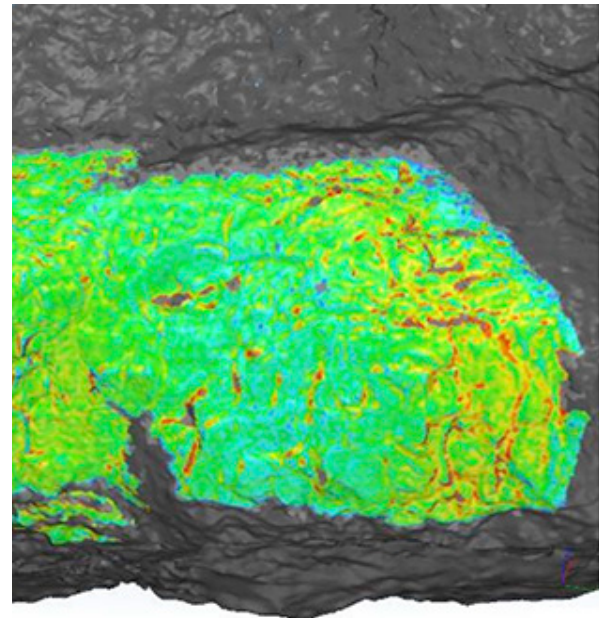


## Modelado fotorrealístico 3D a partir de procesos fotogramétricos: láser escáner versus imagen digital

*Photorealistic 3D modelling by photogrammetry: laser scanning versus digital image*

José Luis Lerma<sup>1</sup>, Miriam Cabrelles<sup>1</sup>, Santiago Navarro<sup>1</sup> y Ana Elena Seguí<sup>1</sup>

1 · Grupo de Investigación en Fotogrametría y Láser Escáner (GIFLE). Correo-e: gifle@upv.es Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría. Universidad Politécnica de Valencia. C<sup>o</sup> de Vera, s/n. Edificio 7i. 46022 Valencia



### RESUMEN

La documentación del patrimonio en dos y tres dimensiones es una labor que, desde hace tiempo, ha venido realizándose satisfactoriamente mediante soluciones fotogramétricas. A día de hoy, las nuevas tecnologías abren la puerta a estudios y análisis métricos más completos y exhaustivos en 3D. En el presente artículo se analizan las técnicas fotogramétricas más precisas y rigurosas que actualmente se utilizan en labores de documentación del patrimonio, capaces de producir réplicas exactas de abrigo arqueológicos a partir de imágenes e instrumentación láser. Este artículo presenta la experimentación realizada en el abrigo X del Cingle de la Mola Remigia, Ares del Maestre (Castellón), ejemplo de arte rupestre del arco mediterráneo en la Península Ibérica. Los resultados permiten confirmar que los modelos 3D obtenidos a partir de láser escáner terrestre y mediante múltiples imágenes son comparables en calidad y precisión, si bien la integración óptima de ambos permite alcanzar modelos fotorrealísticos 3D de máxima calidad.

### ABSTRACT

The documentation of cultural heritage in two and three dimensions is an intensive task that has long been carried out successfully by means of photogrammetric solutions. At present, the new technologies allow users more comprehensive and exhaustive metric studies and analysis fully in 3D. This paper reviews the most precise and rigorous photogrammetric techniques used nowadays to document cultural heritage. These techniques can be used to build up accurate replicas of archaeological shelters by imagery and range-based devices. The rock art Cingle de la Mola Remigia shelter number X placed in Ares del Maestre (Castellón) is selected herein as a case study. The results allow us to confirm that the 3D models obtained either from terrestrial laser scanning or from multiple images are comparable in quality and precision. However, the optimum integration of both sources of information let us achieve maximum quality photorealistic 3D models.

