

Santander, Junio 2017
E. Alonso, J. Corominas y M. Hürlimann (Eds.)
CIMNE, Barcelona, 2017

EMPLEO DE TÉCNICAS GEOMÁTICAS PARA EL ESTUDIO DE PAREDES ROCOSAS

F. BULL*, M.A. NÚÑEZ-ANDRÉS*, C. PUIG-POLO†, N. LANTADA†, A. PRADES*

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental

* Escuela Politécnica Superior de Edificación de Barcelona

Universitat Politècnica de Catalunya

† Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona

Universitat Politècnica de Catalunya

RESUMEN

En la última década el aumento de tráfico en las carreteras, y de personas en zonas de ocio de montaña y playas situadas en acantilados ha incrementado el riesgo provocado por desprendimientos rocosos. Para poder prevenir estos fenómenos es necesaria la caracterización geométrica de las discontinuidades existentes en la pared rocosa a través de su identificación en modelos creados a partir de captura masiva de datos espaciales con técnicas geomáticas. La elección de una determinada técnica entre las diferentes posibilidades existentes se suele basar en su rapidez, alcance, precisión y coste.

En este artículo se presenta la comparación de la calidad geométrica de los modelos obtenidos con diferentes sensores empleando fotogrametría tanto terrestre como aérea desde UAV. Para la comparación se ha tomado como referencia el modelo TLS obtenido. Queda patente que las precisiones que se pueden lograr actualmente a distancias de trabajo medias son similares en todos los modelos.

1. INTRODUCCIÓN

La obtención de modelos tridimensionales mediante técnicas geomáticas para aplicaciones geológicas ha cobrado un nuevo impulso en la última década. Esto es debido al uso cada vez más frecuente de sistemas como el láser escáner, ya sea aéreo o terrestre, como al empleo de

levantamientos fotogramétricos tanto terrestres como desde plataformas no tripuladas.

Cada una de estas técnicas presenta variaciones que suponen ventajas e inconvenientes, tanto de compleción y precisión de modelos, como de diferencia en tiempo de ejecución y costes. Esto conlleva implicaciones en los métodos de la captura de la información y en el tratamiento que, posteriormente, se haga con ella. Hoy en día sería casi imposible modelar superficies de interés geológico sin recurrir al empleo técnicas geomáticas.

Se ha de considerar que las zonas de interés geológico presentan características muy dispares tanto en escala como en nivel de actividad o peligrosidad. Podemos encontrar desde deslizamientos de masas de terreno que abarcan una gran extensión, a caídas de bloques de forma puntual, inestabilidad de taludes, etc. pero casi todas ellas tienen en común la dificultad de acceso para la medida directa, y en muchos casos suponen un riesgo importante para las personas que la realizan.

Las técnicas geomáticas terrestres de captura de información 3D, sean las fotogramétricas o las de LiDAR (*Light Detection and Ranging*), presentan los mismos inconvenientes, principalmente la ocultación de parte de los elementos a levantar por causa de la perspectiva. Lo cual se soluciona con una toma aérea que hasta hace relativamente poco tiempo suponía un incremento importante del coste económico.

La tecnología LiDAR se fundamenta en el cálculo de la distancia entre un emisor y un objeto mediante la emisión de un pulso láser, a intervalos de ángulo especificado. Estos observables, ángulos y distancia, permiten el cálculo de coordenadas de los puntos de incidencia del haz, de modo que permite generar una nube de puntos de alta densidad y gran precisión, consiguiendo un alto nivel de detalle, como el caso fotogramétrico (Baltsavias, 1999; Abellán et al, 2006; Abellán et al, 2009; Brideau et al, 2012). Además se puede asignar color a los puntos gracias a cámaras fotográficas, generalmente solidarias al equipo, y el valor de la intensidad del haz devuelto del láser en cada uno de los puntos, resulta de gran utilidad a la hora de clasificar y detectar elementos en la nube de puntos. Aunque no se debe olvidar que además del material del objeto influirá su color, distancia al objeto y ángulo de incidencia de la señal láser.

Uno de los grandes inconvenientes que presenta el LiDAR aéreo en los levantamientos de taludes o frentes rocosos es la escasez de puntos en la zona de interés por la propia geometría del terreno y la baja resolución que permite obtener este sistema, lo que se verá mejorado con los sistemas aerotransportados en UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*) (<http://www.3dlasermapping.com/riegl-uav-laser-scanners/>).

