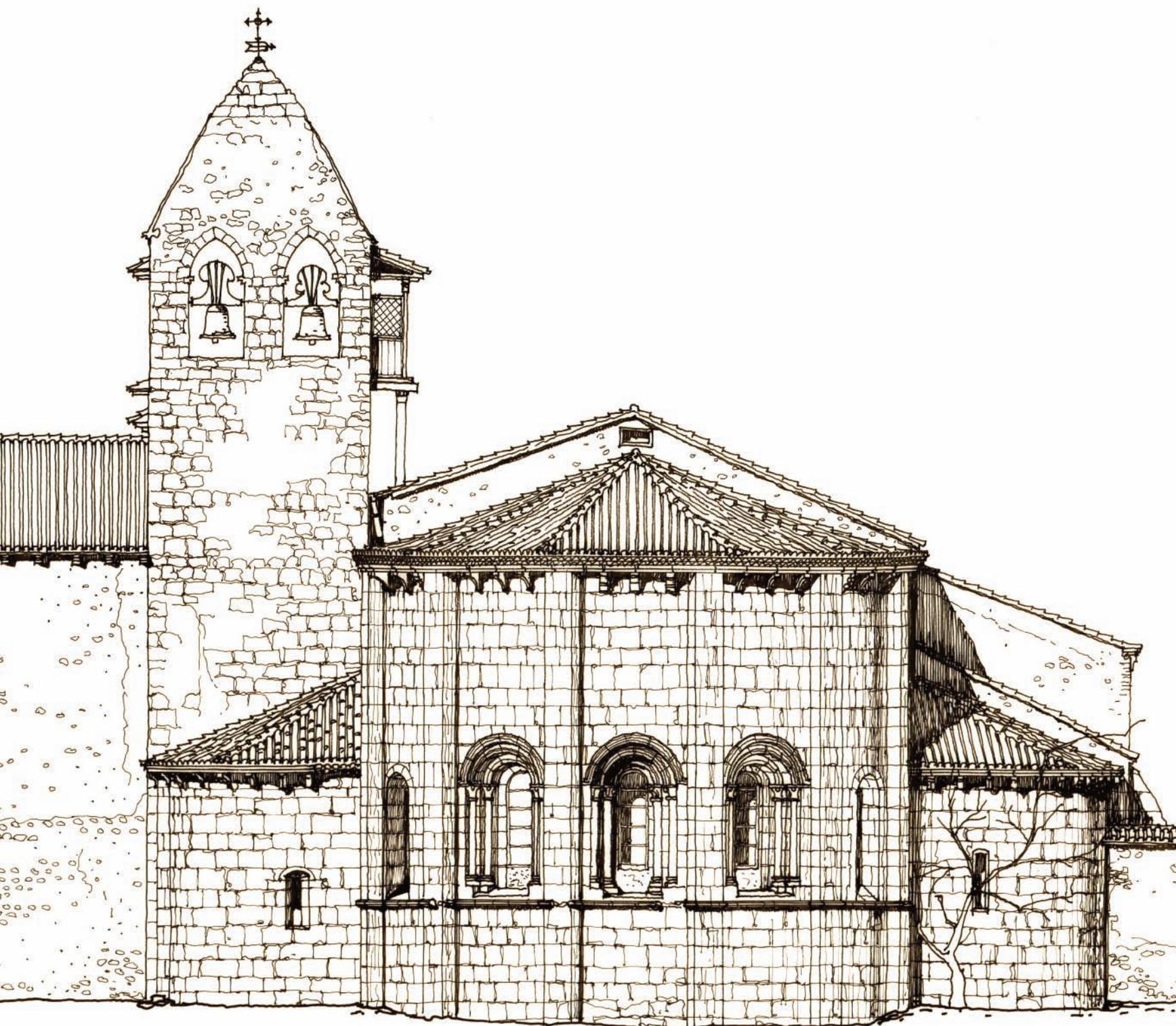


# Documentación gráfica del Patrimonio

Ministerio  
de Cultura





# Documentación gráfica del patrimonio

www.mcu.es

www.060.es

#### DIRECCIÓN DE LAS JORNADAS

José Manuel Lodeiro Pérez

#### COORDINACIÓN DE LAS JORNADAS

Jorge Jiménez Rubio

#### DIRECCIÓN Y COORDINACIÓN EDITORIAL

María Domingo Fominaya

Antonio J. Sánchez Luengo

#### CORRECCIÓN DE TEXTOS

Ana Costalago

#### ILUSTRACIÓN DE PORTADA

Dibujo del Monasterio Cisterciense de Carrizo (León). 1974.

Realizado por José Sandoval Martín



MINISTERIO DE CULTURA

Edita:

© SECRETARÍA GENERAL TÉCNICA

Subdirección General

de Publicaciones, Información y Documentación

© De los textos y las fotografías: sus autores

NIPO: 551-11-006-4



MINISTERIO  
DE CULTURA

**Ángeles González-Sinde**  
Ministra de Cultura

**Mercedes E. del Palacio Tascón**  
Subsecretaria de Cultura

**Ángeles Albert**  
Directora General de Bellas Artes y Bienes Culturales

# ÍNDICE

	Pág.
<b>Presentación</b> .....	7
<b>La documentación gráfica en el IPCE</b> .....	8
José Manuel Lodeiro Pérez	
<b>Tecnologías ópticas aplicadas al arte y a la documentación del patrimonio</b> .....	18
Luis Granero Montagud, Francisco Díaz Gómez, Rubén Dominguez, Yolanda Sanjuan	
<b>Veintidós años de experiencia de fotogrametría arquitectónica en la Escuela de Estudios Árabes, CSIC</b> .....	26
Antonio Almagro	
<b>El dibujo del patrimonio y su vida gráfica</b> .....	46
Javier Ortega Vidal	
<b>La evolución de la documentación geométrica del patrimonio en un estudio privado. La importancia del dibujo</b> .....	64
Alberto Martínez Rubio	
<b>Cartografía en patrimonio: la métrica en la documentación. ¿Una realidad pendiente?</b> .....	80
Mercedes Farjas, Francisco J. García Lázaro, J. Julio Zancajo, Teresa Mostaza	
<b>El papel de los rayos X e infrarrojos en la documentación gráfica del patrimonio; su presente y futuro</b> .....	90
Tomás Antelo, Araceli Gabaldón	
<b>La documentación patrimonial mediante sensores de imagen o de barrido láser</b> .....	108
José Luis Lerma, Miriam Cabrelles, Santiago Navarro, Ana Elena Seguí	
<b>Técnicas no invasivas para el registro del Patrimonio Arqueológico</b> .....	118
C. Dietz, G. Catanzariti, P. de la Presa, A. Jimeno	
<b>Tres niveles para la representación a partir de la aplicación de la tecnología escáner láser terrestre</b> .....	130
Víctor Baccaredo Rodríguez, Daniel Baccaredo Rodríguez	
<b>ImaginArte. Aplicación de tecnologías 3D en museos y espacios singulares</b> .....	144
Julio Ruiz Garcia	
<b>Valorización, difusión y estandarización de la documentación geométrica del patrimonio</b> .....	154
Jorge Angás Pajas	
<b>Hacia una integración de los sistemas de documentación, información y gestión del patrimonio. Resultados y retos</b> .....	164
Javier Finat Codes, F.J. Delgado del Hoyo, R. Martínez García, J.J. Fernández Martín, J.I. San José Alonso, J. Martínez Rubio	
<b>Arqueología virtual bajo el horizonte de ARQUEOLÓGICA 2.0</b> .....	178
Alfredo Grande León	

# Presentación

La documentación métrica del patrimonio se encuentra inmersa en la actualidad en un vertiginoso proceso de cambio. Los múltiples adelantos tecnológicos e informáticos acaecidos en los últimos años, han puesto al servicio de la documentación del patrimonio histórico instrumentos que han dado lugar a novedosos procedimientos y metodologías a la hora de documentar nuestro patrimonio arquitectónico, arqueológico, mueble etc. Todos ellos tienden a automatizar los procesos, reduciendo la labor de producción y el necesario factor humano en estos trabajos.

La gran variedad de métodos existentes hoy en día, desde los más clásicos a nivel manual hasta los más avanzados con tecnología láser, dificultan a los gestores del patrimonio, arquitectos o arqueólogos, escoger el más indicado para su proyecto.

Conscientes de esta situación, el Instituto del Patrimonio Cultural de España organizó durante los días 15, 16 y 17 de Noviembre de 2010 unas Jornadas sobre Documentación Gráfica del Patrimonio Histórico. Presente y Futuro. La celebración de este evento tuvo como objetivos:

- 1.- Convocar a los expertos españoles en la materia para que presentaran sus trabajos con la finalidad de reflexionar acerca de las técnicas existentes y de las perspectivas que plantean de cara al futuro.

- 2.- Presentar a aquellos profesionales implicados en la documentación del patrimonio (gestores, arquitectos, arqueólogos, restauradores, topógrafos, historiadores) los métodos más adecuados para la definición métrica de los bienes culturales.
- 3.- Generar una plataforma común con el fin de reflexionar sobre aspectos tan importantes en la documentación del patrimonio como: ¿Cuál es la precisión idónea para cada trabajo? ¿Qué coste se debe asumir? ¿Qué documentación mínima es necesaria aportar? ¿Hasta dónde llega la calidad métrica de los modelos virtuales? ¿Cómo actualizar los datos ya existentes, cómo hacerlos compatibles con nuevos programas? ¿Qué papel juega el factor humano en el proceso documental? ¿Desplazará el escáner láser al resto de técnicas documentales? ¿Cómo debe ser rentabilizado y divulgado el trabajo? etc.

José Manuel Lodeiro  
Jorge Jiménez

# La documentación gráfica en el IPCE

José Manuel Lodeiro Pérez

IPCE Ministerio de Cultura

jmanuel.lodeiro@mcu.es

8

## Curriculum

Ingeniero Técnico Topógrafo por la Universidad Politécnica de Madrid. Contratado Laboral Fijo desde 1992 en el Gabinete de Fotogrametría del IPCE como Ing. Téc., Topógrafo especializado en documentaciones métricas, numéricas o digitales, en levantamientos fotogramétricos, taquimétricos, rectificaciones, etc. del patrimonio arquitectónico o arqueológico, en la documentación de edificios, fachadas, retablos, rejas, esculturas, etc.

## Resumen

En este artículo se pretende dar una visión de las diferentes técnicas empleadas en el gabinete de fotogrametría del IPCE para la documentación geométrica del patrimonio, mostrar con trabajos reales del IPCE el cuando y el porqué del uso de estas técnicas o combinaciones de ellas, lo que permitirá al arquitecto, arqueólogo o restaurador llegar a un mejor y más eficaz conocimiento del bien a restaurar, llegando incluso a obtener modelos ideales y virtuales de los objetos documentados.

## Abstract

The article is a survey of the techniques employed by the department of Photogrammetry of the IPCE. Through

different examples of works undertaken by the IPCE, it is shown how the architect, the archaeologist or the restorer can reach a broader and more effective knowledge of the item, and how a virtual model of it can be built.

El origen del instituto se remonta al Real Decreto 565/1985, de 24 de abril, por el cual se creó lo que entonces fue llamado ICRBC, ratificado posteriormente el 25 de junio de ese mismo año por las Cortes Generales.

La necesidad de cohesionar en un solo centro estatal todos los organismos que funcionaban hasta esa fecha, en el ICRBC se integraron diversos organismos:

- El Instituto de Conservación y Restauración de Obras de Arte (ICROA).
- El Centro de Conservación y Microfilmación Documental y Bibliográfica (CECOMI).
- Las Subdirecciones Generales de Monumentos y Arqueología.
- El Centro de Información Artística, Arqueológica y Etnológica.

En la actualidad el IPCE es una Subdirección General adscrita a la Dirección General de Bellas Artes y Archivos del Ministerio de Cultura, que desarrolla las funciones otorgadas por el Real Decreto 1132/2008, de las que destacaré las relacionadas con las jornadas que nos ocupan:

- Elaboración y ejecución de planes para la conservación y restauración de los bienes culturales constitutivos del patrimonio español.
- El establecimiento de líneas de investigación, criterios, métodos y técnicas de conservación y restauración de dicho patrimonio.
- Archivo de la documentación generada por cada intervención.
- Difusión y divulgación de todas sus actividades.

Implícito en sus labores está la documentación de los bienes a conservar y restaurar; para llevar a cabo esta función cuenta con varios departamentos, uno de ellos es el gabinete de fotogrametría (creado en el año 1984) y otro el equipo de delineación, ambos adscritos al servicio de arquitectura del área de intervención en bienes culturales, en los que se documentan algunos de los bienes que son restaurados directamente por el instituto o en colaboración con otros organismos autonómicos, estatales e internacionales. Los documentos gráficos o numéricos han sido utilizados por los diferentes técnicos restauradores para documentar, medir y

definir las intervenciones que llevan a cabo durante el proceso de restauración, ya sea arquitectónica, escultórica, arqueológica, de retablos, rejería, etc.

Mientras que en su creación el gabinete de fotogrametría tenía una labor eminentemente documental (dejar constancia del estado en que se encontraba un bien, edificio, etc.), con el devenir de los años a derivado a labores de asistencia a los técnicos del propio instituto, arquitectos, arqueólogos y restauradores, con el fin de proporcionar los planos o documentos que necesitan para definir o ejecutar sus intervenciones. Por ello nuestro trabajo es eminentemente métrico y con un sentido de ejecución práctica.

Actualmente el gabinete está constituido por un ingeniero técnico topógrafo y dos delineantes especializados en la documentación del patrimonio, ambos realizando restituciones estereoscópicas y su edición digital. Contamos para ello con un restituidor analítico de Leica y otro digital de DIGI. Por otra parte uno de ellos se está especializando en dibujo 3D para abordar la parte no métrica y la modelización de las nubes que se obtengan con láser 3D.



Fig. 1 Hall del Instituto del Patrimonio Cultural de España. Fotografía J.M. Lodeiro.

Con todo el 95 % de nuestro tiempo se lo lleva la obtención de la documentación gráfica que precisan los técnicos del IPCE para definir y ejecutar sus proyectos.

Espero transmitir que cada trabajo de documentación del patrimonio es distinto y que las finalidades y resultados que hemos de alcanzar son únicos para cada trabajo. Esto implica que los métodos y equipos empleados han de adecuarse a las finalidades deseadas y a las precisiones prefijadas. Que existe un variado abanico de métodos para la documentación y que debemos elegir el más adecuado a nuestras necesidades y presupuesto, para ello voy a exponer diferentes trabajos realizados en el IPCE con las soluciones aportadas, así como los diferentes métodos utilizados.

Existen dos grandes grupos de trabajos, los métricos y los no métricos y podemos alcanzar nuestros objetivos por caminos diferentes.

Al hablar de documentación del patrimonio, podemos diferenciar dos vertientes, la métrica y la no métrica.

En cuanto a la no métrica fundamentalmente se emplea a nivel divulgativo y didáctico, bien en museos, donde se incluyen modelos 3D o representaciones virtuales de una pieza, fotografía 360 que se proyectan en el ámbito donde se está restaurando para que el visitante tenga una visión digital del motivo, retablo o espacio intervenido, durante el tiempo que dura la restauración.

Dentro de la métrica en el IPCE realizamos el siguiente abanico de intervenciones:

- Fundamentalmente la documentación que permita la definición métrica del bien, lo que implica definir su geometría en un momento determinado para lo que obtenemos plantas, alzados, secciones, perfiles, modelos inalámbricos 3D, modelos virtuales, etc.
- En este registro podemos reflejar las deformaciones o deterioros que se aprecian en el objeto de documentación.
- Si dicha documentación la realizamos en diferentes momentos tendremos un estudio temporal, donde es posible medir las variaciones sufridas en dicho periodo, pudiendo conseguir un mapa de los movimientos, deformaciones o el volumen de materia perdida, etc.
- Sobre la documentación métrica obtenida se trazan los mapas de daños, procesos de restauración, etc. que los técnicos van a realizar.
- También se han utilizado nuestras documentaciones como base a traslados de edificios (anastilosis), etc.

En todos estos trabajos es fundamental el conocimiento de la forma (geometría) y sus dimensiones con precisión, por lo que los documentos obtenidos están todos ellos dotados de metricidad. Una de las constantes a lo largo de todos estos años ha sido intentar no sólo obtener unos documentos precisos, sino que a la vez dotarles de una calidad gráfica excelente e incluso me atrevería a decir que se les intenta imprimir un toque de belleza.

