

Una experiencia en la aplicación del Láser Escáner 3D a los procesos de documentación y análisis del Patrimonio Construido: su aplicación a Santa Eulalia de Bóveda (Lugo) y San Fiz de Solovio (Santiago de Compostela)

Application of Terrestrial Laser Scanner to recording and analysis of Building Heritage: cases study of Santa Eulalia de Bóveda (Lugo) and San Fiz de Solovio (Santiago de Compostela)

PATRICIA MAÑANA-BORRAZÁS

ANXO RODRÍGUEZ PAZ

REBECA BLANCO-ROTEA

LaPa = Laboratorio de Patrimonio, CSIC. Santiago de Compostela *

Resumen

El campo de la topografía cuenta actualmente con herramientas de gran precisión que han permitido agilizar los procesos de recogida de datos, maximizar la información proporcionada por estos y obtener resultados que aportan una representación cada vez más fiel del objeto. Este es el caso del Levantamiento de Alta Definición mediante Láser Escáner 3D. En este artículo se presenta nuestra experiencia en la aplicación de esta herramienta concreta al conjunto monumental de Santa Eulalia de Bóveda (Lugo) y la iglesia de San Fiz de Solovio (Santiago de Compostela), cuyos resultados han aportado una información muy valiosa tanto desde el punto de vista de la representación, el análisis del objeto arqueológico y arquitectónico, la propia interpretación o la generación de resultados, como en las reconstrucciones tridimensionales de las distintas fases documentadas en uno de los edificios analizados.

Palabras Clave: Levantamiento de alta definición; Láser Escáner Terrestre; metodología de registro arqueológico; representación gráfica; reconstrucciones tridimensionales.

Abstract

Nowadays, field surveying has very accurate instruments that allow a substantial speeding up of the processes of topographic measurement, maximizing the information that they provide and obtaining features that represent the objects with a high precision. That is the case of the High-Definition Survey with Terrestrial Laser Scanner. This paper shows the application of such tools to some historical buildings in Galicia. The results have contributed to create a database valuable both as graphic representations, as part of the analytical processes of the architectonic record, and as three-dimensional reconstructions of the different phases of construction of the buildings under analysis.

Keywords: High-Definition Survey, Terrestrial Laser Scanner, Archaeological Documentation, Point Cloud, Graphic Representation, Three-Dimensional Reconstructions.

* patricia.manana-borrazas@iegps.csic.es
 anx.rodriguez-paz@iegps.csic.es
 rebecca.blanco-rotea@iegps.csic.es

1. PRESENTACIÓN

La documentación geométrica se considera una herramienta indispensable en los trabajos arqueológicos, tanto para los que se realizan en yacimientos enterrados como en arquitectura elevada. Un registro exhaustivo de la información arqueológica y arquitectónica hace necesario realizar una documentación precisa y en detalle de los distintos elementos que constituyen el objeto de estudio para obtener unos resultados fiables y ajustados a la realidad, así como identificar las distintas patologías que puedan afectar al objeto, como problemas estructurales, deformaciones, etc.

Pero la documentación del patrimonio cultural no consiste únicamente en la toma *in situ* de los datos necesarios para su registro en detalle, sino que también involucra los procedimientos necesarios para procesar esta información, su presentación posterior y el archivo de los datos imprescindibles para representar la forma, volumen y tamaño del elemento documentado en un determinado momento de la vida del mismo.

Siendo cada vez más habitual la exigencia en la rapidez y precisión en la documentación de los elementos patrimoniales, la tendencia actual es usar como herramientas más avanzadas de documentación geométrica los métodos topográficos y la fotogrametría. Además, aunque la mayor parte de los resultados necesarios en los levantamientos se orientan a representaciones planimétricas en 2D (plantas, secciones, alzados), cada vez se hace más necesario obtener un registro en 3D y con ello, un modelo tridimensional que represente gráficamente tanto la geometría del edificio como el aspecto de sus distintas caras. En este sentido ha avanzado en las últimas décadas la aplicación de la fotogrametría (por ejemplo, en España, ALMAGRO, 2004; ALMAGRO, ALMAGRO, 2007; ÁLVAREZ *et alii*, 2003; ANTOÑANZAS *et alii*, 2003; CÁMARA, LATORRE, 2003; IGLESIAS, 2002) y más recientemente la captura de nubes de puntos por medio láser escáner 3D o Láser Escáner Terrestre (p.e., ARIAS *et alii*, 2005; LAMBERS *et alii*, 2007; LICHTI *et alii*, 2008; MARAMBÍO, GARCÍA, 2006; MONSERRAT, CROSETTO, 2008; PÉREZ, PÉREZ, 2007; ROCA-PARDIÑAS *et alii*, 2008; RODRÍGUEZ *et alii*, 2008; SCHLUZ, INGESAND, 2005; YASTIKLI, 2007).

En un mundo donde la información se almacena fundamentalmente en formatos digitales, se hace cada vez más necesario generar sistemas en los que ésta quede archivada en formatos que sean inservibles al ritmo que cambia el software concreto con el que fue creada, es decir que permitan su conservación en el futuro; un formato que sea además compatible con otro tipo de información digital sobre los sitios analizados (bien sea ésta descriptiva,

gráfica, histórica, etc.), con la cual se pueda también relacionar. En este sentido, encontramos en la bibliografía un interesante debate sobre el archivo digital (JANTZ, GIARLO, 2005; RICHARDS, 2002), el SIG tridimensional (GARCÍA, MOIX, 2003; KOLLER *et alii*, 1995) cuyo desarrollo es fundamental para este tipo de trabajos. Sin embargo, no es este debate uno de los objetivos de este artículo y nos limitaremos a enumerar los formatos en los que actualmente se almacena la información obtenida con este sistema de registro. Debemos indicar, sin embargo, que ésta es una de las líneas de investigación en las que pretendemos seguir trabajando en un futuro.

En esta línea, y con la finalidad esencial de mostrar nuestra experiencia, en este artículo presentamos unos ejemplos recientes de documentación de arquitecturas realizadas en varios proyectos llevados a cabo por el *Laboratorio de Patrimonio* (en adelante LaPa) del Instituto de Estudios Galegos Padre Sarmiento (CSIC) en los que se ha empleado como instrumento de medición un Láser Escáner 3D modelo HDS3000 de Leica.

El texto se centra, por un lado, en el proceso de registro de la información y su postprocesado y, por otro, en la reconstrucción tridimensional de la arquitectura en sus distintas fases constructivas, para lo cual se han combinado los datos obtenidos a través del registro aquí empleado y los resultados de otras metodologías de análisis.

2. EL LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO DE ALTA DEFINICIÓN – EL LÁSER ESCÁNER

Se denomina Documentación Geométrica de Alta Definición (*High-Definition Survey*, HDS) al método de medición no-intrusivo que permite una captura de información rápida, detallada y precisa de una superficie o volumen por medio de una herramienta basada en la tecnología de escáner con láser, un instrumento de registro que también es denominado como Láser Escáner Terrestre (*Terrestrial Laser Scanning*, TLS, por diferencia con otras herramientas de características similares, como el cada vez más extendido LIDAR, que opera sobre una plataforma aerotransportada). El Láser Escáner realiza un barrido de una superficie captando miles de puntos por segundo con un haz de láser en abanico. Como resultado final se obtiene una **nube de puntos 3D** compuesta por cientos de miles de mediciones individuales en un sistema de coordenadas (x, y, z), que en sí mismas componen un modelo tridimensional de los objetos registrados, aunque, como tal conjunto de puntos sin procesado posterior, son un modelo muy simplificado que opera sólo visualmente, pues se compone únicamente de entidades singulares tipo punto. Además, esta visualiza-



Fig. 1. Vista de una nube de puntos 3D del edificio de San Fiz de Solovio (Santiago de Compostela). La vista conjunta de todos los puntos transmite visualmente una imagen modelizada del edificio en 3D, aunque se compone únicamente de millones de puntos singulares

ción puede llegar a alcanzar gran realismo ya que estos puntos pueden reflejar el color de la superficie registrada. Esto es posible ya que, como en el caso del modelo del escáner que se ha empleado para los trabajos que aquí se presentan, el escáner incorpora una cámara fotográfica de alta resolución que permite relacionar cada punto medido con el láser con color del píxel correspondiente de la fotografía de referencia.

El láser escáner es un instrumento habitual en proyectos de ingeniería y ha sido empleado en campos diversos, desde la construcción de barcos o coches, diseños de infraestructuras industriales y civiles, etc., que se ha trasladado con gran éxito al campo del Patrimonio Cultural. Pese a que el coste de adquisición de estos equipos es todavía elevado, su uso va siendo cada vez más habitual como en el caso de la documentación de elementos patrimoniales (p.e., el volumen LICHTI *et alii*, 2008).

Con una gran capacidad de registro, el uso más habitual de este instrumento en Patrimonio Cultural se orienta hacia¹:

- **Registro de volúmenes en 3D:** desde edificios, terrenos, objetos muebles, murales, espacios urbanos, hasta el registro de datos en excavaciones arqueológicas, tanto volúmenes positivos (por

¹ Los usos que siguen no son exclusivos del escáner 3D, sino en realidad aplicaciones posibles con cualquier otro sistema de documentación geométrica tridimensional.

ejemplo, muros, corazas de túmulos, hogueras, deposiciones de materiales, enterramientos, etc.) como negativos (fosas, agujeros de poste, etc.).

- **Dibujo de líneas en 2D y en 3D, Modelado y Animación:** una vez obtenido el registro del volumen en 3D, y por medio de diferentes programas de tratamiento de los datos de origen, se puede procesar y editar esta nube de puntos para obtener mallas, superficies y modelos 3D de todo tipo de objetos, edificios, estructuras, etc., además de imágenes en perspectiva, ortoimágenes y vídeos. Estos procesos, que se pueden aplicar genéricamente a cualquier nube de puntos independientemente del sistema con el que haya sido capturada, sirve de base para elaborar dibujos en formatos más clásicos y simples, como las plantas, secciones o alzados representados mediante líneas, tanto en 2D como en 3D, incluso llegando al detalle «piedra a piedra».
- **Microtopografías y Modelos digitales del terreno o de superficies de alta precisión:** A partir de la nube de puntos registrada, se pueden obtener también modelos digitales del terreno de alta precisión. Los datos pueden ser georreferenciados y vinculados con otros datos adquiridos mediante otros procedimientos topográficos (como Estación Total o GPS). El modelo del terreno puede ser importado a otras herramientas, como los SIG, e integrado con el resto de información cartográfica, documental, etc.

En lo que a Patrimonio Construido se refiere, creemos que las aplicaciones principales de este tipo de registro son:

- **Documentación y Archivo digital:** la información recuperada mediante este registro de gran precisión y detalle opera en sí misma como un mecanismo de documentación y archivo que posibilita la preservación digital del elemento registrado. Este archivo digital es especialmente útil en sitios sensibles o con riesgo de deformación, alteración, etc. ya que garantiza la documentación de detalle de un momento concreto tanto de sitios arqueológicos, edificios, terrenos e incluso mobiliario. Además, cabe la posibilidad de ser manipulado para obtener diverso material gráfico, mediciones e incluso la comparación con mediciones posteriores².