Por otro lado, el láser escáner terrestre (TLS, *Terrestrial Laser Scanning*) permite obtener mayor densidad de puntos en la zona de interés y ha sido empleado también en la evaluación de deformaciones del terreno (Wujanz et al., 2013; Teza et al., 2007) o en los estudios de desprendimientos rocosos (Abellán et al., 2009; Gigli et al., 2014).

Las técnicas fotogramétricas han experimentado un gran cambio en la última década, a partir del empleo de técnicas y métodos provenientes de la comunidad de visión por computador, como el método SfM (*Structure from Motion*) para la obtención de modelos 3D, basado en la identificación de características en fotogramas individuales que se relacionan entre sí utilizando las características comunes y obteniendo como resultado las coordenadas espaciales. De esta forma hemos pasado de la necesidad de disponer de cámaras fotográficas métricas, con un coste muy elevado, a la posibilidad de emplear cámaras convencionales, de menor tamaño y de coste mucho más reducido, y obteniendo un gran nivel de precisión en los datos finales obtenidos.

Este cambio en el tipo de cámaras ha permitido la utilización de plataformas de vuelo de pequeña envergadura y sistemas no tripulados tipo UAV, accediendo a lugares de difícil acceso y captura, de forma que se eliminan gran parte de las oclusiones (Liu et al., 2011). La calidad del modelo dependerá en gran medida de la proximidad de la cámara al modelo, del número de fotogramas y del sensor empleado en la captura de las imágenes (Thoeni et al., 2014), ya sean estas fotografías o *frames* extraídos de videos.

Existen diversos trabajos que establecen la comparación de resultados obtenidos empleando diferentes técnicas (Lato et al., 2015), diferentes cámaras tomando como referencia el resultado del TLS (Thoeni et al., 2014) o diferentes programas de tratamiento (Gómez-Gutiérrez et al., 2015).

En esta ponencia se analizarán las diferencias entre modelos empleando diferentes tipos de cámaras fotográficas tomando tanto imagen fija como vídeo desde UAV y desde el suelo. Se tomará como modelo de referencia el obtenido por el levantamiento con TLS. Las diferencias que se establecen no son meramente geométricas sino que se analizará el nivel de calidad de los modelos a nivel de completitud.

2. TÉCNICAS EMPLEADAS. METODOLOGÍA DE COMPARACIÓN

Para la evaluación de las técnicas LiDAR y de fotogrametría terrestre y aérea desde UAV se ha realizado el levantamiento de una zona que presenta características similares con los macizos rocosos. En este caso se ha elegido la cantera Sanson de *Santa Creu d'Olorda*, localizada en el oeste del Parque Natural de *Collserola* en el área metropolitana de Barcelona.

La pared de roca elegida tiene una longitud de 200 m y entre 10 y 70 m de altura, presenta varias fisuras y grietas de interés geológico. Está formada principalmente por calizas en las que se apoyan un conjunto de materiales más blandos formados por calizas con margas entrelazadas con pizarras.

En esta cantera se han realizado un total de 5 levantamientos: mediante TLS, mediante videogrametría aérea empleando grabación de vídeo 4K, con fotogrametría aérea, y mediante

fotogrametría terrestre; y por último, se ha obtenido un modelo fotogramétrico conjunto utilizando las imágenes fotográficas aéreas y terrestres.

Para la obtención de los datos LiDAR se ha utilizado un TLS modelo ILRIS-3D de la casa comercial Optech. En el caso fotogramétrico se han empleado tres sensores de captura. Para las tomas fotográficas terrestres la cámara Canon EOS 450D con focal fija de 24 mm y para el caso aéreo las cámaras DJI ZENMUSE X5, modelo FC550, de focal 15 mm y el modelo NEX-5 de 16 mm de focal de SONY.

En todos los casos se emplearon dianas para la posterior georreferenciación y control de calidad de los modelos, variando de uno a otro el número de ellas, su posición y tamaño. Se emplearon dos tipos de dianas con medidas de 20x20 cm y 13x13 cm para su correcta visualización a las diferentes distancias de trabajo. Además, se dieron coordenadas a detalles naturales, como vértices de rocas, extremos de grietas, manchas... perfectamente identificables, con el objetivo de ayudar a la georreferenciación en aquellos casos que fuera necesario, y poder realizar la comparación entre modelos. Disponer de puntos de control resulta de gran utilidad, no solo para la georreferenciación y dotar de escala al modelo, sino también para corregir posibles errores de alineamiento entre las nubes de puntos que conforman el modelo (Thoeni et al., 2014).

