

Análisis estructural y geomecánico en zonas inaccesibles de cavernas naturales mediante técnicas fotogramétricas: aplicación en la entrada de la cueva de Artá (Mallorca)

L. Jordá-Bordehore ⁽¹⁾, A. Riquelme ⁽²⁾, R. Tomás ⁽²⁾ y M. Cano ⁽²⁾

⁽¹⁾ Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL, Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, Campus Gustavo Galindo Km 30.5 Vía Perimetral, P.O. Box 09-01-5863, Guayaquil, Ecuador,
ljorda@espol.edu.ec

⁽²⁾ Dpto. de Ingeniería Civil. Escuela Politécnica Superior de Alicante. Universidad de Alicante. P.O. Box 99, 03080 Alicante, España.

RESUMEN

La estabilidad de la mayoría de las cuevas kársticas carbonatadas someras se encuentra controlada por las discontinuidades del macizo rocoso, tales como la estratificación, fallas y diaclasas. Para caracterizar geomecánicamente una cavidad, y con ello determinar su estabilidad, resulta clave un adecuado análisis y censo de las discontinuidades presentes, determinando sus orientaciones medias y su dispersión. La medida de estas orientaciones se realiza de forma habitual mediante brújula con clinómetro. Sin embargo, este procedimiento manual plantea una serie de inconvenientes (e.j. solamente son accesibles las fracturas situadas en la parte baja o hastiales de las salas de las cuevas y bocas de entrada). Durante la última década, se ha extendido el uso de técnicas remotas como el 3D láser escáner o la fotogrametría digital en la caracterización de macizos rocosos. Estas técnicas permiten obtener nubes de puntos 3D de las paredes y techos de la cavidad con una gran resolución y precisión. A partir de estas nubes de puntos 3D es factible obtener las orientaciones y algunos otros parámetros de las discontinuidades, tales como el espaciado, la continuidad o la rugosidad. En este trabajo se lleva a cabo una comparativa entre los datos geomecánicos obtenidos mediante procedimientos manuales convencionales (i.e. mediante brújula en afloramientos accesibles) y mediante la técnica fotogramétrica *Structure from Motion* (SfM) de la zona de la entrada de la cueva de Artá (Mallorca). Los resultados muestran una excelente correlación entre los parámetros geomecánicos obtenidos por ambos procedimientos en las zonas comunes de adquisición de datos. Asimismo, ponen de manifiesto la ventaja de combinar ambas técnicas para elaborar un censo de discontinuidades más completo y realista.

Palabras clave: Análisis estructural, cuevas, geomecánica, *Structure from Motion*, técnicas remotas.

Structural and geomechanical analysis in inaccessible areas of natural caves by photogrammetric techniques: application on the entrance of Artá Cave (Mallorca)

ABSTRACT

The stability of most shallow caves in carbonate karstic environments is controlled by rock discontinuities, such as stratification, faults and joints. A proper analysis and census of discontinuities, determining their orientations and dispersion is key to assess the stability of a cave. The orientation of discontinuities is often performed using compass with clinometer. However, this manual process raises a number of drawbacks (e.g. only fractures located at the lower part of the cave walls and entrances are visible). Over the past decade, the use of remote sensing techniques, such as

LiDAR and photogrammetry, has spread in the characterization of rocky massifs. These techniques allow us to obtain 3D point cloud of the walls and ceilings of the cavity with high resolution and accuracy. From these 3D point cloud, it is feasible the three dimensional reconstruction of the cavity and the obtaining of the orientation and some other parameters of discontinuities, such as spacing, persistence or roughness. This article carries out a comparison between the geomechanical data obtained by conventional manual procedures (i.e by compass in accessible outcrops) and by a photogrammetric technique called Structure from Motion (SfM) at the entrance of the cave named Cueva de Artá (Mallorca). Results show an excellent correlation between the geomechanical parameters obtained by both procedures in common areas of data acquisition. Furthermore, they show the advantage of combining both techniques to develop a more complete and realistic discontinuities census.

Keywords: caves, Structure from Motion, remote techniques, geomechanicsstructural analysis.

Introducción

Las cuevas de grandes dimensiones presentan importantes problemas de acceso a los techos y paredes para la toma de datos estructurales, durante el proceso de caracterización geomecánica. Esta caracterización se lleva a cabo mediante el uso de brújula y el levantamiento de estaciones geomecánicas que permiten tomar datos de la orientación y propiedades de las discontinuidades y de la matriz rocosa, únicamente en zonas bajas de la entrada o las cámaras de las cuevas. La mayoría de cavidades kársticas tienen una génesis mixta entre disolución de una parte del macizo, principalmente a favor de zonas de debilidad estructural, y el desprendimiento de bloques o estratos hasta alcanzar la estabilidad o el colapso completo del hueco. Por tanto, las cavidades kársticas tienen un marcado control estructural, tanto para la etapa de disolución como en la de desprendimientos de bloques. En consecuencia, la toma de datos de orientación y propiedades de las discontinuidades es clave para el análisis de la estabilidad de la cueva.

