante DSE	11
4.2 Análisis cinemático.....	14
4.3 Estimación de volúmenes susceptibles.....	15
4.4 Simulación de caídas potenciales	16
5. Fragmentación de la roca durante desprendimientos	17
5.1 Modelo de Fragmentación fractal.....	18
5.2 Aplicación y calibración	19
5.3 Simulación de desprendimientos con fragmentación fractal.....	21
6. Contribución al campo y posibles mejoras	22
7. Conclusiones	24
8. Referencias bibliográficas.....	26

Figuras

Figura 1. Modos de desplazamiento de rocas durante su caída.	2
Figura 2. a) Equipo de fotogrametría terrestre. b) equipo de fotogrametría aérea.....	8
Figura 3. a) Equipo de fotogrametría terrestre. b) equipo de fotogrametría terrestre, con diferentes rangos de apertura para la emisión de pulsos	10
Figura 4. Discontinuidades extraídas de afloramiento de calizas en un talud (Alicante, España): (a) y (b) representan un trabajo de campo con brújula, (c) y (d) representan una nube de puntos 3D obtenida con SfM y sus familias de discontinuidades clasificadas por colores mediante el programa DSE, (e) y (f) representa la nube de puntos obtenida mediante escáner laser y sus discontinuidades se encuentran clasificadas de la misma manera por DSE.	13
Figura 5. a) Trayectoria de caída de rocas simulado con Rockfall Analyst, b) Trayectoria de caída de rocas simulado con RocPro3D, la línea naranja representa el límite del área máxima de influencia estimada en 1991, la línea morada representa el nuevo limite estimado con las simulaciones.....	17
Figura 6. a) fragmentación de una IBSD a una RBSD b) representación gráfica de “Scale-invariant” y “Scale-variant”	19
Figura 7. Resultados de las simulaciones con RockGIS, a) trayectorias simuladas de rocas con masas de 10m ³ sin considerar la fragmentación, b) trayectorias simuladas de rocas con masas de 10m ³ considerando la fragmentación, c) vista en 3D de una simulación realizada con fragmentación sobre un modelo digital del terreno	22
Tablas	
Tabla 1. Resultados para los análisis de estabilidad, Representa las discontinuidades detectadas con su mecanismo de rotura y los volúmenes susceptibles a caída	15
Tabla 2. Inventariado realizado en 7 desprendimientos diferentes, con la información de características físicas y mecánicas de la litología en los depósitos.....	20

Resumen

Este estudio analiza el uso de herramientas de teledetección y procesamiento computacional para la estimación cuantitativa de caídas de rocas en proyectos viales. Tecnologías avanzadas como LiDAR (Light Detection and Ranging) y la fotogrametría digital permiten generar modelos tridimensionales detallados y obtener datos de alta resolución de macizos rocosos, mejorando significativamente la evaluación de riesgos en taludes. Estas técnicas superan las limitaciones de los métodos tradicionales al facilitar el acceso a áreas de difícil alcance y ofrecer mayor precisión en la identificación de zonas de riesgo. El empleo de programas de procesamiento como el Discontinuity Set Extractor (DSE) posibilita la identificación y caracterización de discontinuidades en los macizos rocosos, factor clave en el análisis de estabilidad de taludes. Asimismo, el uso de software de simulación como RocFall y RockGIS permite modelar trayectorias y distribuciones de bloques durante su caída, aportando información esencial para la planificación de medidas de mitigación. En particular, la implementación del modelo de fragmentación fractal en RockGIS representa un avance significativo, mejorando la simulación del comportamiento de los bloques y, por ende, la eficacia de las estrategias de protección. Los resultados indican que la aplicación de estas tecnologías contribuye notablemente a la seguridad vial al proporcionar información detallada que optimiza el diseño de barreras de contención y otras soluciones de protección. También se evidencia que la posible automatización completa de estos procesos podría incrementar aún más la eficiencia en la gestión de riesgos geológicos en proyectos viales, promoviendo la seguridad y sostenibilidad de las infraestructuras.

Palabras claves: LiDAR - Fotogrametría digital - Caídas de rocas - Proyectos viales - Análisis de estabilidad - Fragmentación fractal.

Abstract

This study analyses the use of remote sensing and computational processing tools for the quantitative estimation of rock falls in road projects. Advanced technologies such as LiDAR (Light Detection and Ranging) and digital photogrammetry allow for the generation of detailed three-dimensional models and the acquisition of high-resolution data of rock masses, significantly improving the risk assessment of slopes. These techniques overcome the limitations of traditional methods by facilitating access to hard-to-reach areas and offering greater precision in the identification of risk zones. The use of processing programs such as the Discontinuity Set Extractor (DSE) enables the identification and characterization of discontinuities in rock masses, a key factor in the analysis of slope stability. Likewise, the use of simulation software such as RocFall and RockGIS allows for the modelling of trajectories and distributions of blocks during their fall, providing essential information for the planning of mitigation measures. In particular, the implementation of the fractal fragmentation model in RockGIS represents a significant advance, improving the simulation of block behavior and, therefore, the effectiveness of protection strategies. The results indicate that the application of these technologies contributes significantly to road safety by providing detailed information that optimizes the design of containment barriers and other protection solutions. Also, the improvement towards the possible complete automation of these processes could further increase the efficiency in the management of geological risks in road projects, promoting the safety and sustainability of infrastructures.

Keywords: LiDAR - Digital photogrammetry - Rock falls - Road projects - Stability analysis - Fractal fragmentation.

1. Introducción

Las caídas de rocas, por efecto de la gravedad, son desplazamientos de bloques macizos a lo largo de pendientes empinadas que, dependiendo de la inclinación del talud, se pueden clasificar de varias maneras según su tipo de caída (Varnes, 1978). Este tipo de fenómenos son especialmente relevantes al considerar la viabilidad de proyectos civiles de carácter lineal, como las carreteras. La amenaza de desprendimiento de macizos rocosos en zonas de taludes representa un riesgo significativo para el desarrollo de las vías, ya sea durante su construcción o durante su vida útil, lo cual hace que el monitoreo y la detección de zonas de riesgo sean esenciales para mitigar potenciales daños humanos o estructurales (Burgos & Novoa, 2023).

La litología de las rocas que conforman los macizos rocosos está directamente relacionada con su comportamiento frente a la inestabilidad en taludes de carretera. Este comportamiento también depende de las discontinuidades presentes en la roca, tales como diaclasas, fallas y estratificaciones (IGME, 1987). Debido al carácter lineal de las vías, estos proyectos deben atravesar diversas unidades litológicas y geomorfológicas, lo que implica que el estudio de estabilidad en taludes no pueda realizarse de manera general, sino que deba abordarse por tramos o secciones para considerar la variación geométrica y reológica que se encuentra a lo largo del trazado de la carretera (Ramírez & Monge, 2007).

En algunos casos, las condiciones geomorfológicas y topográficas dificultan el acercamiento del personal a la zona de estudio, lo cual representa un problema significativo para la toma de datos y la estimación de posibles caídas de rocas en ciertos tramos de los proyectos viales. En este contexto, las herramientas de teledetección y el procesamiento computacional han facilitado enormemente la labor que, de otra manera, sería inviable para el factor humano. Según Tomas et al. (2020), los sensores remotos como LiDAR (Light Detection and Ranging) y la fotogrametría digital, ya sea aérea o terrestre, se han transformado en opciones eficientes para el análisis y monitoreo de macizos rocosos en taludes.

El siguiente proyecto investigativo pretende, por medio de recopilación bibliográfica, identificar las diferentes técnicas y métodos empleados con teledetección en este campo, junto con los programas para el procesamiento de datos más usados. Con el propósito de analizar la manera en que estas herramientas y procesos computacionales han contribuido al cálculo y estimación de posibles caídas de rocas en proyectos viales, con el fin de poder estimar el riesgo.

2. Caídas de rocas

Según Duncan (2014), los desprendimientos o caídas de rocas son fenómenos geológicos que ocurren cuando fragmentos de roca se separan de pendientes empinadas o acantilados. Estos fragmentos de roca se originan en macizos rocosos que presentan discontinuidades estructurales como fracturas, fisuras y planos de estratificación, estas discontinuidades debilitan la cohesión interna del macizo de roca y generan bloques inestables propensos a desprenderse bajo ciertas condiciones. El tipo de caída de roca se clasifica en base a su movimiento y son tres tipos: caída libre, rebote y rodadura. En la caída libre, los bloques se desplazan sin tocar la superficie hasta impactar el suelo; en el rebote, los fragmentos golpean y rebotan a lo largo de la pendiente; y en la rodadura, los bloques ruedan horizontalmente debido a la inclinación. (Figura 1).