10

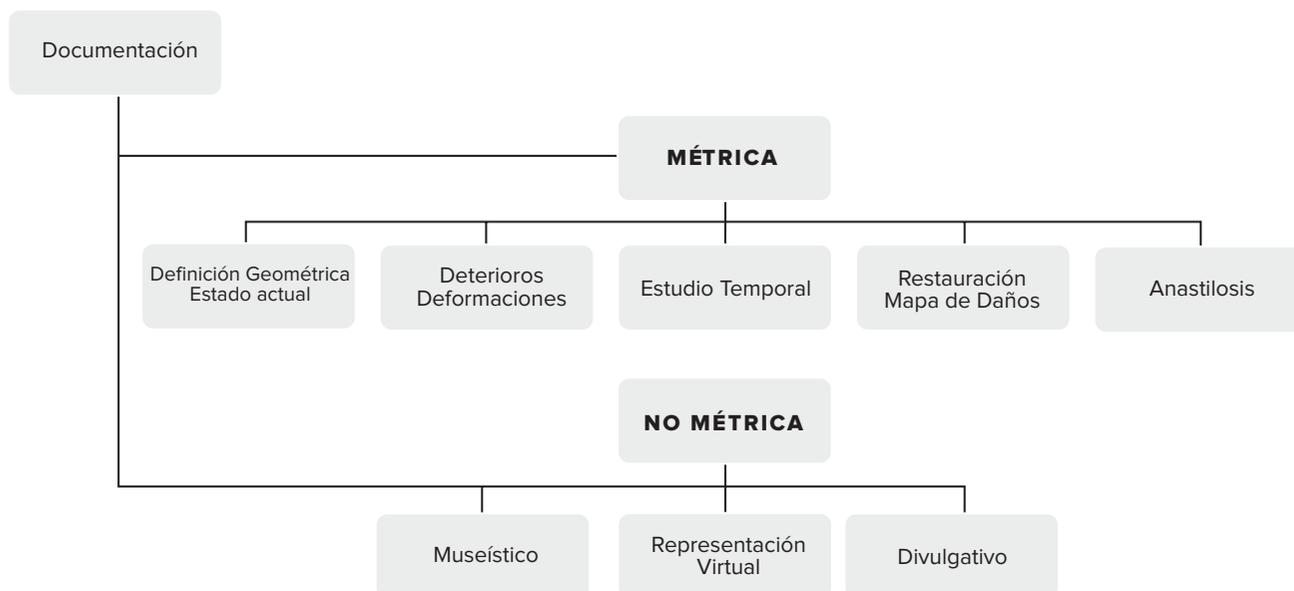


Fig. 2 Esquema de usos.

Se que esta actitud está en clara oposición a la actual tendencia de automatizar los procesos de documentación, de manera que se elimine todo lo posible la intervención humana en el proceso documental.

No puedo compartir este planteamiento ya que considero enriquecedor y necesario, el que cada profesional que interviene en la documentación aporte todos sus conocimientos durante este proceso, para conseguir no sólo un plano preciso sino que a su vez esté correctamente interpretado y diferenciado a fin de facilitar una correcta datación y cronología de fases, intervenciones sufridas en el Bien objeto de estudio, etc. Considero que no sólo debemos proporcionar un plano con una metricidad intachable, además debemos aportar cuanto pueda facilitar la labor de todos los profesionales que intervendrán en la restauración o documentación del bien, proporcionando el grafismo adecuado para su mejor comprensión.

Para nosotros es fácil seguir este camino mientras perdure la escuela creada por el magnífico dibujante, ya fallecido D. José Sandoval, pero soy consciente de lo difícil y caro que

resulta en la actualidad tener y no digamos crear profesionales de estas características. Soy consciente de que productividad y calidad no son buenas compañeras y que se busca el automatismo en los procesos en aras de conseguir una mayor productividad, de igual manera que se considera necesario automatizar procesos eliminando la intervención humana. Este es uno de los puntos de mayor discusión, mientras una parte de los investigadores consideran imprescindible la eliminación de las interpretaciones humanas otra parte considera imprescindible la chispa, el genio humano para obtener una correcta documentación. El trasfondo del asunto es productividad y costes y todos sabemos que la contratación de personal incide de forma importante en los costes y si éste ha de estar especialmente cualificado todavía más.

Otra cuestión que nos preocupa son las precisiones que hemos de alcanzar en los trabajos. Cuando el documento final era un plano la precisión venía determinada por el denominador de la Escala de dibujo, mediante la fórmula  $Pxy=0,2 \text{ mm} \times E$  ( $E_d = 1/50 \Rightarrow Pxy = 0,2\text{mm} \times 50 = 10\text{mm} = 1\text{cm}$ ).

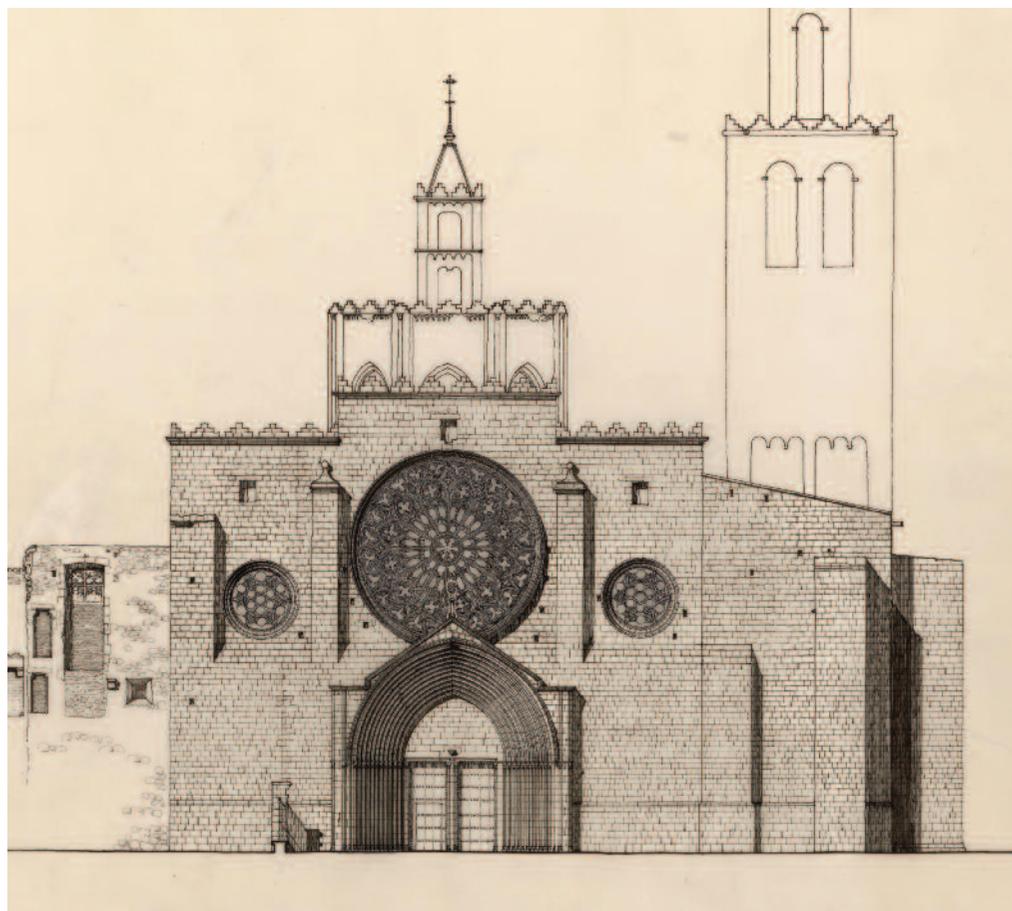


Fig. 3 Detalle Monasterio S. Cugat del Vallés (PCE- Delineación José Sandoval Martín).

¿Pero que ocurre ahora que todos los trabajos son digitales?. El concepto de escala de trabajo ha desaparecido. Supongamos que hemos fijado una y que calculamos los equipos y metodología a seguir para alcanzar las precisiones deseadas. Por culpa del zoom con el ordenador se produce un doble efecto, por una parte el receptor del trabajo va a intentar aproximarse al máximo (querrá llegar a ver los trabajos a escala 1/1), cuando ni se han utilizado los equipos ni métodos adecuados para conseguirlo ya que no se ha pagado por ello; y por otra parte los propios trabajadores intentan dibujar cuanto son capaces de ver, aunque supere con creces las condiciones de toma. Ambos efectos son difíciles de evitar, por lo que hay que mentalizarnos de que los resultados finales han de estar acordes a las metodologías y a los equipos utilizados y por tanto al coste de la documentación.

Sabiendo que cada trabajo se realiza para conseguir una determinada precisión y que los equipos, métodos y costes han de ser los adecuados para alcanzarla, es importante recordar que cada trabajo requiere una precisión y que es tan erróneo exigir en exceso como pecar por defecto. La precisión debe de ser la adecuada para que queden reflejados los elementos que son necesarios documentar.

Por otra parte en éste momento conviven técnicas y equipos de documentación relativamente clásicos con otros innovadores y parece que estemos obligados a emplear estos últimos si queremos obtener unos buenos resultados.

Todos sabemos lo rápido que se queda obsoleta la tecnología, llegándose a desechar métodos y equipos tanto o más precisos que los de última generación por su discontinuidad

de fabricación. No todos los avances mejoran aquello a lo que sustituyen. Yo abogo por el uso de los equipos y técnicas que proporcionen los resultados adecuados. Se está comprobando que no existe uno que desplace a los demás de forma contundente, cada método tiene unos rangos de intervención y unos costes que lo hacen adecuado para cada trabajo en concreto y esa es nuestra obligación como profesionales, facilitar los mejores resultados sopesando presupuesto, precisión, tiempos de ejecución, etc. dejando de lado las “modas” que intenta imponer el mercado.

En el IPCE se emplean los siguientes sistemas de documentación gráfica:

## Documentación métrica

Analizaremos los diversos métodos apoyándonos en diferentes trabajos realizados en el instituto:

### Medición con cinta

Sigue siendo el método estrella en la obtención de plantas y perfectamente útil en muchos trabajos de documentación. Si bien es cierto que este sistema está afectado de errores que en la actualidad pueden considerarse altos, en el IPCE lo dotamos de mayor precisión combinándolo con topografía. Para ello aplicando métodos topográficos damos los puntos fundamentales que conforman el armazón general del edificio. Estos puntos así definidos pueden considerarse exentos de error y apoyándose en ellos se trasladan las medidas rea-

12

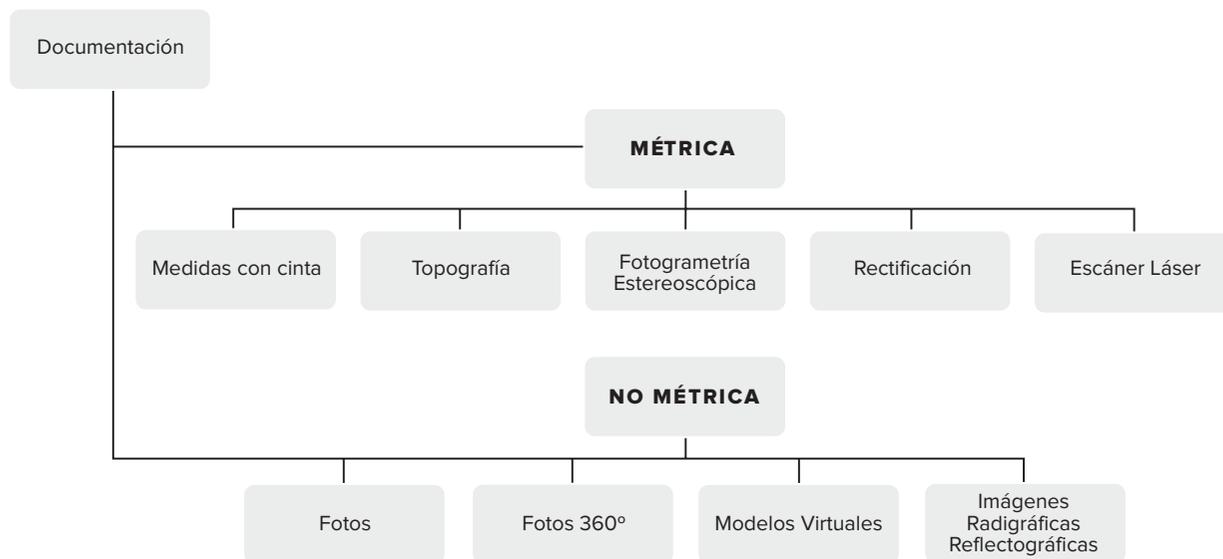


Fig. 4 Esquema métodos.

lizadas con cinta, con lo que los errores no se disparan y los quiebros desvíos etc. quedan definidos topográficamente.

Por su relación coste-resultado, creo que en el futuro seguirá siendo un buen método de documentación del patrimonio y que da precisiones adecuadas en muchos de los trabajos que hemos de realizar.

### Topografía

A parte de proporcionar coordenadas precisas a cualquiera de los sistemas de los que hablamos en este apartado, dota a los trabajos de un sistema único y homogéneo.

Permite documentar cualquier objeto mediante un número finito de puntos, realizando una buena aproximación a su geometría real. Al tratarse de un número finito no sabemos lo que ocurre entre cada dos puntos medidos.

Se obtienen curvas de nivel, secciones, alzados, plantas, etc. Para conseguir una mayor definición debemos finalizar los detalles con trabajos de relleno mediante medición con cinta. Como vemos son métodos que se complementan muy bien.

Como se ha mencionado antes en el IPCE utilizamos mucho la combinación de métodos para conseguir satisfacer las necesidades de los técnicos del Instituto.

Se nos pedía documentar el entorno del tramo de murallas en el que había que realizar una intervención de emergencia por su mal estado, así como obtener un perfil de la coronación de los paños afectados. Para conseguir una documentación adecuada realizamos una combinación de topografía y rectificación fotográfica, mientras que con la topografía se documenta el entorno, terreno, accesos, etc con la rectificación obtenemos la información del tipo de materiales y estado de los paños de muralla. En los alzados



Fig. 5 Detalle planta Catedral de Burgos (IPCE – Topografía: JM Lodeiro, Delineación: José Saldoval, Joaquín Díaz, Delineante).



**Fig. 6** Modelo 3D Tramo Muralla de Roa (Burgos) (IPCE – JM. Lodeiro / Javier Laguna).

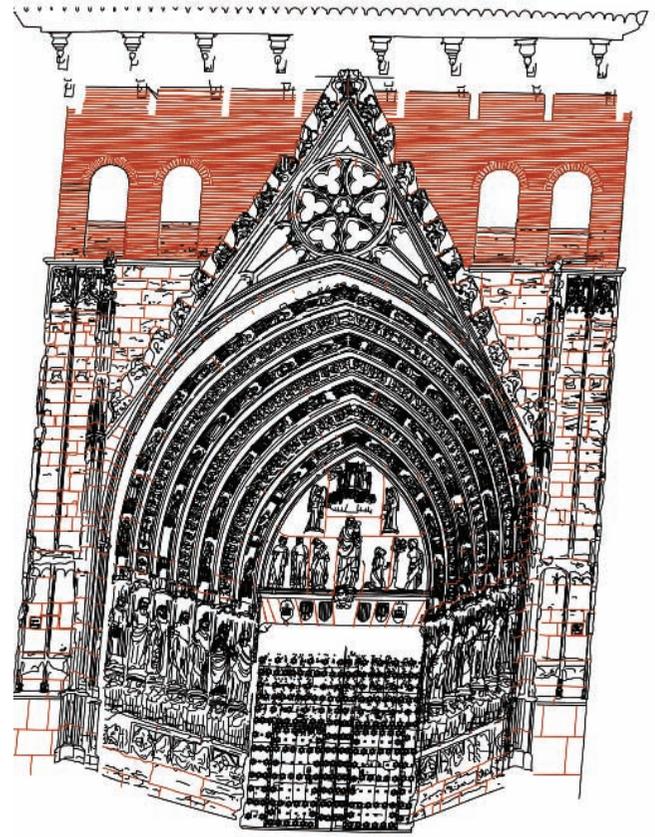
rectificados tenemos cada paño en verdadera magnitud y la información de los materiales y estado de conservación. Con el vídeo podemos transmitir lo escarpado que es el terreno y las dificultades que plantea la restauración del tramo afectado.

En cuanto a su futuro sigue siendo el sistema en que se apoyan casi todos los demás sistemas para dotar a los trabajos de coordenadas homogéneas.

#### Fotogrametría estereoscópica

En el caso del IPCE es una metodología que nos permite documentar con toda precisión desde objetos pequeños (cruz procesional), medianos (retablos, rejas, portadas, etc.) a conjuntos monumentales (iglesias, castillos, catedrales, monasterios, conjuntos históricos, etc.).