² Los problemas de la creación de archivos digitales no son sólo los de la construcción original del registro (generar la información), sino también los de

- **Registro en 3D** de todo tipo de volúmenes, positivos y negativos: edificios, muros, fosos, agujeros, rocas con arte rupestre, etc. con la posibilidad de ser georreferenciado.
- **Evaluación de problemas estructurales** de los elementos arquitectónicos o arqueológicos en base un registro de alta densidad y precisión.
- **Representación** precisa de volúmenes en planos técnicos en 2D y 3D, creación de superficies y modelados.
- **Reconstrucciones** de sitios, terrenos, elementos arqueológicos o arquitectónicos.
- **Creación de infografías:** se pueden emplear las nubes de puntos como base para la recreación o reconstrucción de ambientes o sitios arqueológicos y arquitectónicos, reproducciones de piezas o simulación de escenas, para obtener imágenes, vídeos, paseos virtuales, etc. en la que representar cómo ha sido un edificio, un paisaje, cómo puede ser con la incorporación futura de elementos, por ejemplo, en un proceso de restauración, etc.

3. PROCESO GENERAL DE TRABAJO

A continuación vamos a presentar los resultados de nuestra experiencia en la documentación de dos edificios por medio de escaneado láser, con la finalidad de ejemplificar dos procesos de trabajo concretos con escáner 3D y sus implicaciones en términos de tiempo/esfuerzo y resultados. Esta experiencia la encaramos como una forma de testar las posibilidades prácticas de uso de esta metodología en unos contextos de trabajo bien definidos por demandas concretas derivadas de las necesidades de los proyectos que se estaban realizando en los edificios.

El proceso de trabajo con el Láser Escáner comienza con la captura de datos en el sitio. Esta primera fase conlleva una planificación previa del trabajo en la que se debe tener en cuenta la finalidad del escaneado y, en consecuencia, la intensidad de la captura. Contra la idea de partida de que la opción óptima es hacer todo el registro con la mayor densidad de puntos de la que sea capaz nuestro escáner, hay que valorar que esto, sin duda,

garantizar su mantenimiento en el tiempo, lo cual involucra una problemática diferente respecto a la conservación de archivos documentales. En este caso el punto crítico no es la preservación física de los objetos que son en sí mismos información, sino la de una información que es potencialmente replicable de forma ilimitada, pero que se pierde por completo cuando no podemos acceder a los formatos de almacenamiento digital en que han sido conservadas. Es importante subrayar esta cuestión que, sin embargo, excede mucho el ámbito temático de este trabajo (y que viene siendo explorada desde hace años, ver p.e. RICHARDS, 2002; JANTZ, GIARLO, 2005).

Tipo de instrumento	Láser escáner de impulsos de alta velocidad, con precisión, alcance y campo visual topográfico completo, con cámara digital integrada de alta resolución.
Campo de visión	360° Horizontal × 270° Vertical
Clase láser	3R (IEC 60825-1), Color verde, visible
Precisión de superficie modelada* / ruido	2 mm, 1 σ
Alcance	300 m @ 90%; 134 m @ 18% de albedo
Velocidad de escaneo	Hasta 4'000 puntos/seg., velocidad máxima instantánea
Resolución de escaneo	<p><i>Tamaño del punto:</i> ≤ 6 mm desde 0-50 m (basado en definición Gausiana)</p> <p><i>Elegible:</i> Selección vertical y horizontal completamente independiente para el espaciamiento de medición de punto a punto</p> <p><i>Espaciamiento entre puntos:</i> Selección horizontal y vertical; 1.2 mm de espaciamiento mínimo, cubriendo todo el alcance.</p> <p><i>Densidad máxima de muestra:</i> 1.2 mm.</p> <p><i>Línea de barrido (horizontal)</i> 20'000 puntos/línea, máximo</p> <p><i>Columna de barrido (vertical):</i> 5'000 puntos/columna, máximo</p>
	*Sujeto a la metodología de modelado para la superficie modelada.

Tabla 1. Especificaciones del Láser Escáner 3D Leica HDS3000 según fabricante.
Más información técnica en <http://www.leica-geosystems.com/>

multiplica el tiempo de captura, a cambio de obtener un nivel de resolución en la información que, en su caso, puede ser muy superior al necesario. Debe valorarse por lo tanto qué grado de precisión es necesaria en función de las necesidades del proyecto.

La base de datos obtenida se compone de una nube de millones de puntos que, aunque se puede usar directamente (tanto para visualizaciones, ortoimágenes, obtención de medidas o captura de secciones), habitualmente será procesada para obtener a partir de ella unos resultados que permitan representar de forma más comprensible el elemento registrado, como son los dibujos en líneas en 2D y 3D, superficies, modelos tridimensionales sólidos, etc.

Hay distintos tipos y modelos comerciales tanto de Láser Escáner como de programas informáticos que condicionan, en cierta medida, el proceso de trabajo o la facilidad con la que se pueden obtener resultados. Los ejemplos que presentamos se han obtenido con el Láser Escáner de Leica HDS3000³ y los programas *Leica Cyclone* y *CloudWorx Pro for AutoCAD* para la toma de datos y post-procesado de los mismos.

Trabajo de campo

En los casos que aquí presentamos, se ha buscado relacionar los datos obtenidos con el escáner con la posición geográfica absoluta de los elementos registrados. Así, ade-

más de emplear un Láser Escáner se ha trabajado con Estación Total Topográfica y con GPS, y relacionando su información, hemos obtenido nubes de puntos con coordenadas X-Y-Z en valores UTM. Esto permite que la base de datos que genera el escáner se corresponda con otro tipo de información cartográfica, bien general, como podría ser la topografía, o, por ejemplo, con la información obtenida en el registro de excavaciones. Con estas herramientas se llevó a cabo el **registro topográfico de alta definición**, destacando de este método el muy buen balance entre la rapidez de la captura de datos y su precisión.

El escáner tiene un aspecto similar al de una Estación Total pero de mayor tamaño. Se sitúa sobre un trípode, aunque también se puede posicionar sobre elementos elevadores que tienen que permanecer fijos (como andamios, pértigas, etc.). Este modelo de escáner se maneja a través de un PC y en este caso, como se apuntó, empleamos el programa *Leica Cyclone*, que permite en primera instancia la captura de datos y su visualización, además de diversas operaciones que posibilitan extraer información directamente de la propia nube de puntos en bruto, el modelado de superficies, etc. La toma de datos con el escáner implica el fotografiado del área a escanear y la medición de puntos, estableciendo en este momento la resolución o densidad de puntos con la que se desea registrar un elemento: ésta se define por sectores, midiéndose la distancia existente entre el escáner y el área a registrar y estableciendo en ese momento la densidad de puntos (por ejemplo, 5 x 5 mm).

³ Hay estudios especializados en relación a la precisión y características de diferentes tipos de escáneres, incluido éste modelo, p.e. BOEHLER *et alii*, 2003.



Fig. 2. Instalación en campo del escáner (Santa Eulalia de Bóveda, Lugo)

Al ser un sistema que documenta una superficie por medio de láser, suele ser necesario **combinar distintas posiciones del escáner**, ya que la presencia de obstáculos visuales (un muro, un mueble o unas columnas) va a impedir que se registre la parte o partes del elemento que quedan ocultas desde la posición del escáner, creando zonas de sombra sin información en la nube de puntos.

Para ir completando esas zonas de sombra es necesario realizar varias posiciones combinadas del escáner, buscando una situación en la que sea visible la zona anteriormente oculta. La presencia de elementos que ocultan otras superficies o el hecho de estar limitados por unas perspectivas muy restringidas de las áreas que se quieren documentar, implica una mayor intensidad en el trabajo de campo, ya que son necesarias más posiciones para abarcar la totalidad del elemento a registrar.

Estos distintos escaneos fueron combinados en un registro único gracias al uso de **dianas de control**, un elemento cuya posición fija es registrada en cada escaneo y que sirve como referencia para combinarlos. Son necesarias un mínimo de 3 dianas de control desde cada posición de escaneo, aunque lo habitual en el caso que presentamos ha sido registrar más de 4 dianas por escaneo, procurando que se encuentren en una posición lo más frontal posible respecto al escáner, ya que una posición oblicua le restaría precisión a la medición, e incluso puede llegar a hacerla inservible.

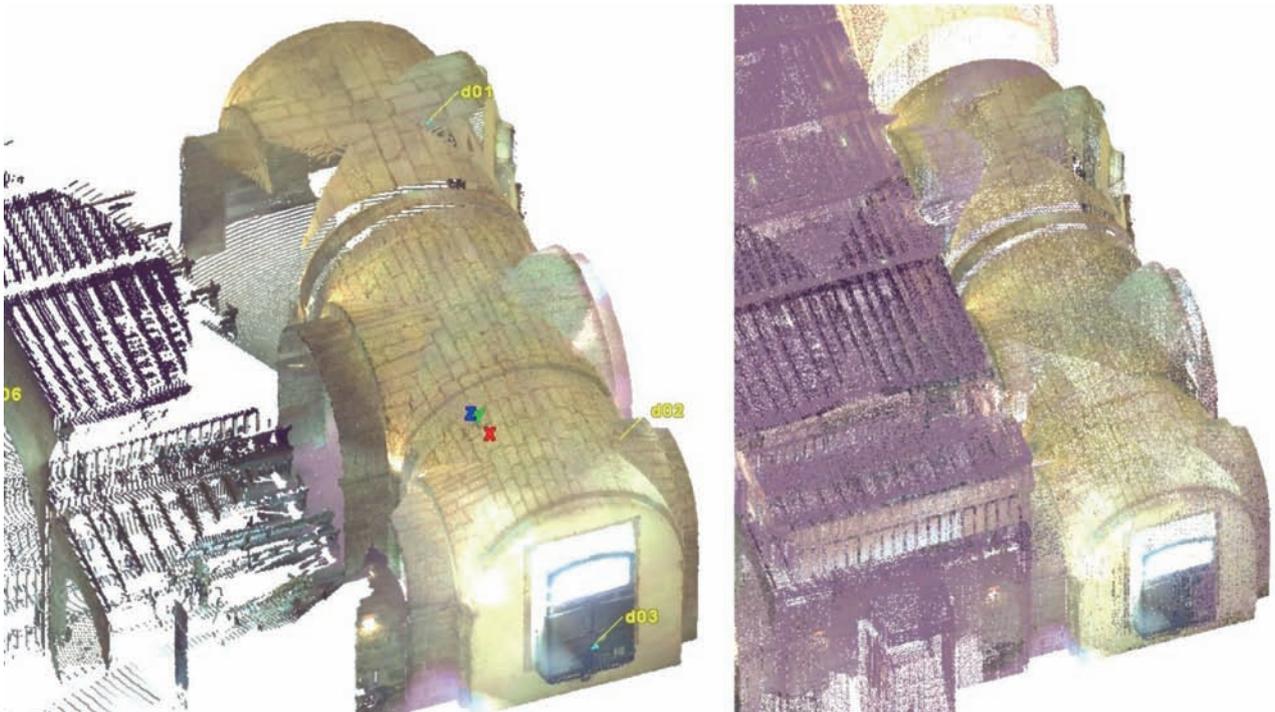


Fig. 3. Izquierda, vista de la nube desde una posición y (en blanco) las sombras que se generan; derecha, vista de la nube completada desde otras posiciones