Las técnicas de adquisición remota se han aplicado a un gran número de investigaciones científicas. Las dos técnicas más relevantes son el *3D laser scanning* terrestre y la técnica de fotogrametría digital SfM (*Structure from Motion*) (Abellán et al., 2016). La primera técnica mencionada consiste en un sensor LiDAR (*Ligh Detection and Ranging*), que fue mencionada por primera vez en los años 60 (Ring 1963). Esta instrumentación puede venir posicionada en varias plataformas, siendo la de mayor interés para esta investigación el posicionamiento sobre un trípode, recibiendo el nombre de TLS (*Terrestrial Laser Scanner*) o láser escáner terrestre. Esta técnica permite adquirir las coordenadas de millones de puntos de una superficie con elevada rapidez y precisión. Una de las principales diferencias que distinguen esta técnica de la segunda es que el 3D láser escáner adquiere los puntos de la superficie en tiempo real, cuando la segunda requiere un procesado de las imágenes (Slob et al, 2005). Estas imágenes son fotografías en formato digital adquiridas desde distintos puntos de vista, a las que se les aplica un algoritmo con computadoras. La calidad del modelo generado con esta técnica depende en gran medida de la calidad de las imágenes adquiridas, su técnica de adquisición y de la aplicación del algoritmo a los datos. Las técnicas de escaneo de cavidades mediante TLS han sido ampliamente empleadas en la última década (Gallay et al., 2015, VVAA 2015, Idrees y Pradhan, 2016). Las principales aplicaciones de esta técnica en cuevas han tenido lugar en los campos de la arqueología, la geomorfología, los cambios morfológicos en la superficie de hielo, la ecología, la paleoclimatología, la paleontología, la divulgación, la visualización 3D,

en los riesgos geológicos (Idrees y Pradhan, 2016). La mayoría de las problemáticas geotécnicas en cavidades se producen en la entrada de la misma, normalmente por la conjunción de un macizo rocoso menos tensionado y la presencia de mayores superficies libres, como son la del hueco de la cavidad y la del exterior, hacia las que pueden progresar las inestabilidades cinemáticas. El uso de las técnicas de adquisición remota permite la digitalización de la superficie del interior de una cueva, por lo que TLS puede resultar de gran utilidad en el estudio de este problema geotécnico. Sin embargo, el desplazamiento de la instrumentación en condiciones de seguridad puede ser inviable cuando se trata de cavidades situadas en parajes remotos. Por otro lado, las técnicas fotogramétricas tienen la ventaja de emplear sensores (i.e. cámaras fotográficas) mucho más ligeros y manejables que el TLS. Desde el punto de vista de adquisición de datos, la fotogrametría presenta el inconveniente de ser difícilmente aplicable en el interior de las cuevas, debido a la diferencia de iluminación y la presencia de sombras, así como por la conveniencia de no utilizar flash. Sin embargo, es una técnica muy efectiva en las zonas iluminadas de forma natural como son las entradas de las cuevas.

En este trabajo se hace uso de la técnica fotogramétrica SfM para llevar a cabo la restitución en tres dimensiones de la entrada de la Cueva de Artá (una de las cuevas más turísticas de Mallorca) a partir de una serie de fotografías digitales. El posterior análisis de la nube de puntos 3D obtenida ha permitido determinar la orientación de los planos que aparecen en la reconstrucción del modelo mediante el programa de código abierto Cloud Compare (2016), llevando a cabo una selección manual de las superficies de discontinuidad. La combinación de los datos obtenidos a partir de esta técnica remota y de los datos tomados por procedimientos convencionales permitiría llevar a cabo un análisis estructural o geomecánico de la cavidad para obtener unos conjuntos de polos de discontinuidades más completos y realistas.

Los motivos principales por los que el trabajo se ha desarrollado en la entrada de la cueva de Artá son: a) los techos son completamente inaccesibles al "mapeo" manual, por estar a más de 22 metros de altura en su punto central; b) en los laterales de la entrada es factible comparar la toma de datos manual con la obtenida a partir de las nubes de puntos 3D; c) toda la entrada está iluminada por luz natural, lo que facilita la adquisición de imágenes fotográficas de gran calidad. Por lo tanto, el objetivo de esta investigación es comparar la toma de datos estructurales mediante SfM y los obtenidos de forma convencional con brújula, en zonas accesibles de la cavidad. De esta manera se puede estimar el grado de precisión de la técnica fotogramétrica en zonas inaccesibles.

Geología y geomorfología de la cueva de Artá

La cueva de Artá es una de las cinco cuevas adaptadas al turismo de la isla de Mallorca, la isla del Archipiélago balear con mayor número de cuevas acondicionadas (Ginés, 2007, Robledo y Durán, 2010). La cueva se ubica en la costa noreste de Mallorca, en la zona acantilada de Cap Vermell (municipio de Capdepera), próximo a la cala-playa de Canyamel (Fig.1). La cueva se abrió al público alrededor de 1880, siendo las primeras exploraciones documentadas de 1806 (Ginés, 2007). Tiene un recorrido de unos 500 m de desarrollo horizontal. La habilitación al turismo se inicia con la construcción de la escalinata (Fig.2), con objeto de la fallida visita de

la reina Isabel II, (Robledo y Durán, 2010). Aunque no existen cifras oficiales, se estima que la cueva recibió más de 100.000 visitantes anuales en la década del 2000 (Robledo y Durán, 2010).

La cueva de Artá está localizada en calizas Jurásicas de las Sierras de Levante y es un buen ejemplo de cueva litoral desarrollada en los complejos ambientes tectónicos de las montañas mallorquinas (Fornós et al., 2012).. La entrada o boca de la cueva que da paso a una sala visitable se abre a una altura de 45 m sobre el nivel del mar en un acantilado y tiene unas dimensiones considerables: 50 m de ancho y 22 m de altura (Figs. 1 y 2).

