

ANÁLISIS DE ESTABILIDAD Y SIMULACIONES DE DESPRENDIMIENTOS EN CANTERAS A PARTIR DE MODELOS 3D OBTENIDOS CON VUELOS DE DRON.

**Roger RUIZ-CARULLA (1), Eduard CÁMARA-ZAPATA (2) y Joan MARTÍNEZ-
BOFILL (3)**

(1) Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental
Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona
Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)
&
Consultoría de Ingeniería SOROdron SL
roger.ruizcarulla@sorodron.com

(2) Departamento de Ingeniería Minera, Industrial y TIC
Escuela Politécnica Superior de Ingeniería de Manresa
Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)
eduardo.camara@upc.edu

(3) Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental
Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona
Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)
&
Consultoría de Ingeniería GEOMAR SL
martinezbofill@geomar.cat

RESUMEN

Se presentan dos casos en canteras donde se trabaja a partir de un modelo 3D del terreno obtenido mediante la reconstrucción fotogramétrica con dron. El primer caso se centra en la delimitación detallada de una masa rocosa inestable y se comparan los resultados de análisis de estabilidad realizados con cuatro metodologías: test cinemático, equilibrio límite mediante el programa RocPlane y equilibrio límite con métodos numéricos en 2D y 3D mediante los programas Slide2D y Slide3D, todos ellos de Rocscience. Se comparan los resultados obtenidos considerando distintos valores de cohesión y ángulo de fricción obtenidos de ensayos de laboratorio sobre el plano de deslizamiento y se debate sobre las incertidumbres que controlan la estabilidad como la presencia de agua y la cohesión. El segundo caso muestra el estudio de una propuesta de geometría futura de taludes muy verticales en una cantera. Se analiza, por un lado, la estabilidad de la geometría futura propuesta y se contrasta con las roturas existentes y, por otro lado, se comparan simulaciones de desprendimientos con la geometría actual y con la propuesta. Se utiliza el programa RockGIS desarrollado en la UPC que permite realizar simulaciones de desprendimientos en 3D y considerando el fenómeno de la fragmentación. Se debate sobre las ventajas e inconvenientes de la geometría propuesta en relación a la estabilidad de los taludes y del riesgo asociado a los desprendimientos. Los dos casos muestran el potencial de realizar un vuelo dron y trabajar a partir de un modelo 3D detallado de la cantera: la caracterización del patrón de discontinuidades de forma masiva, la caracterización de los mecanismos de rotura, la delimitación de volúmenes potencialmente inestable, la definición de la geometría necesaria para realizar análisis de estabilidad en 2D y 3D, así como el escenario donde realizar simulaciones de desprendimientos 3D.

1. INTRODUCCIÓN

En esta comunicación se pretende mostrar dos casos de aplicación de los vuelos de dron y la reconstrucción fotogramétrica en canteras para el análisis de estabilidad de masas potencialmente inestables y para el estudio de propagación de desprendimientos rocosos. Los dos casos muestran el potencial de realizar un vuelo dron y trabajar a partir de un modelo 3D detallado de la cantera: la caracterización del patrón de discontinuidades de forma masiva, la caracterización de los mecanismos de rotura, la delimitación de volúmenes potencialmente inestable, la definición de la geometría necesaria para realizar análisis de estabilidad en 2D y 3D, así como el escenario donde realizar simulaciones de desprendimientos 3D.

En ambos casos expuestos, se realizan un conjunto de trabajos de campo y de gabinete que constan de: 1) planificación del vuelo de dron programado, 2) medida en campo de un conjunto de puntos de control con GPS-RTK, 3) toma de muestras y ensayos de laboratorio, 4) ejecución de los vuelos de dron programados con la adquisición regular de fotografías cenitales y oblicuas, 5) procesado fotogramétrico para la obtención de una nube de puntos 3D, 6) caracterización del patrón de discontinuidades a partir de la nube de puntos 3D, 7) identificación de los mecanismos de rotura mediante test cinemáticos, 8) delimitación de volúmenes potencialmente inestables y 9) análisis de estabilidad mediante métodos de equilibrio límite. Finalmente, también se realizan otros análisis de estabilidad como la utilización del programa Slide2D y Slide3D o el análisis de propagación de desprendimientos rocosos mediante el programa RockGIS. Este último es un código desarrollado en la UPC (Matas G, 2020) capaz de reproducir el fenómeno de la fragmentación en desprendimientos rocosos utilizando un modelo de fragmentación fractal (Ruiz-Carulla R, 2018). En este flujo de trabajos se utiliza un GPS-RTK, un dron de la marca DJI modelo INSPIRE 2 con la cámara X5S, el programa Litchi para la programación del vuelo dron, el programa Agisoft Metashape para la reconstrucción fotogramétrica, el programa de análisis CloudCompare para la caracterización del patrón de discontinuidades, los programas de la empresa Rocscience (Dips, Rocplane, Swedge, Slide2D y Slide3D) para los análisis de estabilidad, y el simulador de propagación de desprendimientos RockGIS, así como los servicios de ensayos de laboratorio de GEOMAR SL.

2. CASO 1: DELIMITACIÓN VOLÚMEN INESTABLE Y ANALISIS DE ESTABILIDAD

El primer caso es el de una rotura de unos 50.000 m³ en una cantera a través de un liso de grandes dimensiones que deja a su lado una masa inestable que preocupa a los gestores de la explotación, que solicitan una delimitación detallada del volumen potencialmente inestable y de su estado de estabilidad para delimitar una zona de seguridad y gestionar las actuaciones a realizar. La siguiente fotografía muestra el plano de rotura antecedente y los dos planos que preocupaban.



Figura 1: Fotografía del liso sobre el que deslizo la rotura antecedente (naranja) y de los planos de interés (rojos).

A partir del vuelo de dron y la reconstrucción fotogramétrica, se trabaja con una nube de puntos 3D que permite la caracterización de la superficie de deslizamiento planar de la rotura antecedente, así como su delimitación hacia la masa rocosa adyacente aún presente en el macizo. La siguiente figura muestra la masa rocosa potencialmente inestable delimitada por el plano de deslizamiento que define un volumen de 56.000m^3 . También se identifica un plano superior de estratificación paralelo al utilizado para deslizar la rotura antecedente, y que delimita un volumen menor de 16.500 m^3 que se encuentra en las mismas circunstancias, por lo menos en relación a su disposición geométrica. Esta información es de gran valor para los gestores de la actividad extractiva ya que había cierta incertidumbre de por dónde pasaba la superficie de rotura en la parte del macizo que no había roto. La delimitación de la masa rocosa que queda por encima del liso de deslizamiento se utilizó para elaborar la cartografía que se muestra en la siguiente figura donde se realizó un replanteo de los puntos amarillos para trazar una zona de seguridad a 10 metros de la superficie del liso, ya que in situ no se identifica por los rellenos de material sueltos que cubren los bancos y plazas de las canteras.