### INFORMACIÓN · INFORMATION

#### Palabras clave

Arte rupestre, fotogrametría, escaneado láser terrestre, modelado fotorrealístico 3D

*Recibido* · mayo 2010

*Aceptado* · noviembre 2010

*Revisado* · julio 2013

#### Keywords

Rock art, documentation, photogrammetry, terrestrial laser scanning, photorealistic 3D modelling

*Received* · May 2010

*Accepted* · November 2010

*Revised* · July 2013

## 1. INTRODUCCIÓN

Los modelos 3D permiten analizar espacialmente la morfología de los abrigos en su conjunto, tanto a escala grande como a escala macro. Además, potencian el análisis de relaciones entre las figuras o motivos que se encuentran sobre un soporte claramente discontinuo, expuesto a diferentes procesos de meteorización y deterioro, y desde puntos de vista diferentes a los tradicionales como son las vistas ortogonales al panel.

Los modelos 3D en sí mismos deben ser muy ricos para que puedan asociarse analogías entre la imagen proporcionada por la cámara digital y el modelo 3D, sobre todo cuando nos referimos a niveles de detalle de resolución elevada. Modelos 3D simplificados, de baja resolución, pueden servir como documento de estudio y análisis a escalas más pequeñas, de conjunto, pero no las partes amplificadas del mismo, es decir, paneles a alta resolución.

Sin embargo, el contenido de color y textura que proporciona una imagen fotográfica (analógica o digital) como documento gráfico es difícilmente superable, es sencillo de interpretar, y, sobre todo, barato de realizar, de almacenar y de gestionar.

La fotografía se viene utilizando desde hace muchos años en trabajos de conservación, restauración y difusión del patrimonio cultural. Las imágenes fotográficas registran el estado de conservación de los objetos en el momento en que se realiza la toma. Inicialmente las tomas se hacían en formato analógico; en la actualidad, se apuesta claramente por la fotografía digital, y toda información existente puede aprovecharse en aras de reproducir métricamente la información contenida mediante procedimientos fotogramétricos a partir de una imagen, pares estereoscópicos o preferiblemente múltiples imágenes (Lerma, 2010). Además, desde principios del siglo XXI, el procedimiento fotogramétrico se enriquece mediante el uso de los escáneres láser, sobre todo en tareas de documentación de monumentos, sitios u objetos complejos, independientemente de su dimensión.

El presente documento examina las técnicas fotogramétricas más rigurosas optimizadas para modelizar el patrimonio en 3D, presentando los resultados obtenidos mediante distintos procedimientos fotogramétricos realizados a partir de:

1. Imágenes digitales capturadas con cámara réflex de alta resolución y procedimientos de correspondencia.
2. Escáner láser terrestre panorámico de tiempo de vuelo.
3. Combinación de modelos 3D e imagen digital (soluciones 1 y 2).

La primera alternativa requiere de un sensor pasivo, la cámara digital, que permite al usuario capturar imágenes con recubrimiento estereoscópico. Las imágenes obtenidas podrían ser utilizadas no solo en estudios científicos tradicionales sino también en labores automatizadas de digitalización 3D. Asimismo, haría falta considerar instrumental topográfico auxiliar que permitiera fijar puntos de apoyo

topográficos. El coste de la instrumentación de partida es modesto. Los programas informáticos requieren personal especializado, existiendo desde versiones económicas que exigen gran intervención manual, hasta soluciones más costosas que permiten flujos de trabajo automatizados. La ventaja principal de esta alternativa es su versatilidad, ya que permite trabajar con imágenes fotográficas de cualquier tipo, y ajustar las capturas a la escala marcada por la finalidad de la misión.

La segunda alternativa requiere de un sensor activo, el escáner láser, que captura grandes volúmenes de información en muy poco tiempo como son las nubes de puntos 3D con valores de intensidad reflejada, e incluso a color, si los equipos incorporan cámaras. La instrumentación láser sería a priori la recomendada a día de hoy para capturar nubes de puntos de escenas con formas complejas, de gran extensión o en aquellas en las que las condiciones de iluminación son mínimas o reducidas. También habría que considerar la inclusión de instrumental topográfico auxiliar para georreferenciar el trabajo, sobre todo en aquellos modelos de escáner que no integran instrumentación GNSS. Esta alternativa requiere una gran inversión económica inicial, programas de tratamiento 3D específicos y formación especializada. Las posibilidades de explotación del instrumental láser son ilimitadas en sectores tan variados como la minería, la geomorfología, la obra civil, el patrimonio cultural, la industria, etc. Además, los equipos de láser escáner podrían utilizarse para documentar de manera masiva los miles de yacimientos existentes en la actualidad, de manera exhaustiva y en 3D, constituyendo bases de datos arqueológicas normalizadas con información múltiple asociada. En cualquier caso, ambas alternativas, llegados al punto de haber alcanzado nubes de puntos registradas, requieren de soluciones informáticas equivalentes.

