



# Evaluación de la estabilidad de taludes rocosos a partir de nubes de puntos 3D obtenidas con un vehículo aéreo no tripulado

Tomás, R. <sup>1,\*</sup>, Riquelme, A.<sup>1</sup>, Cano, M.<sup>1</sup>, Pastor, J.L.<sup>1</sup>, Pagán, J.I.<sup>1</sup>, Asensio, J.L.<sup>2</sup>, Ruffo, M.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Ingeniería Civil, Escuela Politécnica Superior, Universidad de Alicante, Apdo. correos 99, 03080 Alicante, España.

<sup>2</sup> Terabee, Technoparc, 90 Rue Henri Fabre, 01630, Saint-Genis-Pouilly, Francia.

---

**Resumen:** En este trabajo se describe una metodología propuesta para la identificación semiautomática de discontinuidades y el posterior análisis cinemático y de estabilidad a través de su aplicación a una trinchera excavada en roca de una línea de ferrocarril. La adquisición de imágenes se ha llevado a cabo mediante un vehículo aéreo no tripulado de seis rotores para su posterior restitución fotogramétrica a través de la técnica digital *Structure from Motion* (SfM) mediante el programa Agisoft Metashape que proporciona una nube de puntos 3D. A partir de esta nube de puntos, se han identificado cuatro familias de discontinuidades ( $J_1$ ,  $J_2$ ,  $J_3$  y  $J_4$ ) que afectan al talud haciendo uso del programa de código abierto Discontinuity Set Extractor (DSE). Finalmente, se han llevado a cabo análisis cinemáticos y de estabilidad de las posibles roturas de bloques a favor de las discontinuidades identificadas en el talud. Los resultados muestran tres potenciales roturas por cuña y una plana que han sido validadas cualitativamente mediante el análisis de la geometría de las nubes de puntos.

**Palabras clave:** UAV, nube de puntos 3D, discontinuidad, talud rocoso, estabilidad del talud.

## Evaluation of the stability of rocky slopes using 3D point clouds obtained from an unmanned aerial vehicle

**Abstract:** In this work, a methodology proposed for the semiautomatic identification of discontinuities and the later kinematic and stability analyses is described through its application to a rocky railway line cutting. Image acquisition has been performed using a six-rotors unmanned aerial vehicle for their subsequent photogrammetric restitution applying of the digital technique *Structure from Motion* (SfM) by means of the software Agisoft Metashape that provides a 3D point cloud. From this 3D point cloud, four discontinuity sets ( $J_1$ ,  $J_2$ ,  $J_3$  and  $J_4$ ) affecting the cutting have been identified using the open source software Discontinuity Set Extractor (DSE). Finally, kinematic and stability analyses of the potential block failures controlled by the discontinuities identified in the cutting. The results show three potential wedge and planar failures that have been qualitatively validated through the geometric analysis of the 3D point cloud.

**Key words:** UAV, 3D point cloud, discontinuity, rocky slope, slope stability.

---

**To cite this article:** Tomás, R., Riquelme, A., Cano, M., Pastor, J.L., Pagán, J.I., Asensio, J.L., Ruffo, M. 2020. Evaluation of the stability of rocky slopes using 3D point clouds obtained from an unmanned aerial vehicle. *Revista de Teledetección*, 55, 1-15. <https://doi.org/10.4995/raet.2020.13168>

\* Corresponding author: [roberto.tomas@ua.es](mailto:roberto.tomas@ua.es)

## 1. Introducción

La estabilidad de taludes en roca es un aspecto esencial en el ámbito del diseño de infraestructuras civiles tales como ferrocarriles o carreteras. Más concretamente, las roturas o fallos de los taludes rocosos de líneas de ferrocarril (Figura 1a) pueden poner en riesgo la seguridad o funcionamiento normal del servicio, resultando imprescindible la evaluación de su seguridad frente a posibles fallos (Ansari et al., 2015; Hungri et al., 1999).

El estudio de taludes excavados en roca puede llevarse a cabo a través de métodos empíricos, como las clasificaciones geomecánicas, o por medio de análisis de estabilidad. En ambos casos, la toma de datos para conocer las propiedades y características del macizo rocoso se lleva a cabo *in situ*, midiendo y estimando diferentes parámetros de la roca matriz y de las discontinuidades (Figura 1b y c; Tabla 1). Este contacto físico con el talud puede resultar peligroso (e.g. si se producen desprendimientos durante la toma de datos), costoso y lento (i.e. requiere de la obtención de una gran cantidad de información), y la toma de datos puede ser sesgada (e.g. por la existencia de zonas inaccesibles del talud). Asimismo, si la infraestructura se encuentra en servicio, la toma de datos puede requerir interrupciones de esta.

Los sensores remotos como el Láser Scanner (LiDAR, acrónimo del término inglés *Light Detection and Ranging*; Figura 1f) o la fotogrametría digital terrestre (Figura 1d) o aérea (Figura 1e) se han convertido en una alternativa para la caracterización y monitorización de taludes rocosos

(e.g. Abellán et al., 2014; Gigli and Casagli, 2011; Lato and Vöge, 2012; Riquelme et al., 2014, 2016, 2020a; Royán et al., 2014; Slob, 2010). El LiDAR es un instrumento de captura masiva de datos que permite obtener una nube de puntos del terreno en 3D a gran velocidad, con una elevada precisión y desde gran distancia haciendo uso de un haz láser pulsado (Figura 1f). Por otro lado, las técnicas de fotogrametría digital (e.g. *Structure from Motion*, SfM) proporciona nubes de puntos 3D obtenidas mediante la resolución de las ecuaciones de colinearidad a partir del elevado número de puntos conjugados identificados durante la fase de correlación automática de un conjunto de imágenes superpuestas adquiridas de forma no estructurada (Fonstad et al., 2013; James y Robson, 2012; Micheletti et al., 2015; Westoby et al., 2012). La técnica SfM en concreto, es un método basado en los principios de la fotogrametría estereoscópica, es decir, que la estructura en 3D de un objeto se puede obtener mediante la superposición de imágenes ópticas obtenidas desde distintos puntos de vista. No obstante, esta técnica fue desarrollada en el campo de la visión artificial y de los algoritmos de correlación automática de imágenes. Además, la principal diferencia de la técnica SfM con la fotogrametría convencional, en el hecho de que la geometría de la escena, las posiciones de la cámara y sus orientaciones se resuelven automáticamente sin la necesidad de establecer a priori, una red de puntos de control de coordenadas 3D conocidas (Tomás et al., 2016).

Las nubes de puntos 3D obtenidas por las técnicas descritas, aportan información geométrica (i.e.