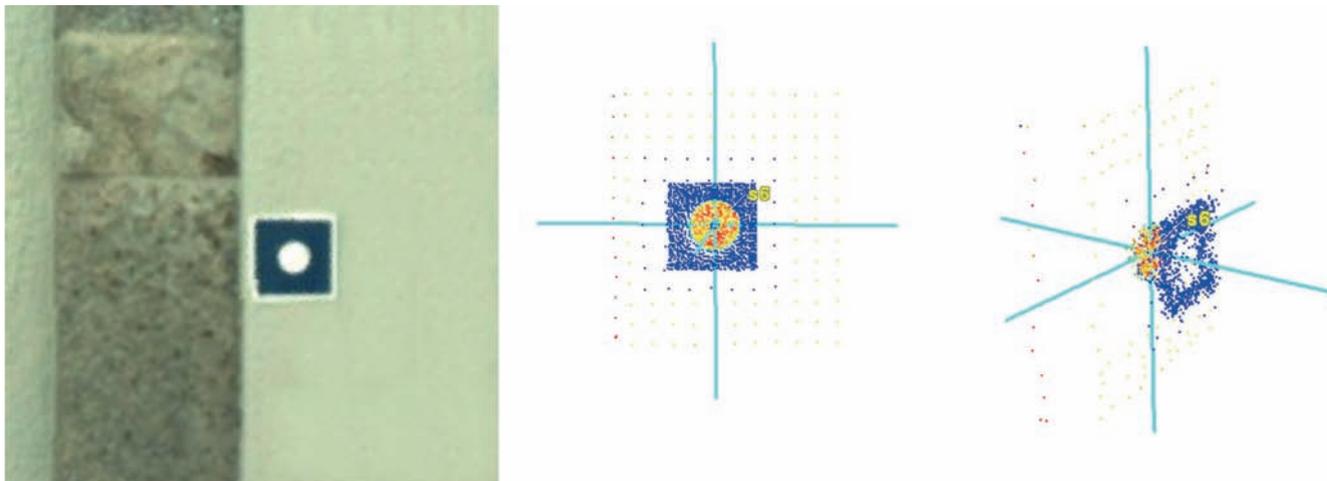


Fig. 4. Detalle de una diana de control y cómo se registra con el escáner⁴

Siendo habitual que los distintos espacios que se escanean no tengan una relación visual directa y no sea fácil que compartan las suficientes dianas de control (por ejemplo entre los escaneados del interior y exterior de un edificio), se ha optado en la mayoría de los casos por establecer una red de bases topográficas⁵ que vincularan todos estos espacios. Es a partir de esta red de bases como se procede a registrar la posición exacta de cada diana de control. Con esto logramos una nube de puntos a partir de los datos de las dianas y en base a ella, procedemos a referenciar el resto de escaneos.

El primer resultado de este trabajo de campo es la obtención de una base de datos formada principalmente por imágenes y **nubes de puntos** que suelen estar compuestas por millones de puntos (así ha sido en los ejemplos que nos ocupan), aunque evidentemente esto depende de la superficie de trabajo y de la densidad con la que haya sido registrada. El archivo que almacena esa base de datos tiene una extensión propia de *Leica Cyclone (.imp)* y gran capacidad de compresión: en el trabajo más intenso de los que presentamos, el de la iglesia de San Fiz de Solovio

(Santiago de Compostela), con unas 18 posiciones de escáner, las fotografías correspondientes desde cada posición y casi 77 millones de puntos, el archivo generado no supera los 2,25 GB.

Procesado de la información y resultados

La obtención de una nube de puntos con esta cantidad de información topográfica ya supone un resultado en sí misma. Respecto a nuestra experiencia previa, en la que los levantamientos y planimetrías de edificios se habían realizado con Estación total y dibujo a mano, se obtiene una reducción significativa de tiempo de trabajo en el sitio y un aumento aún más significativo de la intensidad y resolución del registro volumétrico. Pero además, como ya se ha indicado, uno de los objetivos de la aplicación de este método es conseguir una **documentación y un archivo digital** altamente preciso y detallado sobre el que se puede trabajar y consultar en el futuro, un registro que permitirá, en caso de ser requerido, obtener más información de detalle de elementos sobre los que no ha sido necesario incidir en un momento concreto del proyecto. Cabe resaltar que algo que siempre se ha señalado como un problema (obtener muchos puntos pero no saber qué hacer con ellos) es realmente, en el caso del Patrimonio y desde nuestro punto de vista, tal vez la principal, o al menos la más inmediata ventaja del escáner: aunque no le saquemos de forma inmediata todo el partido posible a estos millones de puntos, obtenemos una base de datos bruta de enorme precisión y detalle, que es en sí un producto altamente útil como tal, sobre todo si pensamos en elementos que puedan cambiar (un edificio que va a ser rehabilitado, una pared que va a ser revocada, una unidad estratigráfica que va a ser elimina-

⁴ Se puede apreciar en la imagen de la izquierda cómo influyen las características de la diana (color, material y forma de la superficie) en la reflectividad registrada por el escáner: los colores oscuros tienen un factor de reflectividad más bajo y por lo tanto, un factor de desviación más alto, por lo que los puntos documentados, a pesar de estar en el mismo plano, se registran a una distancia errónea y causan residuos. Otro factor que influye es el ángulo de incidencia de la señal: en este caso, el escáner fue colocado en una posición perpendicular a la diana, con un ángulo de incidencia directa por lo que se obtiene una mejor reflectividad que si están en un ángulo más oblicuo. Son aspectos que influyen en el registro en general y de amplio análisis en la bibliografía centrada en la precisión de los escáneres (p.e. BOEHLER *et alii*, 2003).

⁵ Las primeras bases se establecen por medio de GPS de alta resolución, y posteriormente, a partir de ellas, se posicionan otras con estación total, sobre todo en el interior de los edificios.



Fig. 5. Vista de elementos que obstruyen el objeto a registrar: el rastro que dejan personas pasando

da) o incluso desaparecer con el tiempo (el registro en excavación) ⁶.

Una de las primeras fases de procesado de las nubes de puntos es la **unión de los distintos escaneos** que, en nuestro caso, se ha hecho empleando el programa de *Leica Cyclone* y trabajando, como apuntamos, dentro de un sistema de coordenadas absolutas. La presencia de elementos que interfieren al objeto registrado, como vegetación, transeúntes, mobiliario, cableado, etc., se puede eliminar de la nube de puntos a través de un proceso de depuración manual y controlado, con lo cual se excluyen elementos que pueden llegar a distorsionar los resultados de representación.

El programa permite la selección de partes concretas de la nube de puntos y sobre ella, obtener secciones o plantas de manera muy ágil, así como imágenes en perspectiva, ortoimágenes, vídeos, etc.

⁶ Este beneficio, que también se obtiene por medio del otro procedimiento principal de documentación geométrica tridimensional como es la fotogrametría, requiere evidentemente implementar los protocolos necesarios para asegurar la legibilidad futura de esa base de datos; como, por otra parte, ocurre con cualquier otro método de generación de información digital. No obstante, como apuntamos en una nota anterior, este tema no es el objeto primordial de este trabajo.

Es posible triangular la nube de puntos y crear mallas que representan las superficies del elemento documentado y que permiten una analítica y una visualización de mejor calidad que las que se pueden obtener directamente sobre la nube de puntos. También se puede mejorar la visualización rectificando fotografías obtenidas desde otros soportes sobre los modelos digitales, tanto de superficies como de nubes de puntos.

Para obtener un dibujo con un formato más común (como un DWG de AutoCad, por ejemplo) es necesario el uso de un plug-in (el *Leica Cloudworx* en este caso) que permite manejar ágilmente en un entorno Cad estas nubes con millones de puntos. Así, se pueden crear dibujos en líneas en 2D y 3D que representen, desde los elementos principales de un edificio hasta los detalles, tanto en planta como secciones, alzados, lo que, a día de hoy y a falta del desarrollo de procedimientos automáticos o semi-automáticos de detección de bordes, superficies, etc., todavía supone un trabajo manual muy intenso.

Además, como la captura de datos se basa, entre otros factores, en la capacidad de refracción-absorción de los materiales sobre los que rebota la señal láser, es posible llegar a analizar la diferenciación entre materiales según el nivel de absorción registrado (ALMAGRO, 2008), lo que ha



Fig. 6. Dibujo en AutoCad con el programa Cloudworx de los volúmenes generales de una estructura sobre una nube de puntos visualizada a baja densidad

permitido, en nuestro caso, detectar y delimitar la presencia e incidencia de líquenes, algas e incluso humedad sobre estos materiales.

La principal problemática actual en el uso de esta metodología de registro es que frente a una captura de datos muy eficaz y rápida, su procesado es complejo, y para obtener unos resultados óptimos es necesario invertir mucho trabajo, ya que el dibujo de elementos concretos como líneas o superficies (por ejemplo en AutoCad) es básicamente manual y la creación de superficies a partir de estos puntos conlleva ciertas dificultades, ya que los elementos registrados suelen ser muy irregulares y no resulta idóneo cualquier algoritmo de triangulación (ARAYICI, 2007; MONSERRAT, CROSETTO, 2008; ROCA-PARDIÑAS *et alii*, 2008). La actual investigación en este campo parece girar en torno a cómo procesar esta información de una manera ágil y lo más automatizada posible (ver LICHTI *et*

alii, 2008; BUCKSCH, LINDENBERGH, 2008) pues nos encontramos ante un archivo digital, la nube de puntos, difícilmente manejable salvo por programas específicamente diseñados para ello y que requiere de una gran inversión de trabajo por parte de técnicos especialistas para obtener cierto tipo de resultados de ellas.

4. PROCESOS CONCRETOS DE TRABAJO:

STA. EULALIA DE BÓVEDA Y S. FIZ DE SOLOVIO

Los levantamientos de construcciones históricas que mostramos están directamente vinculados con los proyectos que desarrolla la *Unidade de Arqueoloxía da Arquitectura* del *LaPa*, planteándose este registro como el apoyo documental y gráfico al trabajo que desarrolló dicha unidad en los procesos de identificación de la evolución constructiva de los edificios, fundamentalmente a través de la lectura estratigráfica de alzados, el estudio crítico de las fuentes

documentales u otras metodologías específicas de la Arqueología de la Arquitectura⁷.

