



## LA FOTOGRAMETRÍA DIGITAL AUTOMATIZADA FRENTE A LOS SISTEMAS BASADOS EN SENSORES 3D ACTIVOS

### DIGITAL PHOTOGRAMMETRY VERSUS THE SYSTEMS BASED ON ACTIVE 3D SENSORS

*Pablo Rodríguez Navarro*

La Fotogrametría Digital está sufriendo una nueva puesta en valor basándose en métodos automatizados que evitan el laborioso proceso de producción, y que cumplen con los objetivos demandados de calidad fotorrealística. Pero, ¿hasta qué punto se asemejan sus aplicaciones a los métodos basados en la utilización de escáneres láser?, ¿qué nuevas fortalezas presenta?, ¿cuáles son sus debilidades?

A estas y otras preguntas tratará de responder el artículo que se desarrolla a continuación, y que ha basado su planteamiento en el análisis del *proceso y desviación del resultado* de dos modelos obtenidos con Fotogrametría Digital Automatizada enfrentando a uno de ellos al obtenido mediante el escáner por triangulación y al otro al obtenido por el escáner por medición de la distancia. Se mostrarán las conclusiones del análisis comparativo, insistiendo en temas como la economía de tiempos y costes, la dificultad tanto en la fase de toma de datos como en la de postproducción, la precisión y la calidad del resultado, así como su idoneidad de aplicación.

**Palabras clave:** Fotogrametría; escáner; 3D

*The value of digital photogrammetry is being reassessed based on the use of automated methods which avoid the laborious production process and that meet the quality requirements photorealism demands. However, to what degree do its applications resemble the methods based on laser scanners? What are its strengths? What are its weaknesses?*

*This article will attempt to answer these and other questions. Its approach is based on the comparison of process and result of two surveys performed using both systems, photogrammetric and laser scanner.*

*The results of the comparative analysis will be shown, concentrating especially on matters such as the reduction of time and cost, the difficulty involved both in the data gathering phase and in post-production, the accuracy and quality of the result and its suitability of application.*

**Keywords:** Photogrammetry; scanner; 3D



1

1. Detalle del modelo digital 3D realizado mediante Fotogrametría Digital Automatizada.

1. Detail of the 3D digital model produced through Automated digital photogrammetry.

2. Base of Benvenuto Cellini para el Perseo. Museo Nacional del Bargello (Florencia).

2. Base of Perseus by Benvenuto Cellini. Bargello National Museum (Florence).

En los últimos años estamos asistiendo a una aceleración de la mejora en los procesos digitales de obtención de modelos tridimensionales, lo que repercute necesariamente sobre nuestra área de conocimiento, y más concretamente en el ámbito de los estudios previos del patrimonio arquitectónico. <sup>1</sup>

Podemos ver como partiendo de los tradicionales sistemas de medición se fue incluyendo silenciosamente la aportación fotográfica, a la que verdaderamente aún no le hemos sacado todo el potencial que como toma de datos posee. De hecho, ahora que iniciamos la segunda década del siglo XXI, en donde ya se ha alcanzado una gran madurez en los escáneres láser 3D, y cuando muchos daban por superados los sistemas basados en la fotografía, estos parecen resurgir con fuerza reclamando su lugar en primera línea de la tecnología para el levantamiento gráfico tridimensional.

### Obtención de datos del modelo a representar

Hagamos un breve recorrido sobre los tipos de sensores que podemos utilizar en el ámbito del levantamiento del patrimonio, con el objeto de establecer cómo podemos obtener los

datos y qué transformaciones posteriores necesitarán para llegar a alcanzar el objetivo último, que es la representación virtual del modelo, incluidas sus características geométricas, de textura y de color, es decir, un modelo geométrico de alta precisión que incluya su superficie elaborada de modo fotorrealístico (Docci, 2011, p. 22).

### Sensores 3D pasivos

Como método pasivo nos referimos a aquellos que se limitan a observar la escena a través de un sistema óptico u óptico-electrónico, con el objetivo de obtener de esta visión, la información de carácter geométrico (Guidi, 2010, p. 10). Estamos hablando de la fotogrametría, es decir, un sistema basado en la realización de dos o más fo-



2

In the last few years, we have been witness to a marked improvement in the process involved in digitally obtaining three-dimensional models, which obviously has repercussions for our area of expertise and, more specifically for preliminary research in the field of architectural heritage <sup>1</sup>.

We can see how using traditional forms of measurement as a starting point, photography has been quietly incorporated, and that its potential as a data gathering system has not been fully developed yet. In fact, now that we are in the second decade of the XXI century, when the quality of 3D laser scanners is at its highest point and many people had given up the photography-based systems, there seems to have been a marked resurgence and they are claiming their place in the front-line of the technology used for three-dimensional graphic elevations.

### The gathering of data for the model to be represented

Let us look briefly at the types of sensors which can be used in the area of heritage surveys, with the aim of establishing how we can obtain the data and what subsequent transformations will be needed to be able to reach the ultimate objective; the virtual representation of the model, including its geometric characteristics of texture and colour. This is to say, a highly precise geometric model including the surface developed using photorealism (Docci, 2011, p. 22).

### Passive 3D Sensors

When we talk about the passive method, we are referring to when a scene is simply observed through an optical or opto-electronic system with the intention of gathering geometric information (Guidi, 2010, p. 10). We are referring to Photogrammetry, which is to say, to a system based on the taking of two or more photographs of the same element from different perspectives, from which homologous points will be singled out in order to obtain a three-dimensional model. Since its inception, Photogrammetry has been considered a rigorous, accurate system which provides an outstanding level of detail. It is worth highlighting the following advantages (Lerma, 2011, p. 109):

- A great deal of information, regardless of the scale.
- The extraction of very precise metric information.



3. Obtención de datos mediante escáner por triangulación.

3. Data gathering through Scanning by triangulation.



3

4. Proyección de luz para la obtención de datos mediante sensor 3D activo.

4. Light projection to obtain data through active 3D sensors.



4

- Data in 2D or 3D, according to the number of images
- Capacity for stereoscopic visualisation.
- Versatility of use of relatively economic equipment.