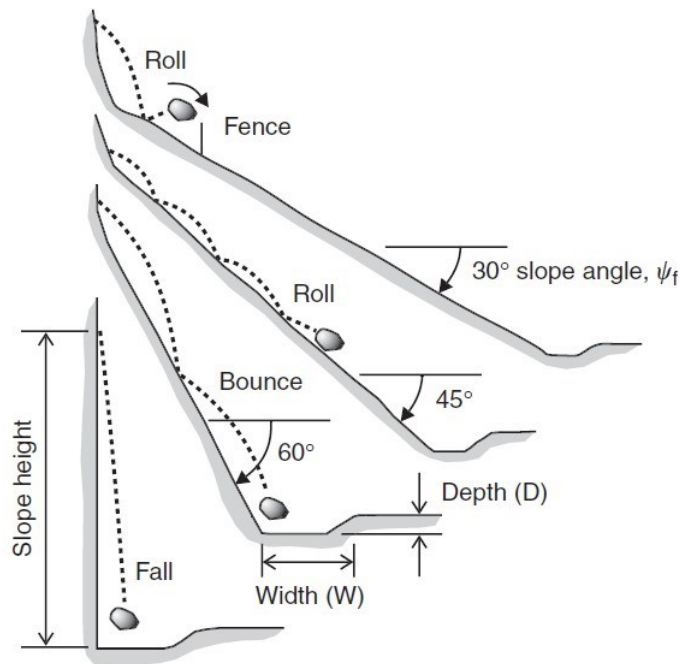


Figura 1. Modos de desplazamiento de rocas durante su caída. Tomado de Bar et al., 2016

El proceso de desprendimiento de rocas es complejo y puede ser influenciado o estimulado por diversos factores naturales y antropogénicos que afectan la estabilidad de los macizos rocosos. Entre los principales factores se encuentran la meteorización, la presencia de agua, los movimientos sísmicos y las acciones humanas, como la construcción de infraestructuras, que alteran el equilibrio natural del terreno (Duncan, 2014). Especialmente en proyectos viales, donde

se pueden llegar a crear las condiciones propicias para el riesgo de caídas de rocas, particularmente en tramos que atraviesan cortes de carretera. Estos cortes pueden exponer secciones con condiciones estructurales y geológicas susceptibles a la inestabilidad, como fracturas y planos de debilidad, aumentando la probabilidad de desprendimientos (Burgos & Novoa, 2023). Comprender cómo estos factores interactúan y contribuyen a la inestabilidad de los macizos rocosos es esencial para mitigar los riesgos asociados. A continuación, se detallan los principales factores que pueden generar inestabilidad y desencadenar una caída de rocas:

- **Influencia del agua:** El agua es uno de los principales agentes que contribuyen a las caídas de rocas. Factores como la lluvia intensa, el deshielo, el flujo canalizado y la erosión diferencial, debilitan las estructuras al reducir la cohesión entre partículas y aumentar la presión de poros. La infiltración de agua en las grietas y fisuras también puede provocar la alteración química de los minerales, facilitando procesos como la hidrólisis y la disolución. Además, el agua facilita el crecimiento de raíces de plantas en las grietas, lo que puede ampliar las fracturas y provocar el desprendimiento de bloques (Duncan, 2014).
- **Ciclos de congelación-descongelación:** Según Arosio (2013), este ciclo es otro factor clave, especialmente en climas fríos y regiones de alta montaña. Durante la congelación, el agua infiltrada en las grietas de la roca se expande hasta un 9% en volumen, generando una presión interna significativa que puede superar la resistencia a la tracción de la roca. Al descongelarse, esta presión disminuye, pero deja la roca más fracturada y susceptible a futuras caídas. Este proceso repetido de expansión y contracción debilita progresivamente la estructura de la roca, facilitando el desprendimiento de fragmentos.
- **Condiciones geológicas:** La presencia de diaclasas, fallas y planos de estratificación en plutones y rocas sedimentarias juega un papel crucial en la estabilidad de las pendientes. Las discontinuidades estructurales actúan como superficies de debilidad que pueden facilitar el desprendimiento de bloques si están orientadas desfavorablemente respecto a la pendiente, rocas fracturadas o con inclinaciones paralelas a la pendiente son más propensas a sufrir desprendimientos. Además, la heterogeneidad litológica y la presencia de minerales alterados pueden crear zonas de menor resistencia dentro del macizo rocoso (Varnes, 1978).

- **Actividad sísmica:** Terremotos o pequeños sismos pueden desencadenar caídas masivas de rocas al generar aceleraciones que superan las fuerzas de cohesión y fricción que mantienen los bloques en su lugar. En zonas sísmicamente activas, los movimientos del suelo desestabilizan las pendientes, especialmente si ya existen fracturas o suelos saturados de agua, la intensidad, duración y frecuencia de las vibraciones sísmicas influyen directamente en la magnitud y extensión de los desprendimientos finales de roca (Marzorati et al., 2002).
- **Erosión y vibraciones:** La erosión causada por la lluvia, el viento y procesos fluviales puede socavar la base de las pendientes, reduciendo el soporte y provocando inestabilidad, las vibraciones producidas por el tráfico vehicular, maquinaria pesada, explosiones o actividades que puedan alterar el terreno, como la construcción de una vía, pueden inducir esfuerzos adicionales en las rocas, acelerando la propagación de grietas y desencadenando caídas. La erosión diferencial también puede exponer materiales más débiles debajo de capas protectoras, aumentando el riesgo de desprendimientos (Duncan, 2014).

La caída de material puede causar daños estructurales graves en carreteras, puentes y túneles, implicando no solo costos de reparaciones sino también posibles bloqueos prolongados de vías de comunicación clave. Esto genera retrasos y desvíos que afectan negativamente la movilidad y las economías locales (Sardana et al., 2022). Un aspecto crítico es el riesgo humano; estos desprendimientos pueden ocurrir de manera inesperada, aumentando el riesgo de impactos a vehículos, generando accidentes fatales en carreteras muy transitadas (Duncan, 2014). La evaluación y mitigación de este fenómeno es crucial para prevenir daños y accidentes, especialmente en cortes de carretera, donde la frecuencia de ocurrencia es más alta dada la naturaleza de estas obras. Esto resalta la necesidad de sistemas de refuerzo y monitoreo continuo, detallado y preciso (Hernández et al., 2023).

Para abordar estos desafíos y mejorar la seguridad en proyectos viales, los monitoreos suelen ser realizados por geólogos o ingenieros geólogos durante la toma, interpretación y análisis de datos estructurales. No obstante, en ciertos casos, la recolección de datos resulta imposible debido a las características del terreno. Factores como la topografía, la inestabilidad o la amplia escala del área de estudio pueden hacer necesario prescindir del factor humano, debido a la alta posibilidad de

sesgo en la toma de datos durante el trabajo de campo (Tomas et al., 2020). Por lo tanto, es necesario recurrir a tecnologías que faciliten y automaticen el análisis, monitoreo y estimación de posibles inestabilidades y caídas de rocas. Esto no solo mejora las condiciones laborales, sino que también amplía el alcance del área de estudio, aumenta la precisión en la recopilación de información y permite tener un mejor reconocimiento de zonas específicas con mayores riesgos, logrando que se llegue a la implementación de medidas para mitigar riesgos de una manera más óptima. Todo esto se logra mediante la implementación de herramientas y técnicas como las de adquisición remota y el procesamiento computacional (Bemis et al., 2014).

3. Técnicas de adquisición remota

Los métodos de captura remota han sido utilizados en diversos ámbitos de investigación en las últimas décadas. Estas tecnologías permiten recolectar información detallada de la superficie terrestre o de estructuras geológicas sin necesidad de contacto físico directo. Utilizan sensores ubicados en satélites, aviones, drones o dispositivos terrestres que capturan datos mediante ondas electromagnéticas, como el láser en el caso del LiDAR o la luz visible en la fotogrametría digital. Estas herramientas permiten generar modelos tridimensionales precisos y analizar diversas características del terreno, como su topografía, estructura y composición (Bemis et al., 2014; Telling et al., 2017).

Para analizar estructuras geológicas de manera eficiente y segura, las técnicas de adquisición remota se han convertido en herramientas esenciales. Por ejemplo, en geología estructural, se han realizado análisis mediante fotogrametría digital, utilizando fotografías georreferenciadas obtenidas con UAVs (vehículos aéreos no tripulados) o nubes de puntos 3D generadas con LiDAR y posterior procesamiento computacional. Esto permite extraer información detallada de las estructuras presentes, como su disposición geométrica (rumbo y buzamiento), a partir de modelos tridimensionales de alta resolución (Vasuki et al., 2013). Casos de estudio que ilustran la aplicación exitosa de estas técnicas incluyen la cueva de Artá en Mallorca, España (Jordá-Bordehore et al., 2016); el sinclinal de Stackpole Quay en el Reino Unido (Cawood et al., 2017); y el cinturón plegado canadiense (Erslev & Mayborn, 1997).

En ingeniería civil y geotecnia, estas tecnologías han sido ampliamente adoptadas para el monitoreo y análisis de la estabilidad de taludes, especialmente en la estimación y cuantificación

de la caída de rocas en proyectos viales (Tomas et al., 2020). Al permitir la creación de modelos tridimensionales de alta resolución, ofrecen una vista detallada de las características geológicas de los macizos rocosos, como la dirección y características de las discontinuidades, facilitando el análisis e identificación de factores que pueden desencadenar desprendimientos. Esto se logra sin necesidad de contacto físico directo con el terreno, siendo especialmente valioso en zonas de difícil acceso o con alto potencial de peligro, y en un tiempo menor al requerido por métodos convencionales (Vinuela, 2020).

Las dos técnicas de mayor relevancia actualmente son el Escaneo Láser Terrestre (TLS, por sus siglas en inglés) y la fotogrametría digital mediante *Structure from Motion* (SfM) (Abellán et al., 2016). El TLS utiliza un sensor LiDAR posicionado sobre un trípode, permitiendo adquirir en tiempo real millones de puntos de una superficie con gran exactitud y velocidad. Por otro lado, la SfM se basa en fotografías tomadas desde distintos puntos de vista y, mediante un post procesado con algoritmos, genera un modelo tridimensional de la superficie. Aunque esta técnica requiere más tiempo de procesamiento en comparación con el TLS, es más accesible y flexible (Slob et al., 2005). Sin embargo, a pesar de sus ventajas, estas técnicas no siempre son óptimas para todas las situaciones. En el caso de las carreteras, que atraviesan diferentes unidades geológicas y geomorfológicas (implicando variaciones litológicas, estructurales y topográficas) surge la necesidad de aplicar metodologías adaptadas a condiciones específicas. Como se evidencia en el trabajo de Cawood (2017), puede ser necesario dar uso a técnicas que, aunque se basan en teoría en las anteriormente mencionadas, presenten variaciones en sus metodologías para optimizar su aplicación en contextos particulares.

3.1 Fotogrametría digital

La fotogrametría digital es una técnica pasiva que utiliza imágenes fotográficas para obtener información métrica y geométrica de objetos y superficies terrestres. Basándose en principios de estereoscopia y triangulación, permite reconstruir modelos tridimensionales precisos a partir de fotografías tomadas desde diferentes puntos de vista y en función de su solapamiento (generalmente entre el 60% y 80%) y que permite en el caso de estudios geológicos y geomecánicas, generar un modelo digital del terreno (Westoby et al., 2012). La obtención de las imágenes se puede hacer de manera terrestre como aérea mediante sensores como lo son las

cámaras digitales o filmadoras y pueden estar ubicadas en vehículos, aeronaves, helicópteros o pequeños drones no tripulados (UAV), esta técnica ha ganado popularidad en geociencias e ingeniería debido a su flexibilidad, accesibilidad y capacidad para producir datos de alta resolución (Vinueza, 2020).