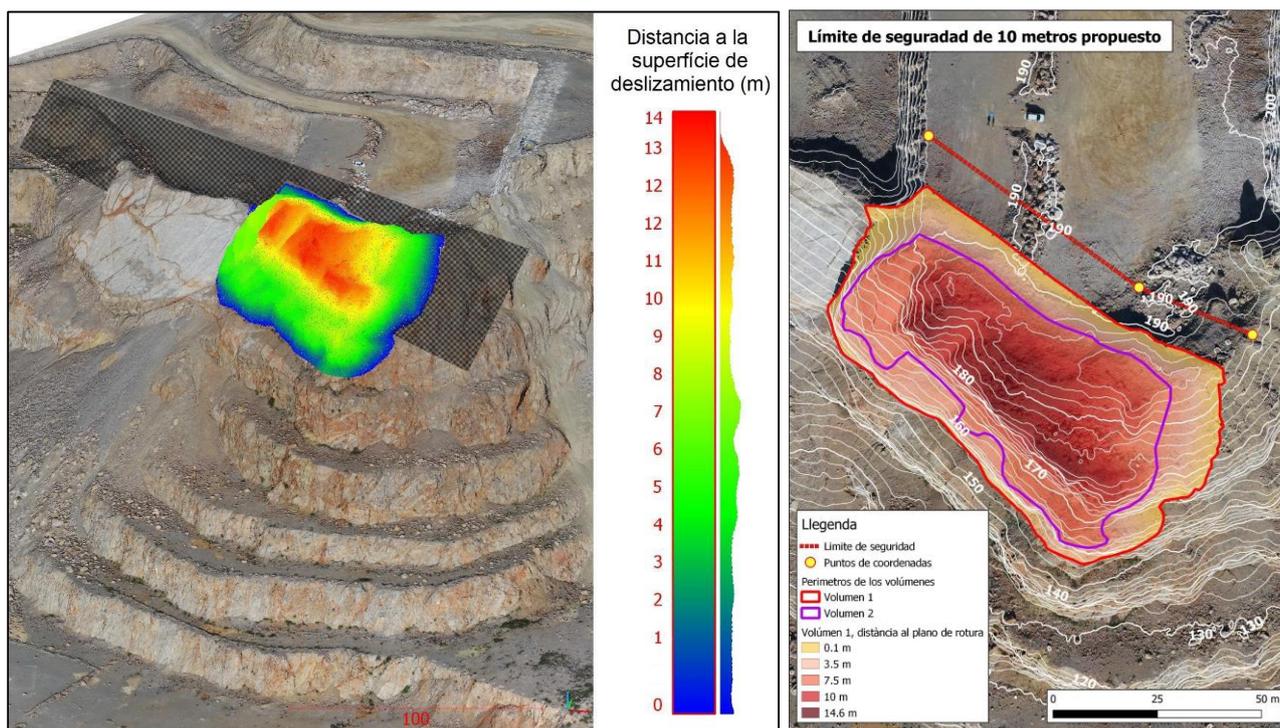


Figura 2: Izquierda: Modelo 3D de la cantera, del plano de deslizamiento y del volumen potencialmente inestable representado por distancia al plano de deslizamiento. Derecha: cartografía de delimitación del volumen potencialmente inestable, el perímetro del volumen menor definido por un plano de estratificación superior al deslizamiento antecedente, y línea de seguridad trazada a 10 metros del liso.

Para el análisis de estabilidad se considera oportuno emplear cuatro métodos distintos y comparar los resultados: utilizando el test cinemático de Markland implementado en el programa Dips, el método de equilibrio límite mediante el programa RocPlane y equilibrio límite con métodos numéricos en 2D y 3D mediante los programas Slide2D y Slide3D, todos ellos de Rocscience. El programa Rocplane permite realizar fácilmente un análisis de sensibilidad paramétrica sobre el ángulo de fricción y las presiones de agua, y en el Slide2D y 3D se impone una geometría de alta resolución que proviene del modelo digital de elevaciones de 10 cm/px de resolución obtenido a partir del vuelo de dron.

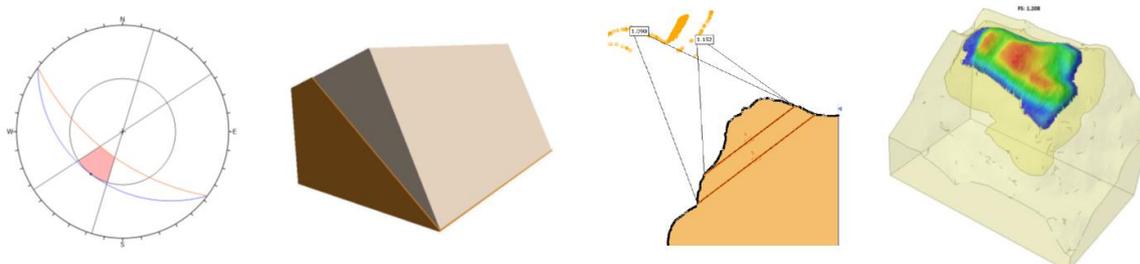


Figura 3: Métodos utilizados para el análisis de estabilidad: Test de Markland, Rocplane, Slide2D y Slide3D.

Para los análisis de estabilidad se requieren la geometría y los parámetros de comportamiento geotécnico. Se utiliza un modelo conceptual los más simple posible, ya que se trata de un deslizamiento planar utilizando un plano de estratificación. Este plano contiene estrías que muestran lo que seguramente es un desplazamiento relativo debido a una flexión flexural del macizo, de modo que se puede considera que es un plano de estratificación que ha sido utilizado como falla para realizar un movimiento relativo entre estratos durante un plegamiento. En este escenario, se considera un modelo friccional de Mohr-Coulomb con la caracterización del plano mediante una cohesión y un ángulo de fricción. Se toman cinco muestras de la superficie de rotura antecedente y se les realiza ensayos de carga puntual, de corte directo sobre superficies existentes y superficies prefabricadas. En la siguiente figura se muestran las muestras ensayadas y se resumen los valores obtenidos. De la muestra M1 se considera que los valore son demasiados altos o demasiado bajos, mientras que los resultados de las muestras M2, M4 y M5 se consideran razonables y dentro del rango esperado.