En la boca de entrada se aprecia el buzamiento de estratos calizos muy marcado hacia el E y una falla de buzamiento hacia el O que dan una morfología muy característica en forma de diedro (Figs. 1c y 2). La cueva tiene un marcado control estructural. La formación de la cueva podría haberse producido por la disolución de un núcleo central y el progresivo desprendimiento de estratos y bloques hacia el interior del hueco, para dejar espacio a más desprendimientos hasta alcanzar el equilibrio cinemático de los bloques, o un arco estable de descarga.

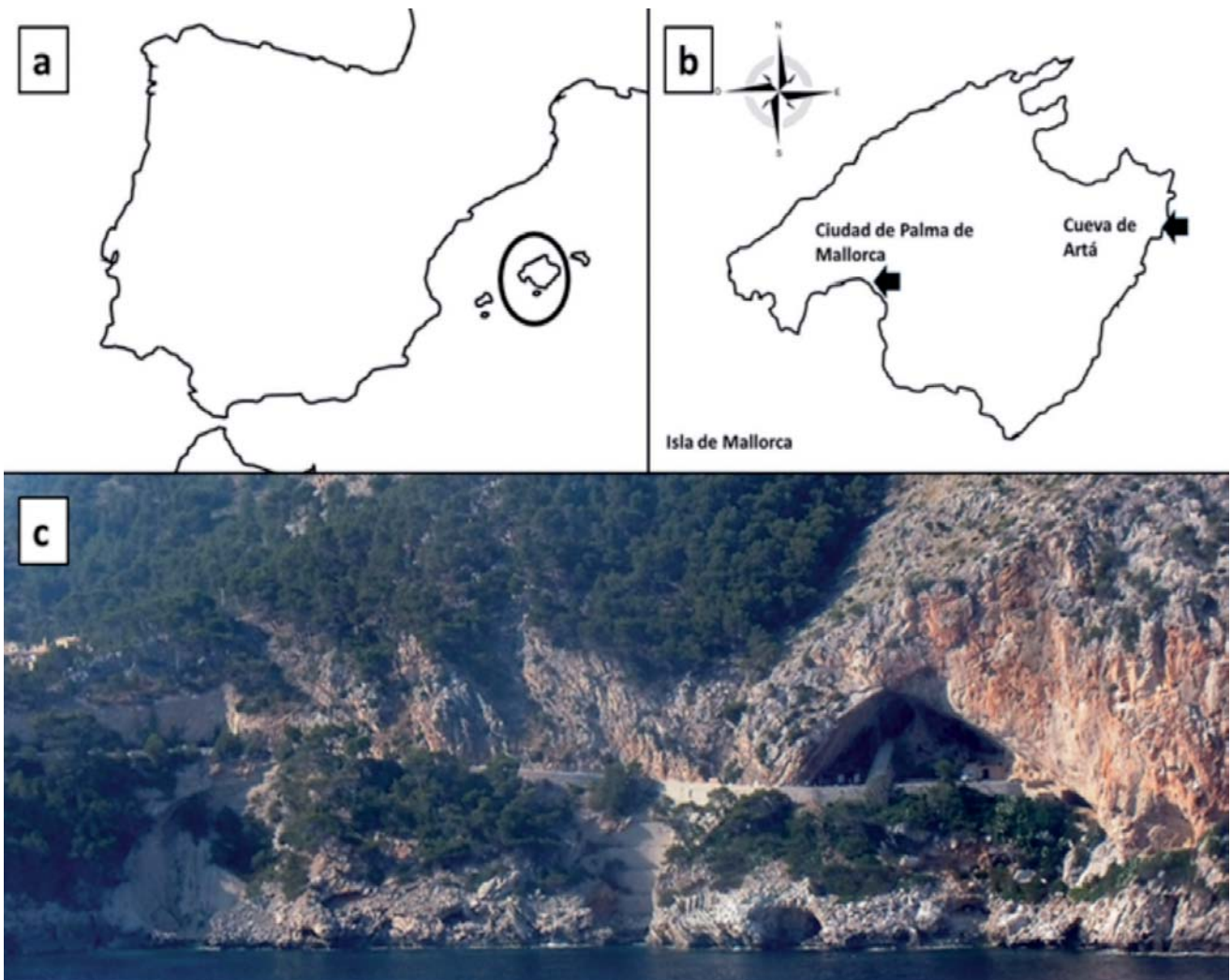


Figura 1. a y b) Localización de la cueva de Artá c) fotografía de la entrada de la cueva (adaptado de una imagen cortesía de A. Manrique Cerrato)