There are, though, some drawbacks that should be pointed out, as, apart from requiring a certain amount of time, the protocol is, to say the least, laborious 2:

- The obtaining of the images.
- The gathering of the metric information needed to scale the model.
- The calibration of the photographic camera.
- The orientation of the camera.
- The modelling by means of recognising edges and surfaces.
- The texturing of the three-dimensional digital model.
- The scaling of the model.

This technology inevitably leads us to be increasingly demanding. Thanks to digital photography and developments in software, we have now been able to progress as far as what is called Automated Digital Photogrammetry.

### Active 3D sensors

The fundamental difference between the passive and active sensors is that while the former capture the natural light reflected in objects, the latter

tografías de un mismo elemento, realizadas desde distintos puntos de vista, sobre las que individualizaremos puntos homólogos para obtener un modelo tridimensional.

Desde sus inicios la fotogrametría se ha considerado un sistema riguroso y preciso, que proporcionaba un elevadísimo grado de detalle, destacando en general las siguientes ventajas (Lerma, 2011, p. 109):

- Gran cantidad de información, independientemente de la escala.
- Extracción de información métrica muy precisa.
- Datos en 2D o en 3D, en función del número de imágenes.
- Capacidades de visualización estereoscópicas.
- Versatilidad de uso a partir de instrumental relativamente económico.

También hay que señalar algunos inconvenientes, pues además de requerir de cierto tiempo, el protocolo a seguir es cuanto menos laborioso 2:

- Obtención de las imágenes.
- Obtención de la información métrica necesaria para llevar a escala el modelo.
- Calibración de la cámara fotográfica.
- Orientación de la cámara.
- Modelización mediante el reconocimiento de bordes y superficies.
- Texturización del modelo digital tridimensional.
- Puesta a escala del modelo.

La tecnología nos lleva inexorablemente a subir nuestras exigencias cada día que pasa. Hoy, gracias a la fotografía digital y al software desarrollado, hemos podido llegar a lo que denominamos Fotogrametría Digital Automatizada.

### Sensores 3D activos

La diferencia fundamental entre los sensores pasivos y los activos es que mientras aquellos captan la luz natural reflejada en los objetos, éstos emiten una luz desde el propio instrumen-



5. Alineación y orientación automática de fotografías.  
5. Automated alignment of the photographs.



5

to; esta luz tiene una estructura definida y conocida por el sensor que debe de captarla (Guidi, 2010, p. 12).

Los sensores 3D activos más utilizados para el levantamiento del patrimonio son de dos tipos: el basado en la triangulación, y el que mide la distancia.

El sistema basado en la triangulación tiene la ventaja de ser el de mayor precisión entre los sensores 3D activos, pero la distancia de utilización es muy limitada (Docci, Maestri, 2010, pp. 221-223).

Por otro lado el sistema basado en la medición de la distancia utilizado en esta ocasión ha sido el de tiempo de vuelo, que realiza mediciones de hasta 50.000 puntos por segundo. Cabe señalar que la otra tecnología utilizada en este ámbito es la basada en la medición de la distancia por la diferencia de fase, llegando en la actualidad a los 5.000.000 de puntos por segundo (Apollonio, Remondino, 2010, p. 97).

### Fotogrametría Digital Automatizada

La solución más novedosa actualmente para la obtención de modelos 3D es la Fotogrametría Digital Automatizada. Se basa en la utilización de imágenes convencionales, realizadas en principio con cualquier cámara fotográfica y desde cualquier punto de vista, pero con la máxima de que todas las partes del modelo sean visibles al menos desde dos ángulos distintos.

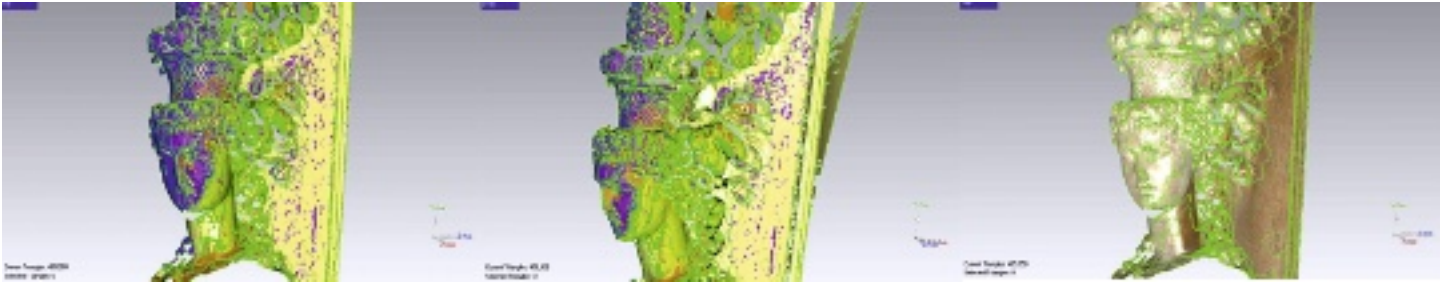
En los modelos con texturas de tonos uniformes, como cielos despejados, cristales o superficies pulidas, aparecen artefactos por la imposibilidad de identificar los puntos homólogos con precisión. Este problema se puede evitar con la utilización de máscaras.

En este tipo de *software* el primer trabajo a realizar es la alineación de las fotografías que se van a utilizar para la reconstrucción del modelo. Esta labor se realiza automáticamente, e in-

emit a light from the instrument itself; this light has a defined structure which is known by the sensor that must capture it. (Guidi, 2010, p. 12). There are two types of active 3D sensors used in heritage surveys: one based on triangulation and the other that measures distance. The system based on triangulation has the advantage of being the most accurate of the active 3D sensors, but it can only be used at a very limited distance (Docci, Maestri, 2010, pp. 221-223). The system of distance measurement, on the other hand, used in this instance is time-of-flight, which takes measurements of up to 50,000 points per second. It is to be noted that the other technology used in this field is based on phase shift distance measurement, which currently allows up to 5,000,000 points per second (Apollonio, Remondino, 2010, p. 97).