En el caso de ambos edificios, era necesario hacer el registro en detalle del volumen real de los mismos que permitiera obtener la representación en 3D de su arquitectura, el dibujo en líneas de sus alzados, secciones y plantas, llegando en algunos casos al detalle de dibujo «piedra a piedra», así como un soporte sobre el que plasmar el resultado de las investigaciones o las reconstrucciones hipotéticas de las fases constructivas identificadas.

Santa Eulalia de Bóveda (Lugo)

Es un edificio emblemático de Galicia, declarado Bien de Interés Cultural en 1931 que, según algunos autores, sus orígenes se remontan a la tardorromanidad (MONTENEGRO *et alii*, 2008)⁸.

En la actualidad conserva una planta inferior que se compone de un aula abovedada soterrada, precedida de un nártex y un atrio (todos estos espacios ocupan menos de 100 m², siendo la superficie de la estancia principal, el aula, de unos 45 m²), y los indicios de una planta superior reflejada en los restos del alzado Norte.

Interesaba de partida obtener un registro en detalle de las distintas partes del edificio y documentar cómo se vinculaban éstas entre sí (BLANCO-ROTEA, BENAVIDES, 2008). La presencia en el aula de varias columnas y una piscina hizo que hubiera que situar el escáner en 5 posiciones dentro del aula para obtener la totalidad de la superficie. El acceso al nártex se hace por medio de unas escaleras y el espacio frente a él es estrecho, por lo que en esta zona también hubo que posicionar el aparato en dos sitios. En total, se realizaron un total de **15 posicionamientos** en los distintos sectores del edificio (interior y exterior), realizándose los barridos o escaneos a una resolución de 5 x 5 mm, resolución que aumentamos a lo máximo que permite este modelo de Láser Escáner (2 x 2 mm) en algunas zonas concretas⁹. Aunque las capturas de cada escaneo se han realizado a una resolución de 5 x 5 mm, al unir las nubes de estos posicionamientos, se ha logrado, en muchas partes del edificio, una mayor densidad de puntos que la establecida en la captura.

Hubo zonas del edificio a las que no se podía acceder

⁷ Para el desarrollo de estas metodologías ver: MAÑANA, BLANCO, AYÁN (2002), BLANCO-ROTEA (2001, 2005).

⁸ El escaneado de Santa Eulalia se llevó a cabo en el marco del último proyecto de consolidación y restauración (2006-2007) que ha financiado la *Dirección Xeral de Patrimonio Cultural, Consellería de Cultura e Deporte de la Xunta de Galicia* (en adelante DXPC) y que ha sido realizado por el arquitecto César Portela (MONTENEGRO *et alii*, 2008).

⁹ Esta intensidad se empleó sobre todo para registrar los bajorrelieves.



Fig. 7. Detalle de la nube de puntos de uno de los escaneos en el aula. Para realizar este trabajo se necesitaron **4,5 días** de registro en campo, obteniendo una base de datos compuesta por más de 50 millones de puntos

fácilmente (como la cámara bufa), por lo que para obtener un levantamiento completo, los datos de la nube de puntos se ha complementado puntualmente con datos tomados con otros métodos, fundamentalmente medidas con cinta métrica.

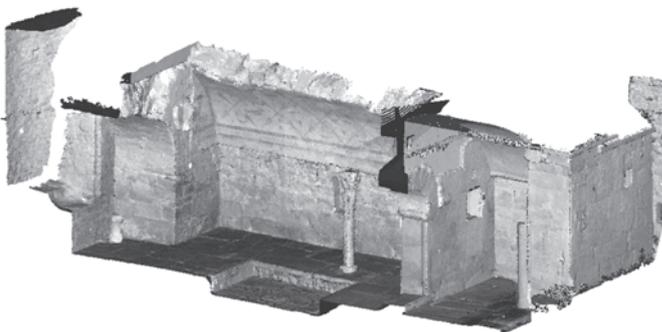


Fig. 8. Detalle de la nube de puntos de toda la parte inferior del edificio, mitad Norte

Además del escaneado, dentro del proyecto la DXPC había solicitado también el dibujo en líneas de todo el edificio y de los elementos del entorno, que incluía el volumen general del conjunto y el dibujo piedra a piedra del enlosado del aula y nártex, para lo cual se invirtieron 20 días de trabajo de post proceso de 1 técnico. Una vez valorados los resultados obtenidos, se nos solicitó también el dibujo de la totalidad del edificio con detalle «piedra a piedra», lo cual se pudo extraer directamente de la nube ya registrada. Debido a la intensidad de captura de puntos, la gran parte de los límites de las piedras en la nube se detectaban sin problemas para el dibujante, siendo más fácil la detección de los bordes de los sillares, que en este caso tienen las juntas remarcadas, que las de los mampuestos, más irregulares. El hecho de encontrarse los muros con un relleno de color muy dife-

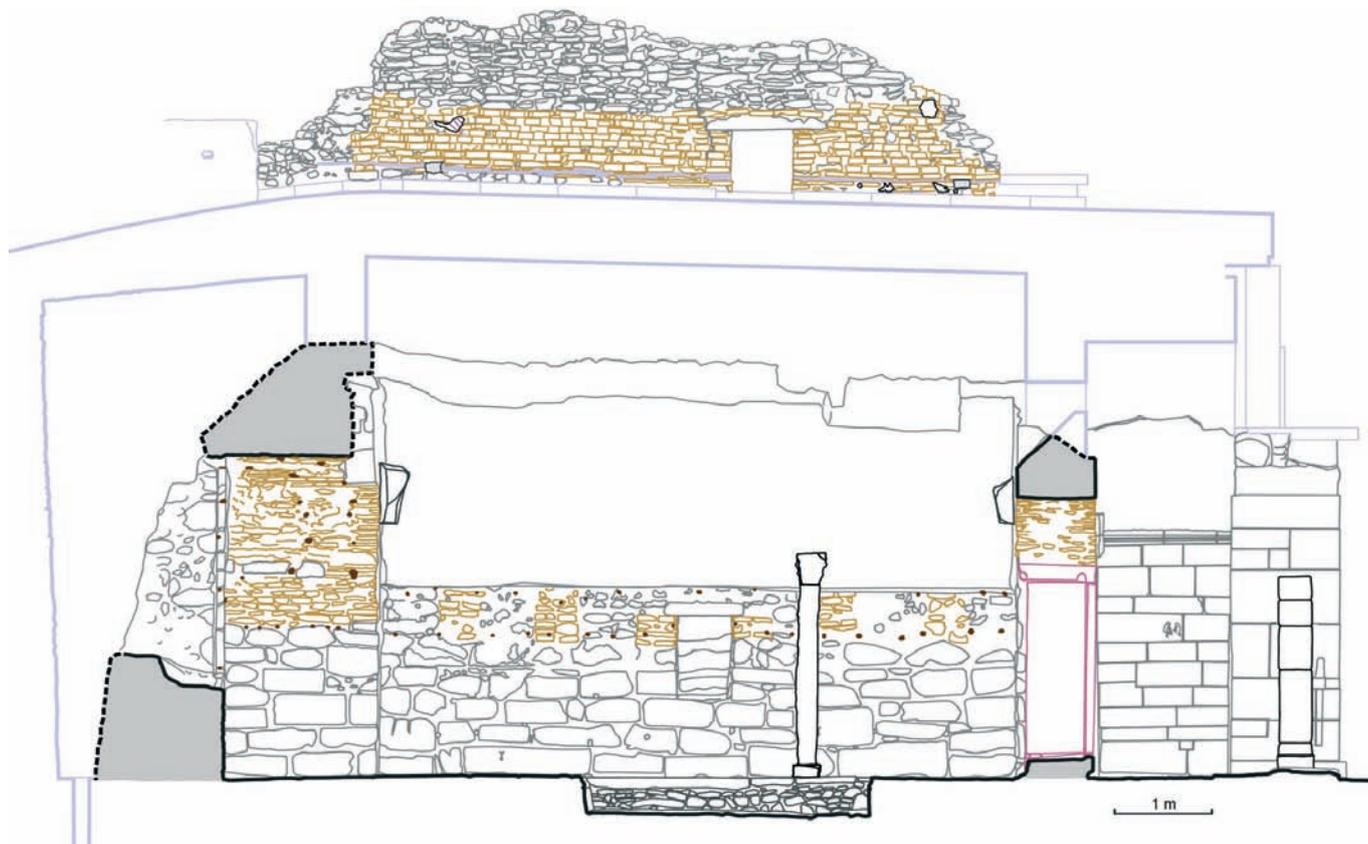


Fig. 9. Alzado N en AutoCad

rente a la piedra, ayudó a la definición de los bordes de los materiales, tanto cuando la nube de puntos se visualizaba en relación al color captado en las fotografías como con otros rangos de colores que se relacionan no con la fotografía sino con datos como la reflectividad del propio punto medido. Además, para guiar el dibujo ha sido fundamental la ayuda de un buen reportaje fotográfico en el cual poder apreciar detalles que no se perciben con claridad en la nube. Esta intensa tarea ha supuesto 20 días más de trabajo. Para este trabajo concreto, el dibujo «piedra a piedra», los datos del escáner no proporcionan una exactitud mayor que otros procedimientos más sencillos, como el dibujo directo con estación total, por ejemplo. La principal ventaja en este caso es obtener un producto secundario (no programado en origen) dentro del flujo de trabajo de este proyecto a partir de una única base de datos original, sin necesidad de hacer nueva toma de datos en campo, ni de interferir en el proceso de rehabilitación arquitectónica del edificio.

Como ya se comentó, uno de los resultados que se puede obtener directa y rápidamente de la nube de puntos son las **ortoimágenes**: al visualizar frontalmente la nube de puntos correspondientes al plano a representar, por ejem-

plo un paramento, y al ser la base de esta visualización puntos con medidas absolutas, se puede obtener una imagen en la que todo el paramento está representado sin deformaciones y con validez métrica. El resultado es similar al que se obtiene empleando procesos de rectificación de imágenes, y sobre esta ortoimagen se pueden hacer mediciones, dibujos y otro tipo de representaciones y operaciones. Es especialmente útil en sitios en los que la perspectiva sobre el paramento es muy angosta y que necesitaría gran cantidad de imágenes parciales o muy deformadas para obtener una ortoimagen completa. También se pueden extraer perfiles, plantas, secciones como ortoimágenes y, por lo tanto, con validez métrica, siendo posible insertar una escala o malla de referencia.