3.1.1 Fotogrametría Terrestre

El ubicar cámaras digitales frente a el área u objeto de estudio de manera fija, permite la obtención de imágenes con una resolución mucho más alta (**Figura 2a**). La fotogrametría terrestre es una herramienta altamente efectiva para el estudio, monitoreo y análisis de inestabilidades. Este método facilita la obtención de información detallada sobre las discontinuidades y la geometría de los taludes, incluso en situaciones donde el acceso es difícil. Además, gracias a los avances en tecnología de captura de imágenes y procesamiento digital, facilita evaluaciones más precisas y frecuentes. Esto contribuye a una mejor gestión de riesgos y a la implementación de medidas preventivas más efectivas en áreas propensas a desprendimientos (Jordá-Bordehore et al., 2016).

3.1.2 Fotogrametría Aérea

Las imágenes digitales aéreas eran tomadas anteriormente por vehículos aéreos privados o militares, por lo que se trataba de una técnica poco utilizada, costosa y que presentaba de mucha distorsión dada la distancia y velocidad de las líneas de vuelo, actualmente paso a tener una mayor aplicación. Mediante el uso de drones (**Figura 2b**), se han superado los problemas relacionados con la altitud y la escala, lo que permite obtener modelos digitales de elevación con mayor resolución y precisión (Vinueza, 2020).



Figura 2. a) Equipo de fotogrametría terrestre. b) equipo de fotogrametría aérea. Tomado de Vinueza, 2020

3.2 LiDAR (Light Detection and Ranging)

Es una tecnología de teledetección activa y que se diferencia de la fotogrametría digital dado que, emplea pulsos de luz láser para medir distancias precisas entre el sensor y los objetos en la superficie terrestre. El sistema emite pulsos láser que se reflejan en los objetos y regresan al sensor; al calcular el tiempo que tarda el pulso en regresar, es posible determinar la distancia con alta exactitud. Integrando estas mediciones con datos de posición y orientación del sensor, generalmente obtenidos mediante sistemas GPS y unidades de medición inercial (IMU), se produce una nube de puntos en tres dimensiones que representa detalladamente la superficie escaneada (Wehr & Lohr, 1999; Baltsavias, 1999). El LiDAR es especialmente eficaz para capturar la geometría de terrenos complejos y estructuras geológicas, ya que puede adquirir millones de puntos en poco tiempo, proporcionando una alta densidad y resolución espacial (Shan & Toth, 2018). Esta capacidad permite modelar con precisión superficies irregulares, como taludes y macizos rocosos, que son fundamentales en el análisis de estructural y de estabilidad, como se mencionaba anteriormente existen algunas variantes para el uso del LiDAR que se usan en la tarea de detección y monitoreo de caídas de rocas, presentadas a continuación.

3.2.1 Láser escáner aéreo (ALS)

El LiDAR Aerotransportado (ALS, por sus siglas en inglés de *Airborne Laser Scanning*) es una técnica de teledetección que utiliza sensores LiDAR montados en plataformas aéreas, como aviones, helicópteros o drones (**Figura 3a**), El sistema escanea el terreno siguiendo líneas de vuelo planificadas que aseguran una cobertura completa y solapamiento adecuado entre pasadas. La alta velocidad de adquisición de datos permite capturar millones de puntos en poco tiempo, lo que es especialmente útil para proyectos que requieren cobertura de grandes extensiones, como las carreteras (Shan & Toth, 2018). El ALS emite pulsos láser hacia el terreno desde la aeronave en movimiento; al medir el tiempo que tardan estos pulsos en reflejarse y regresar al sensor, se calcula la separación entre el sensor y el terreno. Estas mediciones se combinan con los datos precisos de posicionamiento y orientación, dado que es necesario conocer la dirección del láser y la posición

de él dron o vehículo aéreo en el que es transportado. Con esto se obtiene la nube de puntos tridimensional georreferenciada que representa detalladamente la superficie y los objetos presentes. Dada la densidad y resolución obtenidos por este método, su aplicación suele estar enfocada principalmente para estudios regionales y abarcamiento de áreas mucho más extensas (Wehr & Lohr, 1999; Baltsavias, 1999; Jaboyedoff et al., 2012).

3.2.2 Láser escáner terrestre (TLS)

El LiDAR Terrestre (TLS, por sus siglas en inglés de *Terrestrial Laser Scanning*) es una variante que utiliza escáneres láser instalados en estaciones terrestres fijas o móviles para recopilar datos detallados de la superficie y estructuras geológicas a nivel del suelo. A diferencia del LiDAR aerotransportado (ALS), el TLS se implementa desde posiciones fijas en tierra (**Figura 3b**), lo que permite obtener una resolución y precisión superiores en áreas específicas de interés (Lato et al., 2010). El TLS emplea escáneres láser terrestres que pueden emitir pulsos láser en un rango de hasta 360 grados en el plano horizontal y un rango amplio en el plano vertical, dependiendo de su configuración. Estos dispositivos rotan automáticamente para escanear el entorno circundante, capturando detalles minuciosos de las superficies y estructuras geológicas, como fracturas, fisuras y otras discontinuidades (Gigli & Casagli, 2011).

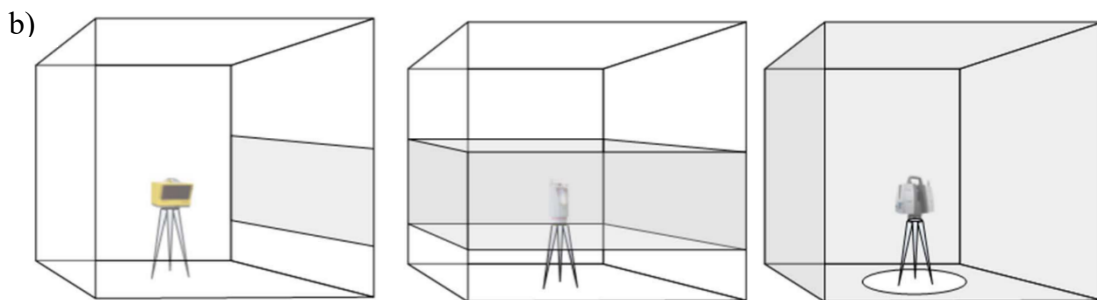


Figura 3. a) Equipo de fotogrametría terrestre. b) equipo de fotogrametría terrestre, con diferentes rangos de apertura para la emisión de pulsos. Tomado de Telling et al., 2017; Tomas et al., 2020

3.3 Toma de datos mediante fotogrametría (SfM)

La recopilación de datos mediante Structure from Motion (SfM) se lleva a cabo capturando una serie de imágenes fotográficas desde múltiples ángulos alrededor de una zona de interés. En el caso de los corredores viales, la toma de imágenes se realiza a lo largo de los tramos que presentan cortes con taludes de carretera. Como ejemplos de análisis realizados, en el estudio de Tomas et al. (2020) se emplearon vehículos aéreos no tripulados equipados con sistemas anticolidión para estudiar la estabilidad de una trinchera atravesada por vías ferroviarias. Este sistema anticolidión permite realizar adquisiciones más próximas al talud y generar imágenes más detalladas de la superficie rocosa desde diferentes posiciones. Por otro lado, en la investigación de Jordá-Bordehore et al. (2016), se capturaron imágenes de una caverna para obtener datos cinemáticos en áreas de acceso muy limitado, como techos y paredes, utilizando una cámara fija en un trípode.

Las imágenes recopiladas en ambos casos fueron procesadas mediante algoritmos SfM usando Agisoft Metheshape (Agisoft LLC, 2020), que identifican características o texturas comunes en imágenes superpuestas (Seitz et al., 2006). Tras detectar estas características coincidentes, se asignan coordenadas X, Y, Z y el software construye automáticamente una red 3D de puntos. Después, se crea una densa nube de puntos para completar el espacio entre los puntos de conexión, empleando algoritmos de estéreo de múltiples vistas (MVS). Estos algoritmos operan buscando grupos de píxeles en las imágenes, eligiendo las coincidencias más adecuadas y generando puntos en el espacio tridimensional (Furukawa y Ponce, 2010; Hirschmuller, 2008; Seitz et al., 2006). La precisión alcanzable de los puntos derivados de SfM está influenciada por varios factores: (1) el número de imágenes superpuestas en las que aparece la característica de interés, (2) la distancia media desde la cámara hasta el objetivo, (3) la distancia entre los centros de las cámaras en relación con el objeto de interés, es decir, el ángulo de convergencia de las imágenes, (4) la distancia focal de la cámara y (5) la precisión de las mediciones de las imágenes y los parámetros de reconstrucción (James y Robson, 2012). Una vez se obtiene la nube de puntos, se hace una selección manual de los sectores que se van a analizar mediante programas como el de Cloud

Comprare (Girardeau-Montant, 2016). Eliminando puntos que puedan corresponder a vegetación y algún otro tipo de característica del terreno que pueda generar ruido.

3.4 Toma de datos mediante LiDAR

Una vez se adquiere la información del área de estudio mediante los escaneos, ya sea mediante TLS o ALS, se debe realizar una verificación de puntos que no pertenecen a las zonas específicas que se van a estudiar, de manera similar al proceso mencionado en la sección anterior, donde mediante software se eliminan puntos parecidos a vegetación y otros objetos innecesarios que puedan generar ruido. La calidad que se pueden llegar a obtener con las coordenadas de los puntos derivados del LiDAR también se determina por diferentes variables: (1) la densidad de puntos obtenida, (2) la distancia entre el escáner y el objeto de interés, (3) el ángulo de incidencia del láser sobre la superficie, (4) las condiciones atmosféricas durante la adquisición y (5) la precisión del sistema de posicionamiento y orientación del escáner (Shan y Toth, 2018). Además, herramientas semiautomáticas permiten extraer datos estructurales de los macizos rocosos a partir de las nubes de puntos de alta resolución (Gigli y Casagli, 2011).