La tercera alternativa pasa por conseguir lo mejor de ambos procedimientos. Esta alternativa parece ser la más adecuada a la hora de afrontar trabajos de documentación de arte rupestre, existiendo al menos dos variantes claramente diferenciadas:

1. Integración de las imágenes de alta resolución a color sobre los modelos 3D obtenidos a partir del láser escáner (Lerma et al, 2010).
2. Alternativa fotogramétrica a partir de imágenes y alternativa láser trabajando de manera integrada, potenciando el concepto de multiresolución y multiescala (Petti et al, 2008).

La decisión final en cuanto a la mejor alternativa de documentación depende de los siguientes factores: la complejidad y del tamaño del objeto, monumento o sitio (Barber 2007), el coste, el plazo de entrega y el tipo de producto final (Patias 2006).

## 2. FOTOGRAMETRÍA

El uso masivo de la fotogrametría digital en labores de documentación patrimonial vino asociado a la capacidad de generar de manera sencilla productos digitales recti-

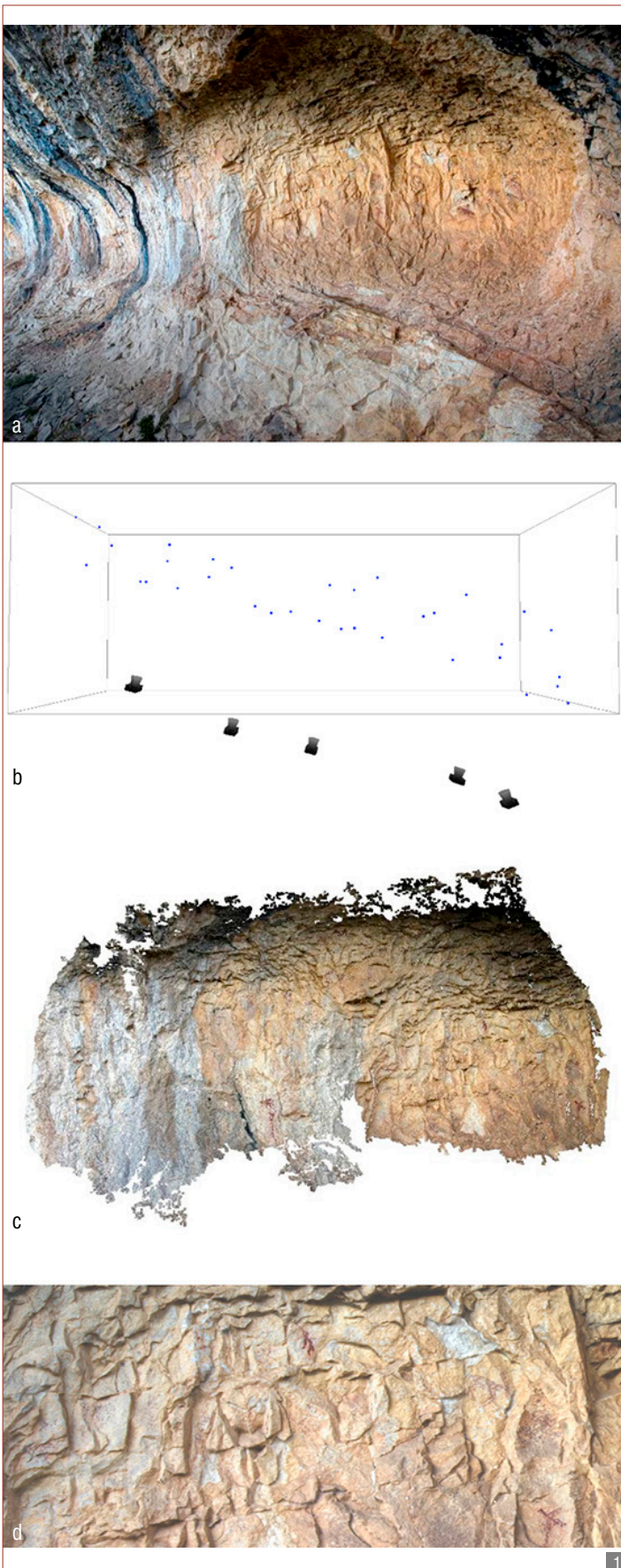


Figura 1 · Abrigo X del Cingle de la Mola Remigia, Ares del Maestre (Castellón): a) Imagen del Abrigo X; b) Distribución de 5 imágenes orientadas del Abrigo; c) Vista en perspectiva de la nube de puntos a color obtenida a partir de un par de imágenes; d) Detalle del modelo fotorrealístico 3D. Copyright: GIFLE.

ficados (con programas de edición gráfica convencionales) u ortorrectificados (con programas fotogramétricos convencionales); el primero para el caso de escenarios en el que aparecían objetos planos, y el segundo cuando nos encontrábamos con superficies con relieve o topografía.

Las desventajas de la fotogrametría tradicional (analógica) desaparecieron, según el profesor Patias (2006), a raíz de:

- El uso masivo de instrumental digital.
- El uso de cámaras digitales convencionales de menor coste y mayor resolución.
- La aparición de programas de fácil manejo y bajo coste durante la última década.
- La consideración de constreñimientos geométricos que relajan las necesidades y requerimiento de apoyo topográfico.