Figura 4: Fotografía de las muestras tomadas y ensayadas en el laboratorio.

| ENSAYOS REALIZADOS | | M1 | M2 | M3 | M4 | M5 |
|-------------------------------------|--------------------------------|------|------|------|------|------|
| CARGA PUNTUAL EN ROCA (Mpa) | | 4,30 | | 4,74 | | 4,43 |
| CORTE DIRECTO Junta preexistente | Cohesión (Kg/cm ²) | 0,16 | 0,14 | | 0,19 | |
| | Ángulo de fricción(°) | 48,2 | 37,7 | | 33,9 | |
| CORTE DIRECTO Junta prefabricada | Cohesión (Kg/cm ²) | 0,09 | | | | 0,04 |
| | Ángulo de fricción (°) | 31,9 | | | | 36,9 |

Tabla 1: Resultados de los ensayos de laboratorio.

La inclinación del plano de deslizamiento se mide con 260.000 puntos de la nube de puntos 3D (Figura 5) donde se calcula la pendiente en función de los puntos de alrededor, obteniendo un valor medio de la distribución de Gauss de 37,34 ° (con cohesión nula, sería el ángulo de fricción).

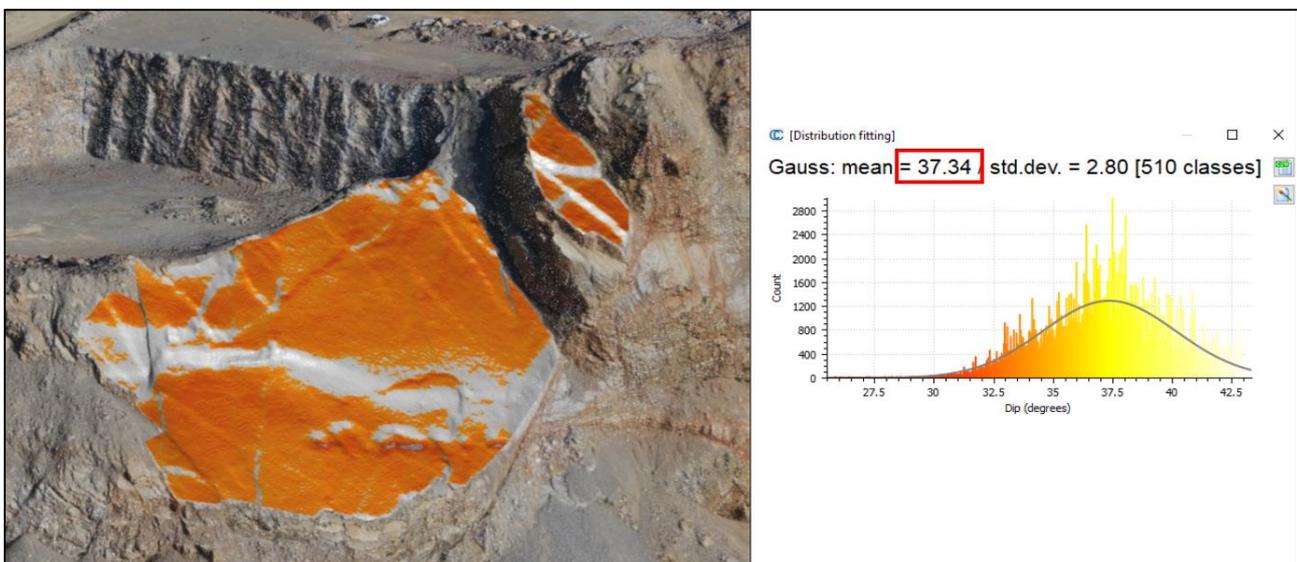


Figura 5: Vista 3D del plano de rotura antecedente y distribuciones gaussianas del valor de pendiente.

Si la cohesión fuera nula, es evidente que la estabilidad vendría dada por un ángulo de fricción mayor o menor de los 37,34° de inclinación del plano de deslizamiento, tal y como se observa en la Figura 6 (izquierda) donde se muestra un análisis de sensibilidad del factor de seguridad frente al ángulo de fricción considerando cohesión nula. En la Figura 6 (derecha) se muestra cómo se reduce el factor de seguridad a medida que se rellena el plano con agua ejerciendo presiones de agua, y en este caso considerando los resultados de laboratorio de la muestra M2, con 13 kPa de cohesión y 37,7° de ángulo de fricción, donde con un 35% de agua en el plano se obtiene el equilibrio estricto (FS=1).

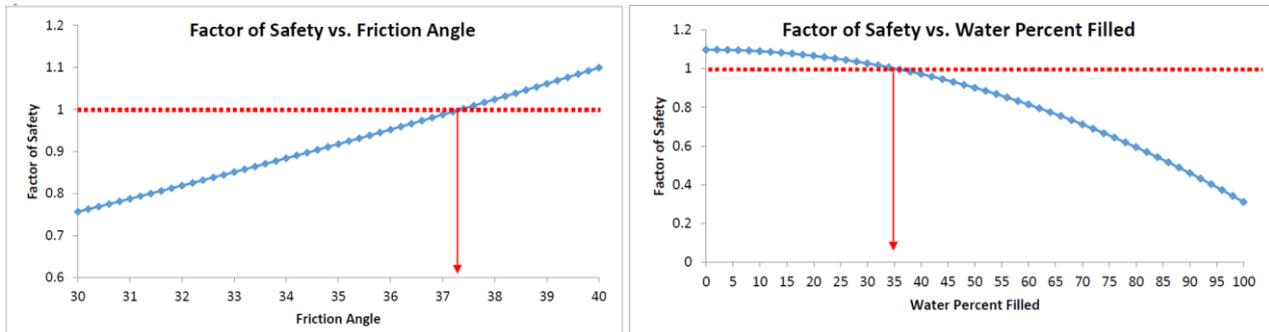


Figura 6: Análisis de sensibilidad del factor de seguridad sobre el ángulo de fricción considerando una cohesión nula (izquierda) y sobre la cantidad de agua en el plano considerando los valores de la muestra M2 (derecha).

En la siguiente tabla se resumen los resultados obtenidos de los cuatro métodos empleados considerando los valores cohesión y ángulo de fricción de las muestras de laboratorio y también considerando cuatro escenarios teóricos. Se muestran dos valores ya que se analiza el volumen de 56.000 m³ (debajo) y el de 16.500 m³ (encima).