4. Procesamiento y análisis de datos

4.1 Identificación de discontinuidades mediante DSE

Con base en la nube de puntos 3D generada, ya sea mediante LiDAR o SfM, es posible identificar las discontinuidades en macizos rocosos utilizando programas de código abierto como el DSE (*Discontinuity Set Extractor*) (Riquelme et al., 2020b). Este programa permite la identificación una cantidad de conjuntos de discontinuidades planas junto con su orientación (buzamiento y dirección). Asimismo, identifica los puntos correspondientes a cada conjunto y plano. Su funcionamiento es el siguiente:

- El proceso comienza con una nube de puntos 3D que representa la superficie del talud rocoso. Cada punto en la nube tiene coordenadas espaciales (X, Y, Z) que describen la geometría detallada de la superficie. El software DSE determina el vector normal a la superficie en cada punto de la nube de datos, esencial para establecer la dirección de las discontinuidades. Utiliza un algoritmo basado en los vecinos más cercanos (KNN), considerando una cantidad predefinida de puntos cercanos para definir el plano local y

calcular el vector normal (Riquelme et al., 2015). Luego, realiza una prueba de coplanaridad para verificar si estos puntos pertenecen al mismo plano; aquellos que no cumplen con los criterios se consideran ruido y se descartan, mejorando así la precisión del análisis (Riquelme et al., 2018).

- Los vectores normales que pasan la prueba de coplanaridad se proyectan en una esfera mediante una proyección estereográfica, lo que permite visualizar la orientación de los planos de discontinuidades en un diagrama de polos y facilitar la identificación de los conjuntos estructurales (Riquelme et al., 2014). El DSE calcula la densidad de los polos utilizando la técnica de estimación de densidad mediante función kernel (KDE), ayudando a agrupar los polos en familias que corresponden a planos discontinuos en el macizo rocoso y permitiendo identificar patrones estructurales significativos (Riquelme et al., 2015).
- Una vez identificadas las agrupaciones en el diagrama estereográfico, el DSE asigna los puntos de la nube 3D a las familias de discontinuidades correspondientes utilizando un criterio angular. Compara el ángulo entre el vector normal de un punto y el vector que define la familia de discontinuidades, descartando aquellos puntos cuyo ángulo excede un límite definido para asegurar la coherencia en la asignación (Riquelme et al., 2014). Posteriormente, el software agrupa los puntos en clústeres mediante el algoritmo DBSCAN, permitiendo identificar grupos de puntos que pertenecen a un mismo plano (Riquelme et al., 2015).
- Finalmente, el DSE agrupa los clústeres de puntos en planos coplanares y estima las características geométricas de las discontinuidades, como la orientación, el espaciamiento y la persistencia. Esta información es fundamental para la evaluación de la estabilidad del talud y para comprender mejor la estructura del macizo rocoso (Riquelme et al., 2018).

Como lo explica Tomas et al. (2020). Este proceso de identificación de discontinuidades no es completamente automático y se necesita de una supervisión, dado que, una vez identificadas las familias, se debe hacer un ajuste manual para que haya una alta correspondencia entre las familias observadas en el software y las identificadas en la nube de puntos. Esto se tiene que hacer debido a que pueden existir planos no asociados a discontinuidades y que introducen familias que no reflejan las discontinuidades que influyen en el macizo, por consiguiente, se tienen que descartar.

Los resultados del procesamiento mediante DSE es la clasificación de familia de discontinuidades mediante colores para una mejor diferenciación (

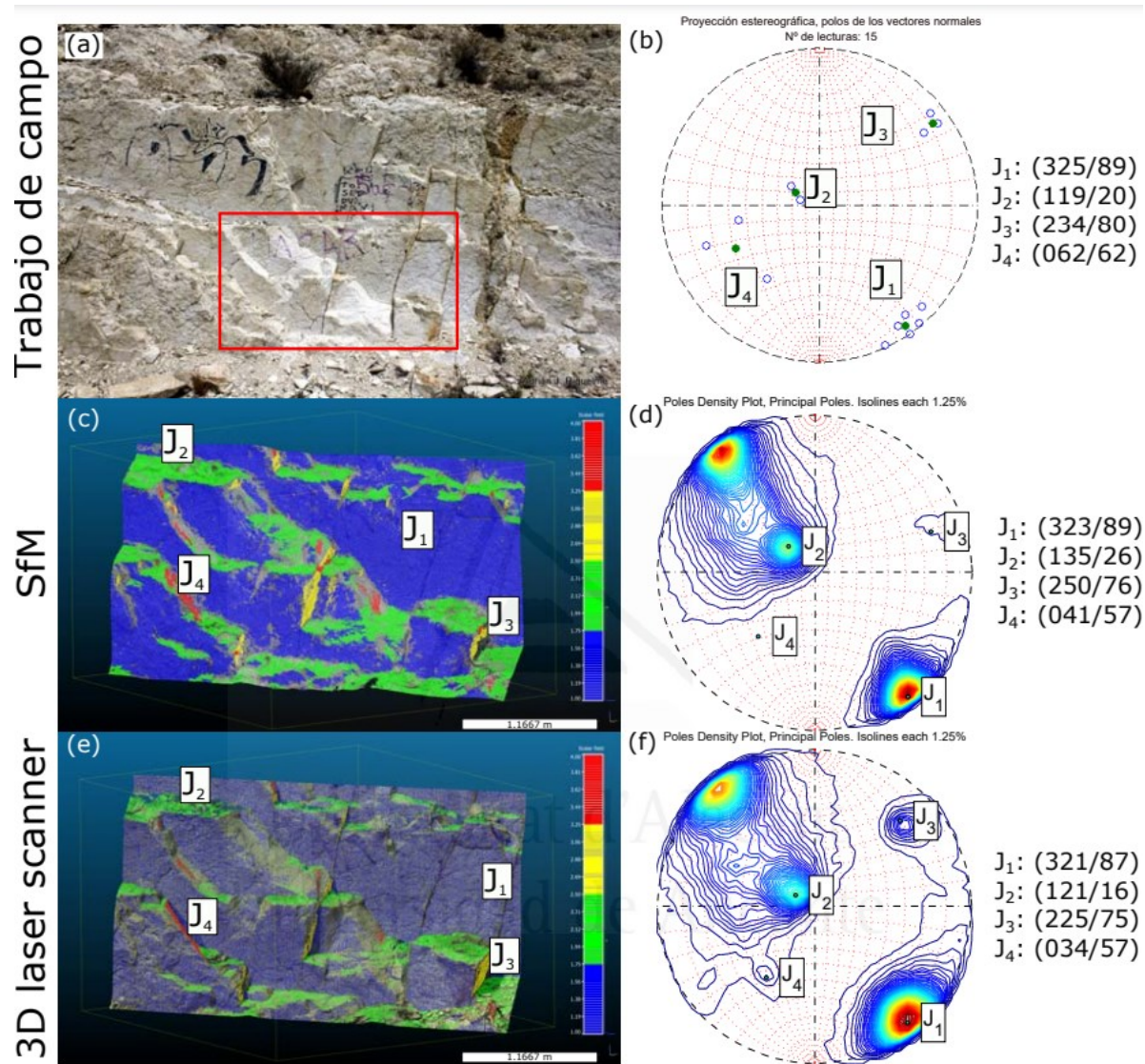


Figura 4).

Figura 4. Discontinuidades extraídas de afloramiento de calizas en un talud (Alicante, España): (a) y (b) representan un trabajo de campo con brújula, (c) y (d) representan una nube de puntos 3D obtenida con SfM y sus familias de discontinuidades clasificadas por colores mediante el programa DSE, (e) y (f) representa la nube de puntos obtenida mediante escáner laser y sus discontinuidades se encuentran clasificadas de la misma manera por DSE. Tomado de Riquelme et al., 2015.

4.2 Análisis cinemático

Con las familias de discontinuidades ya identificadas y caracterizadas, así como las cuñas resultantes de las intersecciones entre estas, es posible realizar un análisis cinemático y un cálculo de estabilidad mediante el límite de equilibrio de los bloques. Este análisis permite realizar una zonificación de las áreas del macizo rocoso más propensas a fallar y generar caídas de bloques, el proceso de análisis cinemático se puede llevar a cabo mediante programas de acceso libre como KAT (Kinematic Analysis Tool) (Tomás et al., 2019), el cual está basado en las condiciones geométricas y geomecánicas descritas en Zhou et al. (2017). El software facilita la identificación de los modos de falla (planar, vuelco o cuña) compatibles con las discontinuidades detectadas en los macizos rocosos a partir de la nube de puntos, así como la evaluación de su estabilidad. La principal ventaja de la herramienta KAT es que permite importar de manera directa las orientaciones de las discontinuidades que se calculan mediante el DSE (Tomás et al., 2020), facilitando así el proceso de análisis. Las condiciones de fallo están definidas en Zhou et al (2017) para la rotura plana es la siguiente:

$$(1) \emptyset < \psi_p < \psi_f$$

$$(2) \alpha_f - \alpha_p \leq 20^\circ$$

En la expresión (1) \emptyset es el ángulo de fricción de la discontinuidad, ψ_p es el ángulo de buzamiento de la discontinuidad y ψ_f es el buzamiento del talud. Para la expresión (2) α_f corresponde a la dirección de buzamiento del talud y α_p es la dirección de buzamiento de la discontinuidad.

Para la rotura por cuña las condiciones son las siguientes (Zhou et al., 2017):

$$(3) \emptyset < \psi_i < \psi_f$$

En la expresión ψ_i corresponde a la intersección de los 2 planos pertenecientes a las discontinuidades que forman la cuña.