La fotogrametría a partir de múltiples imágenes es sin lugar a duda la solución fotogramétrica más precisa, potente y robusta. Se basa en el ajuste en bloque de múltiples imágenes, y puede adaptarse a cualquier tipo de cámara (métrica, semi-métrica y convencional), indistintamente del formato. No existen restricciones en cuanto a la geometría del objeto, monumento o sitio. Además, si la cámara no está calibrada, la calibración de la misma puede realizarse simultáneamente al proceso de orientación externa de las imágenes (Lerma 2002).

Adicionalmente existe la posibilidad de generar modelos digitales de superficie, una vez orientadas espacialmente las imágenes, aplicando técnicas automáticas de detección de entidades homólogas (Cabrelles et al, 2010). Tras un proceso de filtrado, es posible generar un modelo digital adaptado a la nube de puntos obtenida mediante técnicas de correspondencia, así como texturizar a alta resolución el modelo a partir del contenido de información de color existente en las imágenes originales. De esta manera se obtienen modelos fotorrealísticos 3D de máxima calidad. La descripción del procedimiento fotogramétrico seguido se encuentra publicado en (Lerma et al. 2010). Un ejemplo de aplicación de esta metodología aparece reflejado en la Fig. 1. Para la toma fotogramétrica se utilizó la cámara digital calibrada Canon EOS-1Ds Mark III con el objetivo Sigma 15-30 mm en su posición más angular, es decir, 15 mm. El programa fotogramétrico utilizado fue FotoGIFLE, programa éste desarrollado e implementado íntegramente por los miembros del Grupo de Investigación en Fotogrametría y Láser Escáner (GIFLE) de la Universidad Politécnica de Valencia.

### 3. ESCÁNER LÁSER TERRESTRE

A principios del siglo XXI el escaneado láser 3D revolucionó la captura automatizada de grandes nubes de puntos, permitiendo su adquisición de manera sistemática, a altas frecuencias (inicialmente cientos o miles de puntos por segundo), en tiempo casi real y junto con valores de intensidad o color asociados (Böhler 2006).