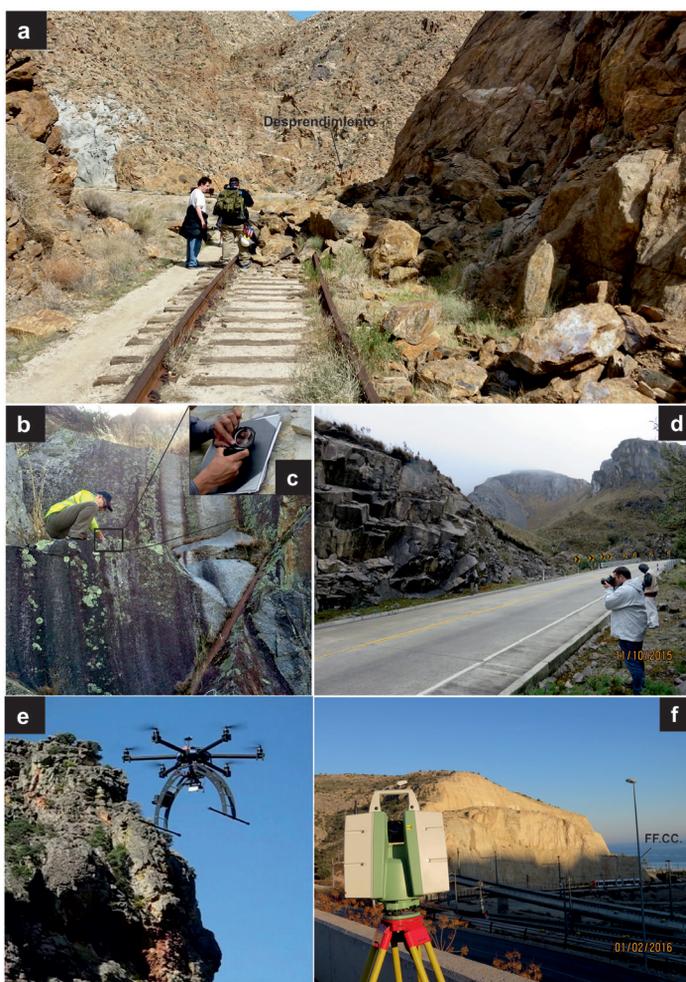
**Tabla 1.** Posibles fuentes de información para la obtención de parámetros geomecánicos del macizo rocoso (modificado de Riquelme et al., 2016). AG: Análisis geométrico; T: testificación; I: intensidad; C: campo; L: laboratorio; 3D: nubes de puntos 3D.

Parámetro del macizo rocoso	Unidades	Adquisición	Origen de datos
Orientación	°	AG	C, 3D
RQD	%	T, AG	L, C, 3D
Espaciado	m	T, AG	L, C, 3D
Persistencia	m	AG	C, 3D
Apertura	m	AG	C, 3D
Rugosidad	-	AG	C, 3D
Agua	-	I	C, 3D
Tamaño de bloques	m <sup>3</sup>	AG	C, 3D

coordenadas X, Y, Z) de la superficie externa de los taludes. Además, algunos equipos LiDAR proporcionan para cada punto la intensidad, que determina la cantidad de energía reflejada por la superficie del objeto. Toda esta información resulta de gran utilidad en mecánica de rocas, dado que permite identificar (Tabla 1) la orientación, el número, el espaciado, la persistencia, la rugosidad y otras propiedades de las discontinuidades que afectan a los macizos rocosos (Lato y Vöge, 2012; Riquelme et al., 2014, 2015, 2018; Sturzenegger y Stead, 2009a, b; Sturzenegger et al., 2011). Los parámetros obtenidos del análisis de las nubes de puntos 3D pueden a su vez emplearse para

caracterizar el macizo rocoso haciendo uso de clasificaciones geomecánicas y evaluar su estabilidad a través de análisis cinemáticos o de estabilidad.

En este trabajo se presenta la metodología desarrollada en el marco del proyecto europeo MOMIT (*Multi-scale Observation and Monitoring of railway Infrastructure Threats*) para la obtención de nubes de puntos 3D mediante Vehículo Aéreo No Tripulado (UAV, del inglés *Unmanned Aerial Vehicle*) y su posterior análisis para obtener las familias de discontinuidades y evaluar la estabilidad de los taludes de una trinchera de ferrocarril situado en la región francesa de Lavancia-Épercy.



**Figura 1.** a) Desprendimiento rocoso sobre una vía de ferrocarril (Creative Commons “Fallen rock on the San Diego and Arizona Railway” by RightCowLeftCoast is licensed under CC BY-SA 4.0). b) Medida manual de la orientación de las discontinuidades de un macizo rocoso mediante (c) brújula con clinómetro. Toma de imágenes de taludes: d) con una cámara fotográfica (fotogrametría terrestre); e) con un UAV; y f) con un LiDAR.

## 2. Materiales y métodos

### 2.1. Descripción de la zona de estudio

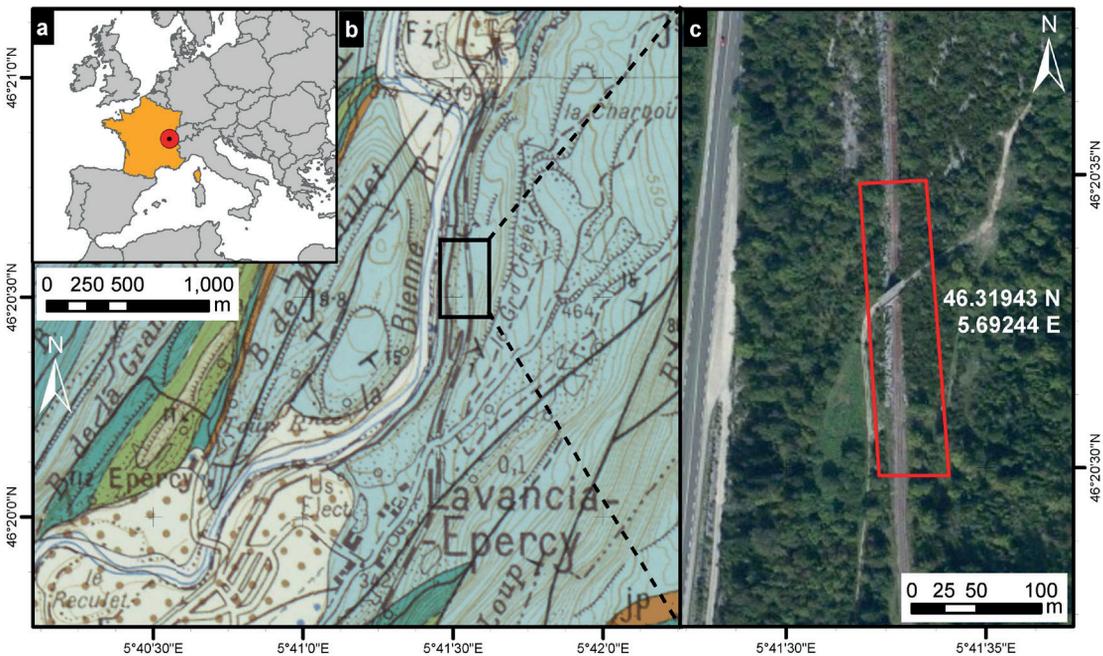
Los taludes en los que se ha aplicado la metodología propuesta se localizan en la localidad de Lavancia-Épercy (coordenadas 46,341943° N, 5,692445° E) situada al E de Francia (Figura 2). Los taludes forman parte de una trinchera de una línea de ferrocarril abandonada que discurre paralela a la carretera de Lyon (D436) y al río Bienne. El tramo estudiado, que fue excavado mediante voladuras, presenta una orientación aproximada N-S y unos 5 m de ancho. Las alturas máxima y media de los taludes resultantes son de 9,5 y 3,0 m, respectivamente.

El macizo en el que se han excavado los taludes está formado por calizas nodulosas con glauconita (J<sup>9-8</sup>) del Jurásico superior con direcciones de buzamiento y buzamientos variables según la cartografía geológica 1:50 000 de la región (brgm 2020) (Figura 2b).