El sistema de coordenadas es el oficial, UTM 31N (ETRS89) y cota ortométrica (modelo de geoide EGM08D595), a partir de una red topográfica observada con sistemas GNSS y enlazada al sistema geodésico nacional a través de la red de estaciones permanentes CATNET del ICGC (*Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya*). Una vez construidos los modelos se adoptó el obtenido mediante TLS como referencia para su comparación. Muchos autores hablan de este modelo como *ground truth*, nosotros preferimos hablar de un modelo de referencia ya que tampoco se encuentra carente de errores, procedentes tanto de la medida como del proceso de alineado y georreferenciación.

3. LEVANTAMIENTOS FOTOGRAMÉTRICOS

Con el fin de obtener un modelo 3D detallado de la pared rocosa se realizaron diversos levantamientos fotogramétricos, casos terrestre y aéreo.

El primero de ellos fue un levantamiento terrestre empleando la cámara Canon EOS 450D en modo ráfaga, obteniendo 3 imágenes en modo *Auto Exposure Bracketing* (AEB), con valores +1, 0 y -1, figura 1, (una con los parámetros convencionales, otra sobreexpuesta y otra con baja exposición), lo que permitió obtener imágenes con la técnica HDR, una resolución de 12.2 Mpx, lo que mejora los resultados (Gómez-Gutiérrez et al., 2015), una focal de 24 mm y un campo de visión de 60° (FOV).

Para cubrir la zona se empleó una base media de 5 m, aproximadamente. En cada base

fotográfica se realizaron dos o tres capturas, una horizontal y una o dos contrapicadas para poder abarcar toda la pared. Al igual que en el caso aéreo se planificó un solape longitudinal promedio del 70% y un solape transversal mínimo del 50%, entre las fotografías contrapicadas. De este modo se obtuvieron 107 fotografías con una escala media de 1/1850.



Figura 1. Tres imágenes obtenidas mediante la técnica HDR y la imagen resultante.

En el levantamiento aéreo se emplearon como soporte aéreo de las cámaras dos drones, un dron tipo cuadricóptero DJI modelo D450, y un modelo tipo hexacóptero DJI modelo S900, ambos con controladora, auto-estabilización y control de cámara, con sistema de transmisión de vídeo en directo y control de tierra *Data link*.

Se emplearon dos cámaras para la toma tanto de imágenes fotográficas como de vídeo: la cámara DJI ZENMUSE X5 modelo FC550, con un sensor tipo 4/3 CMOS de 16 Mpx (4608x3456), con focal de 15 mm, y un campo de visión de 72° (FOV), con la posibilidad de efectuar vídeo 4K (4096x2160) con una toma de 23 fps, y se puede utilizar a distancia con una aplicación móvil desde la *tablet*; y la cámara SONY modelo NEX-5 con un sensor tipo CMOS de 14 Mpx (4592x3056), tamaño APS-C (23.5x15.6 mm), con focal de 16 mm, y un campo de visión de 83° (FOV).

Con la cámara FC550 se realizó un vídeo 4K, tomando para la obtención del modelo *frames* cada 2 segundos. Las fotografías efectuadas se realizaron a resolución máxima (4608x3456), con una apertura máxima de 1.7, un ISO 400, a un tiempo de 1/320 s y un valor f/11. En el caso de la cámara NEX 5 de SONY sólo se efectuaron fotografías a resolución máxima (4592x3056), con una apertura máxima de 3, un ISO 200, a un tiempo de 1/250 s y un valor f/11. La distancia media de la toma fotográfica respecto al objeto es de 48 m en el caso fotográfico y de 52 m para el vídeo, por lo que la escala fotográfica está comprendida entre los valores 1/3200 y 1/3500, respectivamente.

En el caso terrestre se emplearon 107 fotografías y 6 puntos de control, resultando finalmente un modelo con una resolución espacial de 1 cm y un error medio de 3.3 cm (3D).

En el caso de empleo de vídeo 4K con la cámara DJI ZENMUSE X5 modelo FC550, se emplearon 186 *frames* y 5 puntos de control, resultando finalmente un modelo con una resolución espacial de 1.2 cm y un error medio de 2.1 cm (3D).