La calidad visual de la ortoimagen, su aspecto (nos referimos a la textura del objeto representado, a la definición de los bordes de los elementos, etc.), depende en gran medida de la fotografía de partida que hemos logrado con el escáner y de la intensidad de la nube de puntos. Hay casos en los que, por ejemplo, el tiempo de escaneado se dilata y la luz incide de distinta manera en el muro o, en otros casos, la fotografía obtenida con el escáner no tiene un color adecuado (el color de cada

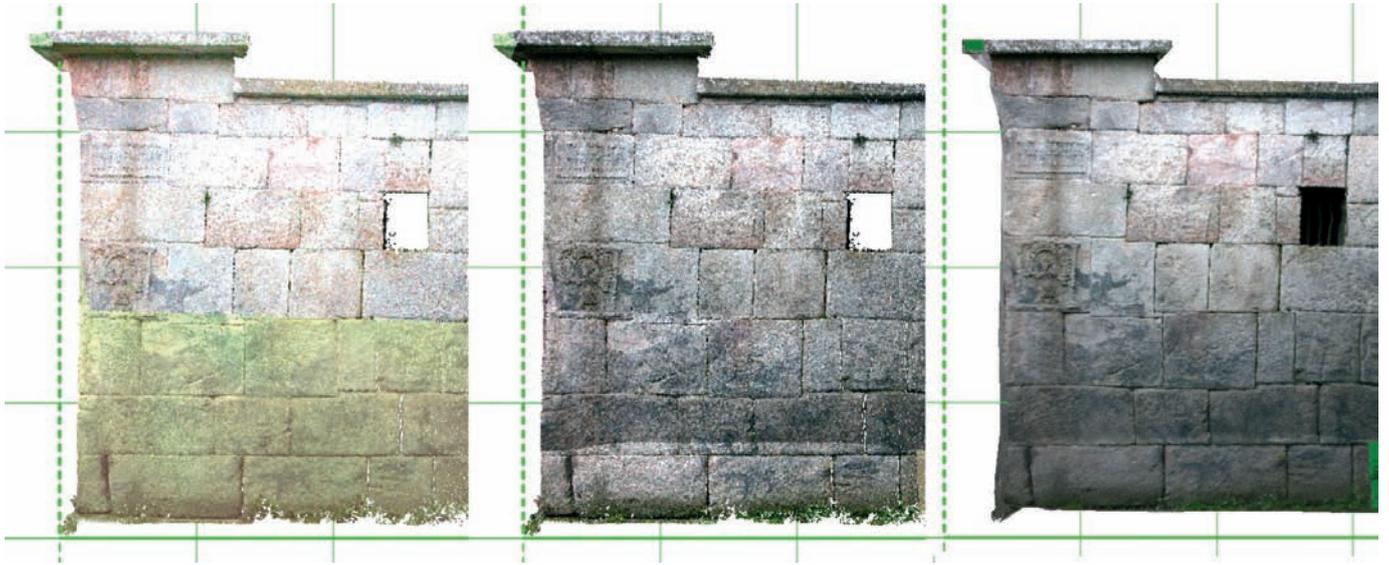


Fig. 10. Ortoimagen de la fachada Oeste del Nártex sobre nube de puntos con imagen del escáner (izquierda), con imagen rectificadas sobre la nube (centro) y sobre malla triangulada con imagen rectificadas (derecha). La retícula es de 1 x 1 m

píxel de la fotografía es el que luego se aplica en la nube de puntos) lo cual empeora la calidad final de la ortoimagen. Con todo, la pérdida de calidad visual se debe fundamentalmente a que al ser **una visualización sobre puntos** y no sobre una imagen no llega a adquirir alta definición pues, como sucede con la pintura impresionista, al acercarnos al objeto se desdibuja el contorno de los elementos registrados, por lo que, si lo que necesitamos es la ortoimagen de un detalle, ésta no presenta gran calidad; en cambio, para grandes superficies, el resultado es muy satisfactorio.

Con la intención de mejorar este tipo de producto hemos empleado 2 técnicas. La más básica es la edición de la ortoimagen en un programa de tratamiento de imágenes, rectificando color, saturación o mejorando el aspecto de la textura. La segunda, que aunque es más laboriosa permite alcanzar un mejor resultado, es incorporar fotografías de buena calidad obtenidas con otros soportes, como cámaras digitales, a la nube de puntos o a la malla de la superficie que se quiere representar. El programa *Leica Cyclone* permite importar imágenes y vincularlas a los datos existentes mediante un proceso de rectificación de esa imagen. Con esto se logra uniformizar los tonos de color y se mejora el aspecto final. Si esta superposición se realiza además sobre una malla, al visualizarse una superficie y no puntos, realmente se logra conformar una ortoimagen, con la que se puede alcanzar gran nivel de detalle.

Finalmente, además del levantamiento del conjunto de Santa Eulalia, se decidió realizar el escaneado de los

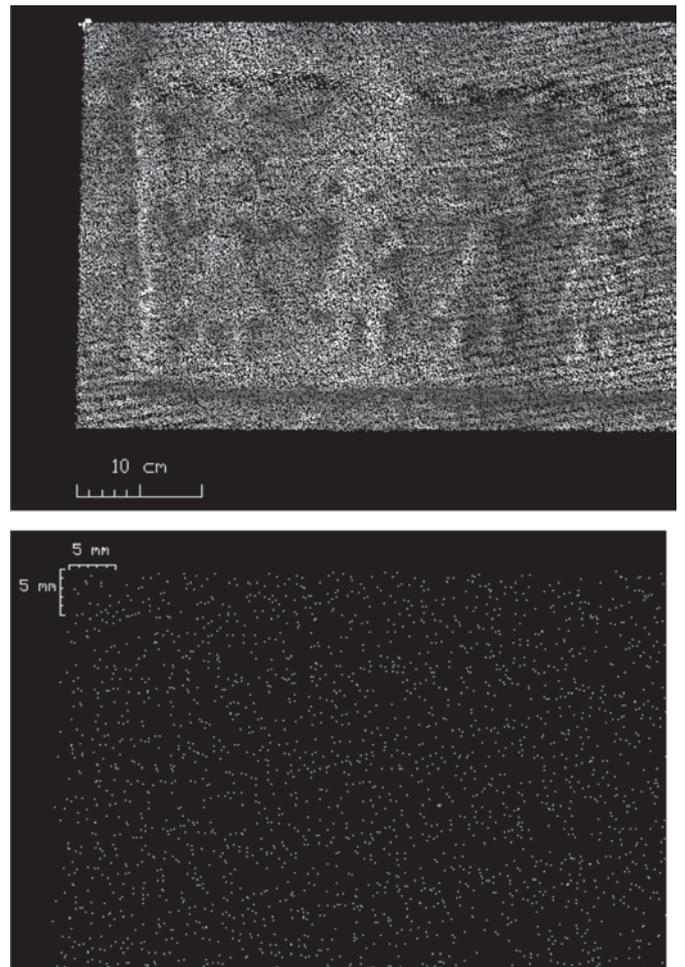


Fig. 11. Detalle de la nube de puntos de uno de los bajorrelieves visto entorno AutoCad; abajo, un detalle de la esquina superior izquierda donde se aprecia la densidad de puntos, con escala de referencia de 5 mm

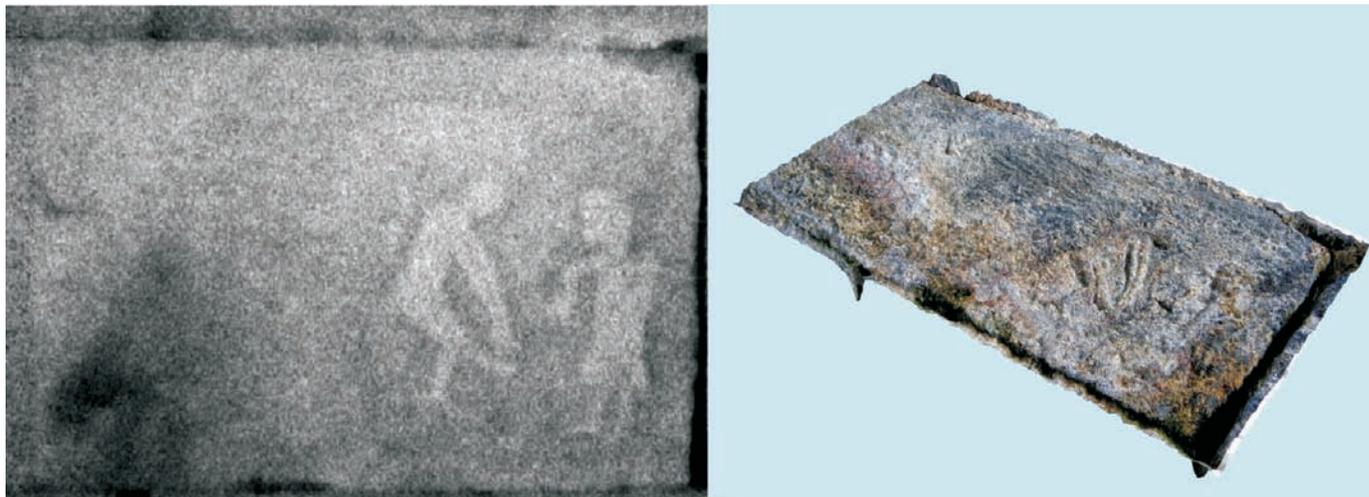


Fig. 12. Dos vistas del MDS del «grabado de los lisiados», el de la derecha con la imagen superpuesta y girada

bajorrelieves presentes en la fachada E del aula y los alzados y fachada del nártex, aprovechando la densidad de puntos obtenida en estas zonas de 2 x 2 mm y que cada uno se había registrado desde más de una posición.

En base a la nube de puntos obtenida se han hecho una serie de Modelos Digitales de la superficie de alguno de los bajorrelieves para intentar enfatizar las superficies que fueron grabadas frente a las que no lo están. Así, empleamos ArcGIS para crear primero una superficie en base a la triangulación de los puntos (TIN) y varios modelos de su superficie (modelo de elevaciones raster, modelo de orientaciones) que resaltarán los bordes de los elementos representados. Con este método se ha obtenido un resultado que refleja mejor la superficie grabada y permite una más clara visualización de las figuras que lo componen. Al emplear un método uniforme en toda la superficie, se intenta evitar la subjetividad habitual en este tipo de representación para identificar los contornos de figuras poco marcadas.

Una vez obtenida toda esta información topográfica del edificio se ha podido recuperar la volumetría real actual del mismo, lo cual permite analizar ciertos aspectos de tipo estructural como las deformaciones producidas en la bóveda que cubría el aula o en los restos de los enjarjes de los arcos con los muros de la cabecera y el ábside. Por otro lado, a partir de estos datos se ha podido reconstruir la geometría de la bóveda del aula y del piso superior o de las arcadas que dividían en tres naves el aula. Finalmente, aunando estos datos y con la información estratigráfica recuperada a través de la lectura de alzados, se ha realizado la reconstrucción hipotética de las fases constructivas principales identificadas en el edificio.

Iglesia de San Fiz de Solovio (Santiago de Compostela, A Coruña)

La iglesia de San Fiz de Solovio se emplaza en el casco histórico de Santiago de Compostela, al sur del Mercado de Abastos. Durante el último año se ha llevado a cabo un estudio de la evolución constructiva del edificio, a través de la lectura estratigráfica de paramentos y del análisis de la documentación histórica (BLANCO, 2005), además de la documentación geométrica de alta definición¹⁰.