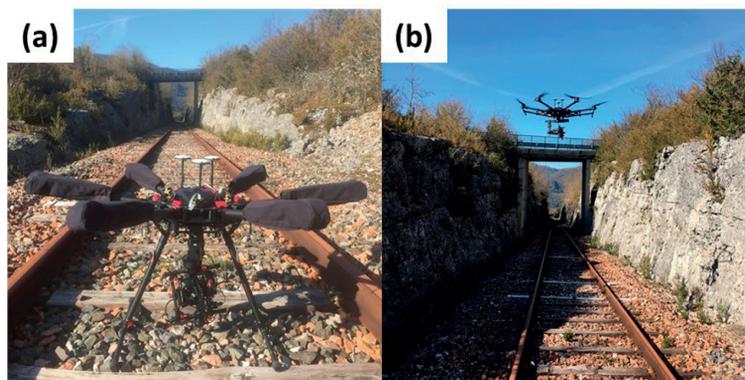
### 2.2. Adquisición de imágenes

Las imágenes empleadas para la construcción de la nube de puntos 3D del talud ferroviario estudiado fueron adquiridas mediante un UAV de seis rotores modelo DJI Matrice 600 Pro con un peso máximo al despegue de 15,5 kg y con una carga útil de hasta 6 kg (Figura 3). El tiempo en vuelo estacionario de este UAV es aproximadamente de 38 min sin carga y 18 min con 6 kg de carga útil, pudiendo alcanzar velocidades máximas 65 km/h (sin viento) contando con un alcance de transmisión de hasta 5 km. La cámara montada en el UAV es una Sony-5r con una resolución de 4912×2760 px y una distancia focal de 15 mm que elimina el efecto ojo de pez de los bordes de las imágenes capturadas. Además, el sistema tiene integrado un sistema anticolidión, lo que le permite llevar a cabo adquisiciones próximas al talud en condiciones seguras.

En total se llevaron a cabo ocho vuelos de unos 20 minutos cada uno, seis en automático y dos de forma manual.



**Figura 2.** (a) Localización de la zona de estudio; (b) Cartografía geológica de la zona de Lavancia-Épercy; (c) Vista aérea del tramo de talud analizado. Fz: Aluvión estabilizado moderno (Cuaternario); n<sub>2</sub>: calizas amarillo claro y margas pastosas azul grisáceas (Cretácico inferior); n<sub>3</sub>: conglomerados, areniscas y margas (Cretácico inferior). n<sub>4</sub>: calizas blancas a amarillentas oolíticas y arrecifes (Cretácico inferior). J<sup>9-8</sup>: calizas nodulosas con glauconita (Jurásico superior); n<sub>2</sub>: conglomerados, areniscas y margas (Jurásico superior).



**Figura 3.** (a) UAV de seis rotores empleado; (b) Proceso de adquisición de imágenes en los taludes de la línea ferroviaria.

### 2.3. Generación de la nube de puntos 3D

La nube de puntos 3D se obtuvo a partir de 96 fotos (72 azimutales y 24 oblicuas tomadas a 45°) adquiridas con el UAV, empleando la técnica SfM, que proporciona excelentes resoluciones y elevados rendimientos. Actualmente, existen numerosos programas, tanto libres como comerciales, para el procesamiento fotogramétrico de imágenes digitales. Para generar la nube de puntos en este trabajo se empleó el programa comercial Agisoft Metashape (Agisoft LLC, 2020) especialmente diseñado para llevar a cabo el procesamiento fotogramétrico de imágenes digitales mediante la técnica SfM. El procesamiento de imágenes con este programa para la obtención de la nube de puntos consta de los siguientes pasos (Agisoft LLC, 2020): a) carga de las imágenes; b) análisis de las imágenes y eliminación de aquellas que sean innecesarias; c) alineado de las fotografías; y d) construcción de la nube de puntos densa.

El alineado y orientación de la nube de puntos se llevó a cabo a partir de tres puntos de control definidos mediante tres dianas cuadradas de 20×20 cm, de fondo blanco, con una cruz negra con un ancho de línea de 19 mm, montadas sobre trípode. Estos fueron posicionados sobre un plano teórico horizontal mediante nivel y distanciómetro láser con una precisión de 1,5 mm, formando un

triángulo rectángulo isósceles sobre la superficie de un puente existente en la zona con dos catetos de 2,96 m, de modo que uno de los catetos estuviera orientado al norte magnético y el otro marcara la dirección E-W.

Los parámetros de procesado más relevantes empleados se muestran en la Tabla 2.

Una vez obtenida la nube de puntos bruta, se seleccionaron los puntos correspondientes a los sectores a analizar. Estas zonas de interés se depuraron manualmente mediante el programa Cloud Compare (Girardeau-Montant, 2016) para eliminar puntos situados sobre vegetación y estructuras que introdujeran ruido en la nube de puntos que afectaran al posterior proceso de identificación de discontinuidades.

### 2.4. Identificación de discontinuidades

La identificación de discontinuidades del macizo rocoso se ha realizado analizando la nube de puntos 3D obtenida mediante el programa de código abierto DSE (Riquelme et al., 2020b) que implementa la metodología propuesta por Riquelme et al. (2014). Este software permite identificar el número de familias de discontinuidades planas y sus orientaciones (dirección de buzamiento y buzamiento) bajo supervisión de un criterio experto.

**Tabla 2.** Principales parámetros de procesado para la generación de la nube de puntos 3D.

Etapa	Parámetro	Valor
Orientación de imágenes	Precisión	Máxima
	Pre-proceso de emparejamiento de imágenes	Genérico
Creación nube de puntos densa	Calidad	Extra alta
	Filtrado de profundidad	Moderado

Además, determina los conjuntos de puntos que pertenecen a cada familia y a cada plano separado y la ecuación algebraica de cada plano individual. El fundamento del DSE es el siguiente: (1) cálculo del vector normal de cada punto para un número de vecinos determinado, realizando un test de coplanaridad que descarta puntos no coplanares y representando en proyección estereográfica el polo del vector normal de cada punto; (2) cálculo de la densidad de los polos anteriores mediante la función *Kernel Density Estimation* (Botev et al., 2010); (3) asignación a cada punto la familia más próxima en proyección estereográfica, mediante un criterio de ángulo entre vectores normales, descartando los puntos cuyo ángulo supera cierto límite; (4) aislamiento de los puntos pertenecientes a cada familia y cálculo de clústeres de puntos mediante la técnica DBSCAN (Ester et al., 1996), eliminando aquellos clústeres con un número de puntos inferior a cierto valor; (5) agrupamiento de planos de clústeres mediante un test de coplanaridad y cálculo de espaciado normal de familia (Riquelme et al., 2015) y de la persistencia (Riquelme et al., 2018). Los parámetros empleados en el caso estudiado para el desarrollo de este análisis, descritos en detalle en Riquelme et al. (2014), se muestran en la Tabla 3.

Este programa ha sido ampliamente contrastado con datos medidos *in situ* por procedimientos convencionales (Jordá Bordehore et al., 2017; Riquelme et al., 2014, 2015, 2017; Tomás et al.,

2016) proporcionando diferencias de unos 5° (Jordá Bordehore et al., 2017), totalmente asumibles en un análisis geomecánico de un talud rocoso.

Para el desarrollo de este análisis se analizaron dos sectores de aproximadamente 12 y 6 m<sup>2</sup> de superficie situados en el talud sur de la trinchera de ferrocarril. El talud norte no pudo ser analizado dado que, al encontrarse en sombra durante la adquisición de imágenes, la nube de puntos obtenida no presenta una calidad suficiente. No obstante, dada la continuidad en cuanto a propiedades geomecánicas a un lado y otro de la trinchera excavada, se ha asumido a efectos de cálculo, que las familias de discontinuidades identificadas en el talud sur son también representativas del talud norte.