### Automated digital photogrammetry

Nowadays, the most innovative way to obtain 3D models is by using automated digital photogrammetry. This is based on the use of conventional images which can be taken, in principle, by any photographic camera and from any perspective, but with the requirement that



6



7



8

every part of the model must be visible from at least two different angles.

In models with uniform tone textures, like clear skies, glass or polished surfaces, digital artifacts appear due to the impossibility of identifying the homologous points with precision. This problem can be avoided using masking techniques. The first task to carry out is that of aligning the photographs which are to be used in the reconstruction of the model. This is done automatically and includes the calibration and correction of all the images using their EXIF data as a starting point. This process is based on the use of each pixel in the image as a point, searching for homologous points in all the photographs and, so, the relative positions of each camera.

The set of camera positions together with the photographs themselves are used for the next step, which is the construction of the model's geometry. By this we mean the construction of the mesh of 3D polygons that define the surface of the model.

Lastly, we can automatically create its photorealistic texture by integrating the colour data of the images in the obtained model.

Now let us see the results of this method and how they compare with the two most commonly used systems based on the use of active three-dimensional sensors: scanning by triangulation and laser scanning by measurement of distance.

cluye la calibración y corrección de todas las imágenes partiendo de sus datos EXIF. El procedimiento está basado en la utilización de cada pixel de la imagen como un punto, buscando puntos homólogos en todas las fotografías y con ello las posiciones relativas de cada cámara.

El conjunto de posiciones de las cámaras junto con las propias fotografías, son utilizadas para la siguiente fase que es la construcción de la geometría del modelo, es decir, la construcción de la malla de polígonos en 3D que definen la superficie del modelo.

Por último podemos crear de forma automática su textura fotorrealística integrando los datos del color de las imágenes en el modelo obtenido.

Veamos ahora los resultados de este método y observemos la comparación con cada uno de los dos sistemas basados en la utilización de sensores tridimensionales activos más usados en la actualidad: el escáner por triangulación y el laser escáner por medida de la distancia.

### Caso de estudio 1.

#### Escáner por triangulación vs Fotogrametría Digital Automatizada

Para realizar este primer análisis y comparación se ha buscado un objeto en el que el escáner por triangulación nos de su máximo rendimiento. Por este motivo se ha elegido una escultura compleja.

La escultura a restituir es la alegoría de la Madre Tierra que realizó Benvenuto Cellini en cada una de las esquinas de la basa del Perseo, y que fue acabada en 1554. Se ha trabajado sobre la original que se encuentra hoy en día en el Museo Nacional del Bargello en Florencia <sup>3</sup>.

Respecto al instrumental se ha utilizado una cámara *Nikon D3000* con un objetivo *AF-S DX 18-55 mm* (13 megapíxeles). El escáner utilizado es el *Nex-tEngine 2020i Desktop 3D Scanner*. Este escáner tiene una precisión de 0,0001 metros y trabaja mediante una tecnología llamada *laser stripe* que hace un barrido del objeto obteniendo una nube de puntos que convierte automáticamente en malla de polígonos.



9



10

Los tiempos utilizados mediante escáner fueron de 5 horas de trabajo de campo y 25 horas de trabajo de gabinete. En este último incluimos todo el proceso de postproducción, como enlace de las distintas escaneadas, ajustes de la malla poligonal, cierre de hue-

cos, obtención de los parámetros de distorsión y orientación de las distintas tomas fotográficas, así como la inclusión de la textura fotorrealística en el modelo obtenido.

Mediante el sistema de Fotogrametría Digital Automatizada hemos uti-

6. Unión de las distintas nubes procedentes del escáner por triangulación. Los colores nos muestran las desviaciones para evaluar el grado de error, que en este caso ha estado por debajo de un milímetro.
7. Detalle de la malla poligonal con presencia de oclusiones apreciables por zonas de polígonos isótropos.
8. Detalle de la superficie obtenida con la inclusión de la malla del escáner por triangulación.
9. Proceso de incorporación de texturas fotográficas de forma no-automática; orientación, inclusión sobre el desarrollo del modelo y resultado final con un fotograma.
10. Modelo 3D final con la inclusión de su textura.

6. Merge of the different point clouds result from Scanning by triangulation. Colours show deviations in order to evaluate accuracy, which in this case has kept the error margin under one millimetre.
7. Detail of the polygonal mesh showing noticeable occlusions due to zones of isotropic polygons
8. Detail of the surface obtained including the mesh obtained through Scanning by triangulation.
9. Non-automatic photographic textures adding process; orientation, adding on the model and photograph of the final outcome.
10. Final 3D model including its texture.

### Case study 1. Scanning by triangulation (projection of luminous plane)

In order to perform this analysis and comparison, a model was needed that would require the method of scanning by triangulation to operate at its peak. This is why a complex sculpture was chosen. The piece to restore is the allegory of Mother Earth which Benvenuto Cellini sculpted on each of the corners of the base of his Perseus, finished in 1554. The original has been worked on and is to be found in the Bargello National Museum in Florence [3](#).

As far as the equipment is concerned, a Nikon D3000 camera with an AF-S DX 18-55 mm lens and a resolution of 13 megapixels. The scanner used is the *NextEngine Model 2020i Desktop 3D Scanner, assisted by a laptop*. This scanner is accurate to 0.0001 metres and Works by means of *laser stripe* technology, which performs a sweep of the object obtaining a point cloud which it automatically converts into a polygon mesh. The time needed for gathering this data when using the scanner was 5 hours of field work and 25 hours office work. The latter includes the entire post-production process, such as linking up the different scanned images, adjusting the polygon mesh, closing up the gaps, obtaining the distortion and orientation parameters of the different photographic shots, as well as including the photorealistic texture in the obtained model. When using the system of automatic digital photogrammetry, on the other hand, we used a total of 80 photographs, which were taken in 15 minutes of field work, while at the same time a measurement of the model was taken for the subsequent scaling of the result. The

office/laboratory work consisted of selecting and uploading images, as well as the implementation and control of the process explained above. This step required 2 hours of individual work on a computer 4.