Se puede concluir que: 1) los factores de seguridad obtenidos son casi iguales independientemente del método utilizado; 2) la cohesión juega un papel fundamental en la estabilidad y su heterogeneidad espacial es la que controla la estabilidad, así como la presencia de agua que puede desencadenar la rotura con facilidad. En cualquier caso, la zona se debe considerar inestable y muy cercana a la rotura.

| Parámetros de la superficie de rotura | FS: Markland | FS: RocPlane | FS: Slide 2D | FS: Slide 3D |
|--|------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| M1: c=8 KPa ϕ=31.9 (prefabricada) | Inestable | 0.885 0.868 | 0.898 0.860 | 0.937 0.879 |
| M4: c=2 KPa ϕ=33.9 (preexistente) | Inestable | 0.898 0.893 | 0.912 0.892 | 0.914 0.898 |
| M5: c=4 KPa ϕ=36.9 (prefabricada) | Inestable | 1.019 1.010 | 1.023 1.003 | 1.047 1.017 |
| M2: c=13 KPa ϕ=37.7 (preexistente) | Estable | 1.126 1.098 | 1.152 1.090 | 1.208 1.115 |
| Escenarios teóricos | | | | |
| Escenario teórico: c=13 KPa ϕ=37.34 | Equilibrio Estricto | 1.113 1.084 | 1.000 1.071 | 1.195 1.102 |
| Escenario teórico: c=0 KPa ϕ=37.34 | Equilibrio Estricto | 1.000 1.000 | 1.000 1.000 | 1.004 1.002 |
| Escenario teórico: c=0 KPa ϕ=37 | Inestable | 0.987 0.987 | 0.988 0.988 | 0.992 0.99 |
| Escenario teórico: c=0 KPa ϕ=36 | Inestable | 0.952 0.952 | 0.952 0.952 | 0.956 0.955 |

Tabla 2: Resultados de los análisis de estabilidad.

3. CASO 2: ESTUDIO DE GEOMETRÍA DE EXPLOTACIÓN PROPUESTA

El segunda caso que se expone en esta comunicación trata sobre el análisis de una geometría de explotación propuesta en una cantera. El objetivo de los gestores de la explotación es excavar con taludes verticales, que definen de 88° de pendiente, para poder extraer material que hoy en día se encuentra en los bancos del lado este de la cantera. Se solicita un análisis de estabilidad de la geometría propuesta y una evaluación de las afectaciones que tendría sobre el peligro de desprendimientos.

Las siguientes dos figuras muestran: primero el modelo 3D de la cantera obtenido mediante el vuelo de dron y la colocación de puntos de control con GPS-RTK, mirando desde el oeste hacia el este; y la segunda figura, muestra el modelo 3D sintético que se ha elaborado siguiendo las indicaciones y requerimientos de los gestores de la explotación. A priori, ya se identifica que la geometría propuesta puede ser muy conflictiva, tanto en términos de estabilidad local, como global, como para el peligro de desprendimientos.



Figura 7: Modelo 3D de la cantera obtenido mediante el vuelo de dron y la reconstrucción fotogramétrica.

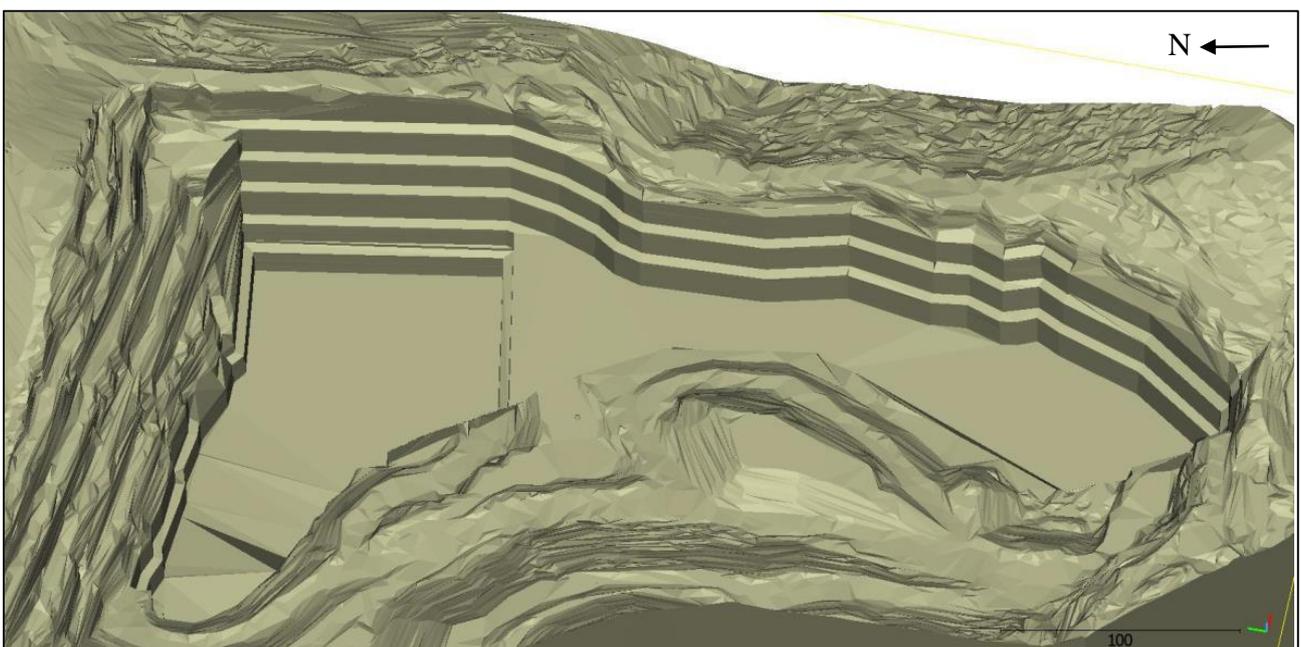


Figura 8: Modelo 3D sintético de la geometría propuesta para los bancos del lado este de la cantera.

A partir de la nube de puntos en 3D, se calculan los vectores normales de cada punto y se representan por orientación y buzamiento. Se ajustan planos utilizando el plugin Facets (Dewez et al 2016) de Cloud Compare. Se interpretan los planos mediante la supervisión de experto, utilizando las fotografías originales, la malla 3D texturizada, la nube de puntos, y las medidas que se hayan podido tomar a campo. No todos los planos que se ajustan a la nube de puntos son realmente familias de discontinuidades. Las que sí que lo son se filtran con una ventana de apertura tanto para la orientación como para la pendiente para cada familia y se exportan, obteniendo las familias de juntas presentes en el macizo rocoso que se muestran en las siguientes figuras en una vista 3D, en la tabla de valores y en la proyección estereográfica. Este procedimiento permite utilizar las medidas de miles de planos, como las 4000 de este caso.