Para la obtención del modelo empleando fotografías tomadas desde UAV se emplearon un total de 669 fotografías y se utilizaron 11 puntos de control. El modelo resultante tiene una resolución espacial de 1.3 cm y un error medio de 3.9 cm (3D).

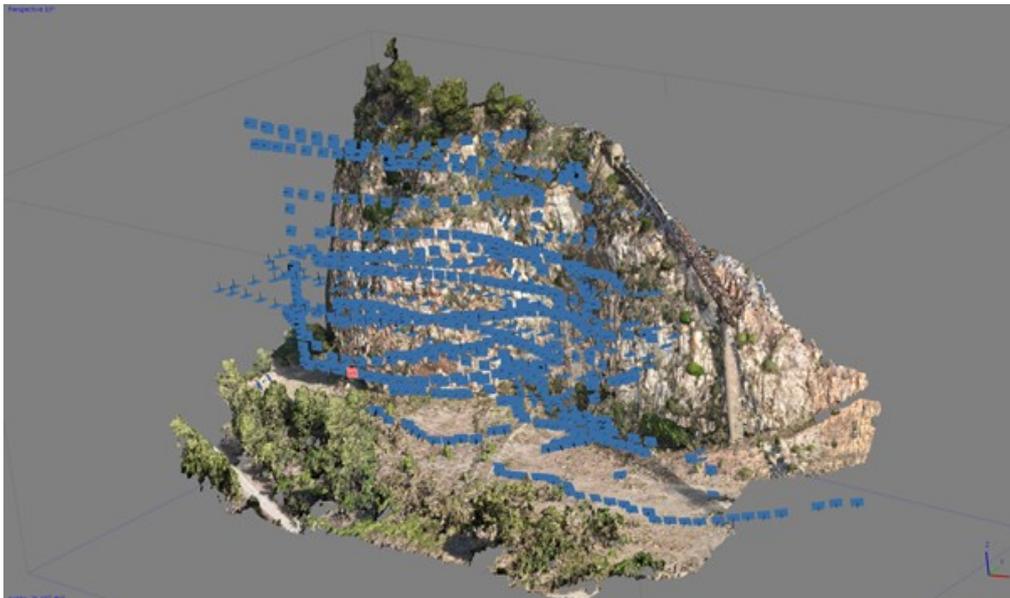


Figura 2. Esquema de la cobertura fotográfica (aérea y terrestre).

Para finalizar, y comprobando que las características de los modelos obtenidos eran similares en las diferentes pruebas efectuadas, se realizó un modelo con todos los fotogramas (aéreo y terrestre), figura 2. En este caso los resultados obtenidos son similares a los obtenidos en el caso fotográfico aéreo, el modelo resultante tiene una resolución espacial de 1.2 cm y un error medio de 3.9 cm (3D), para un total de 776 fotogramas en el ajuste del bloque y

reconstrucción del modelo; consiguiendo además un modelo más completo y homogéneo.

En la realización de los modelos 3D se empleó el software fotogramétrico Agisoft PhotoScan. Este programa utiliza la tecnología fotogramétrica SfM, que ha mejorado la calidad de los datos 3D que pueden extraerse de la utilización de múltiples imágenes incorporando los avances en los programas de aerotriangulación (*softcopy aerotriangulation*) y en los algoritmos de extracción de puntos basados en imágenes.

Las técnicas SfM utilizan los principios básicos de la fotogrametría estereoscópica. La ventaja fundamental es que la geometría del modelo, las posiciones de la cámara y la orientación se calculan de forma simultánea, sin necesidad de especificar a priori las posiciones 3D de puntos de apoyo, mediante un procedimiento de ajuste de haces redundante e iterativo, que se basa en un conjunto de datos invariantes extraídos de múltiples imágenes, en las que aparece fotografiada la misma zona (Snavely et al., 2008, Westoby et al., 2012, Fonstad et al., 2013).

La automatización del proceso desde la identificación de puntos de control hasta la reconstrucción 3D de la geometría de la escena hace que SfM sea más práctico y rentable que las metodologías fotogramétricas tradicionales.