En este caso, nos planteábamos documentar el edificio tanto exterior como interiormente, con el objetivo de lograr un registro de toda la estructura y sus elementos principales, intentando emplear el menor número de posiciones y en el menor tiempo posible. El edificio tiene una nave principal, con un coro alto a los pies, dos naves laterales, dos capillas y dos estancias más que sirven como sacristía y almacén, además de un ábside de planta cuadrangular y un campanario al que se accede desde el coro alto. En el exterior la fachada principal del edificio está volcada a una calle, la fachada Sur a una plaza y el lateral Norte se encuentra cerrado con un callejón que mide entre 1 y 2,50 m de ancho. La cabecera de la iglesia tiene adosadas varias edificaciones, por lo que no es fácilmente visible. Se planteó establecer una posición por cada espacio principal del interior de la iglesia, mientras que en el exterior se buscaron perspectivas desde donde se viera la mayor superficie de edificio posible. En todos los casos, estacionamos el escáner sobre trípode en el suelo, aunque

¹⁰ En el marco de nuestra participación en el proyecto de desarrollo de un Sistema de Información Patrimonial para la ciudad de Santiago, promovido por el Consorcio de la Ciudad de Santiago y dirigido por el Centro Nacional de Información Geográfica.



Fig. 13. Detalle de la nube de puntos de uno de los retablos de San Fiz



Fig. 14. Detalles de la malla de las figuras del tímpano, en la derecha, con fotografía rectificada superpuesta

en el exterior buscamos las posiciones más elevadas posibles para tratar de registrar la mayor superficie visible del tejado.

En este caso, la red de bases topográficas empleada se relacionó con la red de bases topográficas de la ciudad de Santiago. Se ejecutaron un total de 18 posiciones del escáner, escaneando los paramentos y suelos con una resolución de 5 x 5 mm en cada escaneo. Algunos elementos fueron escaneados a la máxima resolución que permite el escáner (2 x 2 mm), como el retablo de una de las capillas laterales o las imágenes del tímpano de la fachada principal.

Con la combinación de estas posiciones se logró el registro casi total de los espacios del interior de la iglesia

que son accesibles, exceptuando las zonas localizadas entre el artesanado de madera y las bóvedas (aunque se puede acceder a ellas, el paso es muy angosto), la escalera de subida al campanario y al coro desde la entrada principal, así como algunos detalles como ciertos quiebros en los paramentos y pilares o algunos remates superiores de las molduras. Todas estas áreas no eran visibles colocando el Escáner a 1,50-1,70 m del suelo ni desde las posiciones centrales de las naves y estancias. En el exterior el registro cubrió completamente los alzados Norte, Oeste y Sur, aunque no ha sido posible registrar la mayor parte de la superficie del tejado, algunos canchillos (los del extremo Noreste), la mitad Este del campanario o gran parte de la cabecera del edificio al que se adosan varias parcelas edificadas¹¹.

El trabajo de campo se llevó a cabo en 7,5 jornadas, lo que incluye tanto el tiempo de captura de datos con el escáner como lo necesario para su georreferenciación en coordenadas absolutas. En total se han logrado un registro

con casi 77 millones de puntos con coordenadas X-Y-Z con posición absoluta, incluyendo un registro fotográfico en detalle desde cada posición (18 posiciones).

Tras esta fase, se procedió a la unión de los distintos escaneos hasta lograr una nube de puntos completa del edificio. En este caso se requería también el dibujo de líneas de los elementos principales para obtener plantas, alzados, secciones y perspectivas. Se ha dibujado en Auto-Cad en 3D para obtener la volumetría completa y relacionada de todo el edificio, lo cual supone una mayor

¹¹ Para lograr el registro de estas partes ocultas a simple vista desde el nivel de suelo, sería necesario haber situado el escáner en unas posiciones elevadas que sólo se podrían lograr con medios auxiliares, como andamios, grúas, etc., de los que no disponíamos.

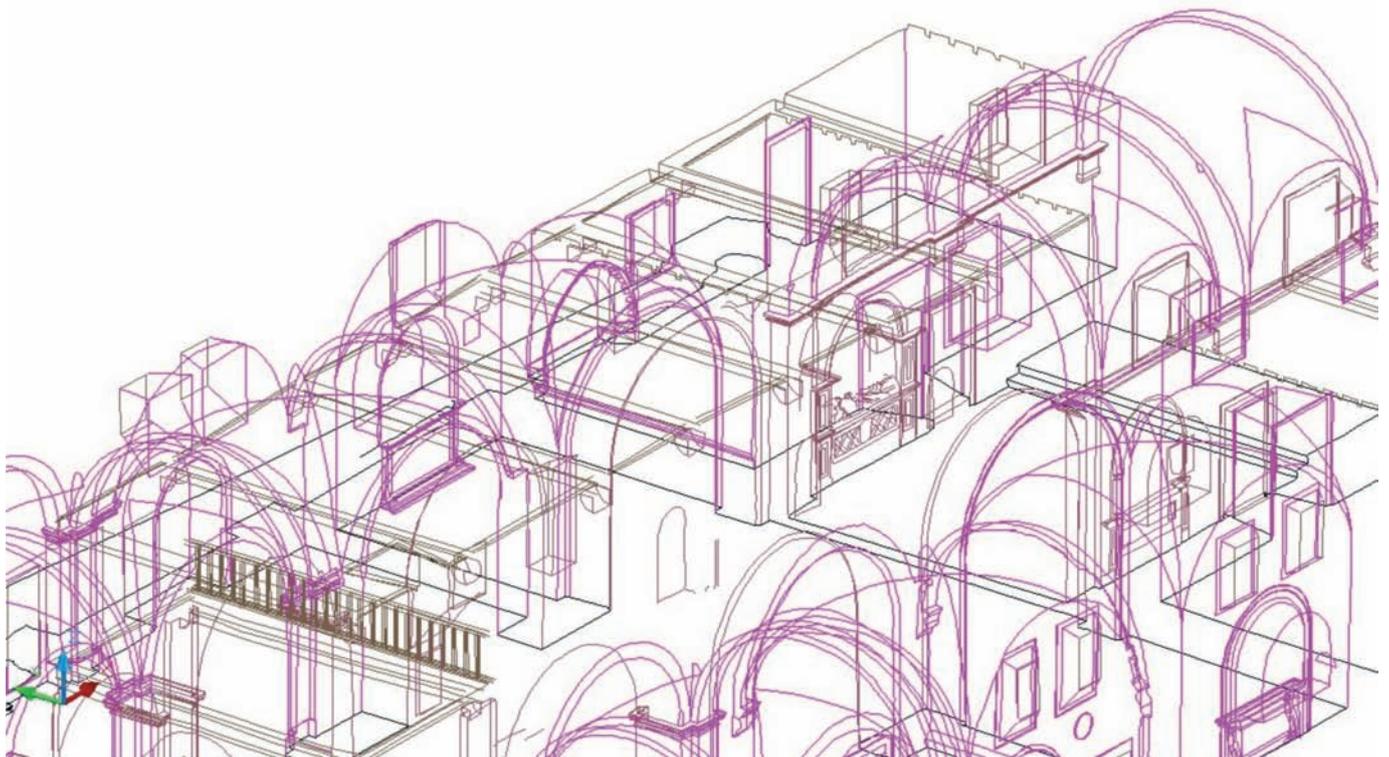
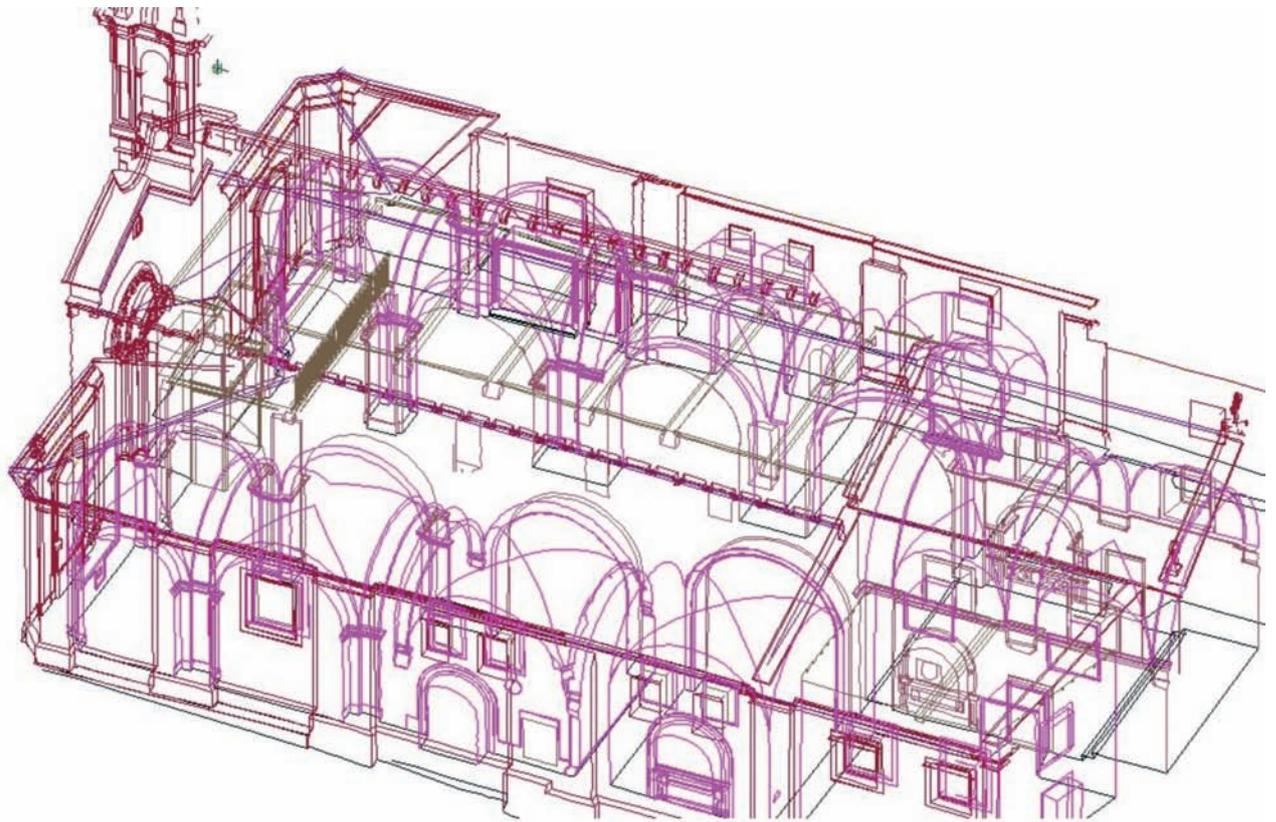


Fig. 15. Vistas tridimensionales de la estructura alámbrica de San Fiz dibujada en AutoCad a partir de la nube de puntos