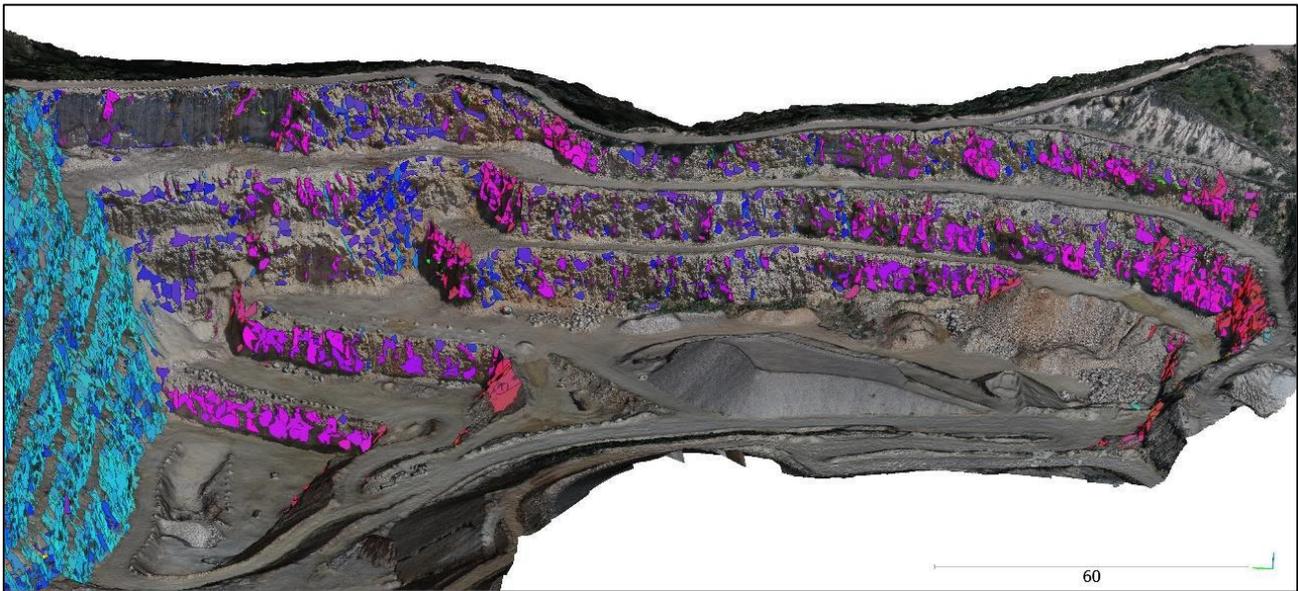


Figura 9: Modelo 3D con los planos ajustados sobre los puntos correspondientes a una de las cinco familias.

| Familia | Medida sobre plano identificado | Plano modal según el análisis estadístico | Nº de planos medidos | RMS |
|---------|---------------------------------|---|----------------------|------|
| F1 | 301/81 | 294/74 | 658 | 0.07 |
| F2 | 181/54 | 183/60 | 2340 | 0.07 |
| F3 | 251/50 | 252/51 | 159 | 0.06 |
| F4 | 223/77 | 217/73 | 620 | 0.07 |
| F5 | 340/50 | 339/50 | 266 | 0.06 |
| Total | | | 4043 | |

Tabla 3: Orientación y buzamiento de las familias medidas sobre el modelo 3D, el valor del plano modal según el análisis estadístico, el número de planos utilizados y el RMS obtenido.

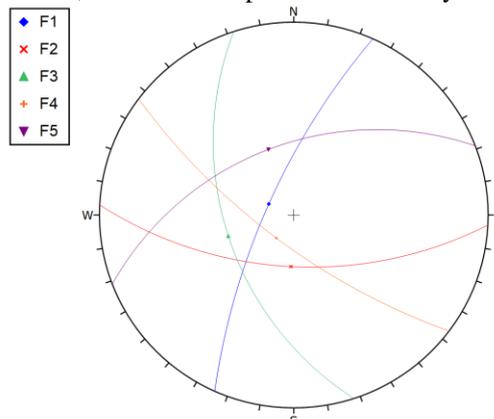


Figura 10: Proyección estereográfica de las cinco familias identificadas

Se toman muestras bloques y se llevan a laboratorio para obtener propiedades de cohesión y fricción de algunos de los planos identificados. Se realizan análisis de estabilidad mediante test cinemático donde se identifican los mecanismos de rotura planar y en cuña como principales mecanismos de rotura. La siguiente figura muestra las proyecciones estereográficas de 4050 planos (izquierda) y de los planos modales (derecha), ambos con el test de Markland para roturas planares analizando un talud orientado 270/88 que describe una de las tres orientaciones de la geometría propuesta.

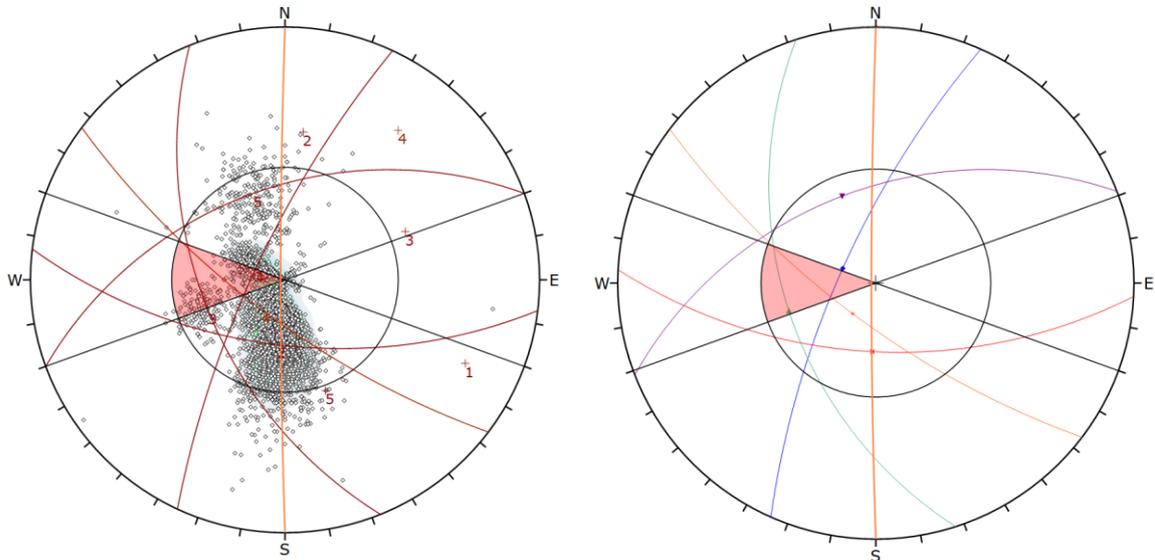


Figura 11: Proyección estereográfica del test de Markland para el talud 270/88 con 4050 planos (izquierda) y solo con los planos modales (derecha)

Una vez identificados los mecanismos de rotura y las familias involucradas, se realizan análisis de estabilidad con el método de equilibrio límite con RocPlane y Swedge (Figura 10), obteniendo valores claramente de inestabilidad, con volúmenes potencialmente afectados que superan los 100 m³. La siguiente tabla 4 resume los resultados obtenidos de los análisis de estabilidad realizados.