By evaluating the results of the two digital models, we can initially see that the model carried out using Automated Digital Photogrammetry is more efficient for use in rendered image generation programmes, as it is the programme itself which automatically generates the mapping of the model with colour textures. Taking this into account, the model achieved through triangulation has higher resolution, but low quality colour texture, and thus additional mapping work is necessary which must be carried out using other IT applications.

As regards the process of stringent documentation of the form, as opposed to recording the median size of the edges of the largest mesh of triangles (1-1.5 mm.) produced by photogrammetry, the advantage of this technology is that a more reliable result on a general level is obtained as to the complete morphology of the object. The simple recording of several high resolution scans (to a precision of 0.1 mm.) in the absence of a general reference creates errors of around a centimetre as Guidi has shown (2010, pp. 412 – 428). Thus the two types of survey can reciprocally be of use to each other in order to achieve high quality results as regards both detailed documentation and pure representation.

Taking our analysis to the next level, we shall move on to evaluate the polygon meshes. Firstly, we must make it clear that the number of polygons carried out by the automatic system has been chosen by us and we have been restricted by the processing capacity of the computer and the need to set a reasonable time limit. So, in this case a mesh of 5,000,000 polygons has been requested, although the number of pixels in the photographs would have permitted a substantially greater quantity. In order to carry out a quantitative comparison between the two models which have been obtained, they have been put into the same reference system by way of a global alignment tool between the meshes of polygons, or put another way, using the same principles which allow alignment between two scans (algorithms ICP algorithms, Interactive Closest Points). Following this a mapping of the deviation between the two meshes is carried out (Fig. 15). When the results for the sculpture are observed we can see some spaces due to shadowy areas which were subsequently reconstructed (Fig. 07)

lizado un total de 80 fotografías, que fueron realizadas en 15 minutos, al tiempo que se determinó una medida sobre el modelo para posteriormente poder escalar el resultado. El trabajo de gabinete consistió en la selección y carga de las imágenes, así como la ejecución y control del proceso explicado anteriormente. La duración de esta fase fue de 2 horas de trabajo autónomo del ordenador 4.

Evaluando los resultados de los dos modelos digitales obtenidos del mismo objeto podemos observar inicialmente que el modelo realizado por Fotogrametría Digital Automatizada es el que más se adapta a una eficaz utilización en programas para la generación de imágenes de renderizado, ya que es el mismo programa el que se encarga de generar el mapeado del modelo con texturas del color de forma totalmente automática. Teniendo en cuenta esta finalidad, el modelo obtenido por triangulación tiene una resolución más alta, pero al mismo tiempo una textura del color de baja calidad, y por lo tanto hace falta un trabajo adicional de mapeado que debe realizarse con otras aplicaciones informáticas.

En cuanto a la *documentación rigurosa de la forma* debería decirse que frente a un tamaño medio de los bordes de la malla de triángulos más grande (1-1.5 mm.) proporcionado por fotogrametría, la ventaja de esta tecnología consiste en la obtención de un resultado más fiable a nivel general sobre la morfología completa del objeto. El registro sencillo de varios escaneados de alta resolución (0.1 mm. de precisión) en ausencia de una referencia general comporta errores en el orden del centímetro como ha demostrado Guidi (2010, pp. 412 - 428). Por lo tanto las dos formas de levantamiento podrían aprovecharse la una de la otra para al-

canzar resultados de alta calidad tanto en cuanto a la documentación detallada como a la pura representación.

Avanzando en nuestro análisis debemos precisar primeramente que el número de polígonos realizados mediante el sistema automático ha sido elegido por nosotros, habiendo tenido como límites la capacidad de procesamiento del ordenador y el uso de un tiempo acotado. En este caso se ha solicitado una malla de 5.000.000 de polígonos, aunque el número de píxeles de los fotogramas permitían realizar una cantidad superior.

Para realizar la comparación cuantitativa entre los dos modelos obtenidos, los hemos puesto en el mismo sistema de referencia a través de la herramienta de alineación global entre mallas de polígonos, es decir, utilizando el mismo principio que permite la alineación entre dos escaneadas (algoritmos ICP, *Interactive Closest Points*). A continuación se realiza un mapeado de la desviación entre las dos mallas (Fig. 15).

Observando los resultados de la escultura vemos algunos huecos procedentes de sombras que fueron reconstruidas posteriormente (Fig. 07) y que marcan la mayor desviación con zonas visibles en tonos rojos. No obstante, más allá de estas zonas puntuales, el histograma nos muestra una desviación aceptable, siendo inferior a  $\pm 2.0$  mm en un 74.84 % (38.92 + 35.92) de los vértices.

Estas aplicaciones de programas informáticos de modelado inverso generan histogramas y mapas de colores que nos han permitido individualizar zonas críticas de desviación entre los modelos. Vemos como el comportamiento de ambos mantiene unos niveles altísimos de coincidencia, encontrando algunos problemas el sistema automático en aquellas zonas con mucha oscuridad que hacen que un área



11. Detalle de la malla de la hornacina obtenida mediante el modo automático.

11. Detail of the mesh of the niche obtained through the automated mode.

no tenga cambio tonal. Sin embargo, se apreciaron más sombras en el escáner por triangulación, ya que el número de escaneadas fue muy inferior al número de tomas fotográficas. Al respecto de la presencia de estas sombras hay que señalar que el tiempo para la toma de datos es siempre limitado, ya sea por imposiciones de tiempos permitidos por la propiedad, ya sea por llegar a un tiempo que podemos denominar crítico. Igualmente la utilización de aparatos que requieren unas necesidades de apoyo y distancia al objeto como el escáner por triangulación, generan problemas logísticos. Como consecuencia de todo ello la presencia de oclusiones que son inevitables en la mayoría de los casos.