Tabla 1. Información sobre el MDT generado después del proceso fotogramétrico

	Cobertura terrestre	Cobertura aérea fotográfica	Cobertura aérea video 4k	Cobertura terrestre y aérea fotográfica
Nº Imágenes	107	669	186	776
Nº Imágenes usadas	107	669	186	776
GSD imagen (m)	0.010	0.013	0.012	0.012
Puntos de enlace	13124	73093	6780	86217
Proyecciones	88743	665379	58949	744122
Número de puntos del MDT	8.35 M	18.32 M	7.60 M	26.18 M
Modelo de cámara	EOS 450D	FC550/NEX 5	FC550/NEX 5	EOS 450D/ FC550/NEX 5
Focal (mm)	24	15/16	15/16	24/15/16
Error x (m)	0.018	0.015	0.008	0.019
Error y (m)	0.014	0.017	0.017	0.020
Error z (m)	0.024	0.031	0.010	0.027
Error xyz (m)	0.033	0.039	0.021	0.039

El software fotogramétrico de Agisoft es capaz de generar el modelo 3D de superficie y obtener un ortofotomapa en las siguientes etapas:

- 1) orientación de las fotografías (ajuste de haces)
- 2) creación de la nube de puntos densa (MDT)
- 3) creación de la malla
- 4) construcción de las texturas
- 5) creación del ortomosaico

Todos los modelos obtenidos se efectuaron en modo de calidad media para la obtención de la nube de puntos densa. La tabla 1 recoge un resumen de los datos empleados y los resultados obtenidos para los modelos creados por fotogrametría.

4. LEVANTAMIENTO CON LÁSER ESCÁNER TERRESTRE

El levantamiento 3D de la pared rocosa se llevó a cabo con TLS modelo ILRIS-3D (Optech) considerado de largo alcance que consta de un transmisor y un receptor láser y un dispositivo de escaneo. La señal del láser se refleja directamente sobre la superficie escaneada sin la necesidad de un elemento reflector, devolviendo diferentes pulsos debido a la existencia de objetos intermedios como vegetación o cables. La tecnología utilizada en la medición de la distancia se basa en el tiempo de vuelo o *Time-of-Flight* (ToF) que calcula la distancia a partir del tiempo que tarda el pulso láser en rebotar en el objeto y volver.

Según las especificaciones técnicas del fabricante, el instrumento tiene un alcance máximo de 700 metros, esta distancia puede disminuir en función de la reflectividad del material y el ángulo de incidencia del objeto. Las nubes de puntos adquiridas tienen una precisión de 7 mm a una distancia de 100 metros. El dispositivo puede adquirir un gran número de puntos en muy poco tiempo, 2500 puntos por segundo.

Para la total definición en 3D de la pared rocosa fueron necesarios 6 escaneos, cada uno tenía una resolución espacial de 30 mm a una distancia de 60 metros.

Una vez adquiridas las nubes de puntos y antes de alinearlas se realizó, manualmente, la limpieza de las mismas que consistió en la eliminación de puntos correspondientes a vegetación y puntos situados fuera de la zona de interés.

Posteriormente, se efectuó la alineación de las nubes de puntos. Este proceso consistió en dos pasos: a) identificación de puntos homólogos entre los diferentes escaneos, y b) la minimización de la distancia entre las nubes de puntos con el algoritmo *Iterative Closest Point* (ICP) desarrollado por Chen y Medioni (1991) y evaluado en diferentes trabajos (por ejemplo: Besl y McKay, 1992; Kromer et al., 2015; Tsakiri y Anagnostopoulos, 2015).

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para el análisis de los resultados se han elegido tres zonas de muestreo representativas de las diferentes características que se pueden encontrar en la pared objeto de análisis. Una zona A de 15 m² correspondiente a un área donde se puede encontrar vegetación en roca y una densidad media de grietas, una zona B de 20 m² sin vegetación, en la que el número de fisuras es más elevado, y una zona C de 30 m² sin vegetación y con pocas fisuras, pero de mayor envergadura, figura 3.