Para la rotura por vuelco las condiciones cinemáticas para falla son (Zhou et al., 2017):

$$(4) (90 - \psi_p) + \emptyset < \psi_f$$

$$(5) \alpha_p = (\alpha_f \pm 180^\circ) \pm 10$$

4.3 Estimación de volúmenes susceptibles

Utilizando los datos de la nube de puntos, es posible estimar los volúmenes de roca susceptibles a desprendimientos, una vez que se han identificado las áreas más propensas a la inestabilidad mediante análisis estructural. Para calcular el volumen, se utiliza el espaciado entre las familias de discontinuidades. Al contar con un área geométrica conocida y modelada a partir de las discontinuidades, se puede emplear la fórmula del volumen básico (volumen de prisma o volumen irregular) para estimar el tamaño de la masa (formula 6). Programas de análisis geotécnico pueden modelar directamente el volumen del bloque utilizando un modelo digital de elevación (DEM) y la red de discontinuidades (Jaboyedoff et al., 2008).

$$(6) V_b = S_1 \times S_2 \times S_3 \times (\sin\gamma_1 \times \sin\gamma_2 \times \sin\gamma_3)$$

Donde S es el espaciamiento entre las discontinuidades y γ es el ángulo entre el conjunto de las discontinuidades (Sarro et al., 2018)

En el estudio de Ruiz-Carulla et al. (2022) se identificaron con éxito áreas susceptibles a desprendimientos a lo largo del talud de una cantera, especificando sus mecanismos de rotura y volúmenes estimados (

). Se utilizaron programas como Rocplane y Swedge para analizar los mecanismos de rotura, y aplicaron las bases metodológicas antes mencionadas para estimar los volúmenes.

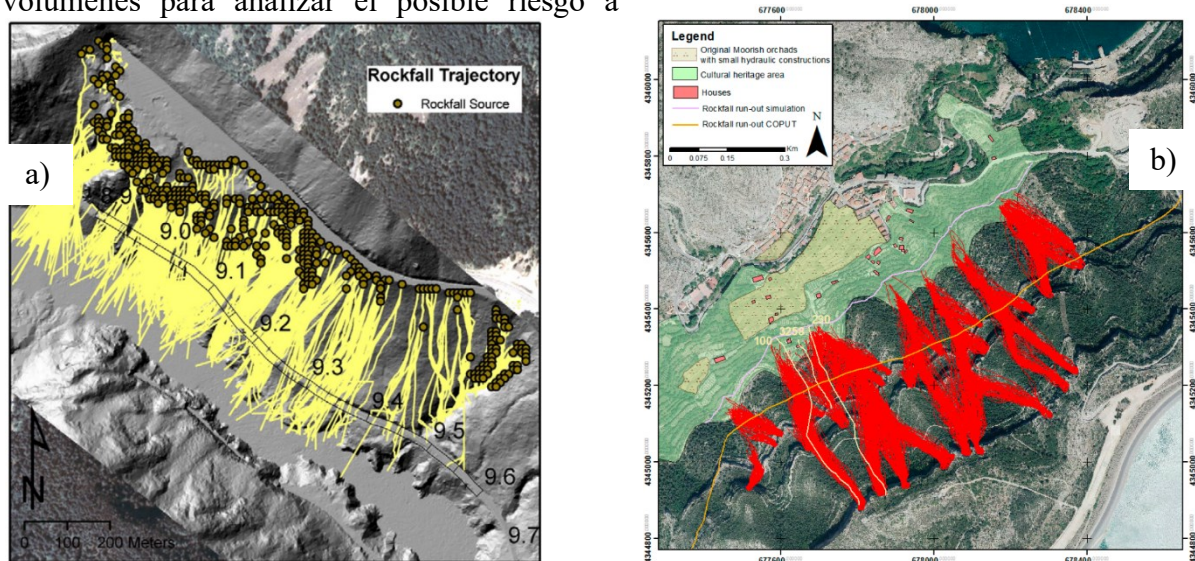
Tabla 1. Resultados para los análisis de estabilidad, Representa las discontinuidades detectadas con su mecanismo de rotura y los volúmenes susceptibles a caída. Tomado y editado de (Ruiz-Carulla et al. 2022)

Mecanismo de rotura	Volumen estimado (m ³ /m)	Familias involucradas
Planar	154 m ³ /m	F3: 252/51
Cuña	149 m ³ /m	F1:301/81, F4:223/77
Planar	154 m ³ /m	F3: 252/51
Cuña	145 m ³ /m	F1:301/81, F4:223/77
Planar	24 m ³ /m	F1:301/81

4.4 Simulación de caídas potenciales

Una vez calculados los volúmenes, es posible simular la trayectoria y distribución espacial de los bloques de rocas durante su caída. El modelado espacial se realiza con software especializado como RocFall (Rocscience, 2023), RockPro3D o extensiones GIS como Rockfall Analyst (Lan et al., 2007). Estas herramientas utilizan las dimensiones de los bloques y un modelo ráster de la topografía para simular, mediante geostatística, la frecuencia, velocidad y trayectorias de las caídas. Al considerar variables como la geometría de la pendiente, la geología y la vegetación, se determina la distribución espacial del riesgo de caída en zonas de interés como vías ferroviarias o carreteras. También se utilizan registros históricos para ajustar los parámetros de simulación, de modo que reflejen con mayor precisión el comportamiento observado de las caídas anteriores (Lan et al., 2010).

En el estudio realizado por Lan et al. (2010), se simularon las caídas de rocas utilizando Rockfall Analyst, identificando con éxito áreas con frecuencias más altas de caídas en un tramo de vía ferroviaria. Se ejecutaron más de 1,000 bloques en la simulación para obtener la mayor variación posible (Figura 5a). Por otro lado, empleando el programa RocPro3D, Sarro et al. (2018) realizaron una simulación similar para la ladera del Barranco de la Barbullá, ubicado en la municipalidad de Cortes de Pallás, Valencia (España). Simularon 4,500 trayectorias con rocas de diferentes volúmenes para analizar el posible riesgo a



viviendas cercanas y compararon el área máxima de influencia obtenida mediante las simulaciones con la propuesta del gobierno regional en 1991 (**Figura 5b**).

Figura 5. a) Trayectoria de caída de rocas simulado con Rockfall Analyst, b) Trayectoria de caída de rocas simulado con RocPro3D, la línea naranja representa el límite del área máxima de influencia estimada en 1991, la línea morada representa el nuevo límite estimado con las simulaciones. Tomado de Sarro et al. 2018; Lan et al., 2010.

A pesar de la alta precisión de los programas Rockfall Analyst y RocFall para simular las trayectorias y propagación de caídas de rocas, ambos autores (Lan et al., 2010; Sarro et al., 2018) señalan que los resultados de las simulaciones y delimitaciones de áreas pueden estar sobrestimados o subestimados debido a la posibilidad de fragmentación de los bloques durante su caída. Programas de modelado como RockPro3D, Rockfall Analyst y RocFall han demostrado ser herramientas robustas para modelar eventos de caídas de rocas; sin embargo, todos emplean un enfoque de "masa concentrada" (lumped mass) que asume que la roca se comporta como una única masa y no permite modelar la fragmentación de la roca. Por lo tanto, la simulación de caídas de rocas de un bloque de tamaño considerable con su fragmentación no es posible con estas herramientas (Lan et al., 2010; Sarro et al., 2018), para la estimación con fragmentación se tienen que implementar otra metodología.

5. Fragmentación de la roca durante desprendimientos

Según Ruiz-Carulla y Corominas (2022), la fragmentación de un bloque de roca es la reducción del tamaño de sus partículas debido a una acción externa, en el caso de las caídas es el constate golpeo con el terreno durante su trayectoria de caída. Comprender el fenómeno de la fragmentación es muy importante, debido a las implicaciones que podría tener su modelamiento a los métodos de mitigación que pueden usarse en proyectos viales o de otra naturaleza, a pesar de todo esto e independientemente del aumento en el estudio sobre desprendimientos de roca, la fragmentación resultante durante el impacto de los bloques es poco conocida.

Un desprendimiento implica un volumen de roca, ya sea como un bloque único o como un conjunto de bloques predefinidos en el macizo rocoso. La intersección de discontinuidades delimita bloques individuales cuya distribución de volúmenes corresponde a la Distribución de Tamaño de Bloques In-situ (In-situ Block Size Distribution, IBSD). Cuando ocurre la caída, los fragmentos producidos

por los impactos se dispersan a lo largo del terreno y, si el desprendimiento es lo suficientemente grande, pueden formar una cubierta de escombros continua denominada cubierta de Escombros Joven (Young Debris Cover o YDC). La distribución de los volúmenes de los fragmentos resultantes se denomina Distribución de Tamaño de Bloques de Desprendimiento (Rockfall Block Size Distribution o RBSD) (Lu y Latham, 1999; Elmouti y Poropat, 2012). Basados en la descripción de Perfect (1997). La fragmentación se define como un fenómeno natural que puede describirse mediante fractales, los cuales son objetos geométricos con una estructura interna repetitiva que se manifiesta en diferentes tamaños y escalas.

5.1 Modelo de Fragmentación fractal

El modelo propuesto por Ruiz-Carulla et al. (2017) tiene como objetivo transformar un volumen o una distribución inicial de volúmenes de bloques (IBSD), en una distribución volumétrica de bloques (o de fragmentos) final, generada por un desprendimiento (RBSD) (**Figura 6a**). La idea clave detrás del modelo es que la fragmentación de una roca sigue un patrón fractal, es decir, una estructura que se repite a diferentes escalas. En otras palabras, cuando una roca se rompe, los tamaños de los fragmentos siguen una distribución auto-similar, lo que implica que ciertos patrones se mantienen independientemente de la escala en que se observen.

para caracterizar la distribución de los fragmentos generados después del impacto de los bloques desprendidos. Ruiz-Carulla et al. (2022) propone una formulación "*Scale-variant*", la cual calcula la dimensión fractal de las rocas, reemplazando a la fórmula "*Scale-invariant*" que conservaba las mismas proporciones a través de todos los órdenes de magnitud o en términos más sencillos, implica que las características de cómo se generan los fragmentos no cambian según el tamaño del bloque inicial, el mismo patrón o comportamiento de fragmentación se aplica sin importar si el bloque es grande o pequeño. Es como decir que la "regla" de la fragmentación se repite de manera uniforme, lo cual mantiene una estructura fractal constante a lo largo de diferentes escalas de tamaño. En cambio, la formulación "*scale-variant*" permite que la fragmentación no sea constante para todas las escalas de tamaño de los fragmentos lo cual facilita la reproducción de distribuciones de fragmentos con una mayor variedad de curvaturas (**Figura 6b**) (Ruiz-Carulla et al. 2022).