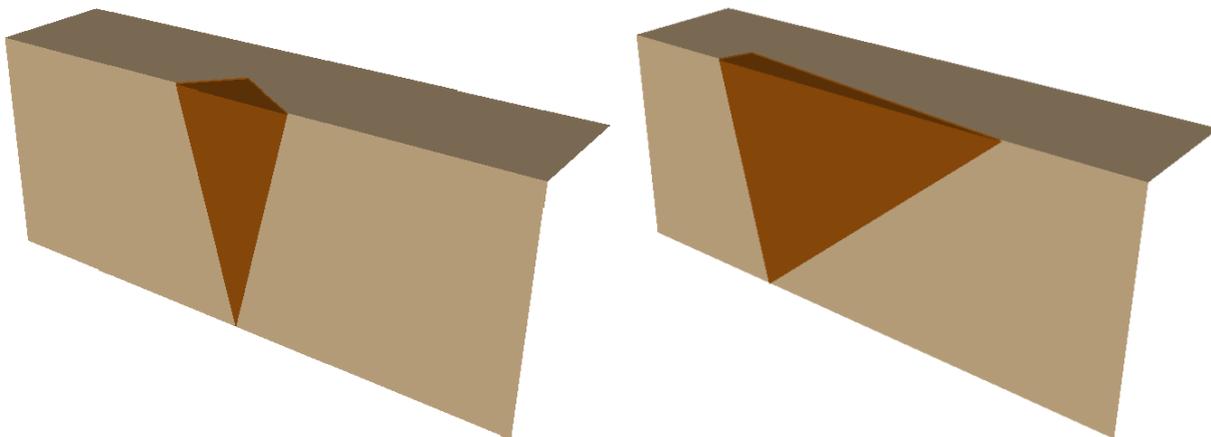


Figura 12: Resultados del programa Swedge para la zona 265/88 (izquierda) y zona 295/88 (derecha)

| Talud futuro | Mecanismo de rotura | Volumen estimado (m ³) | Factor de seguridad | Familias involucradas |
|---------------|---------------------|------------------------------------|---------------------|------------------------|
| 265/88 | Planar | 154 m ³ /m | 0.81 | F3: 252/51 |
| | Cuña | 149 m ³ /m | 0.65 | F1:301/81 F4:223/77 |
| 270/88 | Planar | 154 m ³ /m | 0.81 | F3; 252/51 |
| | Cuña | 145 m ³ /m | 0.66 | F1:301/81 F4:223/77 |
| 295/88 | Planar | 24 m ³ /m | 0.46 | F1:301/81 |
| | Cuña | 271 m ³ /m | 0.74 | F1:301/81 F4:223/77 |

Tabla 4: Resultados de los análisis de estabilidad con Rocplane y Swedge.

Se daba la circunstancia que el banco superior ya se estaba empezando a ejecutar con la geometría propuesta, de modo que se podía comprobar si los resultados de los análisis de estabilidad coincidían con alguna rotura existente en la parte del frente con 88° de pendiente y orientaciones oeste. Y sí, se identificaron diversas roturas, cuatro de las cuales, de relevancia, ya que se desarrollaban con los mecanismos y familias involucradas descritos en la tabla anterior, y con volúmenes parecidos, de entre 40 a 170 m^3 . La siguiente figura muestra una fotografía de dron donde se aprecia una rotura planar que ha dejado ya descalzado un volumen mayor que también rompe deslizando por el mismo plano, con una grieta de tracción bien desarrollada. Las siguientes imágenes muestran el modelo 3D de la zona y la delimitación del volumen inestable estimado en 112 m^3 , valor que si le sumamos la parte inferior ya rota se acerca mucho a los 154 m^3 .



Figura 13: Fotografía de dron de la cicatriz de una rotura planar y de un volumen potencialmente inestable.

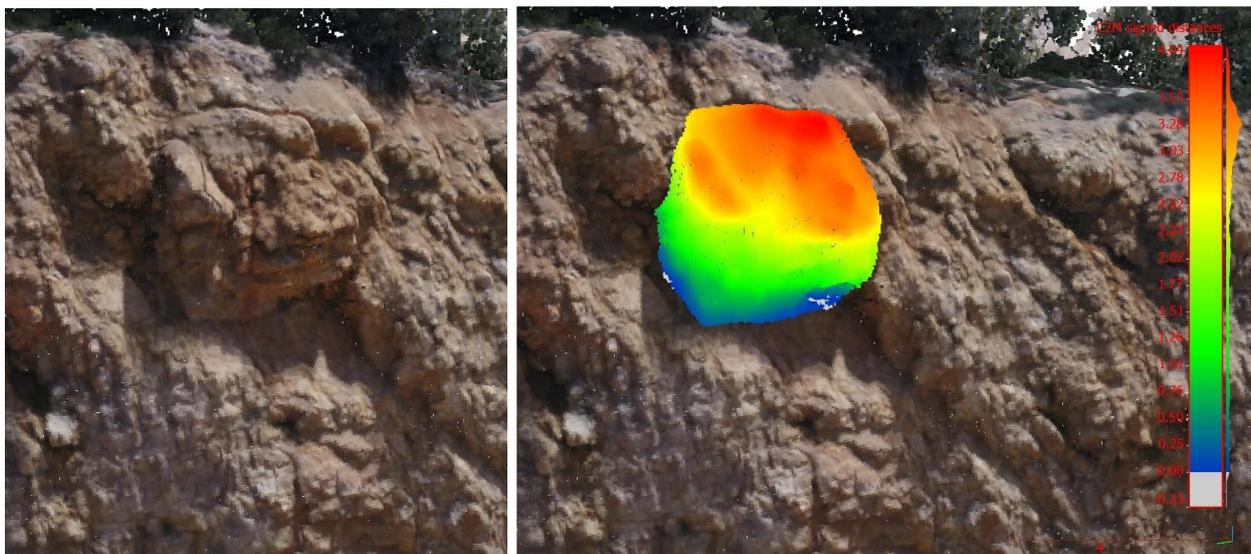


Figura 14: Modelo 3D en formato malla texturizada (izquierda) y volumen potencialmente inestable delimitado, coloreado por cota y estimado en 112 m^3 .

Del mismo modo, en una zona del banco superior donde la excavación se ha realizado obteniendo la pendiente deseada de 88° , se identifican tres roturas en cuña que coinciden perfectamente con las identificadas con los test cinemáticos y con los análisis con Swedge. Las siguientes figuras muestran la fotografía de dron de las tres roturas en este talud vertical, la misma zona en el modelo 3D en formato de malla texturizada, y finalmente la estimación de volumen que se realiza considerando el plano de excavación ajustado al resto de plano que se ha ejecutado sin roturas. Los volúmenes estimados son (de izquierda a derecha en las siguientes imágenes) de 101 m^3 , 47 m^3 y 171 m^3 , coincidiendo con los obtenidos en los análisis de estabilidad con Swedge.