12. Superficie obtenida a partir del detalle de la malla de la hornacina obtenida mediante el modo automático.

12. Surface obtained from the detail of the mesh of the niche through the automated mode.

### Caso de estudio 2. Escáner por medida de distancia vs Fotogrametría Digital Automatizada

En este caso el objeto se eligió por estar realizándose en ese momento un levantamiento con escáner laser, del que se cogió una porción para la comparación de los modelos obtenidos. Se trata de una hornacina de un muro de la *Piazza d'Oro* de la Villa Adriana 5 en Tívoli (Roma).

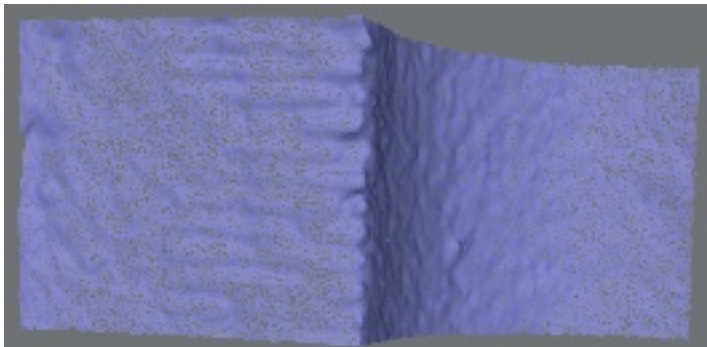
El escáner utilizado ha sido el *Leica ScanStation C10*, que tiene una precisión de 0.004 metros. La cámara fotográfica utilizada ha sido la *Canon EOS 5D* con un objetivo EF 28-80 mm (15 megapíxeles).

Se puede estimar un tiempo de trabajo de campo entorno a la hora, aun-

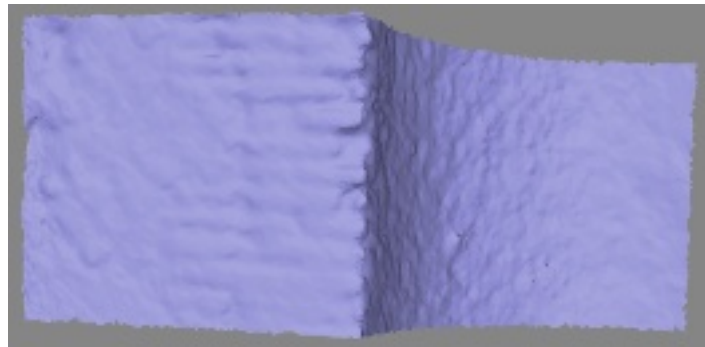
13. Figura anterior con inclusión de la textura fotográfica.

13. Previous figure including the photographic texture.

and which represent the greatest deviation from visible areas in red tones. Nevertheless, beyond these occasional areas, the histogram shows an acceptable deviation, which is less than  $\pm 2.0$  mm in 74.84 % (38.92 + 35.92) of the vertices. These inverse modelling computer programmes generate histograms and colour maps which have allowed us to individualise critical areas of deviation between the models. We can observe that, in their behaviour, the two models show very high levels of coincidence. The automatic system comes up against some problems in those areas with high degrees of darkness which deprive the area of tonal variety. However, more shadows were observed in the scanning by triangulation, given that the number of scans was much lower than the number of photographs taken. With respect to these shadows it should be noted that time for data collection is always limited, sometimes due to limits on the time allowed imposed by the owners of the property, sometimes due to a need to complete the work by what we might call a critical time. In the same way, the use



11



12



13





14. Ortofoto del modelo 3d de la hornacina con acabado fotográfico.

14. Orthophoto of the 3D model of the niche.

of devices with specific requirements as regards support and distance from the objective like the triangulation scanner, creates logistical problems. As a consequence of all the above occlusions occur and are, in most cases, inevitable.

### Case study 2. Scanning by distance measurement

In this case, the model was chosen because, at that moment, a survey with laser scanner was being performed and a portion was used in order to compare the systems. It is a niche from one of the walls of the *Piazza d'Oro* in the Villa Adriana 5 in Tivoli (Roma).

In this case, the scanner used was the *Leica ScanStation C10*, which is accurate to 0.004 metres and does not require a laptop. The photographic camera used was the Canon EOS 5D with an EF 28-80 mm USM lens and a resolution of 15 megapixels.

Around one hour of field work would be the time required although, as a whole day's work was needed for the entire Plaza, this is an estimation. As for the office work, 15 hours was necessary as it was quite a simple element that required very little post-production.

As regards the survey performed using automatic digital photogrammetry, we devoted 5 minutes to the field work and 30 minutes to the office work. There were 16 photographs used in this case. The same laser scanner survey has been used to feed the photogrammetry programme with the data of the points that has allowed us to upright and scale the model.

In a similar way as the previous case, the results achieved by photogrammetry will automatically have model mapping with high quality colour textures, while the scanner will need extra work. If we observe the photorealistic texture of both surveys, there are no appreciable differences even when submitted to detailed scaling.

However, in this case, although both meshes are very accurate, when they are observed at very close quarters, the polygons of the automatic system are seen to be an improvement on the ones obtained by scanner as they adapt better to the real texture of the model and display a near total absence of topological errors.

Nevertheless, this deviation is easily resolved in the mesh's post-production process, as is the smoothing out and control of possible omissions. As regards the quantitative results (Fig. 15), the colour map shows greater deviation in the darkest area of the photographs (upper part) for