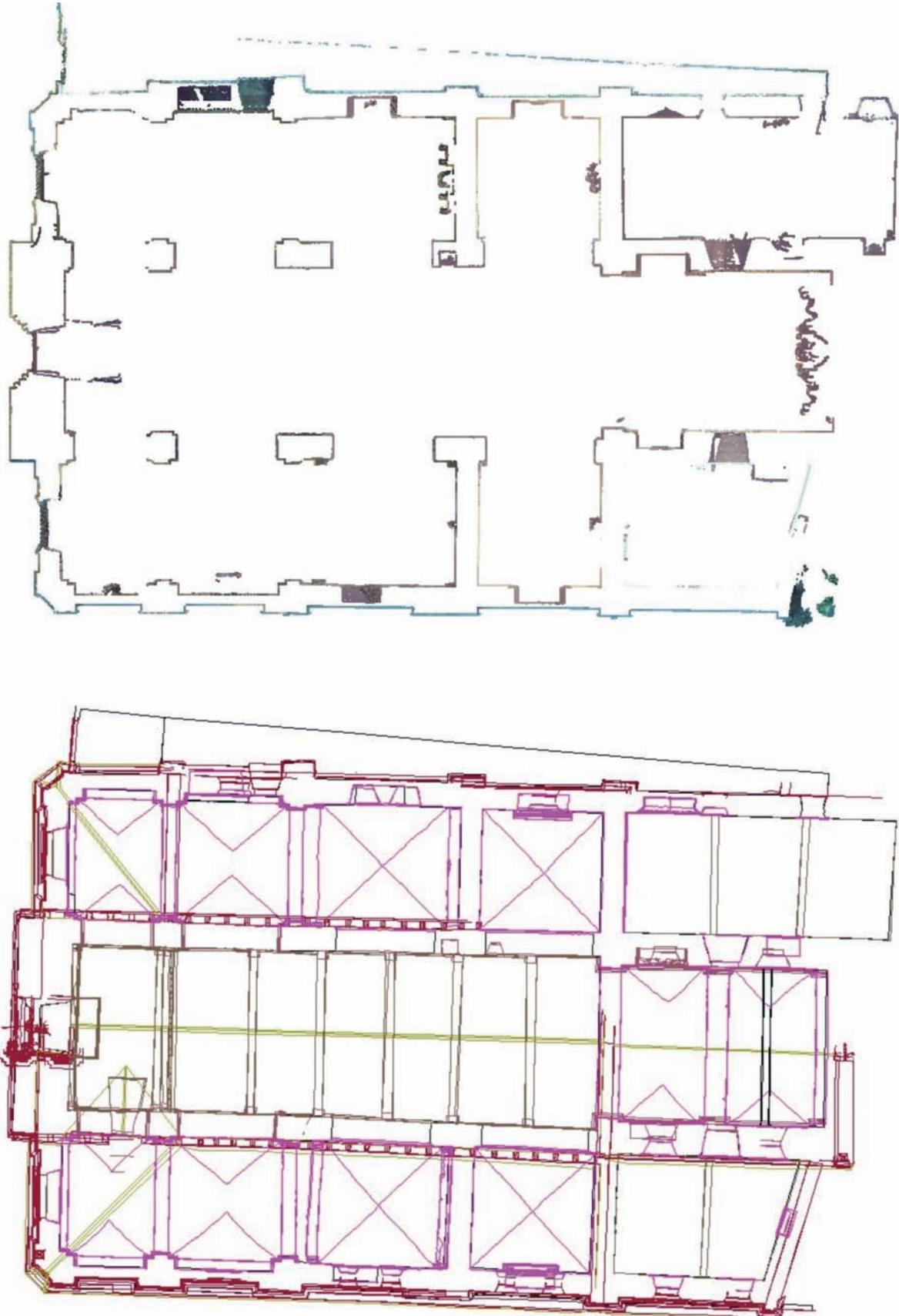


Fig. 16. Plantas de San Fiz, arriba extraída directamente de la nube de puntos, abajo tras su elaboración en AutoCad

inversión de trabajo que si se restringe a dibujos en 2D; este proceso ha supuesto la dedicación de un técnico durante 55 días.

Como en el caso anterior, ha sido posible extraer ortoimágenes tanto de plantas, secciones como de alzados, imágenes en perspectiva, así como detalles de algunos elementos, como la composición de figuras de la portada o la de un retablo menor.

5. VALORACIÓN Y PERSPECTIVAS

Tal y como se comentó al principio de este texto, la intención de este artículo era mostrar nuestra experiencia en el uso del escáner en el registro del patrimonio construido, algunas implicaciones prácticas de su uso y la relación entre tiempo/esfuerzo invertido y resultados obtenidos. Las ventajas son notables respecto los métodos que habíamos empleado con anterioridad (Estación total, dibujo a escala con medidas de cinta métrica), especialmente en términos de la agilidad de la captura de los datos en campo y la definición y detalle del registro obtenido, pero también en los propios productos que se obtienen de manera directa de este uso, en la rentabilidad a nivel de análisis de este registro y los productos finales que se pueden presentar. Sin embargo, también presenta algunas desventajas frente a otros métodos que conviene exponer para transmitir un balance más ajustado de las implicaciones del uso de esta herramienta.

Empezaremos exponiendo la problemática que presenta el uso del Láser Escáner 3D. La experiencia acumulada en este año indica que el paso inicial, la planificación previa que permita valorar la cantidad de posiciones que será necesario establecer para obtener el registro de la totalidad del objeto a la resolución que es necesaria según los objetivos del proyecto, resulta necesariamente crítico, de forma que se puedan prever, por ejemplo, los recursos prácticos necesarios para eliminar las zonas de sombra a las que se hizo mención más arriba, pudiendo ser necesario incluso el uso de medios auxiliares como plataformas elevadoras. Creemos que es un objetivo imprescindible obtener una toma de datos lo más completa posible pues, si por agilizar la toma de datos en campo se ahorra en posiciones, el modelo será incompleto. Con todo, la planificación de la complementariedad de las distintas vistas permite una mejor captura de datos.

Una cuestión que puede aumentar el tiempo de toma de datos en campo es el relacionado con las condiciones de iluminación del sitio. Éste puede ser un factor importante tanto para una mejor visualización del elemento registrado como para obtener una mayor calidad en las ortoimágenes,

así como para analíticas que se basen en estas propiedades, por lo que dentro de la planificación hay que valorar si existe la necesidad de tomar las fotografías del escáner con iluminación artificial, ya que este proceso suele implicar un tiempo significativo dentro del propio escaneado.

Además, en función de los objetivos del proyecto en cuestión y de la finalidad que se persiga con el escaneado, será necesario valorar la resolución de captura. Como ya se comentó, en Santa Eulalia de Bóveda se empleó para el volumen general del edificio una resolución de 5 x 5 mm, con la que se podían dibujar todas las piezas que lo conforman de manera pormenorizada; sin embargo, para documentar realidades de mayor detalle, como los bajorrelieves, fue necesario aumentar la resolución a lo máximo que permite este modelo de escáner (2 x 2 mm) documentando así los surcos que formaban los grabados con mayor densidad¹². Evidentemente, cuanto mayor sea el número de posiciones necesarias y mayor la resolución, aumentará también el tiempo de captura de puntos en campo y, en consecuencia, el tiempo que habrá que invertir en gabinete (tanto para la unión de escaneos como para el tratamiento de la nube de puntos).

De la misma manera, si el producto final que se desea obtener es un dibujo de líneas del contorno de los volúmenes que conforman el objeto, habrá que invertir menos tiempo, tanto en la pura toma de datos como en su post-procesado, que si se dibujan individualmente todos los materiales, grabados, surcos, etc.

Volviendo al ejemplo anterior, en Santa Eulalia de Bóveda, se registraron con distintos métodos los restos del alzado N de la bóveda del piso superior (dibujo manual a escala; Estación Total Topográfica con una resolución de 10 x 10 cm; y Láser Escáner 3D con una resolución de 5 x 5 mm), con la intención de poder comparar los tiempos y el equipo que había que invertir con cada uno de ellos.

Como se puede apreciar en la Tabla 2, cuanto mayor sea la complejidad de la herramienta empleada menor es el tiempo de captura de datos en campo, pero aumenta el tiempo de procesado de los datos en gabinete para obtener una representación del objeto en líneas 2D ó 3D. Sin embargo, la ventaja no es sólo la reducción del tiempo de trabajo de campo sino la mayor variedad de productos finales que se pueden obtener, entre ellos la posibilidad de

¹² En este caso, decidimos realizar una experiencia con este modelo de escáner para ver el resultado de su aplicación en zonas que requerían un mayor detalle en la captura de datos. Aunque el resultado no es óptimo, puesto que existen otros modelos de escáner con una resolución mayor y otras técnicas de registro más apropiadas, nos ha permitido realizar un tratamiento de esta información y extraer unos resultados suficientes para el proyecto en cuestión.

Método de Registro	Trabajo de Campo			Trabajo de Post-Proceso			Resultados
	Equipo	Horas	Instrumentos /Programa	Equipo	Horas	Instrumentos	
Dibujo Manual a escala	1 técnico	40 h	Nivel, plomada, cinta métrica	1 técnico	8	Tableta digitalizadora, AutoCad 2D	Dibujo en 2D detalle "piedra a piedra"
Estación Total Topográfica Leica TCRP1203	1 técnico	5 h para UE + 9 h barrido	Estación, trípode	1 técnico	12	Leica Geo Office, AutoCad	Nube de puntos, para dibujo en 3D del volumen general y contorno UE
Láser Escáner 3D Leica HDS3000	1 / 2 técnicos	2 h desde 4 posiciones distintas	Estación, Escáner, trípodes, baterías, PC, <i>Leica Cyclone</i>	1 técnico	20	<i>Leica Cyclone</i> , <i>Leica Cloudworx</i> (plug-in para AutoCad), AutoCad 3D	Nube de puntos, ortoimágenes, dibujo en 3D: contorno y detalle "piedra a piedra"

Tabla 2. En esta tabla se comparan los tres métodos de registro empleados en Sta. Eulalia de Bóveda aplicados al mismo objeto (los restos de la bóveda superior) que generan resultados distintos. El dibujo «piedra a piedra» indica que se dibujaron todos los materiales que componían la bóveda, el alzado interior, las jambas de la ventana y secciones (1 en el dibujo manual)

representar tridimensionalmente el objeto. Otro factor a favor del Escáner es que, con un registro bien planificado se evitan posteriores salidas al campo. Es habitual que con métodos topográficos como la Estación, una vez que se están procesando los datos sea necesario ampliar la información registrada o representar algún elemento que no se ha registrado inicialmente, o que la cantidad de puntos tomada sea insuficiente para analizar detalles como por ejemplo deformaciones de estructuras. La nube de puntos registrada con el escáner solventa estas inconveniencias y aquí, como hemos avanzado, radica uno de los principales beneficios de esta herramienta: la capacidad de componer una base de datos muy completa, precisa y detallada, que puede ser explotada de diferentes formas para obtener distintos productos finales, y que además permite recurrir a ella indefinidamente, sin agotar sus potencialidades con un número determinado de usos.