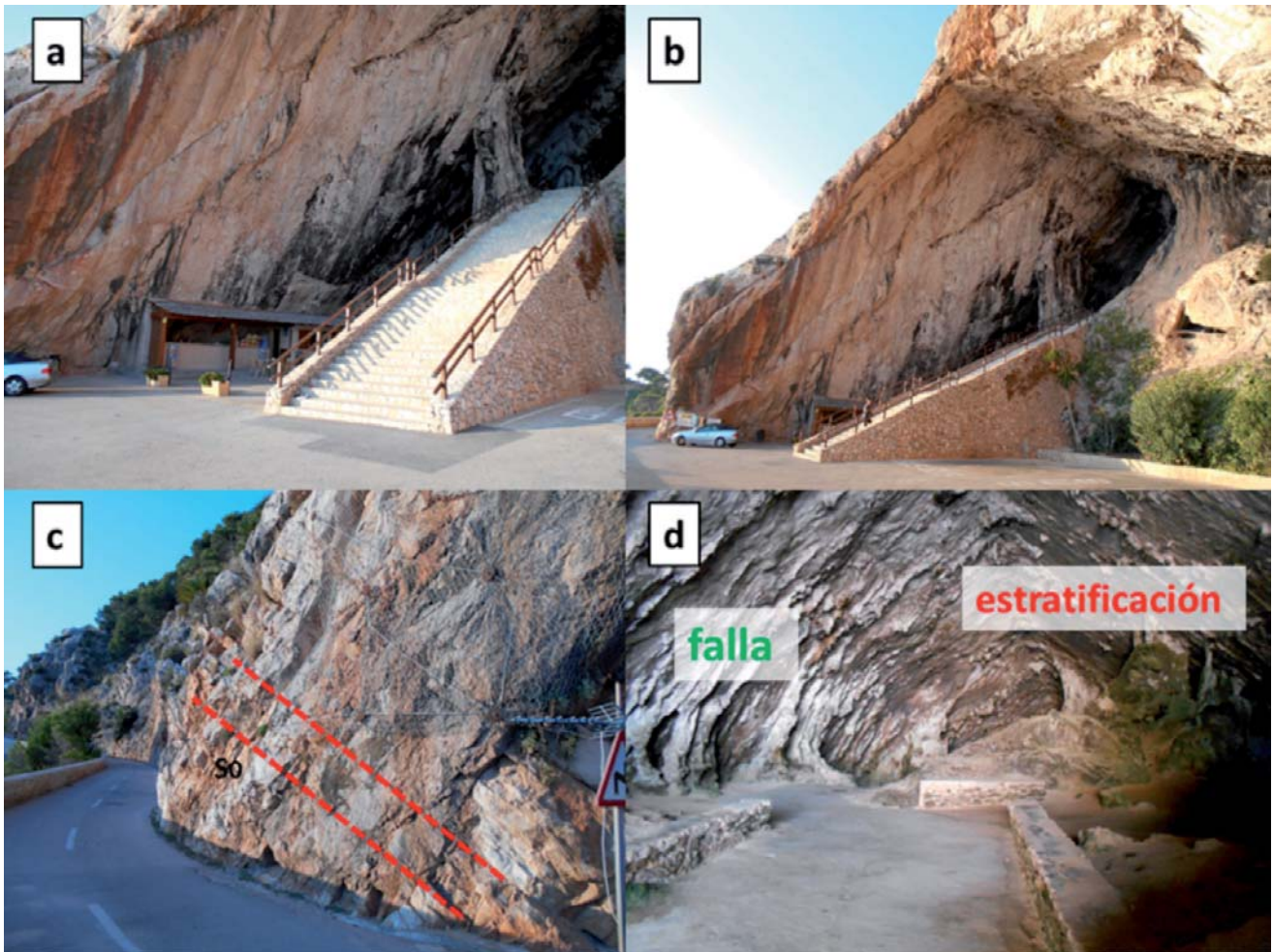


Figura 2. a) Entrada de la cueva, con la escalinata de acceso construida para la visita de la Reina Isabel II. b) Panorámica de la entrada de la cueva, donde se puede apreciar la altura de la boca (22 m) c) detalle de la estratificación en el lado izquierdo de la entrada de la cueva. d) Estrechamiento situado tras subir la escalinata formado por bloques caídos que da paso a la zona con mayor profusión de espeleotemas. En la imagen se aprecia a la izquierda la falla y a la derecha la estratificación

Metodología

Toma de datos mediante Structure from Motion

La fotogrametría es un tipo de técnica remota que permite extraer, a partir de un par o de un conjunto de imágenes, las propiedades geométricas tridimensionales contenidas en una escena. Las distintas estrategias para obtener esta información tridimensional se basan en los principios de la visión estereoscópica (empleando únicamente dos fotografías) o en modernas técnicas de reconstrucción tridimensional que emplean algoritmos de correlación automática de imágenes (e.g. *Structure-from Motion*, SfM; Jordá *et al.*, 2016). En este trabajo se ha hecho uso de ésta segunda técnica (SfM) para reconstituir la totalidad del talud de entrada a la Cueva de Artá (Fig. 2). Para ello, a partir de 72 fotografías tomadas con cierta oblicuidad –para corregir el efecto domo (James y Robson 2014) con una cámara digital compacta de 20 Me-

gapixels en la entrada de la cueva, se ha realizado una restitución fotogramétrica empleando el programa Agisoft Photoscan (2016) que ha proporcionado una densa nube de puntos 3D. Posteriormente, mediante el programa libre Cloud Compare (2016), se ha analizado la nube de puntos 3D obtenida, seleccionando manualmente cada uno de los planos o discontinuidades identificados visualmente para obtener su dirección y buzamiento mediante el ajuste de un plano.