El proceso de identificación de discontinuidades es semiautomático o supervisado, puesto que, una vez identificadas automáticamente las familias, su número definitivo ha de ajustarse manualmente hasta que se observe una buena coincidencia entre las familias identificadas por el programa con las visibles en la nube de puntos. Esto se debe a que, en ocasiones, pequeñas variaciones en la orientación de las discontinuidades o la existencia de planos no asociados a discontinuidades (e.g. el plano del talud) introducen familias que no son representativas de las discontinuidades que afectan al macizo rocoso y que por lo tanto hay que descartar.

**Tabla 3.** Parámetros de procesado para la identificación de discontinuidades con el programa DSE.

Parámetro	Descripción	Valor
knn	K vecinos más próximos a cada punto para la realización del análisis de componentes principales.	30
tolerance	Máxima desviación admisible en un subconjunto de puntos para que sea considerado como un plano.	0,2
Nº bins hist	Número de bins a considerar en el <i>Kernel density estimation</i> (KDE). Este parámetro se usa en el cálculo automático del ancho de los kernels (i.e. ancho de banda) y el cálculo de su densidad. Este parámetro es una potencia de 2.	32/64
Angle min v ppal	Valor mínimo del ángulo formado por dos vectores principales.	10
Max number ppal planes	Máximo número de familias de discontinuidades	Variable según el sector (3 o 4)
Cone	Ángulo del cono considerado para la segmentación de la nube de puntos. Este parámetro se utiliza para asignar cada punto de la nube a la familia principal más próxima.	30
Fix DS orient	Esta opción se usa para fijar el vector normal del polo principal de la familia de discontinuidades.	Activado
K sigmas	Este es un umbral que multiplica la desviación estándar de dos planos para establecer si ambos clusters pueden ser considerados paralelos o no de una forma objetiva.	1,5

## 2.5. Análisis cinemático

Una vez identificadas y caracterizadas las familias de discontinuidades mediante el programa semiautomático DSE, así como las cuñas resultantes de su combinación, se llevó a cabo un análisis cinemático y un cálculo de estabilidad por equilibrio límite de los bloques potencialmente inestables.

El análisis cinemático se efectuó a través de una aplicación libre desarrollada *exprofeso* en Visual Basic para Microsoft Excel denominada KAT (*Kinematic Analysis Tool*) (Tomás et al., 2019) basada en las condiciones geométricas y geomecánicas descritas en Zhou et al. (2017). Esta aplicación permite determinar los modelos de rotura (i.e. plana, cuña o vuelco) compatibles con las discontinuidades identificadas en el macizo rocoso a partir de la nube de puntos 3D y evaluar si estos son estables o inestables. Además, esta aplicación permite importar directamente las orientaciones calculadas mediante el DSE en la etapa anterior.

En detalle, las condiciones de fallo definidas por Zhou et al (2017) para rotura plana son:

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

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

Donde  $\emptyset$  es el ángulo de fricción de la discontinuidad,  $\psi_p$  es el buzamiento de la discontinuidad,  $\psi_f$  es el buzamiento del talud,  $\alpha_f$  es la dirección de buzamiento del talud y  $\alpha_p$  es la dirección de buzamiento de la discontinuidad.

Para rotura por cuña, la condición de rotura es (Zhou et al., 2017):

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

Siendo  $\psi_i$  la inmersión de la línea de intersección de los dos planos que forman la cuña.

Finalmente, para la rotura por vuelco, las condiciones cinemáticas para que falle el talud son (Zhou et al., 2017):

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

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

## 2.6. Análisis de estabilidad

Complementariamente, se realizó un análisis de la estabilidad global, mediante el método de equilibrio límite, en los bloques de los taludes norte (N) y sur (S) de la trinchera, identificados como inestables en el análisis cinemático previo. Este método evalúa las fuerzas resistentes ( $F_{est}$ ) y las tendentes ( $F_{des}$ ) al movimiento del bloque de roca analizado, proporcionando un factor de seguridad que se define como:

$$FS = \frac{F_{est}}{F_{des}} \quad (6)$$

Cabe indicar que el factor de seguridad (FS) se ha determinado únicamente para las roturas planas y para las cuñas. Para los vuelcos no se ha determinado FS al tratarse de procesos más complejos que requieren de un detallado conocimiento de su geometría.

Para la evaluación de la estabilidad de los taludes rocosos se han utilizado los programas comerciales RocPlane (Rocscience Inc, 2020a) y SWedge (Rocscience Inc, 2020b) para las roturas planas y en cuña, respectivamente. El primero, determina el factor de seguridad a partir de las fuerzas calculadas para la geometría de bloque resultante. Por otro lado, SWedge determina el factor de seguridad de cuñas tetraédricas mediante la teoría de bloques (Goodman y Shi, 1985).

El cálculo de las fuerzas estabilizadoras de la expresión (6) se ha llevado a cabo considerando el criterio de resistencia al corte ( $\tau$ ) de Mohr-Coulomb definido de forma general para discontinuidades con ondulación como:

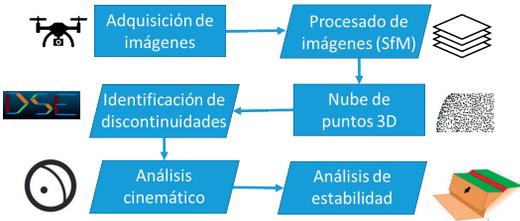
$$\tau = c + \sigma_n \cdot (\tan \emptyset + \tan \emptyset_w) \quad (7)$$

Donde  $\sigma_n$  es la tensión normal que actúa sobre la discontinuidad, y  $c$ ,  $\emptyset$  y  $\emptyset_w$  son la cohesión, el ángulo de rozamiento y el ángulo de ondulación de la discontinuidad, respectivamente.

Puesto que no se realizó ningún levantamiento geomecánico del macizo rocoso y, por tanto, no se conocen los parámetros geomecánicos de las discontinuidades (i.e. ángulos de rozamiento, cohesión y ondulación), se han adoptado valores de referencia del ángulo de rozamiento de  $35^\circ$  correspondiente al valor mínimo de ángulo de rozamiento básico de las calizas (González de

Vallejo y Ferrer, 2011), así como una cohesión y una ondulación (Miller, 1988) nulas, que corresponderían a la situación más pesimista posible. El peso específico de la roca adoptado ha sido de  $23 \text{ kN/m}^3$ , típico de calizas (González de Vallejo y Ferrer, 2011).

La Figura 4 resume de forma gráfica el flujo de trabajo del procedimiento de análisis de la estabilidad de taludes descrito.