Esta técnica tiene varias ventajas para nosotros: al tratarse de una visión tridimensional de los objetos nos permite realizar un calco 3D de los elementos que documentamos, al



**Fig. 7** Portada Catedral de Huesca (IPCE – Topografía JM. Lodeiro, Restitución Javier Laguna).

obtener dibujo de línea 3D podemos representar los elementos decorativos que conforman el bien (ropajes, barbas, etc), deformaciones del objeto (cuando dibujamos una cornisa obtenemos su verdadera geometría y si está deformada saldrá con su deformación, incluso cuando no es visible por observación directa.) No se toca el objeto por lo que no le introduciremos deterioros adicionales.

Con la fotogrametría obtenemos los planos base para posteriores trabajos de restauración, documentación, traslado, etc. Con la información aportada los diferentes profesionales del IPCE desarrollan los planos de sus intervenciones, restauración, mapas de daños, etc. En ocasiones los restauradores solicitan poder contemplar el modelo estereoscópico sobre el restituidor donde aprecian detalles que se les puede haber pasado por alto o recordar el objeto de la restauración ya que la visión estéreo les ayuda mucho.

S. Francisco de Tarazona: otro ejemplo de combinación de tecnologías, en este caso se empleó la fotogrametría estereoscópica para documentar el retablo, planteando qué

hacer con los lexos (elementos pictóricos del retablo, planos). Tras varias opciones el equipo formado por la restauradora el topógrafo y el restituidor decidió que la solución más adecuada para documentar estos elementos era la rectificación fotográfica, incorporándola en su posición 3D con el retablo, con lo que incorporamos las ventajas de la fotografía a la documentación de los elementos pictóricos del retablo. (véase revista Patrimonio Cultural de España, nº 1, págs. 236 a 249).

### Rectificación fotográfica

Esta metodología nos permite documentar elementos planos u objetos que puedan descomponerse en diferentes planos. Ya hemos mencionado que las precisiones son inferiores a las conseguidas por los otros métodos, pero el adjuntar la información fotográfica es tan importante en algunos trabajos que la hace altamente rentable. Aunque la rectificación sólo se puede emplear en elementos planos podemos dotarla de información tridimensional como hemos dicho en el retablo de Tarazona.

La información aportada por la fotografía es importantísima en los trabajos de documentación y restauración que realizamos los profesionales del IPCE, ya que nos facilita el conocimiento del objeto a restaurar, tipos de materiales, deterioros, humedades, pérdidas y como no el color.

Para ello hemos adquirido la cámara Canon Eos 5D de 21 Mp que dota a los trabajos de una gran calidad y definición.

Hemos mencionado su utilización en combinación con otras técnicas, analicemos su utilización en solitario.

Arquería museo Sta. Fe de Toledo. Fue nuestra primera experiencia con este método y los resultados obtenidos nos animaron a adquirir un software de rectificación. Se trata de una arquería hispano – musulmana de la que se encontraron 5 bloques, la restauradora pidió que definiéramos los posibles radios de curvatura con el fin de tener un punto de partida para la restauración. Mediante la rectificación no sólo obtuvimos los radios de los arcos; como habíamos trabajado en 3D, obtuvimos mediante los elementos rectificadas y con la ayuda de la iconografía existente en los bloques un modelo ideal de cómo fue la arquería. Esto posibilitó la obtención de su modelo virtual.

S. Jerónimo de Granada. Una vez comprobado con diversos trabajos que la rectificación fotográfica resultaba de gran utilidad a los técnicos del IPCE y que el futuro de la fotogrametría analógica no es nada halagüeño (por la ausencia de emulsiones fotográficas en el mercado), el IPCE compró la cámara digital de Canon antes mencionada con objetivos de 15, 24, 50 y 100 mm., sistema de disparo por wifi y trípode de 7 m.

A modo de prueba se realizó la documentación de las pin-

turas murales del coro del Monasterio de S. Jerónimo de Granada con diferentes objetivos, comprobando que la mejor relación calidad / trabajo (fotográfico, topográfico y de rectificación) se conseguía con el objetivo de 50 mm. En las ortofotos se aprecian detalles de los materiales, humedad, deterioros, fisuras, etc y encima tenemos la información cromática de las pinturas con un gran detalle y precisión.

La documentación de esta capilla ha sido un trabajo muy especial para el departamento ya que ha permitido una evolución en el proceso de documentación por rectificación. Se empezó en el año 2007 con una cámara de bolsillo, viendo que los resultados no eran válidos pero si que tenía posibilidades la técnica se realizó una documentación completa con una cámara digital del IPCE de 6 MP. Analizados los resultados se vio que la calidad era a todas luces insuficiente. Una vez comprobado que el sistema era eficaz con S. Jerónimo retomamos la documentación de la Capilla Real, solucionando los problemas que encontramos en los trabajos anteriores. Utilizando el trípode de 7 m. hicimos barridos verticales de las paredes con el fin de obtener las imágenes lo más paralelas al objeto y sin inclinar. Sustitución de los focos por flashes que evitan el movimiento de la cámara sobre un trípode tan alto. Igualado de las tomas durante el revelado de los RAW, etc.

Aparte de las paredes que se documentaron por rectificación, se documentó la cúpula por fotogrametría estereoscópica y las plantas y secciones por delineación y topografía.

Con todo ello hemos obtenido una documentación precisa y muy útil de la citada capilla.

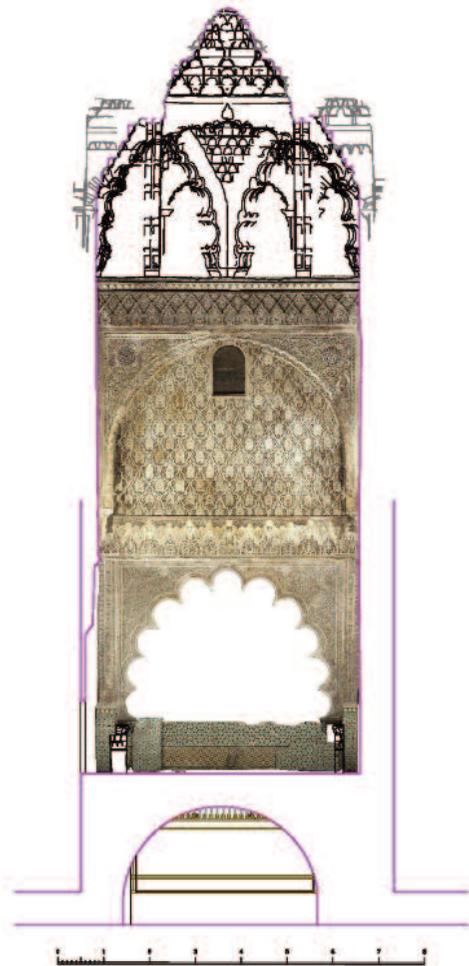
En los foto-planos se aprecian deterioros, policromía, etc., el resultado es una foto a escala, con lo que se tendrán las ventajas de la fotografía con la dimensionalidad de un plano. Sobre este documento es posible definir con toda precisión el mapa de daños previo a la restauración, pues se aprecian detalles ínfimos, que con esta metodología de trabajo son muy superiores a las precisiones correspondientes a la escala empleada.

(véase revista Patrimonio Cultural de España, nº 3, págs. 240 a 259).

### Escáner láser

El IPCE se encuentra en proceso de adquisición de un escáner láser 3D por lo que no podemos presentar resultados.

Ya en 2.003 el IPCE contrató el escaneado de la Cúpula de Regina Martiriun del Pilar de Zaragoza para obtener el modelo 3D con fotos pegadas y unas plantas y secciones con el fin de definir unas deformaciones en su estructura que por otros métodos no podíamos definir. Nos encontramos con los problemas que todo usuario de trabajos de escaneo tiene: los softwares de procesado son muy caros, las nubes de puntos no pueden tratarse mas que en programas



**Fig. 8** Sección por interior norte, Capilla Real Mezquita-Catedral de Córdoba (IPCE – JM. Lodeiro, Javier Laguna).



**Fig. 9** Ortofoto a 45°, cúpula Regina Martirium, Basílica de El Pilar de Zaragoza (IPCE – CT3).

especiales, la información aportada se reduce a secciones, orotofotos o en la mayoría de los casos Orto Nubes, que sólo soportan escalas muy grandes. Para mejorar todas estas cuestiones es por lo que consideramos oportuno la adquisición de un equipo.

## Documentación no métrica

### Fotografías

La documentación del patrimonio por medio de la fotografía es pareja a la invención de ésta y ha ido evolucionando en paralelo con ella. El instituto cuenta con los siguientes archivos fotográficos: Archivo Moreno, Archivo Cabré, Archivo Ruiz Vernacci, Fondo Arbaiza, Fondo Villanueva, Archivo Callejo, Archivo Loty, Archivo Pando, Fototeca digital.

En la actualidad toda intervención que se realiza en el IPCE lleva una documentación fotográfica anterior a la restauración otra durante el proceso y una tercera al finalizar el trabajo. Para ello cuenta con un equipo de fotógrafos.

### Fotos 360

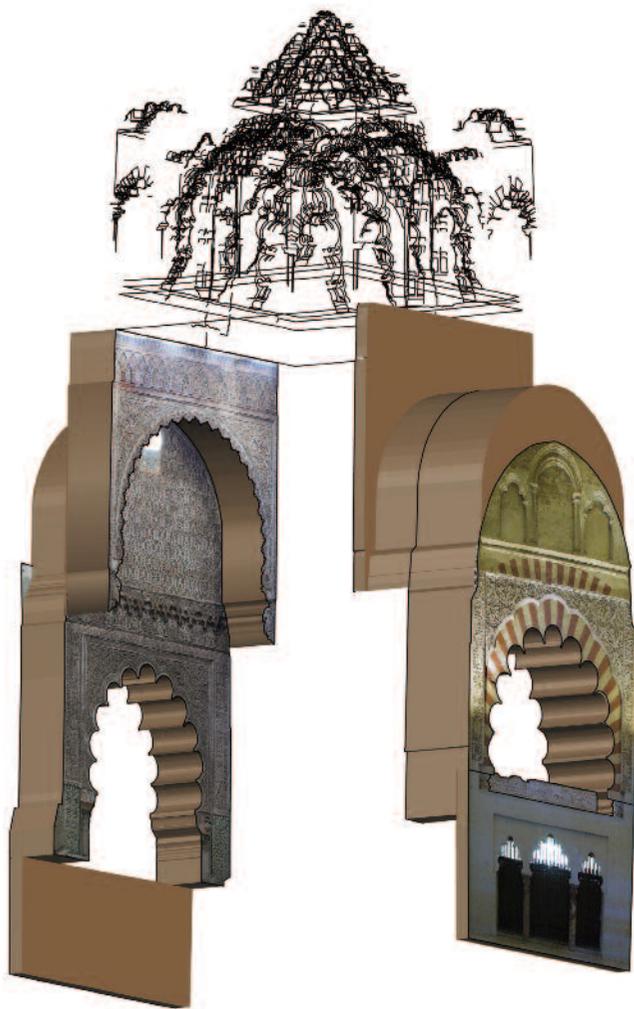
Este tipo de documentación no métrica ha tenido una gran acogida por los excelentes resultados obtenidos, la gran definición del objeto documentado, la sensación de realidad, las visitas virtuales te acercan con realismo a los objetos, esculturas o edificios completos. Una de sus aplicaciones más interesante, a parte de la divulgativa que todos conocemos, consiste en realizar por este sistema un montaje que permita contemplar el objeto que se está restaurando durante el periodo de su restauración.

### Modelos virtuales

Fundamentalmente se emplean en su faceta didáctica y divulgativa pero en nuestro caso los empleamos para mostrar aspectos relacionados con el trabajo, en el caso de la muralla de Roa para tener una visión clara del la dificultad que encierra la restauración, el montaje de los posibles andamios lo escarpado del terreno. En el caso del video de Sta. Fe de Toledo, el modelo se creó para recrear la solución más factible del montaje de los bloques encontrados. Con ello, obtener el modelo de la reconstrucción y posteriormente su ubicación en la sala del museo en que se va a exponer como pieza museística, determinando su mejor posición dentro de la sala con relación a las tumbas existentes en ella y su disposición

respecto a las vías de acceso, espacios, alturas de techos, etc. En este caso el vídeo es un material más de trabajo, de comunicación entre los diferentes profesionales que han de decidir sobre su ubicación.

Otro ejemplo lo tenemos en el arca de Bañolas, de la que se creó un modelo 3D en Autocad sobre el que se pegaron como textura las fotos plano paralelas realizadas con la cámara digital Canon EOS 5d. Sobre dicho modelo el restaurador no sólo puede medir, si no que tiene el estado del arca en el momento en que entró en el IPCE con todo lujo de detalles. A modo de documento se realizó un vídeo documental con el estado al llegar al IPCE y una vez restaurada.



**Fig. 8** Sección por interior norte, Capilla Real Mezquita-Catedral de Córdoba (IPCE – JM. Lodeiro, Javier Laguna).

## Bibliografía

ALMAGRO GORBEA, Antonio: levantamiento arquitectónico, Granada: Universidad de Granada, 2004.

- Los estudios previos en la restauración y rehabilitación de edificios, planimetría y fotogrametría, Cádiz: rehabilitación y ciudad histórica. I curso de rehabilitación del COAAO, Cádiz.

CARBONNELL, M: quelques aspects du relevé photogrammétrique des monuments et des centres historiques, Roma.

DOMINGO CLAVO, Luis: apuntes de fotogrametría, Madrid: escuela universitaria de ingeniería técnica topográfica, Universidad Politécnica de Madrid.

LERMA GARCIA, José Luis: fotogrametría moderna: analítica y digital, Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.

LODEIRO PEREZ, José Manuel: aplicaciones de la topografía en la documentación arquitectónica y monumental, Madrid: colegio oficial de ingenieros técnicos en topografía, Madrid 1995.

# Tecnologías ópticas aplicadas al arte y a la documentación del patrimonio

**Luis Granero Montagud**

AIDO (Instituto Tecnológico de Óptica, Color e Imagen)

Lgranero@aido.es

**Francisco Díaz Gómez**

AIDO (Instituto Tecnológico de Óptica, Color e Imagen)

**Rubén Dominguez**

AIDO (Instituto Tecnológico de Óptica, Color e Imagen)

**Yolanda Sanjuan**

AIDO (Instituto Tecnológico de Óptica, Color e Imagen)

18

## Curriculum

Luis Granero es licenciado en ciencias físicas por la Universidad de Valencia, en el año 2008 obtuvo la suficiencia investigadora con el trabajo “Revisión de Técnicas de Digitalización Tridimensional. Perfilometría por Transformada de Fourier”. En la actualidad está finalizando su tesis, orientada a técnicas de superresolución óptica aplicadas a microscopía. Es el Responsable del departamento de ingeniería de AIDO.

## Resumen

En el siguiente artículo se presentan diferentes técnicas ópticas que se han desarrollado para distintos sectores industriales y que tienen una aplicación directa en la documentación del patrimonio cultural. Estas técnicas tienen una ventaja fundamental respecto de las técnicas tradicionales de documentación, todas ellas son técnicas sin contacto, por lo que la integridad de la obra siempre se preserva. Además se presentan dos casos de estudio en los que se ha hecho uso de algunas de estas técnicas, generando información que no se podría haber obtenido por técnicas tradicionales. Por último se mencionan algunos de los desarrollos futuros en el campo de la óptica aplicada a la documentación de patrimonio, y las perspectivas de futuro de estas tecnologías.

## Abstract

In the following article a number of optical techniques developed for different industrial sectors and which have a direct application in the documentation of cultural heritage are introduced. Such techniques have a fundamental advantage with respect to the traditional ones used in documentation – all of them are non-contact, thus preserving asset integrity. Two case-studies are presented in which some of these techniques have been used, generating information which could not have been obtained by means of conventional methods. Finally, some future developments in the field of applied optics for cultural heritage documentation are mentioned, together with the future prospects of such technologies.

## Introducción

En la actualidad, el mundo del arte y la documentación del patrimonio está experimentando un cambio significativo, con la incorporación de diferentes sistemas ópticos de aplicación industrial a los procesos tradicionales aplicados a este sector. Estos sistemas permiten la adquisición de gran cantidad de información de la obra a analizar, en tiempos relativamente cortos. Estos sistemas basan su funcionamiento en diferentes

tecnologías ópticas como el láser, la luz policromática, la visión hiper-espectral, las imágenes termográficas, etc.