Puntos de control en el talud

Para poder orientar y escalar la nube de puntos 3D, obtenida mediante SfM, es necesario tener las coordenadas precisas de algunos puntos de control (en lo sucesivo GCP), al menos tres, de la superficie del terreno de la zona fotografiada. Las coordenadas de estos puntos (Fig. 3) pueden obtenerse mediante topografía u otras técnicas, en función de la precisión requerida. El uso de GPC permite corregir parámetros internos de las imágenes digitales, corregir distorsiones (e.g. efecto domo) y optimizar la posición y orientación de las cámaras. Por este motivo, el uso de 3 GPC puede parecer impreciso. Sin embargo, no parece coherente utilizar un elevado número de GPC, cuyas coordenadas han sido determinadas con elevada precisión, cuando buena parte de la orientación de los planos del talud serán tomados con brújula. Cuando se requiera mayor precisión, será necesario el uso de un mayor número de GPC. Para los objetivos perseguidos en esta investigación, en la que se emplean pocos recursos, se han determinado tres GPC (utilizando plastilina de colores) con el fin de determinar una matriz de transformación rígida que permita escalar y orientar la nube de puntos adquirida, tal que las lecturas de orientación de planos estén alineadas respecto a la vertical y al norte magnético (no al geográfico). En este caso, las coordenadas de los GCPs se han definido en un sistema relativo, mediante la orientación de dos de ellos respecto a un origen arbitrario de coordenadas (0x,0y,0z) haciendo uso de la brújula y de un distanciómetro.

Calidad del censado de polos. Distribución de Fisher

Una vez tomadas las orientaciones de las discontinuidades, tanto de forma manual (con brújula), como mediante análisis de nube de puntos 3D a partir de SfM, es preciso agrupar esas medidas en familias o clústeres. Para este fin se han representado los polos de las discontinuidades medidas en proyección estereográfica polar equiareal y se han analizado haciendo uso del software DipsV7 (Rocscience, 2016).

La distribución de Fisher se emplea a menudo para modelizar la distribución de la orientación de vectores en tres dimensiones (Fisher, 1953), tal y como sucede con la distribución de orientaciones de juntas (vectores polo) en una esfera o semiesfera. Una distribución de Fisher permite describir la distribución angular de orientaciones respecto de un vector orientación medio y su simetría respecto de la media. La función de densidad de probabilidad (f) se puede expresar como (Rocscience, 2016):

$$f(\theta) = \frac{K \sin(\theta) e^{K \cos(\theta)}}{e^K - e^{-K}} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde θ es la desviación angular del vector medio (en grados) y K es la "constante de Fisher" o factor de dispersión.

El valor de la K Fisher puede estimarse a partir de la siguiente ecuación para grupos de datos mayores de aproximadamente 30 vectores (Fisher, 1953):

$$K \approx \frac{N-1}{N-R} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde N es el número de polos y R es la magnitud del vector resultante (magnitud del vector suma de todos los polos del conjunto de la familia).

De forma análoga a la distribución normal, es posible definir una desviación típica o estándar, estimada a partir de la siguiente ecuación (Butler, 1992):

$$\theta = \frac{81^\circ}{\sqrt{K}} \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde θ es la desviación angular estándar o también llamada "dispersión angular" de la Distribución de Fisher y K es la constante de Fisher. El valor de la K de Fisher describe la "estrechez" o dispersión en un grupo o clúster. Un valor alto de K (e.g. 50) implica un grupo más concentrado que un valor menor de K (e.g. 20) que representa un grupo más disperso.

Resultados y discusión

En este trabajo se han desarrollado dos campañas de toma de datos de campo en la boca de la cueva. Durante la primera campaña (noviembre 2015), se tomaron fotografías para la posterior restitución fotogramétrica. En la segunda campaña (marzo 2016), se levantó una estación geomecánica para la toma de datos estructurales y geotécnicos de las discontinuidades accesibles. La boca de la cueva presenta dos importantes sistemas de fracturas que gobiernan la estabilidad de la misma (Fig. 2): (a) la estratificación, representada por un gran plano localizado en el lado derecho de la entrada a la cueva; y (b) una gran falla que define la pared occidental.

Para poder llevar a cabo la orientación y escalado del modelo 3D obtenido a partir de la restitución fotogramétrica se colocaron tres puntos de control marcados con plastilina de color en la barandilla de la escalinata de subida. Dos puntos se situaron en la occidental (izquierda si se mira al acantilado desde el mar) y uno en la oriental (Fig. 3). La orientación respecto al norte magnético de las alineaciones entre los puntos 1-2 (que además definían una línea horizontal) y 1-3 permitió asignar coordenadas relativas a todos los puntos. Las coordenadas de estos puntos de control se muestran en la Tabla 1.

Como puede apreciarse en la Figura 4, los estereogramas de los planos obtenidos con las dos técnicas muestran dos familias principales de discontinuidades (S_0 y F), así como algunas juntas aleatorias. En la Tabla 2 se muestran los valores de dirección de buzamiento, buzamiento y K de Fisher de cada una de las familias de juntas (*discontinuity sets*) identificadas (Fig. 4). La toma de datos manual es la que presenta los polos más juntos entre sí (K variable entre 137 y 194) debido a que se han podido tomar pocos datos en zonas muy localizadas, de ahí la escasa

dispersión de resultados. Por el contrario, en el caso de las orientaciones determinadas con SfM, los clústeres están más abiertos (K entre 60 y 119) siendo además más representativos de los grandes planos visibles debido a que las medidas se han tomado sobre planos extraídos de mayor tamaño que los medidos con la brújula. Como cabría esperar, combinando ambos procedimientos manual y SfM la dispersión de los polos es mayor aún (K variable entre 55 y 89). Por tanto, independientemente de que los datos se adquieran por procedimientos clásicos (i.e. de forma manual), remotos (i.e. mediante SfM) o por combinación de ambos sets de datos, se obtienen dos familias de discontinuidades correspondientes a la estratificación (S_0) y a la falla (F) (Tabla 2). Asimismo, se aprecian algunas juntas de escasa entidad que aparecen dispersas en el estereograma y que se corresponden con familias menores o aleatorias (Fig. 4).