Los escáneres láser son sensores activos, y pueden operar en entornos diversos que oscilan entre los pocos metros hasta los kilómetros utilizando los principios de medición basados en el tiempo (Lerma et al. 2008), bien sea mediante pulsos (tiempo de vuelo) o mediante diferencia de fase. Los escáneres basados en el principio de triangulación están concebidos para operar a distancias mucho menores, la mayoría a distancias inferiores

al metro, con resoluciones y precisiones máximas. Una revisión exhaustiva de estos últimos puede consultarse en Blais (2004).

A día de hoy, existe una gran cantidad de escáneres láser terrestres en el mercado. Las dimensiones y el peso de los equipos comienzan a reducirse sustancialmente; el coste de los equipos va paulatinamente descendiendo, si bien es verdad que todavía continúan siendo elevados. No obstante, la rentabilidad de un equipo depende del uso. En segmentos como mediciones industriales, tuberías, túneles, canteras, etc., su rentabilidad está más que garantizada, sobre todo si se desea extraer máxima información 3D en intervalos reducidos de tiempo.

La aplicación del escáner láser terrestre de media distancia se utiliza cada día más en labores de documentación patrimonial. Su uso está justificado en proyectos de levantamiento fotogramétrico en donde las dimensiones son grandes y sobre todo con geometría compleja. La Fig. 2 muestra el resultado obtenido para el mismo caso de estudio de la Fig. 1, utilizando el láser escáner terrestre de media distancia. En concreto se utilizó el escáner láser *LEICA ScanStation 2* con alcance máximo de 350 m, campo angular de 360° (horizontal) y 270° (vertical), y cámara integrada. La precisión nominal del instrumental en la medida de un punto es  $\pm 6$  mm.

En la Fig. 3 se muestra la diferencia de la alternativa basada en imágenes frente a la alternativa basada en el barrido láser, una vez filtrados y registrados los datos de entrada. En el caso que nos ocupa, observamos que en un 92.6%, las discrepancias son menores de 5 mm. Además, se comprueba que no existen errores sistemáticos aparentes entre ambas soluciones. Por tanto, en este caso los resultados finales de la alternativa láser frente a los de la alternativa multi-imagen pueden considerarse equivalentes.

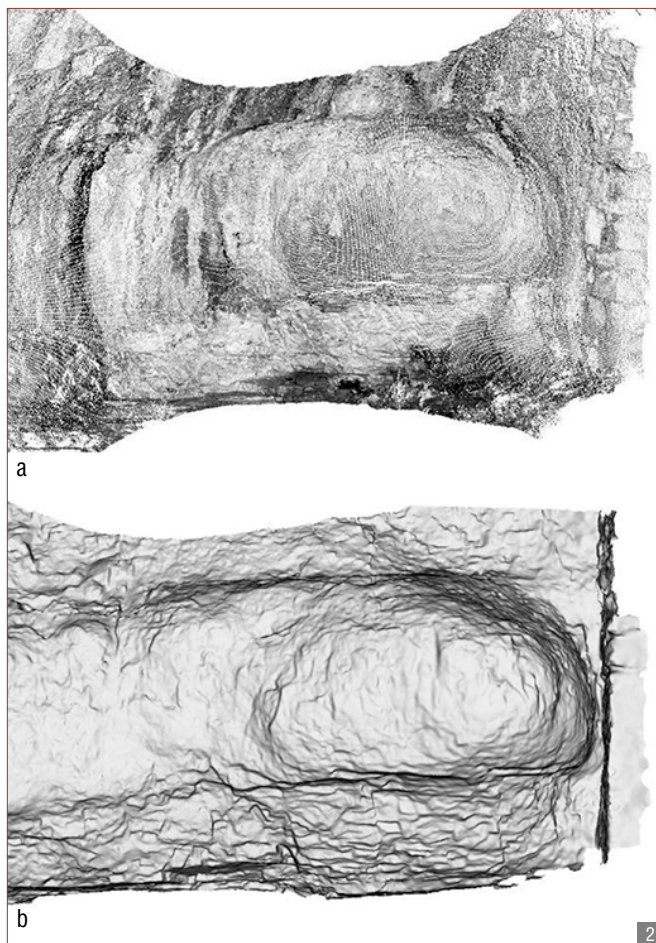
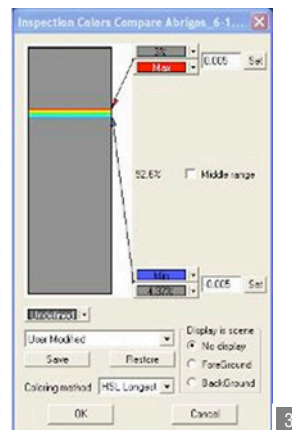
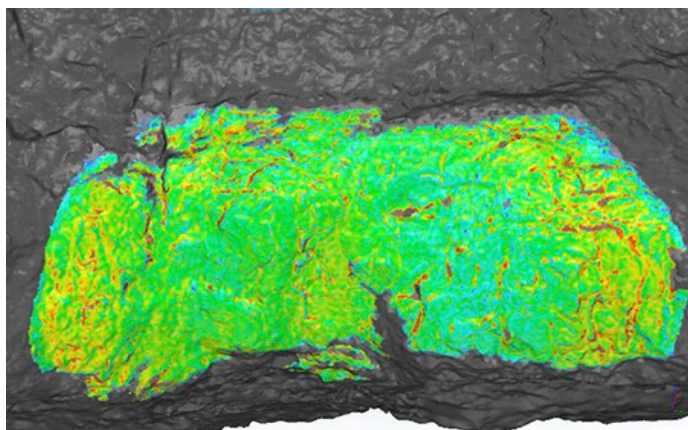