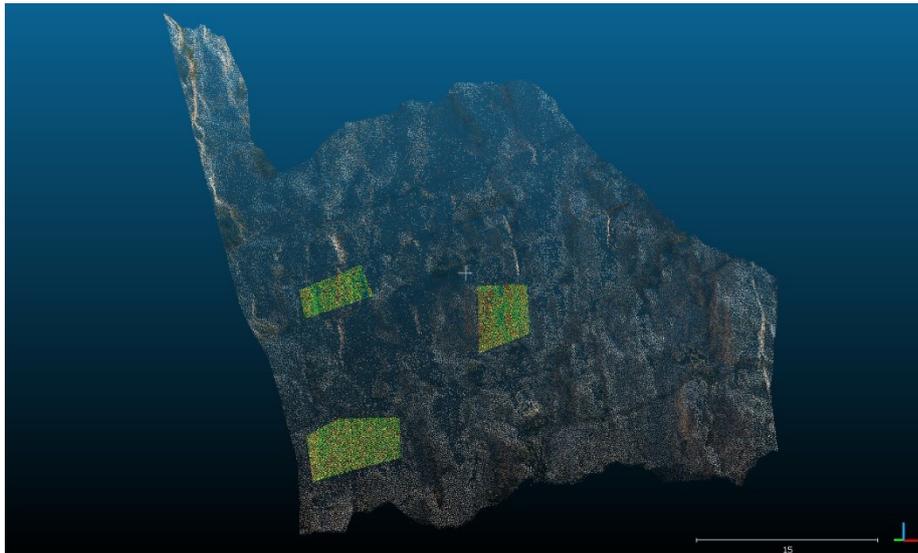


Figura 3. Zonas de muestreo para el análisis de modelos, de izquierda a derecha y de arriba a abajo: zona A, B y C.

Como se ha comentado anteriormente se ha seleccionado el modelo obtenido por TLS como referencia sobre el que comparar el resto de modelos obtenidos por fotogrametría. En todos los casos se ha eliminado los valores atípicos o *outliers* antes de proceder a la comparación quedando entre un 87% y un 99.8% de los puntos obtenidos en los modelos.

En la zona A la discrepancia entre el modelo tomado como referencia y los obtenidos por fotogrametría aérea y video 4K presentan una curva normal, siendo la media para el primer caso de 1 cm y de 3.8 cm en el segundo. Para los otros dos casos, fotogrametría terrestre y combinación de aérea y terrestre la curva presenta un sesgo estando la media en 2.3 cm y 1.3 cm, respectivamente. Los valores máximos en todos los casos se encuentran en torno a los 10 cm pero se presentan en muy baja frecuencia. La desviación típica está próxima a los 4 cm para los modelos aéreo y video, mientras que para la combinación aéreo-terrestre se reduce a 3.3 cm, figura 4.

En la zona B todos los modelos presentan un evidente sesgo, siendo menor para los modelos de fotogrametría terrestre y la combinación terrestre-aéreo ya que el punto de vista de la

captura es compartido con la captura mediante TLS. En estos casos la media está próxima a los 2 cm, y la desviación típica es de 3.4 cm en el caso terrestre reduciéndose a 2.8 cm en el modelo combinado. El modelo obtenido por fotogrametría aérea presenta unas discrepancias con una media de 2.6 cm y una desviación típica de 4.8 cm. Se localizan valores máximos con mayor frecuencia, concentrados en las zonas donde existen fisuras y huecos. Para esta zona las discrepancias con un mayor sesgo se producen en la comparación entre el modelo TLS y el de video 4K, con una media 3.6 cm y desviación típica de 4.2 cm. Sin embargo los valores máximos se mantienen como en la zona A en torno a los 10 cm aunque en este caso se presentan en una mayor frecuencia para un valor positivo, figura 4.