Los primeros sistemas ópticos lanzados al mercado basaban su funcionamiento en la proyección de una única línea sobre el objeto a medir, analizando cada vez la variación que sufría esta respecto de la original, y desplazando o bien la fuente de luz o bien el sistema de captación en cada una de las capturas. Posteriormente empezaron a utilizarse sistemas que proyectaban un patrón de rejilla conocido sobre el objeto evitando así el tener que desplazar los elementos del sistema en cada toma, el inconveniente de este método era que los algoritmos de procesamiento eran complejos y difíciles de tratar. Hoy en día estos problemas no se presentan, implementándose sistemas rápidos, precisos y robustos.

Del mismo modo, los sistemas de visión multispectral empezaron a emplearse como herramientas de análisis en teledetección, y hoy con la aparición de los filtros electrónicos permiten llevar a cabo análisis espectrométricos en obras de arte, sin necesidad de interactuar (de forma física) sobre la obra en cuestión.

## Técnicas ópticas para la documentación del patrimonio

Varias son las técnicas ópticas que tienen una aplicación directa en la documentación del patrimonio. Como se ha mencionado anteriormente estas técnicas tienen la particularidad que ninguna de ellas tiene un contacto físico sobre la obra a documentar. Este hecho las hace idóneas para las aplicaciones que en arte y patrimonio plantean. Las técnicas que se plantean a continuación se emplean en la documentación de piezas de pequeño formato (hasta 5 metros de tamaño), en el caso de la documentación de grandes obras (sobre todo para la captación de la morfología de la pieza) se emplean otro tipo de sistemas, como pueden ser los sistemas de scanner láser de larga distancia basados tanto en la tecnología de tiempo de vuelo, como en la diferencia de fase.

Analicemos a continuación las técnicas más extendidas en el campo de la documentación del patrimonio de pequeño formato.

### Técnicas de digitalización 3D

Por sistema de digitalización 3D se entiende todo sistema que es capaz de capturar la forma geométrica de un objeto, obteniendo las coordenadas locales, dentro de los ejes de referencia del propio sistema, de un conjunto discreto de puntos sobre dicho objeto.

Dentro de los sistemas de digitalización 3D hay dos grandes bloques. Los sistemas de contacto y los sistemas sin contacto. Debido a la naturaleza propia de la medición, los sistemas de contacto solo se utilizan dentro de la industria para la digitalización 3D de piezas rígidas (tipo metálicas). Dentro del sector del arte y el patrimonio, los sistemas más adecuados son los de no contacto, que evitan el problema de la contaminación en la medida cuando los objetos no son rígidos y no interactúan con el objeto, lo que evita posibles daños sobre el mismo.

Una vez se digitaliza un objeto, a partir del conjunto de puntos obtenido (comúnmente llamado nube de puntos) se obtiene, mediante la unión de dichos puntos por aristas, una malla poligonal, que es un objeto sólido desde el punto de vista digital, lo que permite realizar una serie de tratamientos y procesados posteriores que mejoran los procesos de documentación y una posible conservación de las obras de arte.

Dentro de las técnicas ópticas de digitalización 3D, se hablará de 4 tipos diferentes de sistemas:

- Sistemas de luz estructurada.
- Sistemas de luz láser.
- Sistemas de tomografía
- Sistemas de fotogrametría.

A lo largo de los últimos años, esta tecnología ha ido evolucionando muy rápidamente desde los primeros sistemas aparecidos hace algo más de una década. Los principales avances dentro de la digitalización 3D han sido, la resolución y la precisión de los mismos. Además de otro aspecto fundamental como la estabilidad del sistema frente a condiciones ambientales.

Aunque no tan visibles como estos en el resultado final, otros avances muy importantes se han producido en los algoritmos de procesado, reducciones de los tiempos de captura de la información, captación del color (en este sentido debe mencionarse que el avance se ha producido en el procesado de imagen y su aplicación sobre los modelos digitalizados). Por último, un aspecto fundamental, y que a lo largo de estos últimos años ha mejorado ostensiblemente es la facilidad de uso de este tipo de sistemas.

#### • Técnicas de digitalización 3D por luz blanca estructurada

Los sistemas de luz blanca estructurada son sistemas ópticos basados en la proyección de franjas de luz separadas por franjas de oscuridad. Analizando la deformación de dichas franjas es posible capturar la geometría del objeto a digitalizar.

Estos sistemas constan de dos elementos básicos para la medición:

- Proyector de patrones.
- Cámara CCD.

Las técnicas de proyección de patrones pueden clasificarse, en función de la estrategia utilizada, en tres grandes grupos:

- Técnicas de multiplexado.

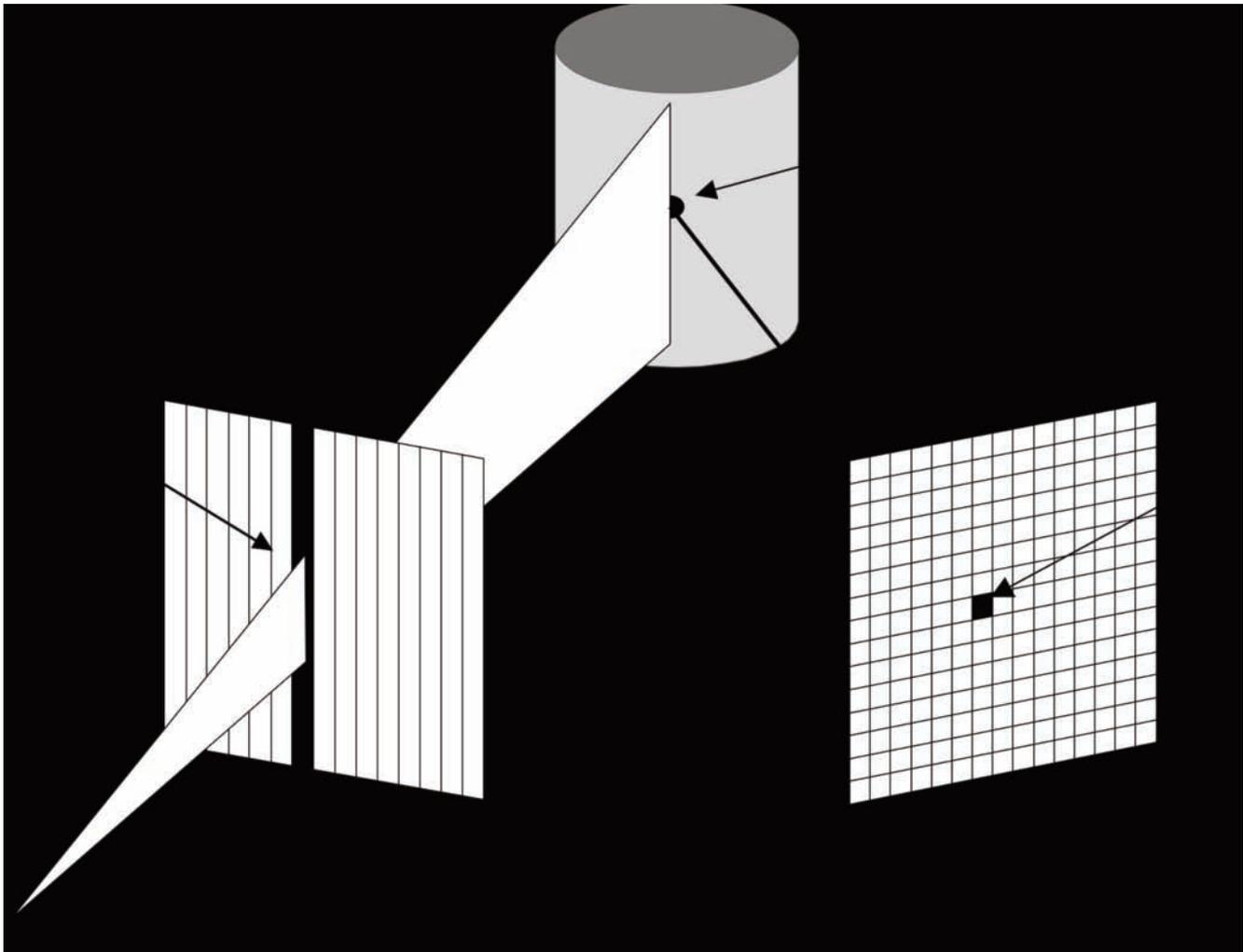


Fig. 1 Triangulación. Imagen: AIDO.

- Técnicas de vecindad espacial.
- Codificación directa.

Dentro de las técnicas de multiplexado, que son las más extendidas a nivel comercial, hay tres subgrupos diferentes:

- Técnicas binarias. En este caso, se utilizan únicamente dos niveles de iluminación, codificados por 0 ó 1. Cada píxel del patrón tiene su propia codificación compuesta por una secuencia de ceros ó unos. Este tipo de patrones son sencillos de codificar y procesar.
- Técnicas de N-ary códigos. Esta técnica reduce el número de patrones a proyectar sobre el objeto en cuestión. Sin embargo, utiliza un número mayor de niveles de iluminación, incrementando el nivel de información codificada en esos patrones.
- Técnicas de codificación en grises y desplazamiento de fase. Esta técnica consiste en la proyección de un conjunto

de patrones binarios que producen una división del objeto a medir en diferentes regiones. Además de este conjunto de patrones, se proyecta un patrón adicional que se desplaza sobre el objeto, para aumentar la resolución.

De estos tres submétodos, el último es el utilizado comercialmente como base para la fabricación de los sistemas de digitalización 3D por luz blanca estructurada.

El principio de medida es el siguiente: primero se proyecta un patrón de franjas de ancho variable, que a su vez se desplazan lateralmente. Desde la cámara se observa la deformación que sufren dichas franjas, que originalmente eran rectas, al proyectarse sobre la superficie del objeto. Una vez realizado esto, se procesa desde el ordenador la información obtenida.

A partir de los datos obtenidos en el proceso, se realiza un análisis de la deformación sufrida por las franjas para, mediante una transformada de Fourier, obtener los valores de distancia y generar así la nube de puntos del objeto.

— Las principales ventajas de este tipo de sistemas son: Son sistemas muy estables sobre la medida. Como el proceso de medida se basa en el análisis de la deformación de las franjas, sin un procesado de la luz reflejada por el objeto, se consiguen evitar los problemas derivados de esta. Así por ejemplo, se evita el ruido de Speckle, consistente en la formación de un anillo de ruido que distorsiona la superficie. Además, estos sistemas pueden digitalizar superficies policromáticas sin problemas.

Otro aspecto a destacar de los sistemas de luz blanca es que son sistemas muy precisos. Con un sistema de luz blanca se pueden obtener precisiones en torno a las 10 o 20 micras con resoluciones de unas 50 o 75 micras, lo que implica obtener una malla poligonal del objeto digitalizado con una calidad de detalle y una exactitud en su reproducción muy altas.

— Los principales inconvenientes son:

Están limitados en tamaño. El tamaño de captura no es muy grande, y si se quiere ampliar, la luz proyectada se dispersa en el espacio y se pierde la definición de los bordes de las líneas. Una posible solución es la utilización de sistemas de iluminación más potentes, pero esto tiene el inconveniente de que aumenta el ruido, por lo que la mejor opción para ampliar el tamaño de medida es la utilización de un sistema de fotogrametría como apoyo. Este punto se verá más adelante.

Un segundo inconveniente de este tipo de sistemas es que tienen un rango de trabajo limitado. En estos sistemas el rango de trabajo (espacio entre las distancias máxima y mínima donde el sistema puede capturar información) está determinado a la distancia de trabajo (distancia del sistema de digitalización al objeto) más menos la profundidad de campo del sistema. La solución a este problema se obtiene permitiendo la variación de la posición relativa entre emisor y receptor, variando la distancia y el ángulo entre ambos. De este modo se consigue tener diferentes rangos de trabajo que cubre todo el posible rango de trabajo desde la distancia mínima hasta la máxima la que el sistema puede trabajar obteniendo resultados dentro de los límites aceptables de precisión.

#### • Técnicas de digitalización 3D por luz láser

Los sistemas de luz láser se basan en la proyección de una línea láser por parte de un elemento del sistema, que hace de emisor, y el análisis de la reflexión de dicha luz, recogida por otro elemento que hace de receptor. Mediante algoritmos matemáticos se procesa la información recibida y por triangulación se obtiene la nube de puntos.

Las ventajas de estos sistemas son la velocidad de captura y la sencillez de uso. Además, son sistemas muy versátiles en

los que se puede escanear prácticamente a cualquier distancia, ya que disponen de elementos que ajustan dicha distancia de forma automática.

Por contra, estos sistemas tienen dificultades para digitalizar objetos policromáticos debido a la diferente reflexión de la luz según el color sobre el que incide, lo que genera un escalón en las zonas de transición de color del objeto. Otro problema surge al digitalizar zonas angulosas. Al digitalizar ángulos cóncavos se produce un fenómeno de interferencias en las proximidades de la arista de unión de las dos superficies, generando un ruido que deforma ambas superficies. Si quiere digitalizar ángulos convexos, debido a un fenómeno de difracción, se produce un escalonamiento en la arista.

Existe una variante de los sistemas láser cuyo campo de aplicación es la digitalización de objetos de gran tamaño. Estos sistemas utilizan una base tecnológica totalmente diferente, lo que les permite la digitalización de grandes extensiones de terreno o edificios. El rango de trabajo de estos sistemas, dependiendo de marcas y modelos, varía desde algunas decenas de metros hasta varios centenares, por lo que son útiles para la digitalización arquitectónica.

La ventaja de estos sistemas es que son fáciles de utilizar, ya que tras una pequeña calibración están listos para trabajar. Además, su precisión es de algunos centímetros en extensiones de hectómetros.

El mayor inconveniente es que, suelen utilizar luz láser de clase III, por lo que se deben de manejar con protección especial y se corre el riesgo de producir algún tipo de desperfecto en lo digitalizado.

#### • Técnicas de digitalización 3D por tomografía

Los sistemas de digitalización 3D por tomografía computarizada, también conocidos como metrotomografía, son una herramienta que la industria ha heredado de la medicina.

El funcionamiento básico es análogo a su versión médica. Consisten en un emisor de haces de rayos X que proyecta sobre el objeto a medir. Dicho objeto se posiciona sobre una plataforma rotatoria de giro controlado. Detrás de la plataforma rotatoria se coloca un panel que captura el haz tras atravesar el objeto. Posteriormente, software se reconstruye el objeto a partir de las vistas parciales que se han ido capturando.

Una ventaja de este tipo de sistemas es que se puede capturar tanto la superficie exterior del objeto como la interior, obteniendo un 3D del objeto total, en donde no quedan agujeros ni zonas de sombra.

Además, son sistemas de muy alta precisión, llegando a estar a la altura de las máquinas de medición de condenadas industriales, con la diferencia respecto a estas de que en estos

no se obtiene un conjunto discreto de puntos que nos dan una serie de cotas del objeto (como pasa en las máquinas de medición de coordenadas) sino que aquí, se obtiene una nube de puntos de alta densidad, igual que se generaría en un sistema de digitalización 3D estándar.

Un inconveniente es la limitación en tamaños, no pudiendo digitalizar un objeto más grande que el tamaño de la cámara de digitalización o más pesado que las especificaciones de la mesa rotatoria, ya que la alta precisión de giro de la plataforma la hace muy sensible al peso que se le ponga encima. El rango de pesos de estos sistemas (que dependen de marca y modelo) va desde 1 Kg. hasta unos 60 Kg. En el caso de los tamaños, el rango puede variar desde unos pocos centímetros (entre 10 y 20 centímetros los más pequeños) hasta algo más de 1 metro.

Otro inconveniente es la contaminación radiactiva. Estos sistemas están basados en la proyección de rayos X sobre la pieza a estudiar, por lo que un primer análisis nos ha de determinar si la pieza puede ser sometida al proceso de medición o no. En un segundo paso, se ha de evaluar es el grado de contaminación sobre el individuo. Hay que tener en cuenta que, como todo sistema de rayos X, este requiere de unas protecciones y unas normas y protocolos de seguridad para su manejo, debido a la delicadeza del trabajo. Además, han de seguir un plan de control y seguridad muy estricto y necesitan personal cualificado para su manejo o, al menos, una persona de calificación cerca.

Por último, este tipo de sistemas puede generar errores si se desea digitalizar objetos metálicos o de materiales muy densos, ya que el haz de rayos X no los puede atravesar.