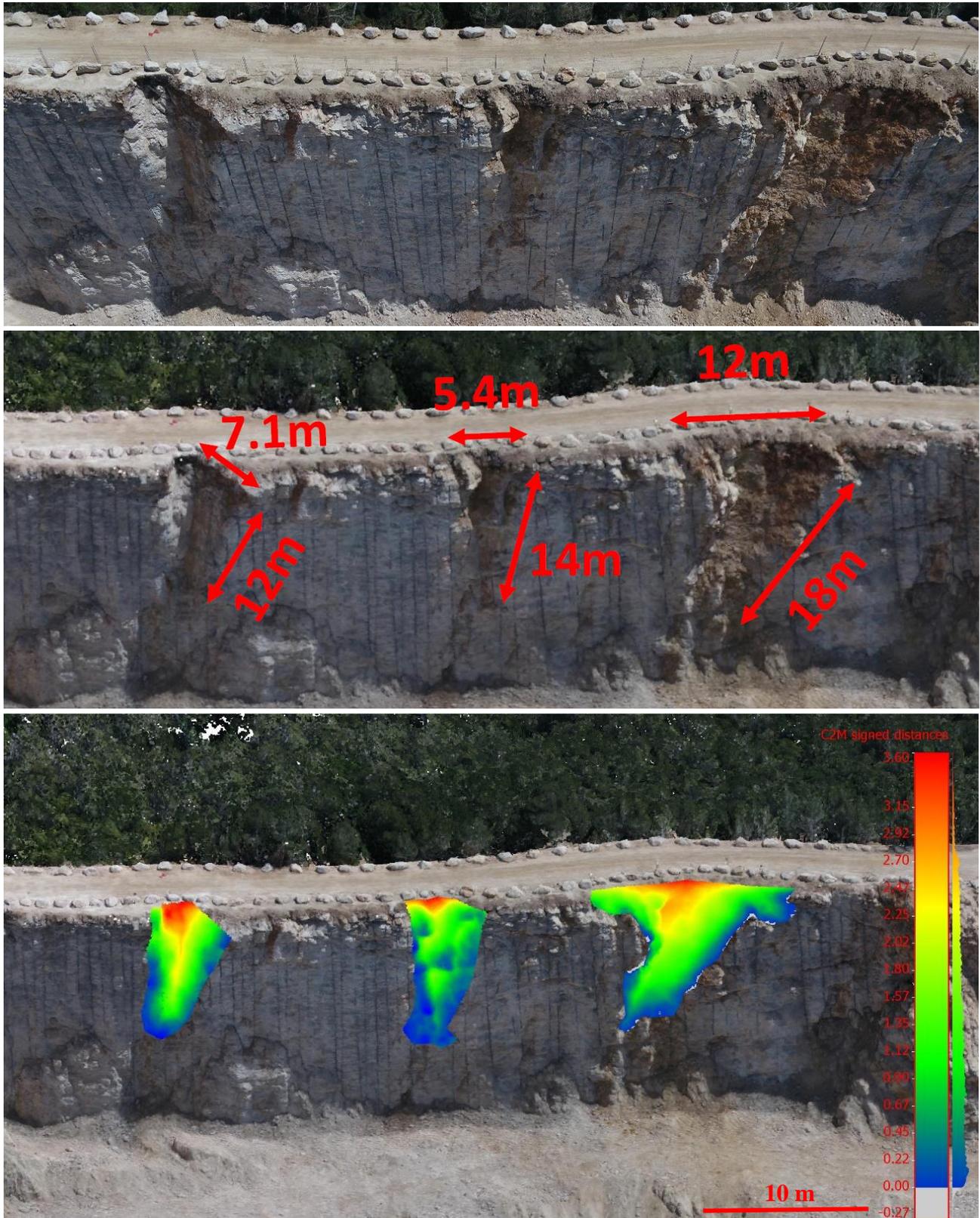


Figura 15: Fotografía de dron (superior), modelo 3D (intermedia) y reconstrucción de volúmenes de rotura (inferior).

Finalmente, se realizan simulaciones de propagación de desprendimientos con RockGIS, considerando bloques de 1 m^3 , 10 m^3 y 100 m^3 para el escenario actual y la propuesta (Figura 14). Debido a que la geometría se modifica mucho entre el escenario actual y la propuesta, para poder comparar los resultados, se analiza cuántas hectáreas de talud susceptible de generar desprendimientos representa cada punto de salida. Así, debido a que se pasa de 5 a 6 bancos, con longitudes totales de cresta de talud de 1.8 km a 3.5 km, y con superficies de talud de 3.68 ha a 7.12 ha, se generan 40 puntos de salida para el escenario actual y 75 puntos de salida para el escenario de la propuesta futura, obteniendo un valor similar de 0.92 y 0.95 ha/punto de salida (Tabla 5).

| Escenario | Nº de bancos | Long. cresta de bancos (m) | Superficie de taludes (ha) | Puntos de salida | Superficie representativa (ha/punto) |
|-----------|--------------|----------------------------|----------------------------|------------------|--------------------------------------|
| Actual | 5 | 1843 | 3,68 | 40 | 0,92 |
| Propuesta | 6 | 3534 | 7,12 | 75 | 0,95 |

Tabal 5: Puntos de salida y superficie susceptible de producir desprendimientos en cada escenario.