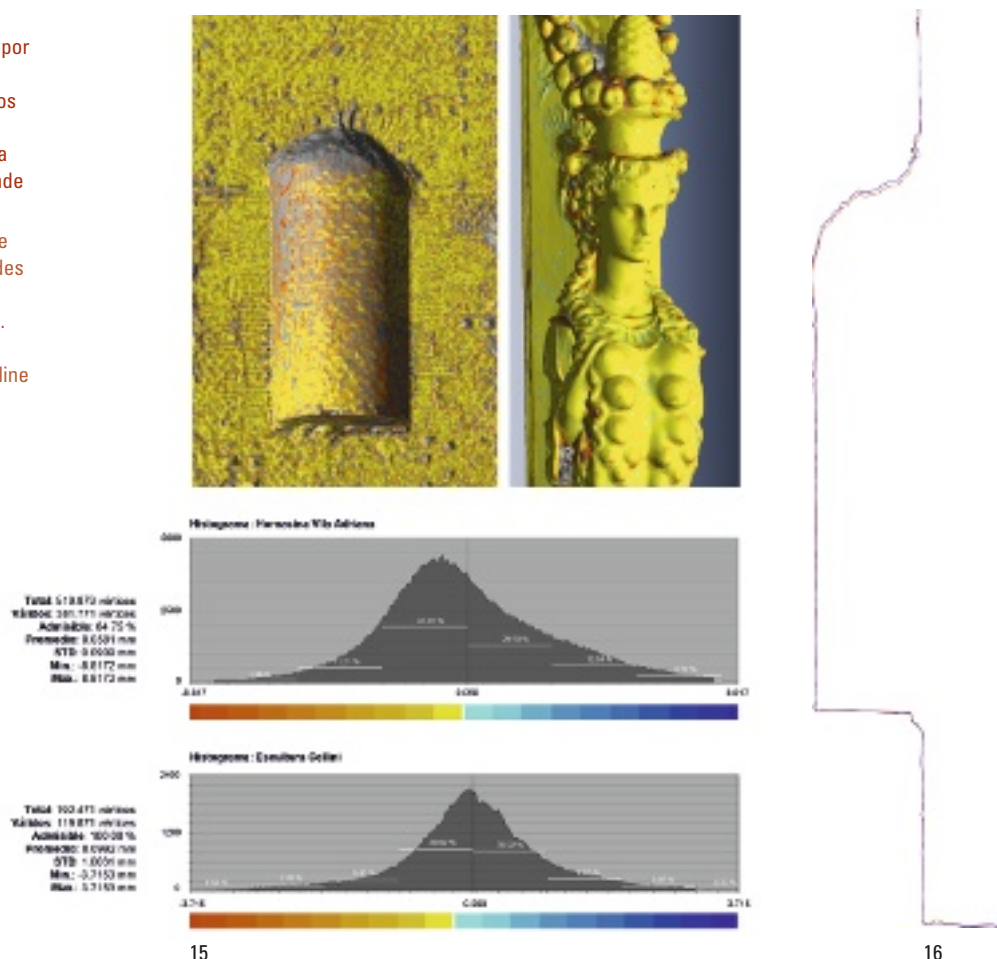


15. Superposición de los modelos 3D de ambos ensayos con la medición del error de desviación por medio del código de color e histogramas.

16. Secciones obtenidas de la hornacina en ambos modelos 3D. La sección roja corresponde a la obtención de datos por medio de la Fotogrametría Digital Automatizada, y la sección azul corresponde a la obtenida mediante el escáner láser.

15. Superimposition of the 3D models of both case studies showing the deviation through colour codes and histograms.

16. Cross sections of the niche in both 3D models. The red line shows the data obtained through Automated digital photogrammetry, and the blue line shows the laser scanner data.



que como se realizó una jornada completa para toda la *Piazza*, no deja de ser una estimación. Para el trabajo de gabinete se dedicaron 15 horas, pues se trataba de un elemento bastante sencillo, que requirió de poca dedicación de postproducción.

En cuanto al levantamiento mediante Fotogrametría Digital Automatizada, hemos dedicado 5 minutos de trabajo de campo y 30 minutos de trabajo de gabinete. El número de fotografías utilizadas en este caso fue de 16. Se ha empleado el mismo levantamiento topográfico de apoyo al láser escáner, para introducir en el programa de fotogrametría las coordenadas de los puntos que han permitido verticalizar y escalar el modelo.

Igual que en el caso anterior, el resultado proveniente de la fotogrametría dispone directamente de un mapeado del modelo con texturas en color

de alta calidad, mientras el del escáner necesitará de un trabajo adicional. Ahora bien, una vez realizado este proceso posterior de postproducción, y observando los dos levantamientos con su textura fotorrealística, no se aprecian diferencias. Sin embargo, aunque ambas mallas sean muy precisas, cuando son sometidas a altos niveles de aproximación los polígonos del sistema automático muestran una mejoría frente a los obtenidos mediante el escáner, pues se adaptan mejor a la textura real del modelo y muestran una casi ausencia de errores topológicos. No obstante, esta desviación se resuelve fácilmente en el proceso de postproducción de la malla, junto con el suavizando y control de posibles lagunas.

En cuanto a los resultados cuantitativos (Fig. 15), el mapa de color nos muestra la mayor desviación en la zona más oscura de las fotografías (par-

reasons as described above, and which are also evident in the joint section (Fig. 16). That said, however, in the readings from the histogram we see how 70.50 % (41.91 + 28.59) of the vertices are within a deviation of  $\pm 3.0$  mm, which gives us an acceptable level of approximation between the two models.

## Conclusions

After the analysis of the results of the first case study we can state that the use of Automated Digital Photogrammetry is a viable alternative to be taken into account in view of the levels of deviation between the two obtained models. It can be said that the level of precision, without claiming to equal the levels obtained by a triangulation scanner, is more than acceptable. As regards economic investment and amortization, the time needed for data gathering, and the time needed for postproduction, it is a more competitive system. In the second case study Automated Digital Photogrammetry continues to demonstrate the same virtues shown in the first study, although in this case it should be noted that as far as



precision is concerned, in the case of long distances and large surface areas, the greater strength of the distance measuring scanner becomes evident.

After the analysis, a table can be drawn up which summarises the parameters of cost, times (total), operating difficulties (over the entire process), post-production work, accuracy, results, ideal case, non-recommended case.