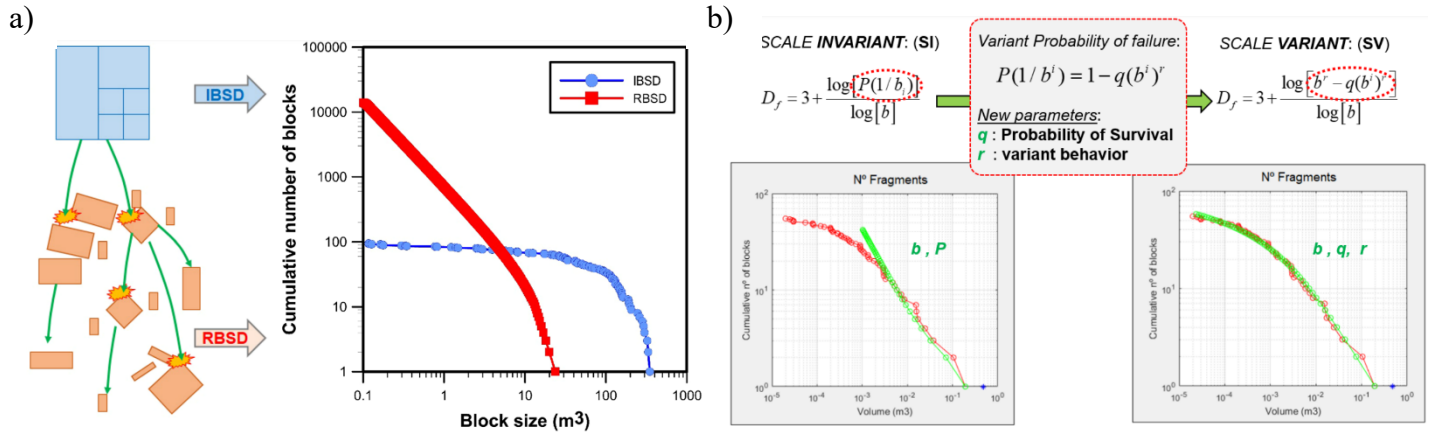


Figura 6. a) fragmentación de una IBSD a una RBSD b) representación gráfica de “Scale- invariant” y “Scale-variant” Tomado de Ruiz-Carulla et al., 2022.

5.2 Aplicación y calibración

Para ajustar los parámetros del modelo y evaluar su precisión, así como su capacidad para replicar diversas simulaciones de desprendimientos fragmentarios, es necesario realizar inventarios de eventos ya ocurridos en los sitios de estudio. Esto implica medir todos los fragmentos de un depósito de caída para obtener sus volúmenes. Una forma más eficiente de hacerlo es utilizar las tecnologías mencionadas a lo largo de este trabajo, como la fotogrametría digital y la reconstrucción del escenario. Estas herramientas permiten medir las geometrías, caracterizar el patrón de discontinuidades, reconstruir en 3D el volumen desprendido y estimar la IBSD, cortando el volumen modelado con las discontinuidades identificadas. Así, se cuenta con la IBSD y la RBSD para ajustar los parámetros del modelo de fragmentación y lograr resultados lo más precisos posibles respecto a la realidad. También se pueden obtener características geomecánicas de la litología de la roca para hacer los inventarios, pero esto requiere de ensayos de laboratorio adicionales en caso de no tener parámetros estandarizados en la literatura, aunque es información valiosa, no es indispensable para realizar la aplicación del modelo (Ruiz-Carulla et al., 2017; Ruiz-Carulla, 2018).

Sin embargo, de no contar con un depósito de fragmentos, la posibilidad de usar valores de calibración generales o estimados para realizar simulaciones preliminares en sitios nuevos es posible. Para ello, el modelo se puede aplicar con parámetros promedio obtenidos de sitios similares en cuanto a características de litología y morfología. Estos resultados no serían tan

precisos como los de un sitio calibrado, pero podrían ofrecer una aproximación inicial valiosa. De ahí la importancia de contar con un inventario detallado (**Tabla 2**). (Ruiz-Carulla et al., 2017; Ruiz-Carulla, 2018).

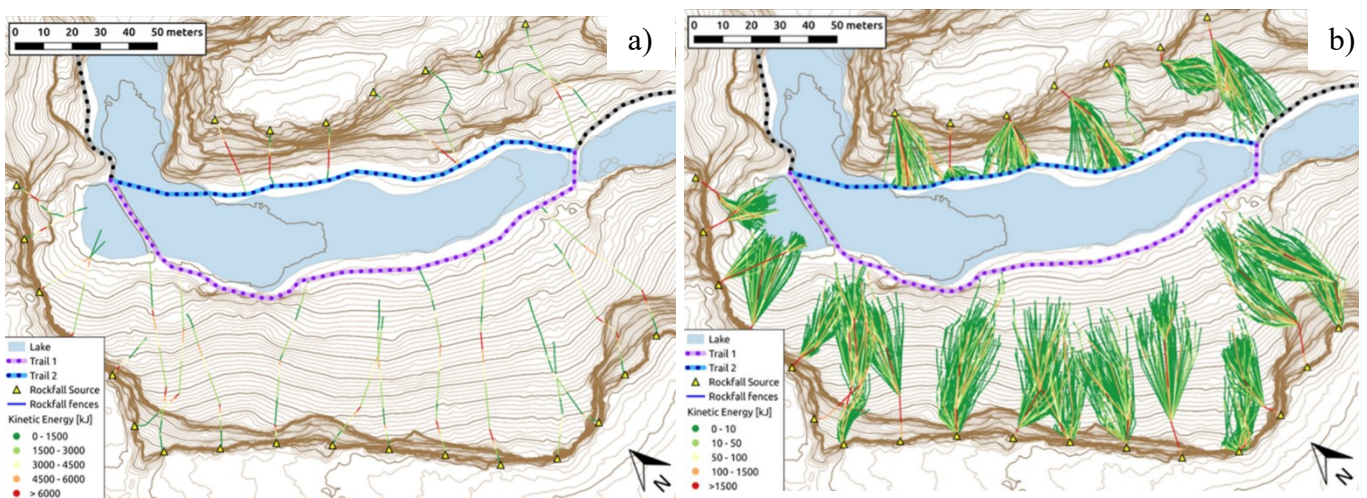
Tabla 2. Inventariado realizado en 7 desprendimientos diferentes, con la información de características físicas y mecánicas de la litología en los depósitos. Tomado y modificado de Ruiz-Carulla et al., 2022

Desprendimientos	1	2	3	4	5	6	7
Tipo de rotura	Planar	Planar	Vuelco	Vuelco	Planar	Vuelco	Planar
Litología	Esquisto	Arenisca	Arenisca	Conglomerado	Calcárea	Calcárea	Calcárea
Volumen total RBSD (m³)	2,6	4,2	10,7	10	900	4350	6351
Volumen total IBSD (m³)	2,6	4,2	10,7	10	997	945	7663
RMR	76	64	72	82	70	74	60
Densidad (kg/cm³)	2,72	2,35	2,46	2,69	2,5	2,35	2,5
Resist. Tracción (MPa)	6,53	2,03	2,6	10,47	0,7	0,7	0,7
UCS (MPa)	32,17	21,38	21,77	38,36	35	13,33	35,29
E young (MPa)	17385	5185	730	74381	20000	12992	22767
Poisson	0,27	0,006	0,18	0,21	0,1	0,12	0,07
Nº de bloques estimados en la RBSD	116	48	78	500	10790	28788	60980
Nº de bloques medidos en la RBSD	116	48	78	500	2256	2721	1524
Vol. Mínimo medido (m³)	0,0001	0,0007	0,0007	0,001	0,001	0,0001	0,01
Vol. Máximo medido (m³)	0,28	1,1	8,5	22	27	445	31
Superficie de cicatriz 3D (m²)	9,55	15	32	87	578	2120	353
Altura escape (m)	15	3,3	6,8	100	50	70	150
Altura primer impacto (m)	12	1	0,6	39	35	10	50
Altura del CdG (m)	13	5	2,8	110	60	80	230
Altura total de caída (m)	13	14,5	6,6	150	70	100	520
Alcance máximo (m)	5	22	9,2	152	70	130	710
Alcance del volumen máximo (m)	5	3	5,6	152	40	80	200
Ángulo de alcance (°)	69	33	36	45	45	38	36
Ancho del depósito (m)	2,5	1,5	5	400	130	80	180
Área del depósito (m²)	5	300	45	2000	4200	6000	44000

5.3 Simulación de desprendimientos con fragmentación fractal

Para simular la propagación de desprendimientos y permitir la activación del modelo de fragmentación propuesto, Matas (2020) desarrolló el programa RockGIS, el cual implementa la fragmentación fractal. Este programa utiliza datos clave como la Distribución de Tamaño de Bloques In Situ (IBSD), que proporciona los volúmenes iniciales de los bloques antes del desprendimiento. Además, requiere información sobre el volumen y la densidad de los bloques para calcular su masa y energía potencial, así como propiedades geomecánicas de las rocas de la zona de estudio, como la resistencia a la compresión, resistencia a la tracción y el módulo de Young, que ayudan a definir la fragmentación bajo condiciones de impacto específicas. Aunque estas propiedades no son siempre obligatorias para el modelamiento.

RockGIS también se beneficia de datos topográficos del terreno, como modelos digitales de elevación, para simular con precisión la trayectoria y el alcance de los fragmentos. Modifica automáticamente los parámetros del factor geométrico y del índice de supervivencia de los bloques (q o S_r) según la energía potencial estimada en cada impacto durante el proceso de propagación. Es la herramienta más sofisticada disponible para determinar el alcance de un desprendimiento y la posible distribución de los fragmentos rocosos, considerando o no su fragmentación, lo cual influye significativamente en las trayectorias y la dispersión de los bloques (**Figura 7**) (Ruiz-Carulla et al., 2022).