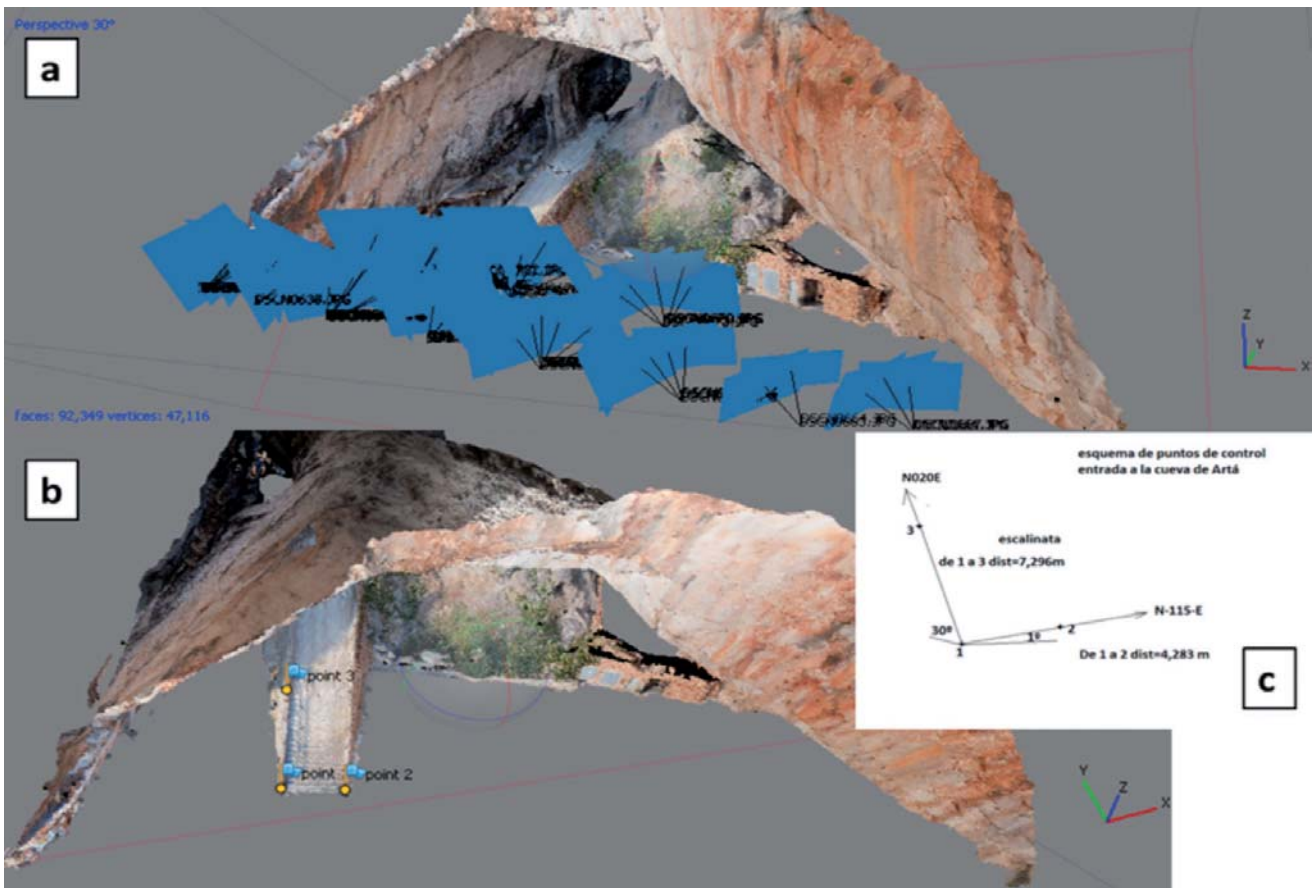


Figura 3. Nube de puntos 3D de la entrada a la cueva de Artá mediante Agisoft Photoscan. En a) se muestran las orientaciones de las fotografías empleadas para el modelo (en azul), y en b) se proporciona una vista cenital de la boca de la cavidad donde se aprecian los puntos de control localizados en la escalinata. c) Esquema de cálculo de las coordenadas relativas de los puntos de control utilizados para la restitución fotogramétrica

Puntos	X	Y	Z
1	0,000 m	0,000 m	0,000 m
2	3,880 m	-1,812 m	0,000 m
3	2,160 m	5,940 m	3,648 m

Tabla 1. Puntos de control (GCP) establecidos en la escalinata. Obsérvese que el sistema de referencia es relativo. Las coordenadas planimétricas (X a Y) vienen referida al norte magnético. El eje Z corresponde a la dirección vertical