With regard to the summary table, it is necessary to clarify that we are referring to the entire process up to the obtaining of the virtual model. Consequently, it must be pointed out that, technologically speaking, the equipment used for data gathering (laser scanner) is currently much more advanced than that employed in its effective application (Verdiani, 2011, p. 11), in many cases it being necessary to develop methods to free up the great mass of data to make it more manageable (Fantini, 2010, p. 149). The system based on automated digital photogrammetry now represents a complementary alternative in high resolution 3D digital surveys and photorealistic finishes. Its strong point is the fact that it is economical, both time and costwise, especially in the step devoted to obtaining photorealistic textures. The idea is based on the almost total automation of the process since, the greater the degree of automation, the fewer the errors caused by the operator. (Herráez Boquera, Navarro Esteve, Denia Ríos, 2010, p. 31)

We can in this way, thus, conclude by saying that the experiment we have carried out confirms that systems based on active 3D sensors and Automated Digital Photogrammetry are valid and complimentary for the virtual portrayal of models. At the same time it became evident that there are economic and logistical disadvantages of using the scanner as opposed to this passive 3D method, which while it fulfills the requirements of the documentation, its suitability can be questioned when the objective of the application requires maximum precision. ■

te superior) por los motivos anteriormente descritos, que también se hacen patentes en la sección conjunta (Fig. 16). Ahora bien, en la lectura del histograma vemos como el 70.50 % (41.91 + 28.59) de los vértices quedan dentro de una desviación de  $\pm 3.0$  mm. lo que nos da una aproximación aceptable entre ambos modelos.

## Conclusiones

Tras el análisis de los resultados del primer caso de estudio podemos afirmar que la utilización de la Fotogrametría Digital Automatizada es una alternativa a tener muy en cuenta a la vista de las desviaciones entre los dos modelos obtenidos, pudiendo decir que el grado

de precisión, sin pretender llegar a lo obtenido por un escáner por triangulación, es más que aceptable. En cuanto a la inversión económica y amortización, tiempos de realización de la toma de datos y tiempos de postproducción, es un sistema más competitivo.

En el segundo caso de estudio la Fotogrametría Digital Automatizada sigue mostrando las mismas virtudes que en el caso anterior, aunque aquí debemos señalar que en cuanto a precisiones se refiere, en largas distancias y grandes superficies el escáner por medición de distancia muestra su mayor fortaleza.

Después de estas conclusiones podemos establecer un cuadro resumen con parámetros de costes, tiempos (to-

	Escáner triangulación <i>Triangulating Scanner</i>	Escáner (tiempo de vuelo) <i>Laser Scanner (time of flight)</i>	Fotogrametría automatizada <i>Automated photogrammetry</i>
Coste económico <i>Economic cost</i>	Medio <i>Medium</i>	Alto <i>High</i>	Bajo <i>Low</i>
Tiempo elaboración <i>Implementation time</i>	Muy alto <i>Very long</i>	Alto <i>Long</i>	Bajo <i>Short</i>
Dificultad <i>Level of difficulty</i>	Alta <i>High</i>	Alta <i>High</i>	Baja <i>Low</i>
Tiempo postproducción <i>Post-production time</i>	Muy alto <i>Very long</i>	Muy alto <i>Very long</i>	Bajo <i>Short</i>
Precisión <i>Level of accuracy</i>	Muy alta <i>Very high</i>	Alta <i>High</i>	Alta <i>High</i>
Resultado <i>Results</i>	Óptimo <i>Optimum</i>	Óptimo <i>Optimum</i>	Óptimo <i>Optimum</i>
Mejor aplicación <i>Best application</i>	Proximidad <i>Close up</i>	Media y larga distancia <i>Medium-long distance</i>	Complementario <i>Complementary</i>
Peor aplicación <i>Worst application</i>	Grandes objetos o de difícil acceso <i>Large objects or ones that are difficult to access</i>	Objetos pequeños y con detalle <i>Small, detailed objects</i>	Objetos sin cambio tonal <i>Objects without tonal variation</i>



tales), dificultad de operador (en todo el proceso), trabajo de postproducción, precisión, resultado, mejor aplicación, peor aplicación.

Respecto al cuadro resumen hay que aclarar que nos estamos refiriendo al proceso completo hasta la obtención del modelo virtual, por lo que se incide también en que hoy en día el nivel tecnológico alcanzado por el instrumental para la obtención de datos (escáner láser) está mucho más avanzado que el alcanzado para su efectiva aplicación (Verdiani, 2011, p. 11), debiendo en muchos casos desarrollar métodos que liberen la gran masa de datos para que sean más gestionable (Fantini, 2010, p. 149).

El sistema basado en la Fotogrametría Digital Automatizada se nos presenta ya como una alternativa en los levantamientos digitales 3D de alta resolución y acabados fotorrealísticos. Su punto fuerte es la economía de tiempos y costes, destacando la fase de obtención de texturas fotorrealísticas. La idea se basa en la automatización de casi todo el proceso, ya que a mayor automatismo, mayor ausencia del error introducido por el operador (Herráez Boquera, Navarro Esteve, Denia Ríos, 2010, p. 31).

Así pues podemos finalizar diciendo que el experimento realizado nos confirma que los sistemas basados en sensores 3D activos y la Fotogrametría Digital Automatizada son sistemas válidos y complementarios para la representación virtual de modelos. Al mismo tiempo nos evidencia las desventajas económicas y logísticas del uso del escáner frente a este método 3D pasivo, que si bien cumple las exigencias de la pura documentación, puede ser cuestionable en aplicaciones con objetivos que requieran la máxima precisión. ■

#### NOTAS

- 1 / La realización de este artículo ha contado con la financiación del Ministerio de Educación, mediante el Programa Nacional de Movilidad de Recursos Humanos del Plan Nacional de I-D+i 2008-2011. Agradecer la colaboración del profesor Giorgio Verdiani, Universidad de Florencia, y del profesor Sergio di Tondo, Universidad de Pisa.
- 2 / Para profundizar sobre el proceso desde la obtención de datos hasta la visualización del modelo ver Gaiani, 2010, p.48.
- 3 / Agradecer la colaboración de la Directora del Museo, la Dra. Beatrice Paolozzi Strozzi, y de la Soprintendente per il Patrimonio Storico, Artistico ed Etnoantropologico e per il Polo Museale di Firenze, la Dra. Cristina Acidini.
- 4 / *HP Work Station Z210*, 3,3 Ghz y 16 GB de memoria RAM.
- 5 / Agradecer la colaboración de la Directora de la Villa Adriana, la Dra. Benedetta Adembi, y a la Soprintendente per i Beni Archeologici del Lazio, la Dra. Marina Sapelli Ragni.