- Técnicas de digitalización 3D por fotogrametría

Los sistemas de fotogrametría son sistemas basados en la reconstrucción fotográfica de objetos en 3D. El proceso consiste en obtener imágenes del objeto a medir (que puede ser un objeto o un terreno o edificación), capturando cada zona desde diferentes ángulos. Posteriormente se realiza un procesamiento de dichas imágenes, seleccionando puntos que son comunes en cada par de fotografías para generar una correspondencia entre estas.

Un aspecto importante de estos sistemas es la calibración inicial del sistema, donde se ha de obtener el error de medida que se obtendrá a la hora de procesar las imágenes obtenidas. Además, se ha de realizar un dimensionado correcto del espacio para que el resultado respete la escala original.

Esta técnica, que es básica en topografía, es aplicable a cualquier sector, ya que el único requisito para trabajar es cubrir toda la superficie del objeto con fotografías. Sus principales ventajas son la portabilidad, ya que solo hay que

trasladar una cámara de fotos y el coste, muy inferior al de cualquier sistema de digitalización.

Por contra, en estos sistemas la precisión depende, en primer lugar, de la calidad de la fotografía digital con la que se trabaja. A mayor calidad de fotografía, mayor definición de detalles y mayor ajuste del alineamiento de las fotografías, pero también mayor coste económico y mayor tiempo de procesado. En segundo lugar, hay que tener en cuenta que este procesado es manual, por lo que existe un factor humano muy importante (el resultado final depende de la experiencia y habilidad de la persona que realiza el trabajo).

### Captura de patrones RGB

Para la captura de la colorimetría del objeto, en vez de trabajar con los métodos estándar de captura de imagen de tipo fotográfico, se ha trabajado con un sistema de proyección de patrones de color. Este método, similar en fundamento al anterior de proyección de patrones, se basa en la proyección de los patrones básicos del espectro colorimétrico (los tres patrones RGB) y el análisis de la imagen del objeto de trabajo obtenido con cada uno de estos patrones. Por comparación entre los patrones de calibración del sistema y los obtenidos en la lectura se obtienen valores RGB de la pieza en cada uno de los píxeles de lectura, generando un mapeado RGB de la pieza. Dado que la lectura RGB se realiza desde la misma cámara de lectura geométrica, lo que se obtiene una correspondencia uno a uno entre los píxeles de geometría y las coordenadas colorimétricas, lo que se traduce en una correspondencia uno a uno entre los puntos geométricos y los puntos de color. Esto se traduce en un alineamiento perfecto entre geometría y color, eliminando ambigüedades y/o desfases entre cada uno de los conjuntos de datos, obteniendo una alineación limpia y sin defectos.

### Casos prácticos: digitalización 3D aplicada a la documentación de patrimonio

A continuación se mostrarán dos ejemplos de aplicación de la digitalización 3D a la documentación de patrimonio, ambos sobre obras históricas de la antigüedad.

#### Mano de bronce

El primer ejemplo de aplicación es la digitalización de una mano de bronce romana. En este caso, la obra tratada fue un resto arqueológico, perteneciente al MARQ de Alicante, consistente en una mano de bronce asiendo la empuñadura de una espada. El trabajo realizado por AIDO consistió en la digitalización 3D del resto arqueológico para su integración dentro de un modelo de cuerpo completo que permitió



Fig. 2 Mano de bronce. Imagen: AIDO.

la reconstrucción parcial de la estatua original y, a partir de esto, la extracción de información de dos tipos:

- Información de escala. Dadas las dimensiones de la mano encontrada, y ensamblándola a un cuerpo genérico, se pudo obtener un tamaño aproximado de la estatua de 2,20 metros.
- Información de posición relativa. Mediante estudios ergonómicos y anatómicos, se pudo extraer la posición en la que la espada yacía sobre el brazo, pudiendo extraer la pose en la que el personaje representado se presentaba en la estatua.

A partir de esta información, y junto a otros tipos de estudio, se pudo realizar una documentación de la pieza que permitió ubicar, espacial y temporalmente, la estatua original, formulando posibles hipótesis de la personalidad representada.

#### Virgen del Rebollet

Como segundo caso práctico de aplicación se presentará la digitalización 3D de una talla de madera de una virgen.

En este caso, la digitalización de la obra de patrimonio se realizó con dos fines:

- Preservación. Gracias a la digitalización 3D de la obra, se obtuvo una versión 3D digital del original, lo que posibilita la generación de réplicas de la obra para su uso cotidiano, manteniendo bajo condiciones óptimas de conservación el original, evitando que esta se dañe y disponiendo en todo momento de una referencia para que, en caso de dañado de la réplica, disponer de una referencia con la que obtener otra réplica que sustituya a la dañada. En todo este proceso, el principal beneficio consiste en que la obra original no sufre ningún tipo de daño.
- Documentación. A partir de la morfología 3D extraída de la obra, se realizaron estudios de catalogación de la pieza, generando versiones digitales de la obra para su intercambio entre los diferentes miembros de la ejecución del estudio que permitieron trabajar sobre la obra virtual sin hacer uso del original, permitiendo su preservación.



Fig. 3 Virgen del Rebollet. Imagen: AIDO.

## Bibliografía

GRANERO, L.; DÍAZ, F. DOMÍNGUEZ, R. (2009): "Application of optical techniques in documentation and identification of archaeological rests: the case study of the roman bronze rest found in Lucentum", SPIE Optical Metrology Congress. 14-18 June. Munich, Germany.

GRANERO, L.; SÁNCHEZ J. ESTEVE-TABOADA J. J. HERVÁS J. (2007): "3D Digitising using Structured Illumination: Application to Mould Redesign" Optical Measurement Systems for Industrial Inspection V Conference. 18 June. Munich, Germany.

GRANERO L.; DE GRACIA V. (2004): "Técnicas de digitalización tridimensional basadas en luz estructurada" II Congreso Diseño, Tecnologías e Ingeniería de Producto. 5 -7 de Mayo. Valencia, España.

HUNTLEY J. (1998); "Automated fringe pattern analysis in experimental mechanics: a review". J. Strain Anal Eng Des.

PAGÉS J.; SALVI J. GARCÍA R. MATABOSCH C.: "Overview of coded light projection techniques for automatic 3D profiling". 1003 IEEE International Conference on Robotics & Automation.

# Veintidós años de experiencia de fotogrametría arquitectónica en la Escuela de Estudios Árabes, CSIC

Antonio Almagro

Escuela de Estudios Árabes, CSIC

Laboratorio de Arqueología y Arquitectura de la Ciudad, LAAC

aalmagro@eea.csic.es

26

## Resumen

En el año 1987 se inició en la Escuela de Estudios Árabes de Granada una nueva línea de investigación sobre arquitectura islámica fundamentada en el uso de documentación planimétrica rigurosa. Para tal fin se fue poniendo en funcionamiento un equipo de fotogrametría con instrumentación y personal adecuados. Trascurrido ya un período de tiempo significativo, los resultados de este proceso de documentación pueden ser analizados con suficiente perspectiva comprobando los logros alcanzados, tanto a nivel cuantitativo, por el copioso número de edificios documentados, como cualitativo por la mejora de la calidad de información hoy disponible en relación con la existente con anterioridad y por el desarrollo de métodos simplificados que posibilitan un uso extendido de estas técnicas.

Por otro lado, la experiencia acumulada en estos años permite hacer una valoración crítica de las nuevas formas de documentación y representación de la arquitectura en relación con los sistemas hasta ahora utilizados.

## Abstract

In 1987 a new line of research about Islamic architecture was started in the School for Arabic Studies. It was based on

the use of accurate planimetric documentation. In order to do so, a photogrammetry team was created with adequate instruments and personnel. After a significant amount of time, the results of this documentation process can be analysed with enough perspective to evaluate how the goals have been achieved, both in quantity, for the high number of buildings that have been surveyed, and in quality, for the improvement of the quality of information available today in relation to that that was available in the past, and for the development of simplified methods that allow an extensive use of these techniques.

At the same time, the experience accumulated during these years allows a critical evaluation of the new recording and architectural representation methods in relation with the systems used until now.

## Introducción

Desde que en 1987 se incorporó a la Escuela de Estudios Árabes un grupo de investigación dedicado al estudio de la Arquitectura Islámica, con especial atención a la de al-Andalus, se pensó que contar con una información planimétrica fundamentada en el rigor y la precisión, era imprescindible para garantizar la validez de cuantos estudios se abordaran poste-

riormente, pues pensamos que la planimetría es una forma de conocimiento fundamental en la investigación de la arquitectura. Para ello resultaba forzoso disponer de los medios técnicos más adecuados para obtener esta documentación arqueológica y arquitectónica. La experiencia de muchos años dedicados a la restauración de monumentos y a la documentación y estudio del patrimonio nos aconsejó integrar todas las técnicas posibles, tanto manuales como instrumentales.

Contar con una correcta documentación planimétrica de la arquitectura es uno de los requisitos fundamentales tanto para la catalogación y protección del patrimonio edificado como para su estudio y análisis, procesos que por otro lado están claramente interrelacionados. La identificación de los elementos arquitectónicos recibe su mejor expresión en la misma forma en que se suele realizar su proceso creativo, es decir, a través del dibujo que une a la mera representación gráfica, las cualidades mensurables del propio edificio. El dibujo permite su individuación por medio de la imagen y de la medida.

La representación de la arquitectura del pasado con fines de preservación y estudio plantea problemas específicos, pues el conocimiento de las formas reales resulta indispensable tanto para el análisis de las necesidades de su conservación, como para un correcto estudio histórico y formal, ya que en

ambos casos hay que separar la realidad física de la mera interpretación formal, bien sea estructural o tipológica.

Naturalmente, estas necesidades se pueden plantear en distintos grados según la fase del proceso de preservación o de estudio, pero evidentemente, en todo momento debe evitarse dar por representación de la realidad aquello que es solo una interpretación formal de esa realidad. En una palabra, resulta imprescindible disponer de información lo más objetiva posible de los bienes a proteger.

Las características especiales que presenta la arquitectura islámica y las dificultades consiguientes para su adecuada documentación, junto con la experiencia de muchos trabajos de este tipo realizados a lo largo de muchos años (Almagro 1986, 1988, 1992, 1996, 2004), nos han conducido a utilizar la fotogrametría como la técnica más idónea. Tanteen la documentación de arquitectura como arqueológica.

## Medios utilizados

Siempre hemos procurado utilizar la tecnología disponible en cada momento adecuándola a nuestras necesidades, aunque rigiéndonos en todo caso por criterios de eficacia y eco-



Fig. 1 Laboratorio de fotogrametría en el Laboratorio de Arqueología y Arquitectura de la Ciudad (LAAC) de la Escuela de Estudios Árabes, CSIC.

nomía. Inicialmente se adquirió un restituidor estereoscópico analítico de pequeño formato Adam MPS2, como solución económica frente a los restituidores de alto coste. Este instrumento dispone de un interfaz que permite la restitución "en línea" en AutoCad, con las ventajas de edición y corrección simultáneas a la restitución. Algunos años después pudimos adquirir un restituidor analítico de gran formato LEICA SD2000 con el que pudimos acometer restituciones de fotografías aéreas así como abordar trabajos de mayor precisión. Para realizar los levantamientos y obtener la precisión adecuada nos dotamos al comienzo de una cámara semimétrica Rolleiflex 6006 Metric con objetivos de 40 mm y de 80 mm. Con estos instrumentos empezamos a trabajar en 1988. Más recientemente hemos podido también disponer de una cámara métrica tipo TMK.

Posteriormente tuvimos la experiencia de transformar una cámara Hasselblad SWC en cámara semimétrica mediante la inclusión de una retícula reseau en el plano de imagen y la calibración, por ajuste de haces, de las constantes de cámara y de la distorsión del objetivo. Los resultados fueron plenamente satisfactorios, habiendo realizado después varias transformaciones parecidas para su uso por otros colegas, sirviendo después esta experiencia para hacer más recientemente calibraciones de cámaras digitales.

La preocupación que siempre hemos tenido de hacer de la fotogrametría un sistema efectivo, no tanto por su precisión sino por las facilidades que ofrece en la toma de datos y en la

documentación de objetos complejos nos ha movido constantemente a utilizar métodos que simplifiquen el trabajo de campo y sobre todo, la instrumentación requerida, tratando de que ésta se reduzca a una cámara fotográfica y algún otro instrumento de medida de fácil transporte (cinta métrica o metro-láser). De este modo tratamos de reducir los elementos de control para orientar el modelo a disponer de una medida de distancia y una serie de referencias tomadas del propio objeto, tales como un plano vertical u horizontal y una línea horizontal o vertical dentro de dicho plano para definir los planos y ejes del sistema de proyección. Este método simplificado, que hemos ido adaptando a las distintas instrumentaciones disponibles, es sólo aplicable a objetos de mediano tamaño y que puedan documentarse con uno o pocos modelos estereoscópicos. En todo caso, seguimos utilizando los restituidores analíticos con fotografías métricas y semimétricas y datos de apoyo topográficos para los grandes proyectos de documentación, pero adoptamos sistemas más simples para gran parte del trabajo cotidiano de investigación que no requiere de grandes precisiones y que generalmente afecta a edificios menores.

Durante este tiempo, la aparición de la fotografía digital ha supuesto una revolución también para la fotogrametría al permitir extender su uso entre profesionales de otros campos científicos. El hecho de que las imágenes digitales contengan en sí mismas y de forma explícita los datos métricos para su explotación sin necesidad de ser extraídos mediante costosos instrumentos de medida, ha permitido reducir drásticamente el coste de los equipos necesarios. Esto permite a los arquitectos y a los arqueólogos valerse de estas técnicas aportando al proceso elementos decisivos para la calidad del levantamiento como pueden ser la adecuada interpretación del objeto y los criterios y modos adecuados de representación.

Durante estos años hemos venido utilizando el software ASRix de rectificación de imágenes desarrollado por nuestro amigo Steve Nickerson para la realización de fotoplanos de superficies planas (alzados, pavimentos,...). Este software tiene la ventaja de permitir trabajar dentro del entorno de AutoCAD insertando las fotos rectificadas en un espacio tridimensional de manera muy intuitiva y sencilla. Para la restitución estereoscópica y tridimensional hemos usado hasta fecha muy reciente el software VSD del Prof. J. Jachimski, basado en la visión tridimensional, mediante un estereoscopio, de los pares de fotos presentados en la pantalla del ordenador.

Este equipo se apoya en dos ideas básicas: que resulta de manejo sencillo, y por tanto de fácil aprendizaje, y que permite trabajar con un mínimo de instrumentos en campo y de manera rápida, permitiendo reducir de forma notable el trabajo a desarrollar fuera de la oficina. A ello se suma un

28



Fig. 2 Dispositivo de sobremesa y portátil para la restitución digital con el programa VSD.

costo reducido. Además logramos combinar todos estos componentes con la puesta a punto de un sistema fotogramétrico portátil, susceptible de ser transportado y utilizado en cualquier sitio, y con enormes posibilidades de uso especialmente en el campo de la arqueología.

En la actualidad estamos trabajando con el software Poivilliers F desarrollado por Yves Egels, ingeniero del Institut Géographique National de Francia, que une a todo lo antes enunciado la comodidad de trabajo gracias al uso de gafas de obturación por control infrarrojo, que el desarrollo tecnológico ha puesto a nuestro alcance a un coste perfectamente asumible. El conjunto del monitor LCD Samsung SyncMaster 2233RZ y las gafas Nvidia 3D Vision proporciona una visión estereoscópica perfecta a un precio que nada tiene que ver con el de los equipos disponibles hace algún tiempo. Requiere una tarjeta gráfica estéreo del tipo Nvidia Quadro de gama media. En todo caso, puede utilizarse incluso sin estos periféricos mediante gafas de anaglifos, algo menos cómodas pero totalmente eficaces. Este software de distribución libre, resulta de una gran facilidad

de manejo, plenamente fiable en los procesos de orientación de los modelos, y totalmente operativo en las tareas de restitución, obteniéndose dibujos de fácil exportación a sistemas de CAD.

Sólo esperamos que en un plazo breve pueda ser también utilizado en ordenadores portátiles gracias a la salida al mercado de hardware para aplicaciones multimedia en 3D de amplia difusión.

## Metodología

El recurso a la topografía sigue siendo fundamental en nuestro trabajo. La medición topográfica la hemos utilizado siempre para establecer sistemas de referencia y especialmente para el levantamiento de plantas, aunque también realizamos levantamientos íntegramente con esta técnica. Pero principalmente este procedimiento nos permite obtener las mediciones de apoyo necesarias para las restituciones de fotogrametría.