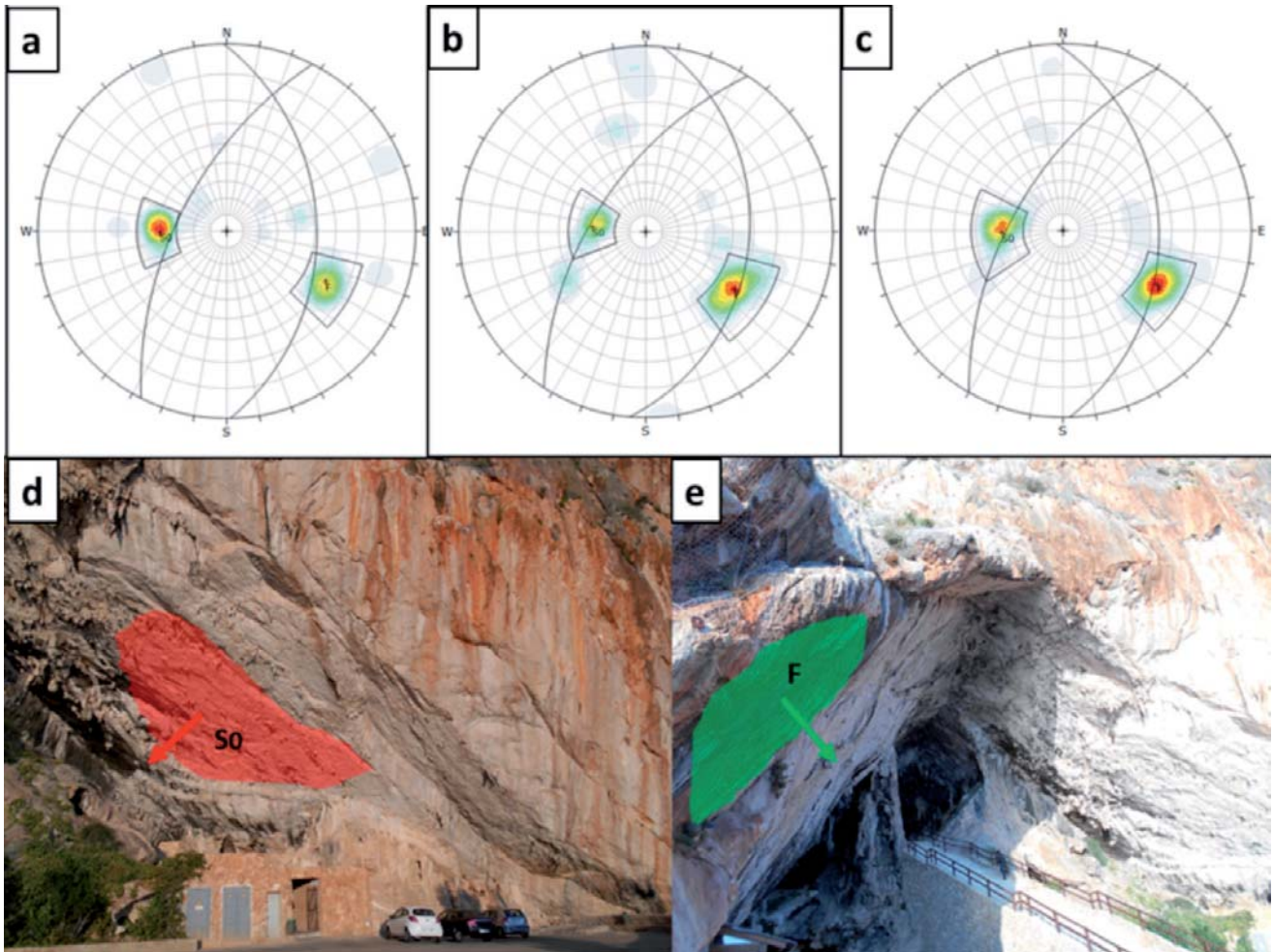


Figura 4. Estereogramas de las nubes de polos de las discontinuidades (representación en proyección equiareal, hemisferio inferior) obtenidas: a) mediante brújula; b) mediante SfM; y c) por combinación de polos obtenidos de forma manual y mediante SfM. d) Detalle del plano de estratificación (S_0) existente en la pared derecha u oriental de la cueva. e) Detalle del plano de falla (F) existente en pared izquierda u occidental de la cueva

Método de toma de datos	Familia de discontinuidades	Dirección de buzamiento (°)	Buzamiento (°)	K de Fisher
Manual (mediante brújula)	Estratificación (S_0)	089	39	137
	Falla (F)	297	61	194
Remota (mediante SfM)	Estratificación (S_0)	095	32	119
	Falla (F)	303	59	60
Combinando campo y SfM	Estratificación (S_0)	088	36	55
	Falla (F)	300	60	89

Tabla 2. Orientaciones de las discontinuidades determinadas

Conclusiones

La técnica de fotogrametría SfM resulta de gran efectividad para la toma de datos estructurales en zonas inaccesibles de cuevas. Su uso combinado con la toma de datos convencionales con brújula y estación geomecánica tiene una gran ventaja al permitir cotejar los datos tomados en un punto accesible mediante ambas técnicas. En el caso estudiado de la entrada de la cueva de Artá, las zonas inaccesibles alcanzan una altura de más de 20 metros. A simple vista se aprecian dos familias importantes: una falla y la estratificación que pueden ser medidas en la parte baja de la cueva pero que presentan un gran desarrollo y por tanto para su adecuada caracterización se requiere disponer de datos de orientación (y eventualmente otros parámetros tales como rugosidades, persistencias) en la parte alta.