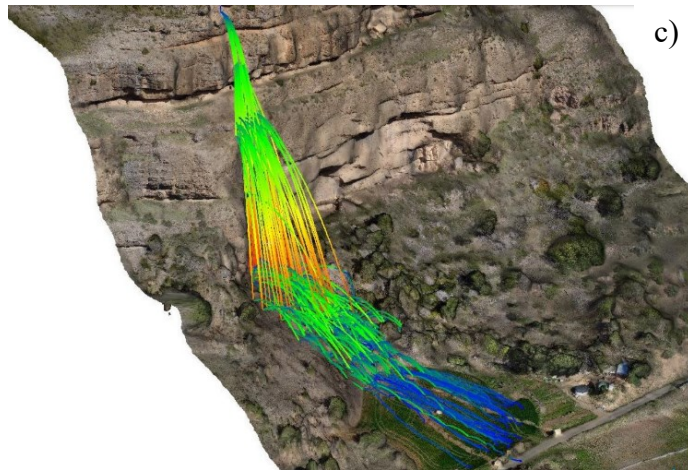


Figura 7. Resultados de las simulaciones con RockGIS, a) trayectorias simuladas de rocas con masas de 10m^3 sin considerar la fragmentación, b) trayectorias simuladas de rocas con masas de 10m^3 considerando la fragmentación, c) vista en 3D de una simulación realizada con fragmentación sobre un modelo digital del terreno. Tomado de Ruiz-Carulla et al., 2022; Corominas et al., 2019

6. Contribución al campo y posibles mejoras

La presente revisión bibliográfica evidencia el papel crucial de las herramientas de teledetección y procesamiento computacional en la estimación cuantitativa de caídas de rocas en proyectos viales. Estas tecnologías superan las limitaciones de los métodos tradicionales, especialmente en contextos de difícil acceso, y aportan una precisión y eficiencia sin precedentes en el análisis geológico. La implementación de tecnologías modernas como LiDAR y fotogrametría digital ha demostrado ser más precisa y efectiva que los métodos convencionales de monitoreo de macizos rocosos. Sin embargo, cada tecnología tiene fortalezas y limitaciones específicas. La fotogrametría terrestre es excelente para capturar imágenes de alta resolución en áreas específicas, pero su aplicabilidad disminuye en zonas con vegetación densa o de gran extensión debido a restricciones en resolución y cobertura. Por otro lado, el escaneo láser aerotransportado (ALS) es eficaz para cubrir grandes áreas de manera eficiente, aunque con menor resolución que el escaneo láser terrestre (TLS). Por lo tanto, el uso de estas herramientas depende de las necesidades específicas del estudio, y no existe la obligación de utilizar un método en particular, lo cual es una gran ventaja.

Un desafío significativo es la identificación y análisis de discontinuidades estructurales a partir de nubes de puntos. Aunque el uso del programa DSE (Discontinuity Set Extractor) ha sido

fundamental en este aspecto, requiere ajustes manuales que pueden introducir subjetividad y aumentar el tiempo de análisis. Esto limita la objetividad y eficiencia del proceso, resaltando la necesidad de desarrollar algoritmos más robustos que minimicen la intervención manual. La mejora de estos algoritmos permitiría una identificación más precisa y rápida de las discontinuidades, optimizando así el análisis estructural de los taludes.

En la simulación de caídas de roca, herramientas como RocFall, RockPro3D y RockGIS son esenciales para modelar las trayectorias de los bloques y estimar la distribución espacial del riesgo. Sin embargo, los enfoques tradicionales que utilizan modelos de "masa concentrada" siguen predominando, y el principal problema es que no reflejan adecuadamente la fragmentación de los bloques durante la caída. Esto puede conducir a estimaciones inexactas de las zonas de impacto y la magnitud del riesgo. En un contexto regional como el de Colombia, hay muy poca evidencia de estudios que empleen estas metodologías, y los que se conocen, como el de Sanabria (2019), continúan implementando modelos de masa concentrada. Por ello, la introducción y divulgación del modelo de fragmentación fractal en RockGIS representa un avance significativo en este campo, ya que permite una simulación más realista del comportamiento de los bloques. Esto facilita una mejor estimación de las áreas afectadas y una planificación más efectiva de las medidas de mitigación necesarias, lo que se resume en estudios más completos. También el ir implementando esta herramienta no solo a nivel global si no regional, permitiría una mayor retroalimentación para el mejoramiento del modelo. Un claro ejemplo sería una base de datos inventariada de múltiples caídas con variaciones litológicas y morfológicas, lo que permitiría crear parámetros estandarizados para las simulaciones.

Para futuras investigaciones, es esencial considerar la integración de todas las herramientas y modelos mencionados en una plataforma unificada. La incorporación de modelos predictivos basados en inteligencia artificial podría complementar y mejorar las metodologías actuales, ya que tiene el potencial de aumentar la precisión en la predicción de la probabilidad de caídas de rocas al analizar grandes volúmenes de datos y detectar patrones que podrían pasar desapercibidos en análisis tradicionales. Aunque ya existen estudios que emplean redes neuronales y aprendizaje profundo aplicados a la detección de caídas de rocas, como los de Faemakis et al. (2022) y Senanayake et al. (2024), presentan limitaciones, especialmente en cuanto a la adaptación a diferentes entornos geológicos y la falta de un modelo de fragmentación en su ejecución. Sin

embargo, se trata de una línea de investigación prometedora que, con más desarrollo, puede convertirse en una herramienta eficaz para predecir desprendimientos.

También es importante reconocer que, aunque las tecnologías modernas ofrecen ventajas significativas, también presentan limitaciones, la dependencia de equipos costosos y personal capacitado puede ser una barrera para su implementación generalizada. Además, factores ambientales como las condiciones climáticas y la presencia de vegetación densa pueden afectar la calidad de los datos recopilados. Estas limitaciones subrayan la necesidad de continuar investigando y desarrollando soluciones que hagan estas tecnologías más accesibles y resilientes a diversas condiciones de campo.

7. Conclusiones

La aplicación de herramientas de teledetección y procesamiento computacional ha supuesto un avance significativo en la estimación de caídas de rocas en proyectos viales, mejorando la precisión y seguridad de los estudios geológicos, especialmente en áreas de difícil acceso. Tecnologías como LiDAR y fotogrametría digital, junto con programas como DSE para la identificación de discontinuidades, han demostrado una capacidad superior para generar modelos tridimensionales de alta resolución, resultando en un monitoreo más eficiente, detallado y continuo.

La implementación del modelo de fragmentación fractal en RockGIS permite simular de manera más realista las trayectorias y la fragmentación de los bloques de roca durante su caída. Esto tiene implicaciones directas en el diseño de infraestructuras de protección y en la evaluación precisa de las áreas de riesgo, posibilitando medidas de mitigación más efectivas. Además, optimiza la planificación de proyectos viales y la implementación de medidas de seguridad específicas, como el diseño adecuado de barreras de contención.

A pesar de limitaciones como la necesidad de ajustes manuales en algunos programas y los costos asociados a equipos y personal capacitado, el impacto positivo de las tecnologías modernas en el monitoreo y análisis de taludes es evidente. La adopción de estas herramientas contribuye significativamente a mejorar la seguridad vial y a gestionar más eficientemente los riesgos geológicos asociados, ya que son métodos relativamente fáciles de ejecutar y reducen la exposición del personal a peligros inminentes.

Mirando hacia el futuro, el desarrollo de algoritmos más avanzados y la integración de inteligencia artificial tienen el potencial de automatizar completamente el proceso de evaluación de riesgos. Esto incrementaría la precisión en las estimaciones y permitiría una gestión más eficiente y sostenible de las infraestructuras viales. La continua innovación y adaptación de estas tecnologías serán esenciales para afrontar los desafíos futuros en ingeniería geológica y garantizar la seguridad de las redes viales en diversos contextos geográficos y geológicos.

Esta investigación refuerza la importancia de integrar tecnologías avanzadas y enfoques multidisciplinarios en la gestión de riesgos geológicos. La combinación de teledetección y análisis computacional representa el camino a seguir para mejorar la seguridad y sostenibilidad de las infraestructuras viales. Es fundamental que la comunidad científica y profesional continúe colaborando y explorando nuevas metodologías que aborden eficazmente los desafíos asociados con la inestabilidad de taludes y otros riesgos geológicos, garantizando así la protección de las personas y los recursos en el ámbito vial.

8. Referencias bibliográficas

- Abellán, A., Derron, M. H., & Jaboyedoff, M. (2016). Use of 3D point clouds in geohazards: current challenges and future trends. *Remote Sensing*, 8(2), 130.
- Agisoft LLC. (2020). *Agisoft Metashape* (Versión 1.6.2). San Petersburgo, Rusia: Agisoft LLC. Recuperado de <https://www.agisoft.com/>
- Arosio, D., Longoni, L., Mazza, F., Papini, M., & Zanzi, L. (2013). Freeze-thaw cycle and rockfall monitoring. En C. Margottini, P. Canuti, & K. Sassa (Eds.), *Landslide Science and Practice* (pp. 331-338). Springer, Berlín, Heidelberg.
- Baltsavias, E. P. (1999). Airborne laser scanning: basic relations and formulas. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54(2-3), 199-214.
- Bar, N., Nicoll, S., & Pothitos, F. (2016). Rock fall trajectory field testing, model simulations and considerations for steep slope design in hard rock. En P. M. Dight (Ed.), *APSSIM 2016: Proceedings of the First Asia Pacific Slope Stability in Mining Conference* (pp. 457-466). Australian Centre for Geomechanics.
- Bemis, S. P., Micklethwaite, S., Turner, D., James, M. R., Akciz, S., Thiele, S. T., & Bangash, H. A. (2014). Ground-based and UAV-based photogrammetry: a multi-scale, high-resolution mapping tool for structural geology and paleoseismology. *Journal of Structural Geology*, 69, 163-178.
- Cawood, A. J., Bond, C. E., Howell, J. A., Butler, R. W. H., & Totake, Y. (2017). LiDAR, UAV or compass-clinometer? Accuracy, coverage and the effects on structural models. *Journal of Structural Geology*, 98, 67-82.
- Corominas, J., Matas, G., & Ruiz-Carulla, R. (2019). Quantitative analysis of risk from fragmental rockfalls. *Landslides*, 16(1), 5-21.
- Elmouti, A., & Poropat, G. V. (2012). Rock mass blockiness characterization using discrete fracture networks. *Computers and Geotechnics*, 43, 150-160.
- Erslev, E. A., & Mayborn, K. R. (1997). Multiple geometries and modes of fault-propagation folding in the Canadian thrust belt. *Journal of Structural Geology*, 19(3-4), 321-335.