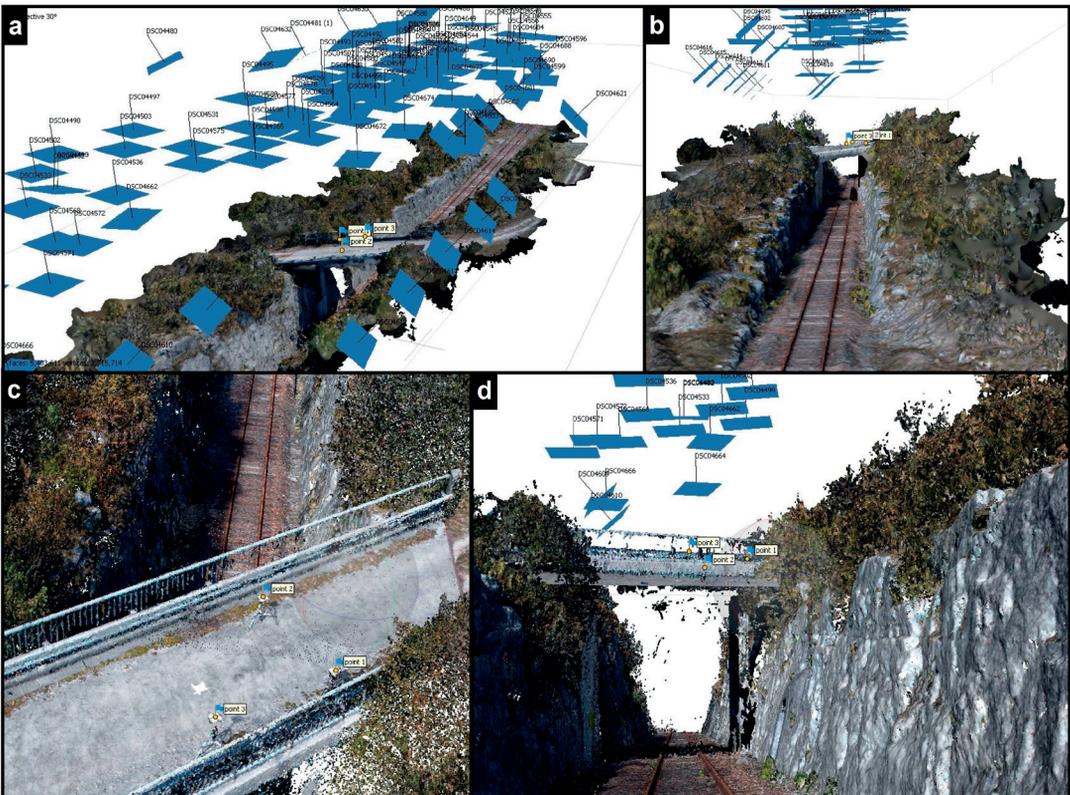


**Figura 4.** Metodología para la evaluación de la estabilidad de taludes rocosos a partir de nubes de puntos 3D obtenidas con UAV.

### 3. Resultados

#### 3.1. Nube de puntos 3D

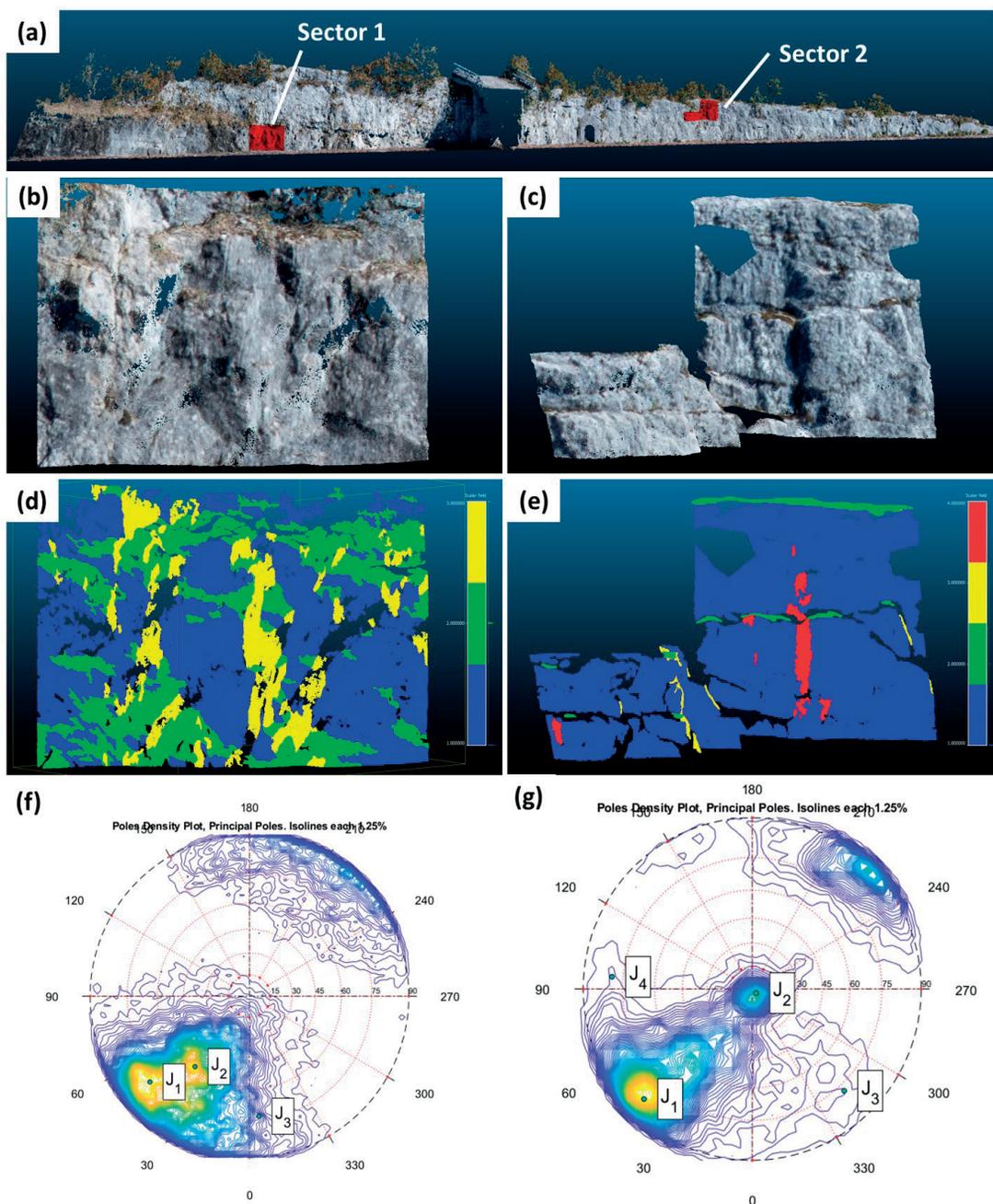
La nube de puntos obtenida a partir del vuelo cubre la totalidad de los taludes objeto de estudio, tiene un tamaño de 1,95 GB y está constituida por más de 110 millones de puntos (Figura 5). La raíz del error medio cuadrático y el valor máximo de reproyección de la nube de puntos 3D obtenidos en la restitución fotogramétrica fueron de 0,0821902 (0,303328 pix) y 0,286049 (15,7263 pix), respectivamente, con un tamaño medio de punto de 3,05475 pix. La densidad media de puntos se ha determinado dividiendo el número de puntos de los dos sectores analizados entre sus respectivas superficies de la malla (mesh) obtenidas a partir de sus nubes de puntos, resultando valores de 1,54 y 1,37 puntos/cm<sup>2</sup> para los sectores 1 y 2, respectivamente. La inversa de estos valores nos proporciona a su vez espaciados medios entre puntos para los sectores 1 y 2 de 6,5 y 7,3 mm.



**Figura 5.** Capturas de pantalla del programa Agisoft Metashape: a) Orientaciones de la cámara y nube de puntos densa; b) Vista frontal de la nube de puntos y de las posiciones de la cámara. C) Puntos de control empleados para el alineado y la orientación. D) Vista cercana de la nube de puntos. Como elemento de referencia tómesese el ancho de vía que es de aproximadamente 1,5 m.

Como se ha indicado anteriormente, se han seleccionado dos sectores representativos del talud sur de la trinchera para analizarlos pormenorizadamente (Figura 6) que han sido convenientemente

limpiados manualmente para eliminar los puntos correspondientes a vegetación.