Se ha aplicado la técnica SfM para tomar medidas en la parte inaccesible y se ha comparado con la toma de datos manuales con brújula en la parte accesible. La comparación entre las medidas de orientación se ha realizado mediante análisis estereográfico y distribución estadística K de Fisher, el resultado muestra una buena correlación entre la toma de datos remota y manual.

La técnica fotogramétrica y en particular el SfM es de gran aplicación en el análisis estructural y geomecánico de taludes. En el caso de las cuevas la técnica fotogramétrica a priori parece solo aplicable a la boca de las mismas, donde las superficies están iluminadas con la luz natural.

En futuras investigaciones se propondrá la aplicación en el interior de cuevas, para lo cual es preciso prestar especial atención al modo y sistema de iluminación artificial, ya que esta técnica no permite el uso de flashes por las diferencias de iluminación de píxeles en diferentes fotografías a solapar.

Agradecimientos

A aquellos que nos han ayudado en la toma de datos de campo en Artá y los que nos han suministrado información de la cueva: Armando Manrique, Mercedes Bordehore, Ana López, Miquel Ginard y Joan J. Fornos. El software Photoscan ha sido financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad (MINECO) y Fondos Feder en el marco del proyecto TIN2014-55413-C2-2-P.

Referencias

- Abellán, A., Derron, M.H., y Jaboyedoff, M. (2016) Use of 3D Point Clouds in Geohazards. *Special Issue: Current Challenges and Future Trends, Remote Sens*, 8(2):130; doi: 10.3390/rs8020130.
- AgiSoft PhotoScan Professional (Version 1.2.4) (Software). 2016. Retrieved from <http://www.agisoft.ru/products/photoscan/professional/>
- Butler, R.F. 1992. *Paleomagnetism: magnetic domains to geologic terranes*, Blackwell Science.

- Cloud compare. 2016. CloudCompare 2.7: 3D point cloud and mesh processing software. Open Source Project <http://www.danielgm.net/cc/> (01/05/2016)
- Fisher, R., 1953. Dispersion on a sphere. *Proc. Royal Society London*, A217, 295-305.
- Fornós, J.J., Ginés, A., Ginés, J., Gómez-Pujol, Ll., Gràcia, F., Merino, A., Onac, B.P., Tuccimei, P., y Vicens, D. 2012. Upper Pleistocene deposits and karst features in the littoral landscape of Mallorca Island (Western Mediterranean): a field trip En: Ginés, A., Ginés, J., Gómez-Pujol, L., Onac, B.P. & Fornós, J.J. (eds). 2012. Mallorca: A Mediterranean Benchmark for Quaternary Studies. *Mon. Soc. Hist. Nat. Balears*, 18, pp. 163-219.
- Gallay M., Kanuk L., Hochmuth Z., Meneely J.D., Hofierka J. y Sedlak V. 2015. Large-scale and high-resolution 3-D cave mapping by terrestrial laser scanning: a case study of the Domica Cave, Slovakia. *International Journal of Speleology*, 44 (3):277-291
- Ginés J. 2007. Las cuevas turísticas de las islas Baleares: antecedentes y estado de la cuestión. En: J.J. Durán, P.A. Robledo y J. Vázquez (Eds.), *Cuevas turísticas: aportación al desarrollo sostenible*. Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España. Serie Hidrogeología y Aguas Subterráneas, nº 24, 17-30.
- Idrees M.O., y Pradhan B. 2016. A decade of modern cave surveying with terrestrial laser scanning: A review of sensors, method and application development. *International Journal of Speleology* 45 (1): 71-88.
- ITGE, 1991. *Hoja geológica nº 700*, Manacor.
- James, M. R., & Robson, S. 2014. Mitigating systematic error in topographic models derived from UAV and ground-based image networks. *Earth Surface Processes and Landforms*, 39 (10), 1413-1420.
- Jordá Bordehore, L., Tomás Jover, R., Arlandi Rodríguez, M. y Abellán Fernández, A. 2016. *Manual de estaciones geomecánicas y descripción de macizos rocosos en afloramientos*. Ed: C.Lopez Jimeno Ud Proyectos ETSI Minas UPM. Madrid.
- Manrique, A., 2016. *Volando sobre Mallorca*. <http://blogliterarioyfotografico.blogspot.com.es/2013/08/volando-sobre-mallorca.html> (01/05/2016)
- Ring, J. 1963. The Laser in Astronomy, *New Scientist*, Jun 20: 672-673
- Robledo P.A., y Durán, J.J. 2010. Evolución del turismo subterráneo en las islas Baleares y su papel en el modelo turístico. En: J.J. Durán y F. Carrasco (Eds.), *Cuevas: Patrimonio, Naturaleza, Cultura y Turismo*, 305-322. Madrid. Asociación de Cuevas Turísticas Españolas.
- Rocscience Inc. 2016, Dips version 7.0 Graphical and statistical analysis of orientation data. www.rocscience.com Toronto, Ontario, Canadá.
- Rocscience. 2016. *Fisher Distribution*. https://rocscience.com/help/swedge/webhelp/swedge/Fisher_Distribution.htm (Extracted 20/02/2016).
- Slob, S., Van Knapen, B., Hack, R., Turner, K. y Kemeny, J. 2005. Method for automated discontinuity analysis of rock slopes with three-dimensional laser scanning. Transportation Research Record. *Journal of the Transportation Research Board*; Geology and Properties of Earth Materials. 1913:187-194.
- VVAA. 2015. The worlds voids in 3D, *Descent* (245): 34-43