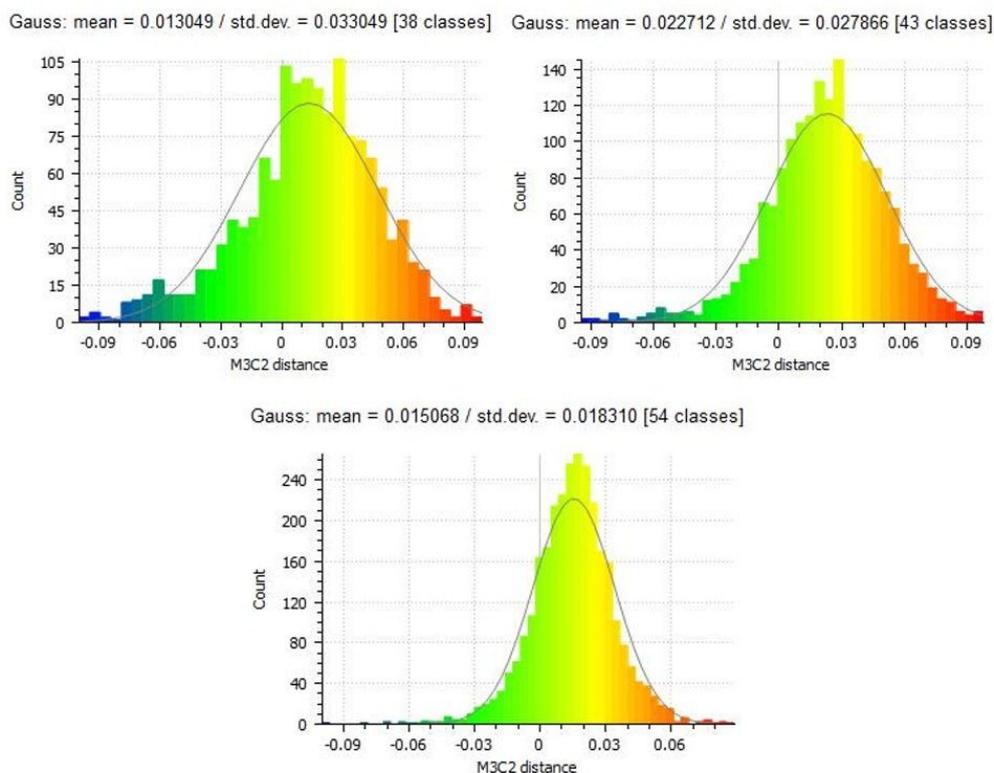


Figura 4. Arriba izquierda histograma de la diferencia del modelo TLS y modelo conjunto terrestre-aéreo para la zona A. Arriba derecha histograma del modelo TLS y modelo conjunto terrestre-aéreo para la zona B. Abajo histograma del modelo TLS y modelo conjunto terrestre-aéreo para la zona C.

En la zona C la discrepancia entre el modelo tomado como referencia y los obtenidos por fotogrametría aérea y video 4K presentan una curva normal, siendo la media para el primer caso de 2.5 cm y de 2.2 cm en el segundo. Para los otros dos casos, fotogrametría terrestre y combinación de aérea y terrestre la curva presenta un sesgo estando la media en 1.0 cm y 1.5 cm, respectivamente. Los valores máximos en todos los casos se encuentran en torno a los 10 cm pero se presentan en muy baja frecuencia. La desviación típica está entre los 3 y 4 cm para los modelos de video y aéreo, mientras que para el caso terrestre y la combinación aéreo-terrestre se reduce a 1.9 y 1.8 cm respectivamente, figura 4.

6. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La elección de las técnicas geomáticas que se pueden aplicar en los levantamientos de zonas donde existe un riesgo por desprendimiento y caída de rocas está condicionada entre otros aspectos por la calidad de los datos y el coste del trabajo, pero también por las características geométricas de la zona que condiciona la toma de datos.

Siempre que las condiciones de toma de datos sean las adecuadas para que la geometría de captura sea óptima, sin toma muy oblicua, cualquiera de las técnicas descritas podría emplearse con resultados similares, en cuanto a densidad de puntos y calidad de la nube obtenida.

En cuanto al instrumental necesario para los distintos levantamientos, todavía es necesaria una inversión económica mucho mayor en el caso del TLS frente a la fotogrametría, del orden de 5 veces para distancias cortas y medias.

En el ejemplo mostrado en este trabajo, los resultados en las diferencias de los modelos en las distintas zonas respecto al modelo TLS, tomado como referencia éste, son similares en todos los casos. Se debe considerar que el sesgo que se presenta en algunos de ellos es coherente con el error en la georreferenciación de las nubes, siendo coherente también con las precisiones de los modelos independientes.

El caso ideal sería la combinación de captura desde suelo, utilizando sensor TLS o fotogrametría digital, y desde UAV.

Se puede afirmar que la diferencia entre los modelos obtenidos resalta algunas características de la pared, como por ejemplo las fisuras y huecos existentes. Por lo que disponer de dos técnicas permitiría la segmentación de las nubes de puntos obtenidas con mayor facilidad.