**Figura 6.** (a) Nube de puntos del talud sur de la trinchera excavada en el macizo rocoso estudiado con indicación de los sectores analizados. (b) y (c) Nubes de puntos 3D y (d) y (e) familias de discontinuidades identificadas en los sectores 1 y 2, respectivamente (cada familia se representa mediante un color diferente). (f) y (g) Diagrama de densidad de polos de los sectores 1 y 2, respectivamente.

### 3.2. Análisis poblacional de discontinuidades

El análisis de la nube de puntos llevado a cabo mediante el programa DSE ha permitido identificar un total de 3 y 4 familias de discontinuidades ( $J_i$ ) en los sectores 1 y 2, respectivamente, para cada una de las cuales se ha realizado el análisis cinemático. Las orientaciones de las familias identificadas se muestran en la Figura 6 y la Tabla 4.

Por otro lado, a partir de la combinación de familias de discontinuidades se han calculado las líneas de intersección ( $J_i$ - $J_j$ ) que definen las posibles cuñas de roca tetraédricas que podrían generarse, con el fin de incluirlas en el análisis cinemático. Las orientaciones de las líneas de intersección de las cuñas se muestran en la Tabla 4. Cabe también señalar que para el desarrollo de los análisis cinemáticos y de estabilidad se ha calculado la orientación media de los taludes norte y sur de la trinchera mediante el ajuste de un plano a todos los puntos que definen

**Tabla 4.** Resultados del análisis cinemático y de estabilidad.  $\alpha_p$ : dirección de buzamiento de la discontinuidad;  $\alpha_i$ : rumbo de la línea de intersección entre dos discontinuidades;  $\psi_p$  y  $\psi_i$ : buzamiento de la discontinuidad e inmersión de la intersección entre dos planos, respectivamente. Talud de la trinchera: norte, N (218/78°) y sur, S (35/76°); Tipo de rotura: W, cuña; TP, vuelco; PL, plana; Estabilidad resultante del análisis cinemático que se evalúa como IN (inestable) y ST (estable). NA: No calculado. (\*) Se observan huecos en la nube de puntos ocasionados por posibles caídas de bloques.

Sector	$J_i$	$\alpha_p$ o $\alpha_i$ (°)	$\psi_p$ o $\psi_i$ (°)	Talud	Análisis cinemático		Factor de seguridad por equilibrio límite
					Estabilidad	Tipo de rotura	
Sector 1	$J_1$	49,6	78,7	N	ST	-	-
				S	ST	-	-
	$J_2$	38,0	58,1	N	IN	TP	NA
				S	IN	PL*	0,44
	$J_3$	355,5	73,5	N	ST	-	-
				S	ST	-	-
	$J_1$ - $J_2$	325,0	25,1	N	ST	-	-
				S	ST	-	-
	$J_1$ - $J_3$	1,7	73,4	N	ST	-	-
				S	IN	W*	0,23
	$J_2$ - $J_3$	59,2	56,3	N	ST	-	-
				S	IN	W*	0,44
Sector 2	$J_1$	44,9	84,4	N	IN	TP	NA
				S	ST	-	-
	$J_2$	315,5	3,8	N	ST	-	-
				S	ST	-	-
	$J_3$	317,5	77,7	N	ST	-	-
				S	ST	-	-
	$J_4$	94,9	79,6	N	ST	-	-
				S	ST	-	-
	$J_1$ - $J_2$	315,3	3,8	N	ST	-	-
				S	ST	-	-
	$J_1$ - $J_3$	339,5	76,8	N	ST	-	-
				S	ST	-	-
$J_1$ - $J_4$	103,0	79,5	N	ST	-	-	
			S	ST	-	-	
$J_2$ - $J_3$	227,5	0,1	N	ST	-	-	
			S	ST	-	-	
$J_2$ - $J_4$	5,4	2,5	N	ST	-	-	
			S	ST	-	-	
$J_3$ - $J_4$	24,3	61,1	N	ST	-	-	
			S	IN	W*	0,95	

la superficie de cada talud. Para este cálculo, se ha hecho uso del programa libre Cloud Compare (Girardeau-Montant, 2016). Las orientaciones resultantes de los taludes norte y sur de la trinchera son 218/78° y 035/76°, respectivamente.

### 3.3. Resultados del análisis cinemático

Una vez identificadas las discontinuidades que afectan al macizo rocoso en el que está excavado el talud se ha realizado el análisis cinemático de todos los juegos de discontinuidades identificados y de las cuñas resultantes por combinación de las mismas atendiendo a los criterios definidos por Zhou et al. (2017) con la aplicación KAT. Como puede observarse, el análisis cinemático ha permitido identificar seis posibles situaciones de inestabilidad (dos en el talud norte y el resto en el talud sur). Tres corresponden a roturas por cuña, dos por vuelco y una plana (Tabla 4).

### 3.4. Factor de seguridad de los taludes

Una vez identificadas a través del análisis cinemático las familias de discontinuidades y las cuñas tetraédricas formadas por combinación de dos juegos de discontinuidades potencialmente inestables, se han calculado sus factores de seguridad mediante los programas de equilibrio límite descritos anteriormente (Tabla 4). La geometría de los taludes (i.e. dirección, buzamiento y altura) y de las discontinuidades (i.e. dirección de buzamiento y buzamiento), así como los parámetros geomecánicos de las discontinuidades necesarios para el desarrollo de estos cálculos son los descritos en las secciones anteriormente en el texto.

El análisis de estabilidad proporciona valores de  $FS < 1$  (inestables) para todos los casos de rotura plana y por cuña, coincidiendo su valoración con la derivada del análisis cinemático.

## 4. Discusión

La adquisición de datos para la caracterización y evaluación de la estabilidad de taludes rocosos suele hacerse *in situ* de forma manual, estableciendo contacto físico con el macizo rocoso. Esto plantea ciertos inconvenientes y riesgos que pueden ser minimizados a través del empleo de nubes de puntos obtenidas mediante sensores remotos. En este sentido, los UAVs presentan la ventaja

principal de operar de forma remota y eficiente en taludes de gran altura en los que la toma de datos por procedimientos convencionales suele limitarse a la parte baja del talud por cuestiones de accesibilidad. Las nubes de puntos obtenidas mediante la técnica SfM presentan una resolución, precisión y densidad de puntos que permite determinar de forma objetiva diversas propiedades del macizo rocoso que pueden a su vez ser empleadas para evaluar la estabilidad de los taludes.

En el presente trabajo se define una metodología para el desarrollo de análisis cinemáticos y de estabilidad de taludes rocosos a través de nubes de puntos 3D obtenidas a partir de UAV a través de su aplicación a una trinchera de ferrocarril situada en Lavancia-Épercy (Francia). La información proporcionada por la nube de puntos ha sido analizada para identificar las familias de discontinuidades que afectan a los taludes de la trinchera. Estos valores han sido a su vez empleados para la identificación de los mecanismos de rotura compatibles con la geometría del talud mediante un análisis cinemático. Por último, se ha evaluado la estabilidad de los factores de seguridad asociados a cada mecanismo de rotura por medio de un análisis determinístico de equilibrio límite. El análisis detallado de la nube de puntos de los taludes de forma manual mediante CloudCompare (Girardeau-Montant, 2016) ha permitido validar las roturas identificadas en los análisis de estabilidad y cinemáticos a través del reconocimiento de huecos potencialmente asociados a huellas de desprendimiento de bloques de roca. Las orientaciones del plano (en el caso de rotura plana) o de los planos (en el caso de rotura por cuña) de los huecos de rotura identificados manualmente sobre la nube de puntos 3D fue medida haciendo uso de la herramienta “Brújula virtual” de CloudCompare, observándose una excelente coincidencia con las orientaciones obtenidas con el programa DSE que producen cuñas o roturas planas.