Figura 2 · Abrigo X del Cingle de la Mola Remigia: a) Vista en perspectiva de la nube de puntos con intensidad del láser; b) Vista en perspectiva del modelo 3D. Copyright: GIFLE.

Figura 3 · Diferencia entre modelos provenientes de escaneado láser y de fotogrametría multi-imagen, Abrigo X del Cingle de la Mola Remigia. Copyright: GIFLE.



#### 4. TEXTURIZADO DE MODELOS 3D

La demanda de modelos 3D es cada vez mayor en el ámbito de la documentación del patrimonio cultural debido a que permiten el análisis de formas y dimensiones, y la reconstrucción y monitorización de escenarios u objetos complejos a través del tiempo. Sin embargo, los modelos 3D pueden enriquecerse mucho más si el texturizado de los mismos se realiza de manera rigurosa, analizando la mejor proyección de textura, eliminando sombras y ajustando radiométricamente las imágenes empleadas. La solución fotogramétrica en estos casos es una garantía frente a alternativas de estiramiento de imágenes sobre los modelos. Puede comprobarse la diferencia de texturizado entre ambas alternativas, aproximada y rigurosa, en Biosca et al (2007).

La figura 4 muestra el resultado de texturizar tanto el modelo obtenido mediante técnicas de correspondencia de imagen como el modelo láser, a partir de fotografías de alta resolución.

A día de hoy, uno de los procedimientos más recomendables para obtener modelos fotorrealísticos 3D es la integración del láser escáner terrestre con múltiples imágenes (Lerma et al. 2010). En dicho artículo se presenta y aprovecha el potencial del escáner láser para derivar modelos y la fotogrametría multi-imagen para texturizar sobre éstos.

#### 5. CONCLUSIONES

En este artículo se han presentado las últimas tecnologías en levantamientos fotogramétricos tridimensionales. Para el caso del abrigo X del Cingle de la Mola Remigia se ha demostrado que es posible obtener modelos 3D fotorrealísticos igual de precisos a partir del procesos fotogramétricos con múltiples imágenes o a partir de escáner láser terrestre, si bien la mejor solución es la que garantiza un texturizado 3D riguroso mediante la combinación del láser escáner y soluciones multi-imagen.