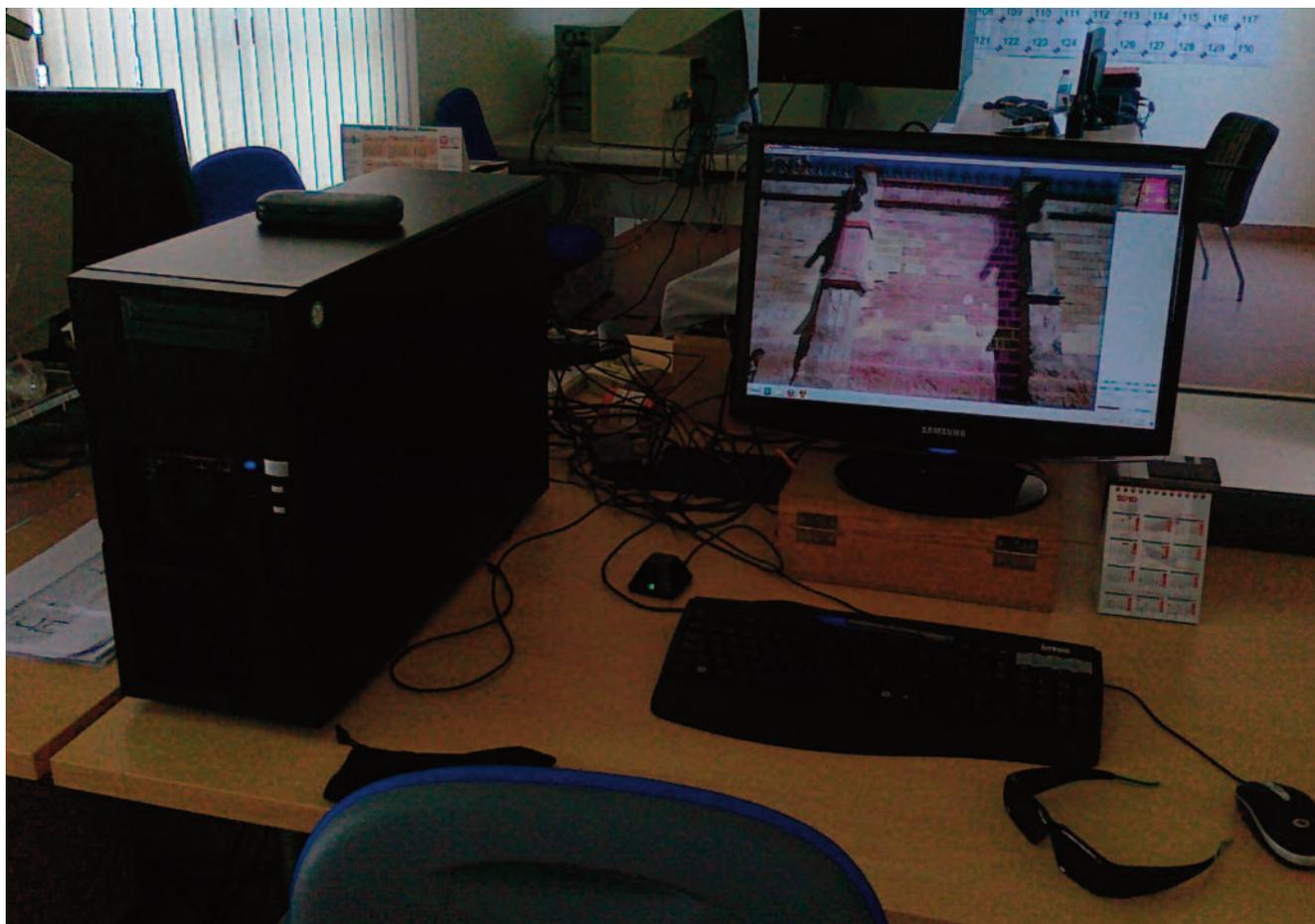


Fig. 3 Sistema de restitución PoivilliersF con pantalla y gafas de oclusión para visión estéreo.

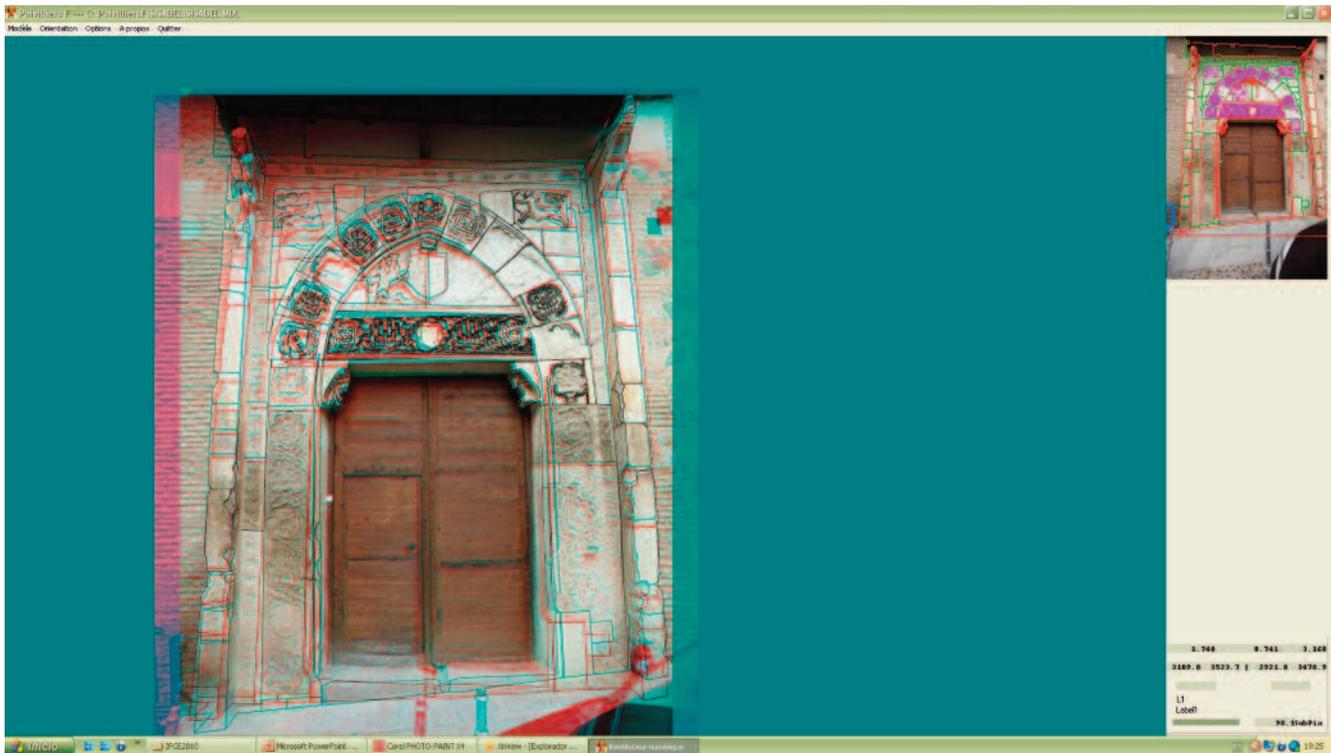


Fig. 4 Pantalla de restitución del sistema PoivilliersF con sistema de visión estéreo por anaglifos con superposición del dibujo restituído.

30

Sin embargo, el levantamiento realizado únicamente mediante la medición con estación total de puntos sueltos, de gran precisión y fiabilidad, no resulta suficiente para muchos de nuestros propósitos. La arquitectura árabe en general y la hispanomusulmana de forma especial, suelen presentar elementos ornamentales de pequeño tamaño y con gran profusión de motivos decorativos, cuyo registro por el método de punto a punto es prácticamente inviable. También en las excavaciones se presentan igualmente elementos de estructura compleja cuyo registro por el procedimiento de punto a punto puede resultar igualmente inabordable. Así pues consideramos siempre imprescindible poder contar con sistemas de fotogrametría.

Con el desarrollo la fotografía digital, hemos recurrido, como ya se ha dicho, al uso de software de rectificación fotográfica que resulta de una gran eficacia, siempre que el objeto a medir sea plano o de muy escaso relieve. De no ser éste el caso, se hace imprescindible acudir a la fotogrametría de imágenes múltiples. En nuestro caso, decidimos utilizar la técnica de la estereofotogrametría por considerar que la visión estereoscópica constituye ya de por sí un auxiliar valioso para el análisis y la interpretación de la arquitectura y el medio más eficaz para permitir el dibujo continuo de elementos que, por su complejidad, no es posible asimilarlos a formas geométricas sencillas.

La innovación en el campo de la restitución fotogramétrica cuando el resultado que se desea obtener son las representaciones tradicionales de plantas, alzados y secciones resulta difícil, pero sí se ha venido haciendo en el de la toma de datos, que es una etapa crucial pues generalmente se realiza lejos del lugar habitual de trabajo y frecuentemente con penuria de medios auxiliares y de tiempo. Además, la toma de datos condiciona absolutamente las posibilidades y alcance del levantamiento. En este ámbito hemos ido adquiriendo gran experiencia para realizar las tomas fotográficas simplificando su obtención, permitiendo hacerlas en breve plazo y reduciendo en lo posible las mediciones complementarias. El levantamiento con medición de puntos de control con coordenadas tridimensionales exige generalmente utilizar un teodolito, lo que supone más equipo a transportar y sobre todo, emplear personal cualificado y más tiempo en la toma de datos. La medición con métodos topográficos resulta, a pesar de todo, indispensable cuando el edificio es muy grande o muy complejo y exige trabajar con muchos pares estereoscópicos o cuando es necesaria una precisión alta. Pero en muchas ocasiones, sobre todo para casos de simple inventario o catalogación de edificios o de un primer análisis y diagnóstico, puede acudirse a métodos más simples, si como ocurre habitualmente nada nos impide establecerse

un sistema arbitrario de referencia, solo condicionado por el mantenimiento de un plano horizontal como única referencia obligada. Las posibilidades que el propio software y en especial el CAD ofrecen para fijar direcciones y planos de proyección, pueden simplificar notablemente los trabajos de campo.

De las distintas pruebas realizadas, para edificios u objetos que pueden ser documentados con un solo par de fotografías, el método más sencillo consiste en fijar un nivel a la cámara para que el plano de la imagen sea vertical y de este modo establecer un sistema de referencia en base a dicho plano de la cámara izquierda. Basta en este caso con tomar una medida o colocar sobre el objeto una referencia de longitud para poder tener los elementos suficientes para una restitución que se realiza tras una simple orientación relativa de las fotos y un ajuste de la escala. El restituidor Adam cuenta con una opción de orientación para estos casos. Un nivel de burbuja, fijado en el soporte del flash de la cámara proporciona una precisión suficiente, de en torno a 1°. En todo caso el error que se genera en las medidas realizadas sobre el plano de proyección principal puede considerarse insignificante en la mayoría de los casos, cuando se trata de restituir simples alzados de edificios de mediano tamaño.

Otro sistema utilizado consiste en la fijación del sistema de referencia mediante elementos contenidos en las fotografías, tal como una plomada o una línea nivelada. Actualmente, los sistemas de fotogrametría digital que usamos permiten realizar dichos ajustes de modo sencillo. VSD cuenta con un modo de orientación adaptado a estos casos. Con Poivilliers F se puede utilizar un sistema de mínimo control a base de tres puntos con altimetría únicamente para determinar un plano que puede ser vertical u horizontal, y dos puntos con las tres coordenadas que permiten fijar una distancia y una dirección horizontal o vertical.

De este modo, con un par de fotografías adecuadamente obtenidas según el caso normal o próximo a él, una distancia medida sobre una línea horizontal o vertical y la referencia de un plano vertical u horizontal sobre el objeto (fácil de definir en una fachada o un pavimento) se pueden lograr, sin dificultad, documentos gráficos y métricos con muy escaso esfuerzo de trabajo de campo.

## Ejemplos de trabajos realizados

Se muestran en las distintas figuras que acompañan el texto distintos ejemplos de trabajos realizados mediante el uso de estos instrumentos y métodos.

Junto a casos de grandes monumentos con dificultades añadidas por su tamaño o complejidad y que se han docu-

mentado de manera sistemática con fotogrametría tradicional mediante restituciones en instrumentos analíticos de fotos métricas con apoyo basado en redes topográficas, se incluyen ejemplos de trabajos realizados con toma de datos muy reducida.

La Catedral, el Alcázar y la Iglesia de El Salvador de Sevilla, las catedrales de Guadix y Albarracín o la cartuja de Granada son, entre otros, ejemplos de documentación de grandes monumentos, el primero de ellos la mayor catedral gótica de Europa por la superficie que ocupa, y el último un caso de ornamentación extremadamente compleja y extensa.

Ejemplos de documentación de edificios con ornamentación islámica compleja muestran la idoneidad de estas técnicas para este tipo de elementos como es el caso del Alcázar Genil o el Cuarto Real de santo Domingo de Granada.

La documentación de portadas de palacios medievales de Toledo, de los que mostramos algún ejemplo, fue llevada a cabo en una visita rápida tomando pares estereoscópicos y simples distancias, con vistas a la confección de un catálogo. En apenas dos horas se hizo toda la toma de datos, incluyendo el tiempo de desplazamiento dentro de la ciudad. Otros ejemplos son los levantamientos de las puertas de las fortalezas de Carmona (Sevilla) y Gormaz (Soria).

Caso interesante de aplicación de este método simplificado a un edificio relativamente complejo es el levantamiento del pabellón o qubba occidental del palacio del Badi de Marrakech. Para este trabajo se tomaron pares estereoscópicos con cámara digital de todos los paramentos junto con las medidas necesarias para dibujar la planta, obtenidas mediante un Leica Disto. Algunas de estas medidas y observaciones en el propio edificio, como la comprobación de la verticalidad de los muros o las huellas de los zócalos de alicatado que marcan una línea horizontal en todos los paramentos, permitieron una restitución completa y en 3D de la totalidad del monumento con la que poder abordar su estudio y las hipótesis de su forma original.

## Reflexiones sobre el presente y el futuro

Lo que venimos conociendo como levantamiento arquitectónico no es más que una manera de recrear un modelo reducido del objeto, capaz de contener suficiente información que permita transmitir un conocimiento adecuado del mismo que permita, entre otras cosas, la toma de decisiones necesarias para su adecuada conservación.

La evolución de las tecnologías aplicadas a la documentación del patrimonio cultural y la aparición de nuevas formas de representación de la arquitectura obligan a reflexionar



Fig. 5 Sección transversal de la catedral de Sevilla por la galería del Lagarto, cabecera y sacristía mayor.

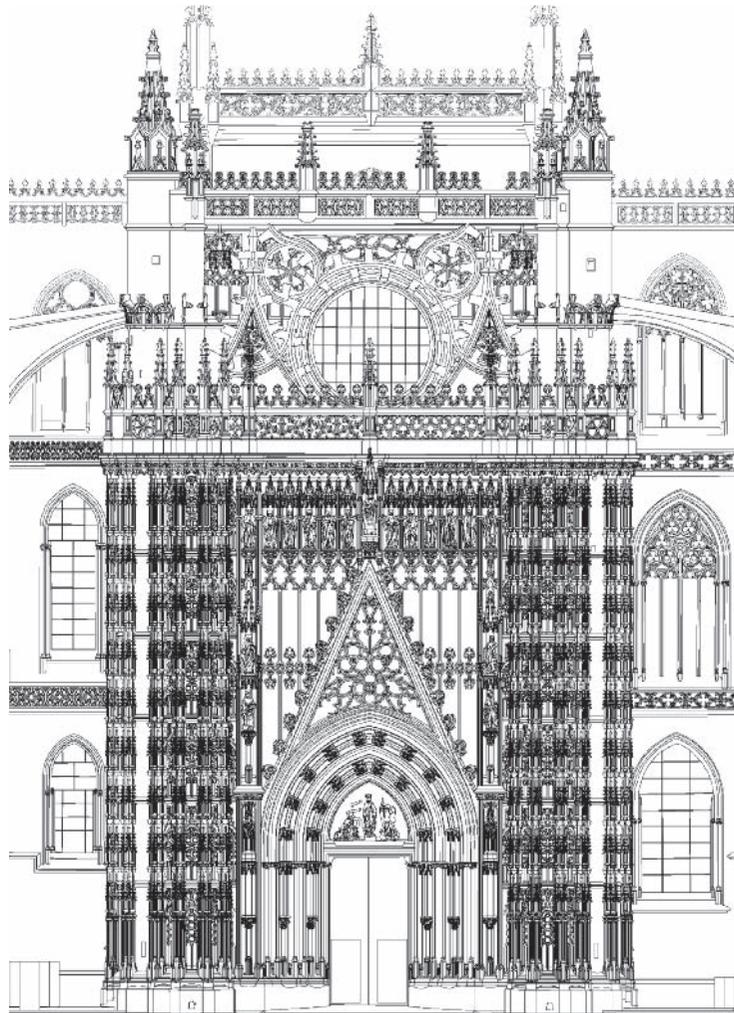


Fig. 6 Portada norte de la catedral de Sevilla.