No obstante, cabe recordar que los análisis realizados se han llevado a cabo asumiendo que el ángulo de fricción de la discontinuidad coincide con el ángulo de fricción básico del material, y que la cohesión y la ondulación en el modelo de Mohr-Coulomb adoptado es nula, por lo que los cálculos mostrados corresponden a la hipótesis más pesimista de todas las posibles. Sin embargo, según las imágenes disponibles de los taludes, cabe esperar

que las discontinuidades presenten cierta ondulación y cohesión, y posiblemente un ángulo de rozamiento más elevado, por lo que el FS real será probablemente mayor. Por tanto, esta metodología permite identificar a partir de datos remotos las inestabilidades que pueden desarrollarse en un talud y evaluar sus factores de seguridad bajo una hipótesis pesimista, permitiendo así reconocer las zonas de mayor probabilidad de rotura en la que centrar los posteriores trabajos de detalle.

Las pruebas de rendimiento de los programas empleados para la aplicación de la metodología se han realizado mediante un equipo Intel(R) Core(TM) i7-4790 CPU @ 3,60GHz, 15,94 GB de RAM, una GPU GeForce GTX 750 Ti y Windows 64 bit. La estimación de tiempos para el desarrollo de tareas manuales se ha estimado de forma aproximada. La Tabla 5 muestra las características de procesado de cada uno de las etapas de aplicación de la metodología propuesta, así como del resto de procesos incluidos en la metodología propuesta.

La implementación de las diferentes fases de la metodología propuesta mostradas en la Tabla 5 supone una inversión de tiempo total de unas 7 h.

La metodología clásica para llevar a cabo este tipo de estudios sigue, en líneas generales, estos mismos pasos difiriendo en las fases de adquisición de imágenes, generación de la nube de puntos 3D y la identificación semiautomática de las discontinuidades, que clásicamente se llevan a cabo mediante la toma de datos con brújula, la posterior representación estereográfica de las medidas y su análisis poblacional. Aunque los tiempos necesarios para desarrollar este mismo análisis mediante

procedimientos clásicos es difícil de estimar, este podría ser similar al de la metodología propuesta o ligeramente superior. Sin embargo, el método propuesto presenta una serie de ventajas frente al método clásico como: a) la gran cantidad de información analizada que proporcionan miles de valores de orientación (dirección de buzamiento y buzamiento) de las discontinuidades presentes en el talud frente a las decenas o centenas de puntos que normalmente se obtiene por los procedimientos clásicos; b) la obtención de medidas de orientación en toda la superficie del talud, dado que los métodos clásicos requieren acceso físico al mismo, por lo que suelen limitarse a la obtención de toma de datos en su base, siendo en ocasiones imposible o requiriendo medios de escalada o de elevación para poder tomar medidas en zonas más elevadas del talud; c) objetividad y precisión en la identificación de discontinuidades, al ser el proceso semiautomático, frente a los métodos clásicos que se limitan a considerar las familias que el operador es capaz de identificar en el campo y medir y, por tanto, pudiendo obviar la presencia de familias menos representadas; y d) la mayor seguridad proporcionada por los sistemas remotos, puesto que en taludes activos el operador podría verse afectado por desprendimientos de roca durante la toma de datos manual en el talud.

La principal desventaja de la metodología propuesta son los costes de los equipos necesarios para la obtención de las imágenes y la restitución de las nubes de puntos, aunque para esta segunda cuestión existe la posibilidad de recurrir a programas libres y fotogrametría terrestre.

**Tabla 5.** Estadística de las pruebas de rendimiento de los procesos de la metodología propuesta.

Fases de la metodología	Parámetros	Herramienta empleada	Tiempo
Marcado de puntos de control y adquisición de imágenes	96 fotografías y 3 puntos de control	Topografía y UAV	≅ 2 h 40 min
Generación de la nube de puntos 3D	110356682 millones de puntos	Agisoft Metashape	2 h 23 min 18 s
Recorte, limpieza de la nube de puntos	110356682 millones de puntos totales.	CloudCompare	≅ 30 min
Identificación de las discontinuidades	234940 y 118593 puntos en los sectores 1 y 2, respectivamente.	DSE	3 min 29 s y 2 min 18 s para los sectores 1 y 2, respectivamente.
Análisis cinemático de los taludes	32 combinaciones posibles de roturas potenciales.	KAT	≅ 1 h
Cálculo equilibrio límite de los taludes	4 inestabilidades de las 32 combinaciones posibles.	Rocplane y Swedge	≅ 20 min

## 5. Conclusiones

En el presente trabajo se ha definido una metodología de análisis de taludes rocosos a partir de nubes de puntos 3D obtenidas mediante UAV. El flujo de trabajo comienza con la adquisición de imágenes de taludes rocosos mediante UAV, lo que permite acceder a zonas elevadas de los taludes con mayor seguridad. Posteriormente, a partir de las imágenes se obtiene la nube de puntos 3D que es analizada mediante el programa DSE para identificar las familias de discontinuidades que afectan al macizo rocoso. Esta información permite llevar a cabo análisis cinemáticos de los taludes, así como evaluar la estabilidad del talud mediante equilibrio límite, proporcionando una estimación cuantitativa acerca de su estabilidad.

Las principales ventajas de este método son que permite identificar de forma segura (i.e. de forma remota, sin necesidad de acceder físicamente al talud), con un elevado rendimiento, con precisión, con una elevada densidad de información, con una inmejorable capacidad de acceso a zonas elevadas de taludes de gran altura y de manera objetiva las familias de discontinuidades que afectan los taludes y que condicionan el desarrollo de mecanismos de rotura de bloques. Asimismo, permite llevar a cabo análisis cinemáticos y de estabilidad preliminares de dichos bloques, usando datos procedentes de la literatura científica, o realistas cuando el análisis se acompaña de parámetros geomecánicos de las discontinuidades medidos *in situ*. En el caso de estudio presentado se han detectado seis bloques potencialmente inestables de los cuales cuatro presentaban un factor de seguridad inferior a la unidad y en otros dos no se ha podido evaluar.

Es decir, esta metodología presenta un gran potencial en la evaluación preliminar de la estabilidad de taludes rocosos de infraestructuras (e.g. carreteras y vías de ferrocarril) durante las etapas de construcción y servicio dado que, debido a sus características, no genera interferencias con la actividad normal a desarrollar en ellas. Además, la incorporación de información geomecánica de detalle del macizo rocoso (i.e. ángulo de rozamiento, cohesión, ondulación y densidad) permitiría refinar las comprobaciones y cálculos realizados, proporcionando datos de estabilidad de gran calidad a considerar.

## Material suplementario

La nube de puntos 3D completa empleada para este estudio se encuentra disponible para su descarga, visualización y análisis en el repositorio europeo de acceso abierto Zenodo: <https://doi.org/10.5281/zenodo.3777996>

## Agradecimientos

Este trabajo se ha realizado en el marco del proyecto MOMIT, recibiendo financiación de Shift2Rail Joint Undertaking perteneciente al programa de investigación e innovación H2020 de la Unión Europea a través de la subvención No 777630, del proyecto de la Universidad de Alicante GRE18-05 y del proyecto TEC2017-85244-C2-1-P del Ministerio de Economía y Competitividad (MINECO) y EU FEDER. Los autores quieren dar las gracias a José Miguel García Torres (Geotor S.L.) por la fotografía del UAV incluida en la Figura 1.