Por lo tanto, el Láser Escáner es una herramienta que captura datos de manera muy ágil e intensa, mientras que el proceso de post procesado se puede ralentizar y llegar a ser muy costoso dependiendo del nivel de los productos o resultados que se quieran obtener de ellos. Como se ha podido ver a lo largo de los ejemplos expuestos, según sea el resultado que se necesite obtener de la nube de puntos, el tiempo de post-procesado de los datos es muy distinto. Esto está intrínsecamente relacionado la propia complejidad del elemento a documentar. Por la experiencia que

hemos acumulado hasta ahora, la documentación de los edificios es la que puede llegar a requerir unos niveles de detalle más intensos y alcanzar una mayor complejidad (se suelen tener que documentar espacios interiores y exteriores, elementos decorativos de formas irregulares), mientras que los levantamientos de terreno o el registro de elementos patrimoniales puntuales (una roca con grabados, una fuente, etc.) requieren de una inversión de edición y post-procesado de los datos mucho más liviana.

Por otra parte, hay que tener en cuenta que esta herramienta todavía presenta un elevado coste en el mercado, no sólo en lo que respecta a la adquisición del aparato, sino también a las licencias de los programas y a los propios programas, encareciendo también los costes de los trabajos a realizar. Además, su manejo requiere personal especializado, ya que los programas de toma de datos y post-procesado demandan una formación específica.

Nos faltaría comparar estos métodos con el otro sistema principal de registro equivalente como es la fotogrametría. Es éste un sistema muy ágil en la captura de datos ya que se hace por medio de fotografías (con perspectiva) que son rectificadas por medio de diversos puntos de control topográficos y que permite obtener representaciones o modelos de gran precisión y detalle. En sus inicios y hasta hace unos años era un sistema costoso y complicado de ejecutar sin una formación intensa, pero en los últimos años ha evolucionado hacia programas infor-

máticos más fáciles de usar y con un menor coste, lo que hace de ella una técnica cada vez más generalizada. Con todo, en la bibliografía sobre el tema se puede observar que aunque en la documentación del patrimonio cultural la fotogrametría tiene una amplia difusión (en España, p.e. ALMAGRO, 2004; ALMAGRO, ALMAGRO, 2007; ÁLVAREZ *et alii*, 2003; ANTOÑANZAS *et alii*, 2003; CÁMARA, LATORRE, 2003; IGLESIAS, 2002), los levantamientos con Láser Escáner son cada vez más habituales (ver el volumen de LICHTI *et alii*, 2008; también, ARIAS *et alii*, 2005; MARAMBÍO, GARCÍA, 2006; MONSERRAT, CROSETTO, 2008; PÉREZ, PÉREZ, 2007; ROCA-PARDIÑAS *et alii*, 2008; RODRÍGUEZ *et alii*, 2008) y en algunos casos se propone la combinación de ambas herramientas como método ideal de registro (LAMBERS *et alii*, 2007; YASTIKLI, 2007).

6. BIBLIOGRAFÍA

- ALMAGRO GORBEA, A., 2004, *Levantamiento arquitectónico*, Granada.
- ALMAGRO GORBEA, A., ALMAGRO VIDAL, A., 2007, Traditional drawings versus new representation techniques. *XXI International CIPA Symposium, (01-06 October 2007, Athens, Greece)*.
- ALMAGRO VIDAL, A., 2008, *El concepto de espacio en la arquitectura andalusí. Un análisis perceptivo a través de la infografía*, Madrid.
- ÁLVAREZ GONZÁLEZ, I.; LOPETEGUI GALARRAGA, A.; MESANZA MORAZA, A.; RODRÍGUEZ MIRANDA, A.; VALLE MELÓN, J. M.; VICENTE ESPINA, I., 2003, Diferentes propuestas para la representación geométrica, *Arqueología de la Arquitectura*, n.º 2, pp. 9-12.
- ANTOÑANZAS, M. A.; IGUÁCEL DE LA CRUZ, P.; LOPETEGUI GALARRAGA, A.; VALLE MELÓN, J. M., 2003, El Sequeral (Calahorra, La Rioja). Investigación fotogramétrica y arqueológica, *Arqueología de la Arquitectura*, n.º 2, pp. 13-16.
- ARAYICI, Y., 2007, An approach for real world data modelling with the 3D terrestrial laser scanner for built environment, *Automation in Construction*, n.º 16 (6), pp. 816- 829.
- ARIAS, P.; HERRÁEZ, J.; LORENZO, H.; ORDÓÑEZ, C., 2005, Control of structural problems in cultural heritage monuments using close-range photogrammetry and computer methods, *Computers and Structures*, n.º 83, pp. 1754-1766.
- BLANCO-ROTEA, R. (Coord.), 2001, *Módulo 5. Metodologías de Intervención en el Patrimonio Arqueológico. Curso de Especialización en Gestión Arqueológica del Patrimonio Cultural*, Santiago de Compostela.
- BLANCO-ROTEA, R., 2005, The study of mediaeval architecture from an archaeological perspective, en *Section 14: Archaeology and History of the Middle Ages*. General Sessions and Posters edited by Le Secrétariat du Congrès. Acts of the XIVth UISPP Congress (Belgium, 2-8 September 2001). BAR, Oxford.
- BLANCO-ROTEA, R.; BENAVIDES, R., 2008, Mirando cara o futuro: coñecer para conservar, en Montenegro Rúa E., Blanco-Rotea R., Benavides R., Portela C., *Santa Eulalia de Bóveda*, Pontevedra, pp. 43-82.
- BOEHLER, W.; BORDAS VICENT, M.; MARBS, A., 2003, Investigating Laser Scanner Accuracy, *Xixth CIPA Symposium at Anatolya* (Turkey, 30 SEP – 4 Oct 2003), http://www.i3mainz.fh-mainz.de/publicat/cipa2003/laserscanner_accuracy.pdf
- BUCKSCH, A.; LINDENBERGH, R., 2008, CAMPINO—A skeletonization method for point cloud processing, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, n.º 63 (1), pp. 115- 127.
- CÁMARA, L.; LATORRE, P., 2003, El modelo analítico tridimensional obtenido por fotogrametría. Descomposición, manipulación y aplicaciones en el campo de la restauración arquitectónica, *Arqueología de la Arquitectura*, n.º 2, pp. 87-96.
- GARCÍA ALMIRALL, P.; MOIX BERGADÀ, M., 2003, Las tecnologías de visualización urbana SIG 3D y su integración en la Internet avanzada, nuevo entorno de estudio de la ciudad, *Mapping*, n.º 85, pp. 52-58.
- IGLESIAS GIL, J. M. (coord.), 2002, *Experiencias cartográficas y fotogramétricas aplicadas a la conservación del Patrimonio Histórico. Actas de los XII Cursos Monográficos sobre el Patrimonio Histórico* (Reinosa, julio-agosto 2001), Reinosa, pp. 215-332. ISPRS, International Society for Photogrammetry and Remote Sensing. <http://www.isprs.org/>
- JANTZ, R.; GIARLO, M.J., 2005, Digital Preservation: Architecture and Technology for Trusted Digital Repositories, *D-Lib Magazine*, n.º 11:6 (Junio 2005). <http://www.dlib.org/>
- KOLLER, D.; LINDSTROM, P.; RIBARSKY, W.; HODGES, L. F.; FAUST, N.; TURNER, G., 1995, Virtual GIS: A Real-time 3D Geographic Information System, en *Proc. IEEE Visualization*, pp. 94-100.
- LAMBERS, K.; EISENBEISS, H.; SAUERBIER, M.; KUPFERSCHMIDT, D.; GAISECKER, T.; SOTODEH, S.; HANUSCH, T., 2007, Combining photogrammetry and laser scanning for the recording and modelling of the Late Intermediate Period site of Pinchango Alto, Palpa, Peru, *Journal of Archaeological Science*, n.º 34 (10), pp. 1702-1712.
- Leica HDS3000 - Manual del Usuario. http://www.leica-geosystems.com/corporate/en/ndef/lgs_5570.htm
- LICHTI, D.; PFEIFER, N.; MAAS, H-G. (eds.), 2008, *Theme issue Terrestrial Laser Scanning. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, n.º 63 (1).
- MAÑANA BORRAZÁS, P.; BLANCO-ROTEA, R.; AYÁN VILA, X. M., 2002, *Arqueotectura 1: Bases teórico-metodológicas para una Arqueología de la Arquitectura*, TAPA (Trabajos de Arqueología y Patrimonio), n.º 25. Santiago.
- MARAMBÍO, A.; GARCÍA ALMIRALL, P., 2006, Escaner laser: modelo 3d y orto imágenes arquitectónicas de la iglesia de Santa Maria del Mar en Barcelona, *ACE: architecture, city and environment*, n.º 2, pp. 178-187.
- MONSERRAT, O.; CROSETTO, M., 2008, Deformation measurement using terrestrial laser scanning data and least squares 3D surface matching, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, n.º 63 (1), pp. 142-154.
- MONTENEGRO RÚA, E.; BLANCO-ROTEA, R.; BENAVIDES, R.; PORTELA, C., 2008, *Santa Eulalia de Bóveda*, Pontevedra.
- PÉREZ CAÑAS, S.; PÉREZ MARTÍN, E., 2007, Levantamiento topográfico con la aplicación del Barredor Láser 3D del graderío romano en el yacimiento arqueológico de Tiermes: Reconstrucción digital y modelo digital del terreno, *Topografía y cartografía: Revista del Ilustre Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos en Topografía*, n.º 24 (141), pp. 58-63.
- RICHARDS, J. 2002, Digital preservation and access, *European Journal of Archaeology*, n.º 5 (3), pp. 343-366.
- ROCA-PARDIÑAS, J.; LORENZO, H.; ARIAS, P.; ARMESTO, J., 2008, From laser point clouds to surfaces: Statistical nonparametric methods for three-dimensional reconstruction, *Computer-Aided Design*, n.º 40 (5), pp. 646-652.
- RODRÍGUEZ, A.; VALLE-MELÓN, J. M.; CASAR, J. I.; ESTEBAN, J., 2008, Aportaciones metodológicas a la gestión y explotación de nubes de puntos procedentes de escáneres tridimensionales, aplicados a la documentación geométrica del patrimonio. El caso de la portada de los hierros de la catedral de valencia, en *IX Congreso Internacional (CICOP) de Rehabilitación del Patrimonio Arquitectónico y Edificación* (9-12 Julio de 2008, Sevilla), Sevilla, pp. 357-362.
- SCHULTZ, T.; INGENSAND, H., 2005, El escaneado por láser terrestre: investigaciones y aplicaciones del escaneado de alta precisión, *Topografía y cartografía: Revista del Ilustre Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos en Topografía*, n.º 22 (131), pp. 3-12.
- YASTIKLI, N., 2007, Documentation of cultural heritage using digital photogrammetry and laser scanning, *Journal of Cultural Heritage*, n.º 8 (4), pp. 423 – 427.

Más información sobre las publicaciones de los autores y este Instituto en el Repositorio Institucional de CSIC de acceso abierto **DIGITAL CSIC** <http://digital.csic.es/>

Recibido: 8 de septiembre de 2008

Aceptado: 13 de enero de 2009