Las características del trabajo definirán qué alternativa fotogramétrica utilizar: sólo escaneado láser; sólo múltiples imágenes en combinación con instrumental topográfico; sólo múltiples imágenes con algún estreñimiento adicional (por ejemplo de distancia); o soluciones mixtas que permitan abordar procedimientos de multi-resolución y multi-escala en trabajos de gran extensión si las escalas de visualización y análisis son muy diferenciadas. Gracias a que cada proyecto o misión es diferente, la tecnología apuntada en este artículo está lista para ser integrada (junto con otras alternativas topográficas, por ejemplo GNSS) en SIGs arqueológicos, sistemas CAD o aplicaciones Web.



Figura 4 · Abrigo X del Cingle de la Mola Remigia: a) Detalle del modelo obtenido mediante técnicas de correspondencia con textura fotorrealística; b) Vista en perspectiva del modelo láser 3D con textura fotorrealística. Copyright: GIFLE.

## 6. AGRADECIMIENTOS

Los resultados presentados en este artículo se enmarcan dentro del proyecto de investigación de excelencia Prome-teo/2008/165 de la Generalitat Valenciana y en el proyecto de investigación HAR2010-18620 del Ministerio de Ciencia y Tecnología.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- BIOUCA TARONGER, J. M.; NAVARRO TARÍN, S. Y LERMA GARCÍA, J. L. (2007). Modelado tridimensional de una bóveda barroca mediante la combinación de láser escáner y fotogrametría. *7ª Setmana Geomàtica, Barcelona, Spain. 11 de noviembre de 2010*. <http://jllerma.webs.upv.es/pap021.pdf>.
- BLAIS, F. (2004). Review of 20 Years of Range Sensor Development. *Journal of Electronic Imaging*, 13(1): 231-240.
- BÖHLER, W. (2006). Comparison of 3D laser scanning and other 3D measurement techniques. En Baltasvias, E., Gruen, A., Van Gool, L., Pateraki, M. (Eds.) *Recording, Modeling and Visualization of Cultural Heritage*. Taylor & Francis Group, Londres, pp. 89-99.
- CABRELLES, M., SEGUÍ, A. E., NAVARRO, S., GALCERÁ, S., PORTALÉS, C. Y LERMA, J. L. (2010). 3D Photorealistic Modelling of Stone Monuments by Dense Image Matching. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 38(5): 121-124.
- BARBER, D. (ED.) (2007). *3D Laser Scanning for Heritage. Advice and guidance to users on laser scanning in archaeology and architecture*. English Heritage, Swindon.
- LERMA GARCÍA, J. L. (2002). Fotogrametría moderna: analítica y Digital, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia.
- (2010). Heritage Recording Using Image-Based Techniques. En Ioannides, M., Alonzo, A., Georgopoulos, A., Kalisperis, L., Brown, A. y Pitzalis, D. (eds.), *Heritage in the Digital Era*, Multi-Science Publishing.
- LERMA, J.L., VAN GENECHTEN, B., HEINE, E. Y SANTANA, M. (2008). *Teoría y práctica del Escaneado Láser Terrestre. Material de aprendizaje basado en aplicaciones prácticas*. Proyecto Leonardo da Vinci 3DRiskMapping.
- LERMA, J. L.; NAVARRO, S.; CABRELLES, M. Y VILLAVARDE, V. (2010). Terrestrial laser scanning and close range photogrammetry for 3D archaeological documentation: the Upper Palaeolithic Cave of Parpalló as a case study. *Journal of Archaeological Science*, 37: 499-507.
- PATIAS, P. (2006): Cultural Heritage Documentation, *International Summer School Digital Recording and 3D Modeling, Aghios Nikolaos, Creta, Grecia, Abril 24-29*, pp. 1-26.
- PETTI, F.M.; AVANZINI, M.; BELVEDERE, M.; DE GASPERI, M.; FERRETTI, P.; GIRARDI, S.; REMONDINO, F. Y TOMASONI, R. (2008). Digital 3D modelling of dinosaur footprints by photogrammetry and laser scanning techniques: integrated approach at the Coste dell'Anglone tracksite (Lower Jurassic, Southern Alps, Northern Italy). *Acta Geologica*, 83: 303-315.