- Farmakis, I., DiFrancesco, P. M., Hutchinson, D. J., & Vlachopoulos, N. (2022). Rockfall detection using LiDAR and deep learning. *Engineering Geology*, 309, 106836.
- Furukawa, Y., & Ponce, J. (2010). Accurate, dense, and robust multiview stereopsis. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 32(8), 1362-1376.
- García Burgos, J. H., & Yalán Novoa, J. F. (2023). Análisis cinemático y probabilístico para evaluar el desprendimiento de caída de rocas en taludes.
- Gigli, G., & Casagli, N. (2011). Semi-automatic extraction of rock mass structural data from high-resolution LiDAR point clouds. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 48(2), 187-198.
- Girardeau-Montaut, D. (2016). *CloudCompare (versión 2.6.2)*. Recuperado de <https://www.danielgm.net/cc/>
- Hernández Avelino, I., Aceves Quesada, J. F., & Legorreta Paulín, G. (2023). Inventario de caídas de rocas, análisis estadístico y mapeo geomorfológico de la Localidad Área Nueva en la porción NE de la Sierra de Guadalupe, Estado de México. *Investigaciones Geográficas*, (110).
- Hirschmüller, H. (2008). Stereo processing by semiglobal matching and mutual information. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 30(2), 328-341.
- Jaboyedoff, M., Oppikofer, T., Minoia, R., Locat, J., & Turmel, D. (2008). Terrestrial LiDAR investigation of the 2004 rockslide along Petit Champlain Street, Québec City (Québec, Canada). En *4th Canadian Conference on Geohazards: From Causes to Management* (pp. 295-301). Presse de l'Université Laval.
- Jaboyedoff, M., Oppikofer, T., Abellán, A., Derron, M. H., Loye, A., Metzger, R., & Pedrazzini, A. (2012). Use of LiDAR in landslide investigations: a review. *Natural Hazards*, 61(1), 5-28.
- James, M. R., & Robson, S. (2012). Straightforward reconstruction of 3D surfaces and topography with a camera: accuracy and geoscience application. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 117(F3).

- Jordá-Bordehore, L., Riquelme, A., Tomás, R., & Cano, M. (2016). Análisis estructural y geomecánico en zonas inaccesibles de cavernas naturales mediante técnicas fotogramétricas: aplicación en la entrada de la cueva de Artá (Mallorca). En *El Karst y el Hombre: Las Cuevas como Patrimonio Mundial* (pp. 255-265).
- Lan, H., Martin, C. D., & Lim, C. H. (2007). RockFall analyst: A GIS extension for three-dimensional and spatially distributed rockfall hazard modeling. *Computers & Geosciences*, 33(2), 262-279.
- Lan, H., Martin, C. D., Zhou, C., & Lim, C. H. (2010). Rockfall hazard analysis using LiDAR and spatial modeling. *Geomorphology*, 118(1-2), 213-223.
- Lato, M., Diederichs, M. S., & Hutchinson, D. J. (2010). Bias correction for view-limited LiDAR scanning of rock outcrops for structural characterization. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 43(5), 615-628.
- Lu, P., & Latham, J. P. (1999). Developments in the assessment of in-situ block size distributions of rock masses. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 32(1), 29-49.
- Marzorati, S., Luzi, L., & De Amicis, M. (2002). Rock falls induced by earthquakes: a statistical approach. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 22(7), 565-577.
- Matas, G. (2020). *Modelling fragmentation in rockfalls* (Tesis doctoral). Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona.
- Perfect, E. (1997). Fractal models for the fragmentation of rocks and soils: a review. *Engineering Geology*, 48, 185-198.
- Posse, F. J. A. (1987). *Manual de ingeniería de taludes* (No. 3). Instituto Geológico y Minero de España (IGME).
- Ramírez Oyanguren, P., & Alejano Monge, L. R. (2004). *Mecánica de rocas: Fundamentos e ingeniería de taludes*. Madrid, España: Ediciones RIL.
- Riquelme, A. (2015). *Uso de nubes de puntos 3D para identificación y caracterización de familias de discontinuidades planas en afloramientos rocosos y evaluación de la calidad geomecánica* (Tesis doctoral). Universitat Politècnica de Catalunya.

- Riquelme, A., Abellán, A., & Tomás, R. (2014). A new approach for semi-automatic rock mass joints recognition from 3D point clouds. *Computers & Geosciences*, 68, 38-52.
- Riquelme, A., Abellán, A., Tomás, R., & Jaboyedoff, M. (2015). Automatic mapping of discontinuity persistence on rock mass surfaces using 3D point clouds. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 48(3), 1025-1039.
- Riquelme, A., Tomás, R., Cano, M., Abellán, A., & Tsutsumida, N. (2018). Discontinuity spacing analysis in rock masses using 3D point clouds. *Engineering Geology*, 235, 43-55.
- Rocscience Inc. (s.f.). *RocFall3: 3D Rockfall Analysis Software*. Recuperado el 24 de octubre de 2024, de <https://www.rocscience.com/software/rocfall3>
- Ruiz-Carulla, R., Corominas, J., & Mavrouli, O. (2017). A fractal fragmentation model for rockfalls. *Landslides*, 14(3), 875-889.
- Ruiz-Carulla, R., & Corominas, J. (2020). Analysis of rockfalls by means of a fractal fragmentation model. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 53(3), 1433-1455.
- Ruiz-Carulla, R. (2018). *Rockfall fragmentation: in situ rock block size characterization, fragmentation degree and implication in propagation analysis* (Tesis doctoral). Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona.
- Ruiz-Carulla, R., & Corominas, J. (2022). Fragmentación fractal en desprendimientos rocosos. En *Taludes 2022: X Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables* (pp. 297-308). International Centre for Numerical Methods in Engineering (CIMNE).
- Ruiz-Carulla, R., Cámara Zapata, E., & Martínez Bofill, J. (2022). Análisis de estabilidad y simulaciones de desprendimientos en canteras a partir de modelos 3D obtenidos con vuelos de dron. En *Taludes 2022: X Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables* (pp. 185-196). International Centre for Numerical Methods in Engineering (CIMNE).
- Sanabria, J. (2019). Evaluación del riesgo ante caída de bloques en taludes de roca a partir de procesamiento de imágenes digitales y simulación de redes de fracturamiento y de trayectorias de bloques. *Universidad Nacional de Colombia*.

- Sardana, S., Sinha, R. K., Jaswal, M., Verma, A. K., & Singh, T. N. (2022). Influence of freeze-thaw cycles on the velocity of elastic waves in saturated rock specimens. En A. K. Verma, A. S. Dinda, & R. S. Kanjlia (Eds.), *Proceedings of Geotechnical Challenges in Mining, Tunneling and Underground Infrastructures* (pp. 15-25). Springer, Singapur.
- Sarro, R., Riquelme, A., García-Davalillo, J. C., Mateos, R. M., Tomás, R., Pastor, J. L., ... & Herrera, G. (2018). Rockfall simulation based on UAV photogrammetry data obtained during an emergency declaration: application at a cultural heritage site. *Remote Sensing*, 10(12), 1923.
- Seitz, S. M., Curless, B., Diebel, J., Scharstein, D., & Szeliski, R. (2006). A comparison and evaluation of multi-view stereo reconstruction algorithms. *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 1, 519-528.
- Senanayake, I. P., Hartmann, P., Giacomini, A., Huang, J., & Thoeni, K. (2024). Prediction of rockfall hazard in open pit mines using a regression-based machine learning model. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 177, 105727.
- Shan, J., & Toth, C. K. (Eds.). (2018). *Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing* (2^a ed.). CRC Press.
- Slob, S., van Knapen, B., Hack, R., Turner, K., & Kemeny, J. (2005). Method for automated discontinuity analysis of rock slopes with three-dimensional laser scanning. *Transportation Research Record*, 1913(1), 187-194.
- Telling, J., Lyda, A., Hartzell, P., & Glennie, C. (2017). Review of Earth science research using terrestrial laser scanning. *Earth-Science Reviews*, 169, 35-68.
- Tomás, R., Pagán, J. I., Riquelme, A., Cano, M., & Pastor, J. L. (2019). *Kinematic Analysis Tool, KAT*. Recuperado de <http://hdl.handle.net/10045/90669>
- Tomás, R., Riquelme, A., Cano, M., Pastor, J. L., Pagán, J. I., Asensio, J. L., ... & Ruffo, M. (2020). Evaluación de la estabilidad de taludes rocosos a partir de nubes de puntos 3D obtenidas con un vehículo aéreo no tripulado. *Revista de Teledetección*, (55), 1-15.

- Varnes, D. J. (1978). Slope movement types and processes. En R. L. Schuster & R. J. Krizek (Eds.), *Landslides: Analysis and Control* (pp. 11-33). Transportation Research Board, National Academy of Sciences.
- Vasuki, Y., Holden, E. J., Kovesi, P., & Micklethwaite, S. (2013). A geological structure mapping tool using photogrammetric data. *ASEG Extended Abstracts*, 2013(1), 1-4.
- Vinueza Nobre, J. R. (2020). *Monitoreo de bloques de rocas mediante el uso de láser escáner terrestre (TLS): Estudio de alternativas para la detección de bloques desprendidos* (Tesis de maestría). Universitat Politècnica de Catalunya.
- Wehr, A., & Lohr, U. (1999). Airborne laser scanning—an introduction and overview. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54(2-3), 68-82.
- Westoby, M. J., Brasington, J., Glasser, N. F., Hambrey, M. J., & Reynolds, J. M. (2012). 'Structure-from-Motion' photogrammetry: a low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 179, 300-314.
- Wyllie, D. C. (2014). *Rockfall Engineering*. CRC Press.
- Zhou, X., Chen, J., Chen, Y., Song, S., Shi, M., & Zhan, J. (2017). Bayesian-based probabilistic kinematic analysis of discontinuity-controlled rock slope instabilities. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 76, 1249-1262.