## Referencias

- Abellán, A., Oppikofer, T., Jaboyedoff, M., Rosser, N.J., Lim, M., Lato, M.J. 2014. Terrestrial laser scanning of rock slope instabilities. *Earth Surface Processes and Landforms*, 39, 80-97. <https://doi.org/10.1002/esp.3493>
- Agisoft LLC. 2020. Agisoft Metashape. St. Petersburg, Russia, <https://www.agisoft.com/>.
- Ansari, M.K., Ahmed, M., Rajesh Singh, T.N., Ghalayani, I. 2015. *Rainfall, A Major Cause for Rockfall Hazard along the Roadways, Highways and Railways on Hilly Terrains in India*. Springer International Publishing, Cham, 457-460. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-09300-0\\_87](https://doi.org/10.1007/978-3-319-09300-0_87)
- Botev, Z.I., Grotowski, J.F., Kroese, D.P. 2010. Kernel density estimation via diffusion. *Ann. Statist.*, 38, 2916-2957. <https://doi.org/10.1214/10-AOS799>
- brgm. 2020. Carte géologique 1/50 000 vecteur harmonisée (BRGM). World Wide Web Address: <http://infoterre.brgm.fr/viewer/MainTileForward.do>
- Ester, M., Kriegel, H.-P., Sander, J., Xu, X. 1996. A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise *KDD*, 96, 226-231.
- Fonstad, M.A., Dietrich, J.T., Courville, B.C., Jensen, J.L., Carbonneau, P.E. 2013. Topographic structure from motion: a new development in photogrammetric measurement. *Earth Surface Processes and Landforms*, 38, 421-430. <https://doi.org/10.1002/esp.3366>

- 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, 187-198, <https://doi.org/10.1016/j.ijrmmms.2010.11.009>
- Girardeau-Montant, D. 2016. CloudCompare v2.6.2 64 bit. <https://www.danielgm.net/cc/>
- González de Vallejo, L., Ferrer, M. 2011. Geological Engineering Ied.
- Goodman, R.E., Shi, G. 1985. *Block Theory and Its Applications to Rock Engineering*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J.
- Hungr, O., Evans, S.G., Hazzard, J. 1999. Magnitude and frequency of rock falls and rock slides along the main transportation corridors of southwestern British Columbia. *Canadian Geotechnical Journal*, 36, 224-238. <https://doi.org/10.1139/t98-106>
- 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, n/a-n/a. <https://doi.org/10.1029/2011JF002289>
- Jordá-Bordehore, L., Riquelme, A., Cano, M., Tomás, R. 2017. Comparing manual and remote sensing field discontinuity collection used in kinematic stability assessment of failed rock slopes. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 97, 24-32. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmmms.2017.06.004>
- Lato, M.J., Vöge, M. 2012. Automated mapping of rock discontinuities in 3D lidar and photogrammetry models. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 54, 150-158. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmmms.2012.06.003>
- Micheletti, N., Chandler, J.H., Lane, S.N. 2015. Structure from motion (SfM) photogrammetry. In: Clarke, L.E. & Nield, J.M. (eds.) *Geomorphological Techniques*. British Society for Geomorphology, London.
- Miller, S.M. 1988. Modeling Shear Strength at Low Normal Stresses for Enhanced Rock Slope Engineering. In: Youd, T.L., Case, W.F., Keane, E.G. & Rausher, L.H. (eds.) *39th Highway Geology Symposium*. Brigham Young University Press, North Caroline, USA, 346-356.
- Riquelme, A., Araújo, N., Cano, M., Pastor, J.L., Tomás, R., Miranda, T. 2020a. Identification of Persistent Discontinuities on a Granitic Rock Mass Through 3D Datasets and Traditional Fieldwork: A Comparative Analysis. In: Correia, A.G., Tinoco, J., Cortez, P. & Lamas, L. (eds.) *Information Technology in Geo-Engineering*. Springer International Publishing, Cham, 868-878. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-32029-4\\_73](https://doi.org/10.1007/978-3-030-32029-4_73)
- Riquelme, A., Cano, M., Tomás, R., Abellán, A. 2017. Identification of Rock Slope Discontinuity Sets from Laser Scanner and Photogrammetric Point Clouds: A Comparative Analysis. *Procedia Engineering*, 191, 838-845. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.251>
- Riquelme, A., Tomás, R., Cano, M., Pastor, J.L., Abellán, A. 2018. Automatic Mapping of Discontinuity Persistence on Rock Masses Using 3D Point Clouds. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 51, 3005-3028, <https://doi.org/10.1007/s00603-018-1519-9>
- Riquelme, A.J. 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*, Universidad de Alicante.
- Riquelme, A.J., Abellán, A., Tomás, R. 2015. Discontinuity spacing analysis in rock masses using 3D point clouds. *Engineering Geology*, 195, 185-195. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.06.009>
- Riquelme, A.J., Abellán, A., Tomás, R., Jaboyedoff, M. 2014. A new approach for semi-automatic rock mass joints recognition from 3D point clouds. *Computers & Geosciences*, 68, 38-52. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2014.03.014>
- Riquelme, A.J., Abellán, A., Tomás, R., Jaboyedoff, M. 2020b. Discontinuity Set Extractor World Wide Recuperado de <https://personal.ua.es/en/ariquelme/discontinuity-set-extractor-software.html>
- Riquelme, A.J., Tomás, R., Abellán, A. 2016. Characterization of rock slopes through slope mass rating using 3D point clouds. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 84, 165-176. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmmms.2015.12.008>
- Rocscience Inc. 2020a. RocPlane. Toronto, Canada. <https://www.rocscience.com/software/roplane>
- Rocscience Inc. 2020b. SWedge. Toronto, Canada. <https://www.rocscience.com/software/swedge>
- Royán, M., Abellán, A., Jaboyedoff, M., Vilaplana, J. & Calvet, J. 2014. Spatio-temporal analysis of rockfall pre-failure deformation using Terrestrial LiDAR. *Landslides*, 11, 697-709. <https://doi.org/10.1007/s10346-013-0442-0>
- Slob, S. 2010. *Automated rock mass characterization using 3D terrestrial laser scanner*, Technical University of Delf.
- Sturzenegger, M., Stead, D. 2009a. Close-range terrestrial digital photogrammetry and terrestrial laser scanning for discontinuity characterization on rock cuts. *Engineering Geology*, 106, 163-182. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2009.03.004>

- Sturzenegger, M., Stead, D. 2009b. Quantifying discontinuity orientation and persistence on high mountain rock slopes and large landslides using terrestrial remote sensing techniques. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 9, 267-287. <https://doi.org/10.5194/nhess-9-267-2009>
- Sturzenegger, M., Stead, D., Elmo, D. 2011. Terrestrial remote sensing-based estimation of mean trace length, trace intensity and block size/shape. *Engineering Geology*, 119, 96-111, <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2011.02.005>
- Tomás, R., Pagán, J.I., Riquelme, A., Cano, M., Pastor, J.L. 2019. Kinematic Analysis Tool, KAT. Disponible en <http://hdl.handle.net/10045/90669>
- Tomás, R., Riquelme, A., Cano, M.A., Jordá, L. 2016. Structure from Motion (SfM): una técnica fotogramétrica de bajo coste para la caracterización y monitoreo de macizos rocosos. *10º Simposio Nacional Ingeniería Geotécnica*, La Coruña.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>
- 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. <https://doi.org/10.1007/s10064-016-0972-5>