Fig. 7 Sección transversal del Alcázar de Sevilla.



Fig. 8 Alzado norte de la Iglesia Colegial de El salvador de Sevilla.



Fig. 9 Sección de la Cartuja de Granada por la sacristía, cabecera, sala capitular y antigua iglesia.

34

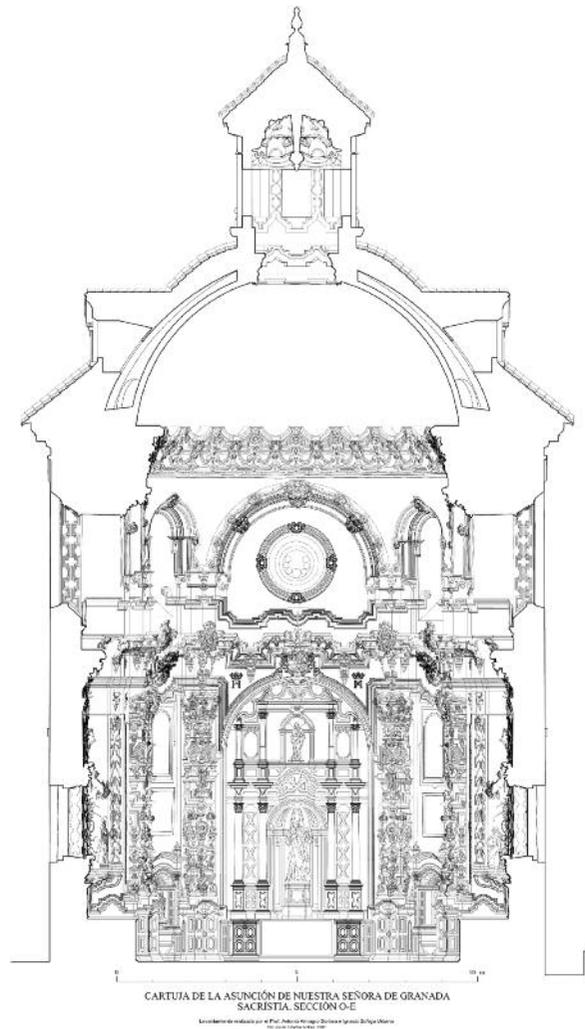
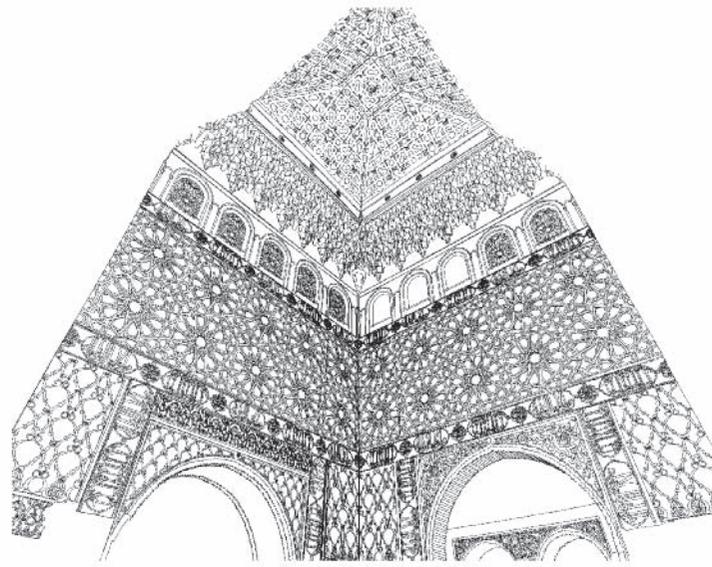


Fig. 10 Sección transversal de la sacristía de la Cartuja de Granada.



ALCAZAR GENIL. GRANADA.

ESCUELA DE ESTUDIOS ARABES. C.S.I.C. A.ALMAGRO/ arq.

Fig. 11 Restitución de la qubba del Alcázar Genil de Granada.

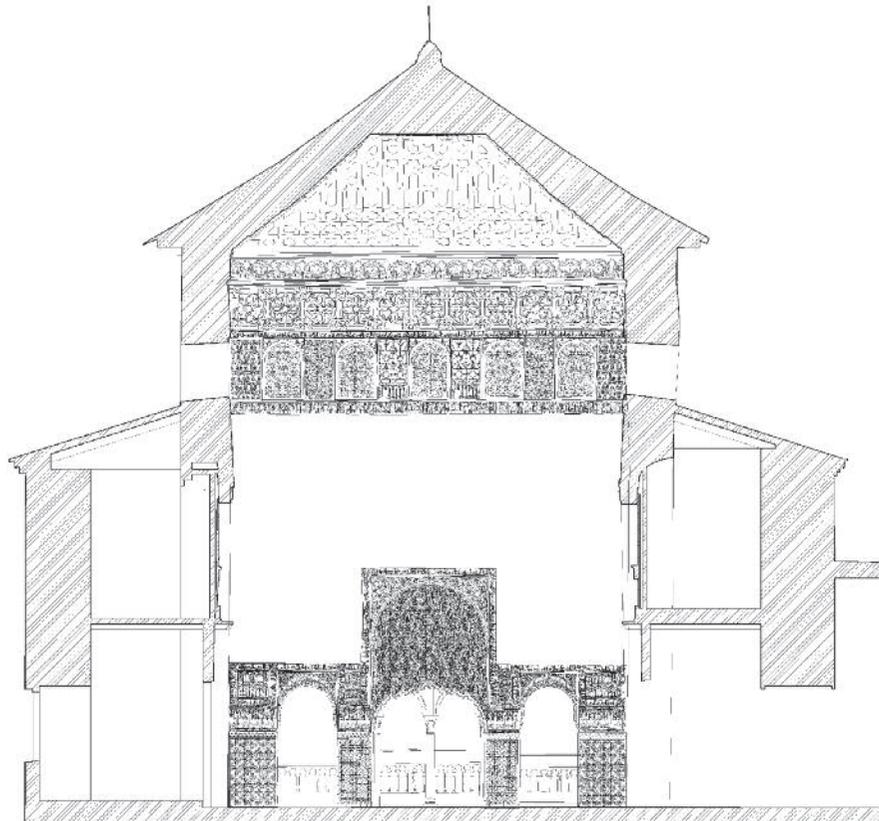
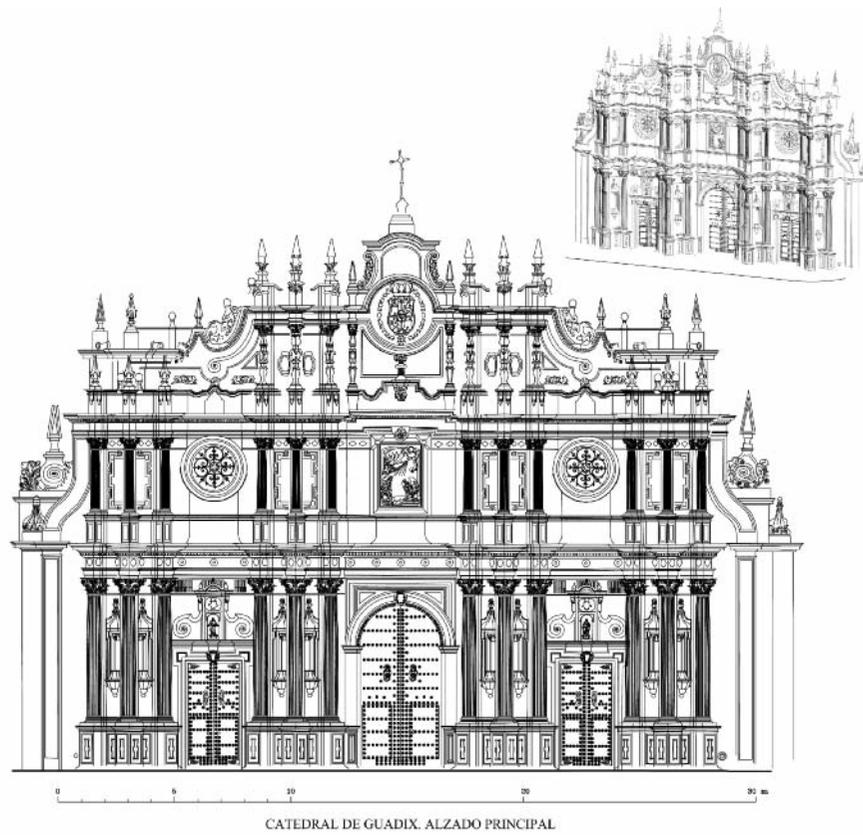


Fig. 12 Sección transversal de la qubba del Cuarto Real de Santo Domingo de Granada.



CATEDRAL DE GUADIX. ALZADO PRINCIPAL

Fig. 13 Fachada de la catedral de Guadix, en alzado y en vista axonométrica.

sobre la utilidad y verdaderas posibilidades de uso de los resultados obtenido con estos nuevos medios por parte de los profesionales involucrados en las tareas de conservación de ese patrimonio.

Tradicionalmente el modelo se ha venido generando a través del uso de dibujos realizados siguiendo las normas de la geometría descriptiva, obtenidos mediante proyecciones ortogonales sobre planos en los que la dirección vertical del espacio es la única referencia obligada. Este sistema de representación, pese a que a veces produce imágenes del objeto muy distintas a las que nos proporciona la experiencia visual inmediata, permite la obtención de información de tipo métrico de una manera directa. Por otro lado, el dibujo de línea obliga a una simplificación del objeto basada en una selección de los elementos más significativos, que pese a su subjetivismo, facilita la comprensión del edificio. Los sistemas utilizados hasta ahora, medición directa o restitución fotogramétrica, obligan a la participación de un operador que es el responsable de analizar el objeto, extraer los datos significativos y producir la representación.

Conviene no olvidar, que la fotogrametría clásica, basada en la restitución estereoscópica, no es más que una técnica

de medición y que, al igual que los demás instrumentos y sistemas, sólo constituye un mero útil de medida, sin duda más sofisticado y más preciso que una cinta métrica, pero al fin y al cabo un mero instrumento. La calidad del resultado final del trabajo, sobre todo en cuanto a expresión gráfica, depende en todo caso de quién maneje estos instrumentos. Y en arquitectura, el proceso de selección y abstracción que supone pasar de la realidad de la obra arquitectónica a su representación en un dibujo requiere de una actividad de tipo intelectual que las máquinas, hasta ahora, no pueden realizar de manera plenamente eficaz. Por tanto, la calidad de un levantamiento depende en gran medida de la habilidad, la práctica y sobre todo, la capacidad de interpretación del operador que maneja el sistema de restitución.

La dificultad que esto comporta, junto al deseo de facilitar los procesos haciéndolos menos dependientes de un trabajo a veces fatigoso, ha llevado a un gran desarrollo de sistemas automatizados en los que el operador tiene menos trabajo pero también menos capacidad de decisión. El desarrollo de los escáneres, bien sean de láser o bien basados en la correlación automática entre varias fotografías para ge-

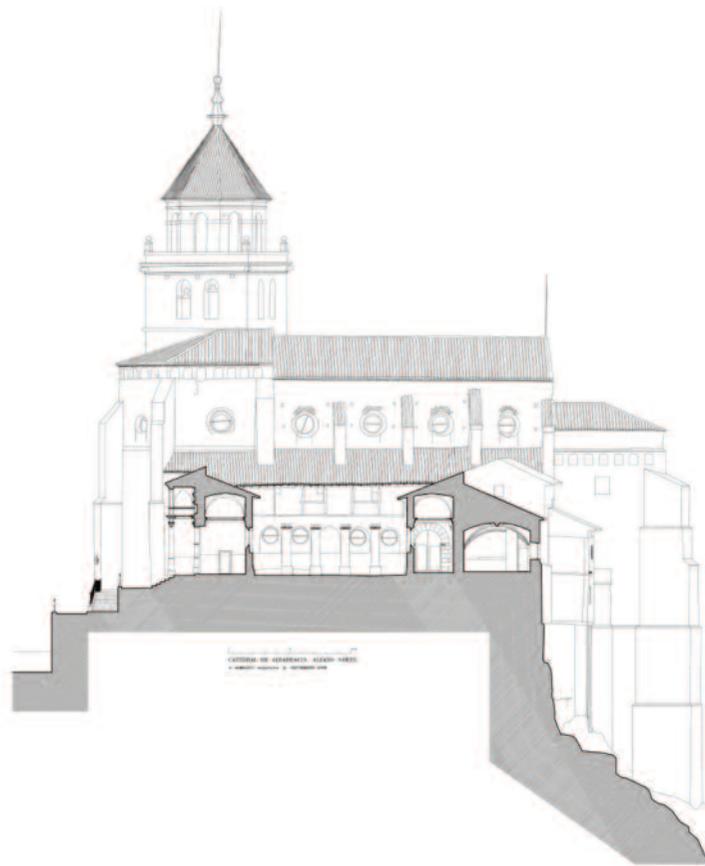


Fig. 14 Sección por el claustro y alzado norte de la catedral de Albaracín.

nera nubes de puntos tridimensionales, ha sido durante estos últimos años el gran campo de investigación y avance en las técnicas de medición y documentación. Pero, como no podía ser de otro modo, esta investigación la han llevado a cabo mayoritariamente personas y centros de investigación de lo que podríamos llamar la parte técnica del colectivo dedicado a estos menesteres, tratando de ofrecer a la parte más directamente vinculada al patrimonio instrumentos cómodos y precisos.

Estas nuevas tecnologías hoy disponibles o en desarrollo tienden a una adquisición indiscriminada de la información que es tratada de forma automatizada mediante sistemas informáticos con la que se construye el modelo objeto del levantamiento. Los datos manejados suelen ser coordenadas tridimensionales de puntos e información cromática relativa al punto del objeto. Mediante ellos se generan imágenes y representaciones de gran vistosidad y efecto, pero que a nuestro entender plantean serios inconvenientes en su uso real aplicado a la conservación. Se puede decir que las nuevas tecnologías se basan principalmente en sistemas automatizados que adquieren grandes cantidades de información, que es tratada y seleccionada a su vez de forma automática por el sis-

tema y que finalmente deja al usuario final la responsabilidad de hacer la interpretación, selección y codificación definitiva.

Pero en este proceso se ha dejado un tanto olvidada una realidad y es que el dibujo, a la vez que es un método de representación, es también un método de análisis y por tanto de conocimiento, que hoy por hoy la máquina no puede realizar. Es evidente que desde este punto de vista el levantamiento más adecuado es el que se realiza íntegramente in situ, dibujando a la vista del objeto, porque permite el análisis más adecuado y directo. Su inconveniente suele ser lo penoso de este tipo de tareas y el tiempo que requiere trabajando fuera del estudio o la oficina.

La fotogrametría estereoscópica, permite una observación del objeto muy cercana a la real e inmediata, aunque en la práctica se haya limitado la cantidad de información con la que trabajamos a aquella que contienen las fotografías. Pero el operador sigue teniendo la capacidad de interpretar y seleccionar lo que interesa.

Con los sistemas de escáner, ya sean fotogramétricos o de láser, es el sistema el que selecciona la información con la que después habremos de trabajar, y lo hace de una forma bastante aleatoria, aunque sea con intervalo regular. No se



Fig. 15 Instrumentos básicos para la toma de datos para fotogrametría simple.

38

selecciona lo importante, sino lo que está en el lugar que el intervalo marca. La interpretación la debe hacer siempre una persona, pero en este caso a partir de información previamente seleccionado por el sistema. Podemos reducir el intervalo para garantizar que capturamos todo lo necesario, pero a costa de adquirir enormes cantidades de información innecesaria cuya eliminación, en muchos casos necesaria, resulta también laboriosa.

En la medida en que sustituimos al hombre por la máquina o por el software, perdemos capacidades de análisis y adquisición directa de información, que deberemos entonces adquirir por otros medios. Prescindir del dibujo tradicional y de su proceso de realización puede suponer renunciar a una forma de adquisición de conocimiento que hasta ahora ha funcionado perfectamente sin que podamos asegurar que muchos de los documentos gráficos que las nuevas técnicas nos proporcionan puedan sustituir satisfactoriamente a los tradicionales o ni siquiera nos faciliten verdaderamente la obtención de aquéllos por una vía más cómoda.