#### Referencias

- APOLLONIO, I. F., REMONDINO, F., 2010. Modellazione 3D da sensori attivi, Pipeline con laser scanner. In: B. Benedetti, M. Gaiani, F. Remondino, ed. 2010. *Modelli digitali 3D in archeologia: il caso di Pompei*. Pisa: Edizioni della Normale, pp. 94-117.
- BALDISSINI, S., GAIANI, M., REMONDINO, F., 2010. Rilievo, gestione e mappatura del colore. In: B. Benedetti, M. Gaiani, F. Remondino, ed. 2010. *Modelli digitali 3D in archeologia: il caso di Pompei*. Pisa: Edizioni della Normale, pp. 200-235.
- DOCCI, M., MAESTRI, D., 2010. *Manuale di rilevamento architettonico e urbano*. Roma: Laterza.
- DOCCI, M., 2011. *Metodologie integrate per il rilievo, il disegno, la modellazione dell'architettura e della città*. Roma: Gangemi.
- FANTINI, F., 2010. Image Based Data Processing (IBDP): la restituzione attraverso displaced subD a partire da rilevamento laser scanner. In: E. Mandelli, U. Velo, ed. 2010. *Il modello in architettura. Cultura scientifica e rappresentazione*. Firenze: Alinea, pp. 149-158.
- GUIDI, G., RUSSO, M., BERARDIN, J. A., 2010. *Acquisizione 3D e modellazione poligonale*. Milano: McGraw-Hill.
- HERRÁEZ BOQUERA, J., NAVARRO ESTEVE, P., DENIA RÍOS, J. L., 2010. Fundamentos y aplicaciones de la tecnología de Escáner Láser para documentación y restauración de patrimonio. In: A. Alcántara Onofre, A. M. Lara Gutiérrez, ed. 2010. *Implementación de nuevos métodos de documentación y registro fotogramétrico digital para la protección y puesta en valor del patrimonio monumental mexicano*. México: Universidad Politécnica de Valencia, pp. 17-41.
- LERMA, J. L. et al., 2011. La documentación patrimonial mediante sensores de imagen o de barrido láser. In: *Documentación gráfica del patrimonio*. Ministerio de Cultura, pp. 108-117.
- VERDIANI, G., 2011, *Il ritorno all'immagine. Nuove procedure image based per il Cultural Heritage*. Lulu.com (ed).

#### NOTES

- 1 / This article has had the financial backing of the Ministry of Education, through the National Programme for the Mobility of Human Resources from the National Research and Development Plan 2008-2011. We are grateful to Professor Giorgio Verdiani of the University of Florence and Professor Sergio di Tondo of the University of Pisa for their collaboration.
- 2 / To gain a more detailed understanding of the process from the gathering of data to the visualisation of the model, see Gaiani, 2010, p.48.
- 3 / We are grateful to the Museum Director, Dr. Beatrice Paolozzi Strozzi, for her collaboration and to the Soprintendente per il Patrimonio Storico, Artistico ed Etnoantropologico e per il Polo Museale di Firenze, Dr. Cristina Acidini.
- 4 / *HP Work Station Z210*, 3.3 Ghz and 16 GB of RAM memory .
- 5 / We are grateful to the Director of Villa Adriana, Dr. Benedetta Adembi and to the Soprintendente per i Beni Archeologici del Lazio, Dr. Marina Sapelli Ragni for their collaboration.

#### References

- APOLLONIO, I. F., REMONDINO, F., 2010. Modellazione 3D da sensori attivi, Pipeline con laser scanner. In: B. Benedetti, M. Gaiani, F. Remondino, ed. 2010. *Modelli digitali 3D in archeologia: il caso di Pompei*. Pisa: Edizioni della Normale, pp. 94-117.
- BALDISSINI, S., GAIANI, M., REMONDINO, F., 2010. Rilievo, gestione e mappatura del colore. In: B. Benedetti, M. Gaiani, F. Remondino, ed. 2010. *Modelli digitali 3D in archeologia: il caso di Pompei*. Pisa: Edizioni della Normale, pp. 200-235.
- DOCCI, M., MAESTRI, D., 2010. *Manuale di rilevamento architettonico e urbano*. Roma: Editori Laterza.
- DOCCI, M., 2011. *Metodologie integrate per il rilievo, il disegno, la modellazione dell'architettura e della città*. Roma: Gangemi Editore.
- FANTINI, F., 2010. Image Based Data Processing (IBDP): la restituzione attraverso displaced subD a partire da rilevamento laser scanner. In: E. Mandelli, U. Velo, ed. 2010. *Il modello in architettura. Cultura scientifica e rappresentazione*. Firenze: Alinea Editrice, pp. 149-158.
- GUIDI, G., RUSSO, M., BERARDIN, J. A., 2010. *Acquisizione 3D e modellazione poligonale*. Milano: McGraw-Hill.
- HERRÁEZ BOQUERA, J., NAVARRO ESTEVE, P., DENIA RÍOS, J. L., 2010. Fundamentos y aplicaciones de la tecnología de Escáner Láser para documentación y restauración de patrimonio. Algunos ejemplos de aplicación en La Comunidad Valenciana. In: A. Alcántara Onofre, A. M. Lara Gutiérrez, ed. 2010. *Implementación de nuevos métodos de documentación y registro fotogramétrico digital para la protección y puesta en valor del patrimonio monumental mexicano*. México: Universidad Politécnica de Valencia, pp. 17-41.
- LERMA, J. L. et al., 2011. La documentación patrimonial mediante sensores de imagen o de barrido láser. In: *Documentación gráfica del patrimonio*. Ministerio de Cultura, pp. 108-117.
- VERDIANI, G., 2011, *Il ritorno all'immagine. Nuove procedure image based per il Cultural Heritage*. Lulu.com (ed).