AGRADECIMIENTOS

Nuestro agradecimiento al *Parc de Collserola* y al piloto del UAV Sr. Roger Ruíz Carulla. Este trabajo ha sido desarrollado dentro del Proyecto *RockRisk* (2014-2016) <http://rockrisk.upc.edu/es>, financiado por el Ministerio Español de Economía y Competitividad, y titulado "Desprendimientos en escarpes rocosos: Cuantificación del riesgo y su prevención" (BIA2013-42582-P).

REFERENCIAS

Abellán, A., Vilaplana, J.M., Martínez, J., 2006. Application of a long-range Terrestrial Laser Scanner to a detailed rockfall study at Vall de Núria (Eastern Pyrenees, Spain). *Engineering Geology*, 88:

136-148.

- Abellán, A., Jaboyedoff, M., Oppikofer, T., Vilaplana, J.M., 2009. Detection of millimetric deformation using a terrestrial laser scanner: experiment and application to a rockfall event. *Nat. Earth Syst. Sci.*, 9: 365-372.
- Baltsavias, E.P., 1999. A comparison between photogrammetry and laser scanning. *ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing*, 54: 83-94.
- Besl, P., McKay, N. 1992. A Method for Registration of 3-D Shapes. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. doi:10.1109/34.121791
- Brideau, M., Sturzenegger, M., Stead, D., Jaboyedoff, M., Lawrence, M., Roberts, N., Ward, B., Millard, T., Clague, J. 2012. Stability analysis of the 2007 Chehalis lake landslide based on long-range terrestrial photogrammetry and airborne LiDAR data. *Landslides*, 9:75-91.
- Chen, Y., Medioni, G. 1991. Object Modeling by Registration of Multiple Range Images. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation* (pp. 2724–2729). Sacramento, California.
- 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 (4): 421-430.
- Gigli, G., Morelli, S., Fornera, S., Casagli, N., 2014. Terrestrial laser scanner and geomechanical surveys for the rapid evaluation of rockfall susceptibility scenarios. *Landslides* (2014) 1:1–14.
- Gómez-Gutiérrez, A., Sanjosé-Blasco, J.J., Lozano-Parra, J., Berenguer-Sempere, F., Matías-Bejarano, J., 2015. Does HDR Pre-Processing Improve the Accuracy of 3D Models Obtained by Means of two Conventional SfM-MVS Software Packages? The case of the corral del Veleta Rock Glacier. *Remote Sens.*, 7: 10269-10294.
- Kromer, R. A., Abellán, A., Hutchinson, D. J., Lato, M., Edwards, T., Jaboyedoff, M. 2015. A 4D filtering and calibration technique for small-scale point cloud change detection with a terrestrial laser scanner. *Remote Sensing*, 7(10), 13029–13058.
- Lato, M., Hutchinson, D.J., Gauthier, D., Edwards, T., Ondercin, M., 2015. Comparison of airborne laser scanning, terrestrial laser scanning, and terrestrial photogrammetry for mapping differential slope change in mountainous terrain. *Can. Geotech. J.*, 52: 129–140.
- Liu, C., Li, W., Lei, W., Liu, L., Wu, H., 2011. Architecture Planning and Geo-Disasters Assessment Mapping of Landslide by Using Airborne LiDAR data and UAV images. In: T Q. Tong, X.Gu, B. Snavely, N., Seitz, S.M., Szeliski, R., 2008. Modeling the World from Internet Photo Collections. *International Journal of Computer Vision*, 80 (2): 189-210.
- Teza, G., Galgaro, A., Zaltron, N. and Genevois, R., 2007. Terrestrial laser scanner to detect landslide displacement fields: a new approach. *International Journal of Remote Sensing*, 28: 3425–3446.
- Thoeni, K., Giacomini, A., Murtagh, R., Kniest, E., 2014. A comparison of multi-view 3d reconstruction of a rock wall using several cameras and a laser scanner. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XL-5. *ISPRS Technical Commission V Symposium*, Riva del Garda, Italy, pp. 573-580.
- Tsakiri, M., Anagnostopoulos, V. 2015. Change Detection in Terrestrial Laser Scanner Data Via Point Cloud Correspondence. *International Journal of Engineering Innovation & Research*, 4(3), 2277–5668.
- 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.
- Wujan, D., Krueger, D. and Neitzel, F., 2013. DefoScan: surface based registration of terrestrial laser scans for deformation monitoring. In: *Proceedings of the joint international symposia on deformation monitoring*, Nottingham, UK, 9–10 September.