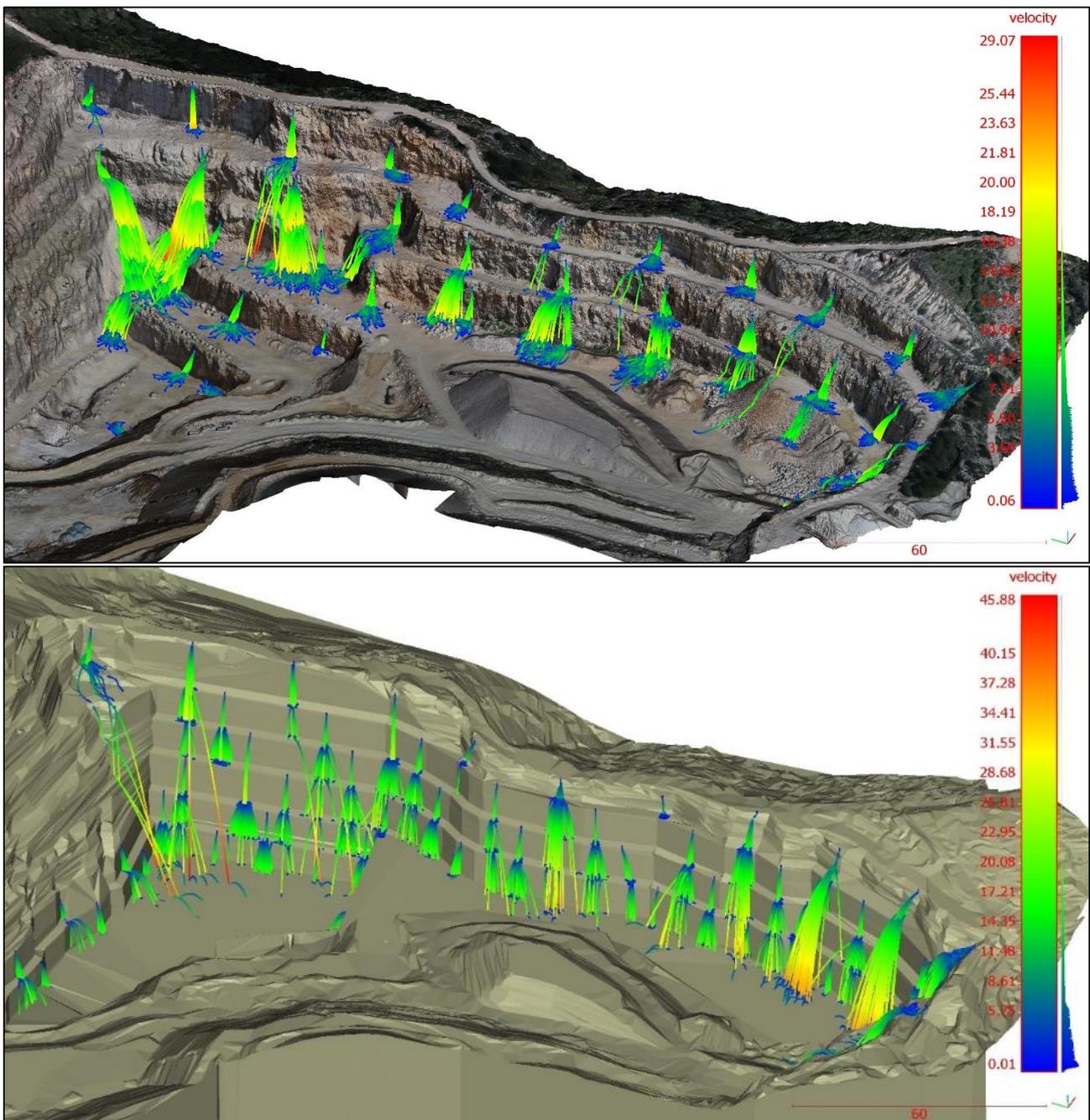


Figura 16: Simulaciones de desprendimientos para bloques de 1 m^3 en escenario actual (superior) y propuesta (inferior).

Los bloques de 1 m³ y 10 m³ se simulan sin fragmentación, y los bloques de 100 m³ se simulan sin y con fragmentación. Los resultados no se muestran en detalle por motivos de formato y brevedad de la comunicación, pero, en resumen, las energías de impacto se duplican en el escenario propuesto debido a que se incrementa la altura de caída libre de 60 a 120 metros con la geometría propuesta. Las energías de impacto se duplican y la fragmentación genera una mayor dispersión de los bloques aunque reduce su alcance. Finalmente, se considera relevante anotar que el modelo sintético carece de rugosidad en las paredes casi verticales, aportándole muy poca divergencia a las trayectorias en comparación con las obtenidas con el modelo 3D de la cantera actual con rugosidades reales descritas con detalle ya que se utiliza un modelo digital de elevaciones obtenido con el dron de 10 cm/px.

12. CONCLUSIONES

En los dos casos presentados se ha utilizado el vuelo de dron como sistema de adquisición de datos con el que se ha generado una nube de puntos 3D de muy alta resolución (más de 100 puntos por metro cuadrado) utilizando técnicas de fotogrametría digital. El tratamiento de las nubes de puntos permite una caracterización del patrón de discontinuidades de forma masiva muy eficaz y potente, que además de mejorar la cantidad y calidad de los datos de trabajo, reduce enormemente la exposición al riesgo de desprendimientos y roturas de los trabajos de campo al no tener que pasar horas midiendo planos con la brújula sobre los taludes, típicamente muy inestables en canteras en explotación. Los modelos 3D son muy útiles para identificar y delimitar volúmenes como se ha visto en los dos casos mostrados. También el modelo 3D del terreno es una parte imprescindible y muy relevante en la propagación de desprendimientos, y es una información imprescindible para realizar simulaciones de propagación de calidad.

En relación al primer caso expuesto, la metodología mostrada permite la delimitación con precisión del volumen potencialmente inestable y la generación de cartografías de detalle para delimitar una zona de seguridad. Los análisis de estabilidad realizados con test cinemáticos, equilibrio límite analítico con RocPlane y equilibrio límite con métodos numéricos con Slide2D y Slide3D muestran resultados muy consistentes. Los ensayos de laboratorio permiten tener un rango de valores de la cohesión y el ángulo de fricción del plano de deslizamiento, y el modelo 3D de precisión del liso de la rotura antecedente permite conocer muy bien su pendiente a partir de la medida sobre 260.000 puntos. Aun así, existe una gran incertidumbre sobre la variación espacial de la cohesión en el plano de deslizamiento que controla la estabilidad. Del mismo modo, las presiones de agua son las que pueden desencadenar la rotura, según el análisis realizado, con un 35% de la superficie del liso llena de agua.

En el segundo caso, las roturas observadas concuerdan con las resultantes de la caracterización de las discontinuidades y de los análisis de estabilidad, reforzando su validez. La geometría propuesta conlleva peligros asociados a las roturas caracterizadas, así como un incremento en las energías de impacto en caso de producirse desprendimientos, en gran parte, debido al hecho de doblar las alturas de caída libre y reducir los anchos de los bancos que podrían conseguir parar algunos bloques.

REFERENCIAS

- Dewez, T. J. B., Girardeau-Montaut, D., Allanic, C., and Rohmer, J.: FACETS : A CLOUDCOMPARE PLUGIN TO EXTRACT GEOLOGICAL PLANES FROM UNSTRUCTURED 3D POINT CLOUDS, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLI-B5, 799-804, doi:10.5194/isprs-archives-XLI-B5-799-2016, 2016.
- Matas G. (2020) Modelling fragmentation in rockfalls. Tesis doctoral del programa de Ingeniería del Terreno. Dpto. de Ingeniería de Ingeniería Civil y Ambiental (Universitat Politècnica de Catalunya. UPC-BarcelonaTech).
- Ruiz-Carulla R. (2018) Rockfall analysis: Failure, fragmentation and propagation characterization. Tesis doctoral del programa de Ingeniería del Terreno. Dpto. de Ingeniería de Ingeniería Civil y Ambiental (Universitat Politècnica de Catalunya. UPC-BarcelonaTech).Z