En mi opinión, los escáneres de láser están aún lejos de resolver de forma adecuada muchos de los problemas que hoy se plantean. En primer lugar por el enorme coste de los instrumentos y del software que requieren. En segundo lugar por la necesidad de un personal muy cualificado para su manejo. Y en tercer lugar, porque la información que proporcionan (nubes de puntos aleatorias o modelos fotográficos 3D) no resultan fácilmente utilizables por los usuarios y son difícil-

mente convertibles a los formatos habituales de la representación arquitectónica. Los llamados escáneres fotogramétricos, basados en el uso de fotografías para obtener nubes de puntos, tiene la ventaja de un costo mucho más asequible, pero siguen presentando los otros problemas antes enunciados.

Sin duda, el láser-scanner puede dar mayor precisión que muchas mediciones fotogramétricas, pero su selección de puntos aleatoria acaba también generando en muchos casos altos grados de imprecisión, sobre todo en lo referente a la exacta representación de los bordes claramente definidos en los objetos. En las superficies sin bordes nítidos, es en donde, evidentemente, prestan estos instrumentos una ayuda casi sin competencia. Un caso evidente es el de los frescos sobre superficies curvas en donde la única forma de conseguir una representación fidedigna, tanto dimensional como de contenido, es mediante el recurso al modelo 3D texturizado.

Hay que considerar que una gran masa de información almacenada en bruto no es necesariamente más útil que una información adecuadamente seleccionada e interpretada. Resulta difícil admitir que las nubes de puntos o los modelos fotorealísticos tridimensionales, pese a su efectismo, permitan una mejor comprensión de la realidad dimensional y espacial de un edificio que la que proporciona una buena serie de plantas, alzados y secciones realizadas siguiendo los procedimientos y criterios tradicionales.

Es evidente que todos estos aspectos se plantean a dos niveles diferentes del uso y aplicación de la documentación.

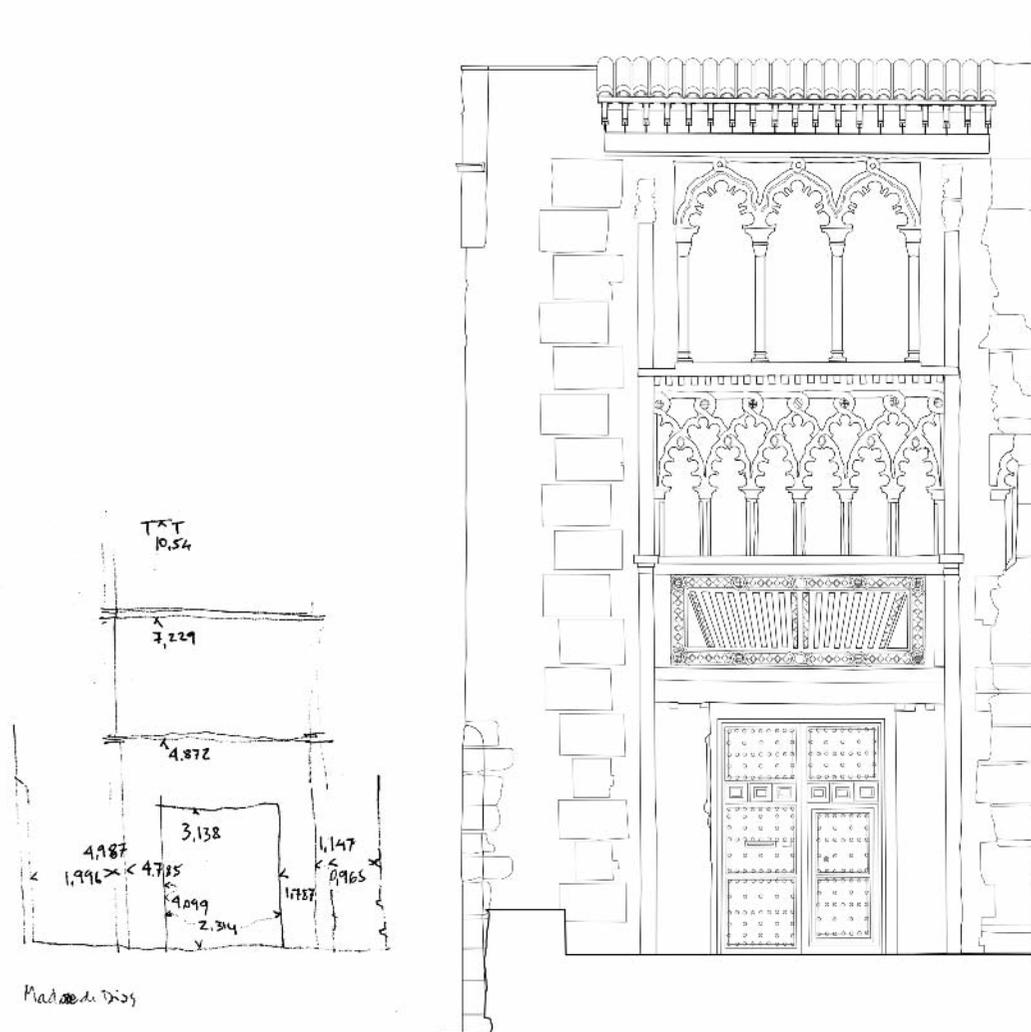


Fig. 16 Datos y restitución de la portada del palacio de los Oter de Lobos de Toledo.

Uno es el del uso de la información por técnicos y responsables en la conservación del patrimonio, a los que se debe, en principio suponer más familiarizados con cualquier tipo y forma de representación. Pero este aspecto mismo no es tan evidente, fundamentalmente por dos razones. En primer lugar porque la difusión de las nuevas técnicas, con haber experimentado un gran desarrollo, está todavía lejos de haber llegado al conocimiento efectivo y más aún a la asimilación de un número significativo de técnicos. Y sobre todo, queda el problema no sólo de que dispongan de instrumentos capaces de realizar los levantamientos, sino si quiera del software necesario para utilizar y aprovechar sus resultados.

El otro ámbito de usuarios de la documentación, aquél de los profesionales menos tecnificados (historiadores del arte, arqueólogos, gestores y conservadores general-

mente en áreas humanísticas) y sobre todo, el público en general, ciudadanos de muy diversa formación pero con un creciente interés por la cultura y el patrimonio, necesitan, sin duda productos mucho más elaborados y que generalmente no surgen de modo inmediato de los trabajos de toma de datos.

El manejo de la información obtenida mediante los nuevos procedimientos requiere siempre de sistemas tecnológicos, generalmente informáticos (hardware y software), muchos de los cuales son hoy por hoy caros y de no simple manejo. Esto hace que los usuarios finales se vean muy limitados en el aprovechamiento de las posibilidades y ventajas que los sistemas proporcionan. Por otra parte, hay que considerar que debido a la formación tradicional que la mayor parte de los técnicos ha recibido, su mentalidad está más preparada a interpretar y asimilar la información contenida en

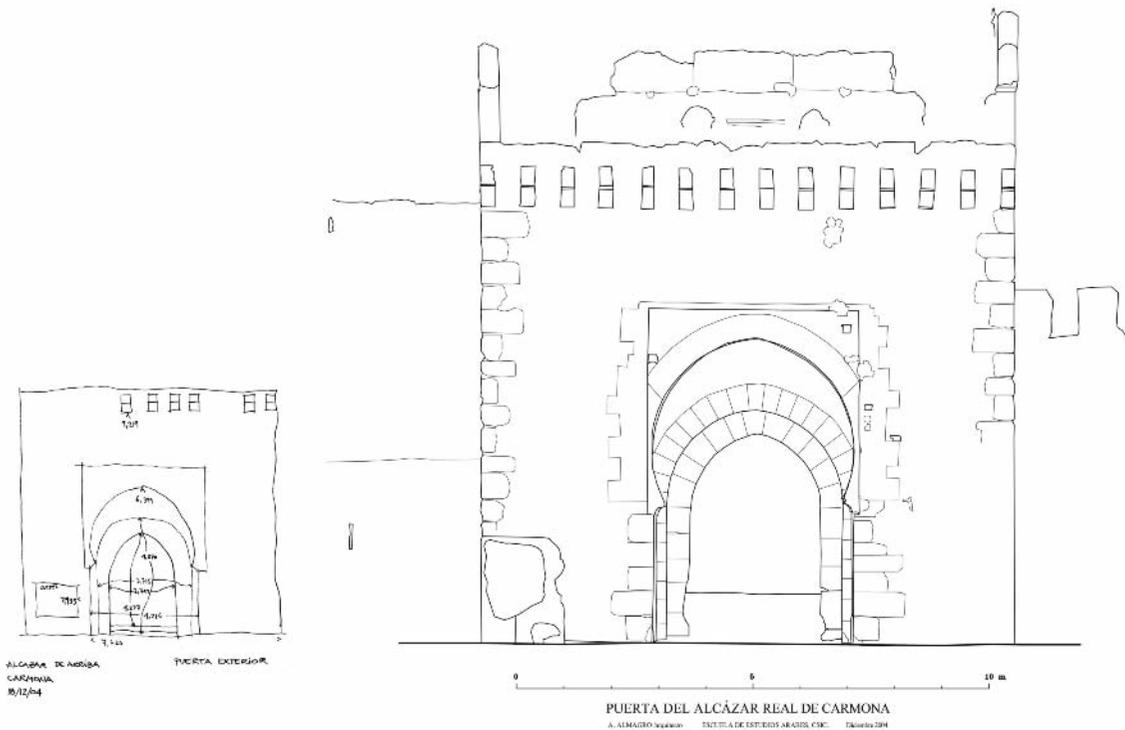


Fig. 17 Datos y restitución de la puerta del Alcázar de Arriba de Carmona.

40

los dibujos tradicionales que en las imágenes tridimensionales proporcionadas por las nuevas técnicas. Por ello, pese a la espectacularidad de esas imágenes es dudoso que sean realmente útiles en la actividad cotidiana de la conservación por los dos motivos antes mencionados: necesidad de contar con los medios tecnológicos adecuados, no sólo en la oficina sino en muchas ocasiones también en las obras, y falta de formación y capacidad de entendimiento de la información proporcionada.

Otra cuestión nada banal es la de que ante la ausencia de un análisis e interpretación del objeto por quien hace el levantamiento, que en resumen queda casi encomendado al sistema informático, la interpretación debe ser realizada por el usuario final, lo que si bien es cierto que tiene sus evidentes ventajas cuando quienes hacen el levantamiento no son expertos en la representación, también presenta el inconveniente de que éste puede carecer de los elementos adecuados al tenerlo que hacer de forma diferida y sin el contacto directo con el objeto. La cuestión resulta aún más crítica si el usuario final es el público no especializado o si los trabajos han de ser publicados impresos sobre papel. La transformación de los datos obtenidos con sistemas de documentación automatizada en dibujos convencionales sigue siendo un

tema que nos devuelve hacia los procedimientos de la documentación tradicional.

Este aspecto de la representación, basada en la interpretación y análisis simultáneo del objeto resulta imprescindible en los sistemas tradicionales pero tiende a soslayarse debido por un lado a la búsqueda de modos cada vez más automatizados, pero también a que para quienes desarrollan los nuevos sistemas, este aspecto no resulta prioritario.

El proceso en el que nos encontramos recuerda de algún modo el que se producía hace años con la fotogrametría. Sus magníficas posibilidades quedaban frenadas por el alto precio de los instrumentos y la necesidad de una formación adecuada y compleja de sus técnicos. Pero los resultados obtenidos con aquellos métodos, siempre sobre soporte de papel, eran útiles de inmediato para cualquier usuario ya que en su realización se seguían los mismos principios de representación usados y admitidos universalmente. Hoy en día, las nubes de puntos generadas por un láser-scanner no tienen ninguna utilidad para quien no disponga del software necesario para su manejo y visualización, e incluso en ese caso, tampoco le aportarán la información deseada si no se han materializado a nivel de dibujos vectoriales o de modelos de superficies texturizadas. Sólo en ese caso se podrá pasar a la

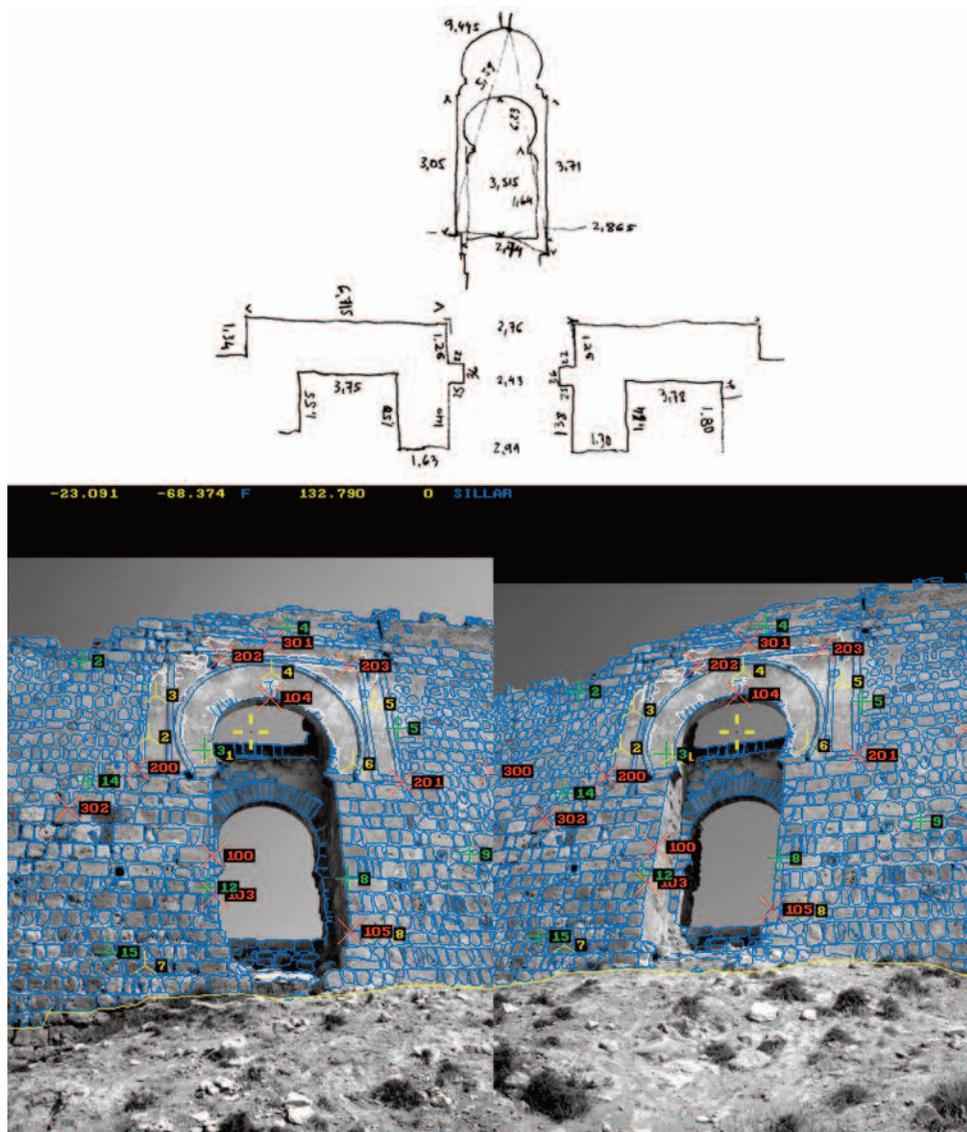


Fig. 18 Datos y restitución con VSD de la puerta del castillo de Gormaz.

obtención de imágenes sobre papel con cualidades semejantes a las tradicionales de comprensión universal. Pero hoy por hoy, este paso dista de ser fácil y automático para objetos y edificios como los que se han representado en los trabajos que aquí presentamos.

Por ello, pienso que debería analizarse cuál es el impacto real de estas técnicas en la actividad cotidiana de la conservación de patrimonio y hasta qué punto su uso está teniendo una aplicación real en la práctica y está ayudando a otros profesionales en su labor. La representación tradicional de la arquitectura mediante plantas, alzados y secciones sigue siendo una forma no sólo válida, sino aún imprescindible de abordar la documentación de este patrimonio, y que, aún en el supuesto de que cayera algún día en desuso, aún perdurará algún

tiempo. Al menos mientras en el campo de la proyectación arquitectónica se siga trabajando con esos instrumentos

Frente a todo esto la fotogrametría estereoscópica ha alcanzado una madurez y desarrollo dignos de ser aprovechados antes que relegados. Las posibilidades que ofrece una instrumentación hoy totalmente asequible gracias a usar hardware estándar de bajo coste y software cada vez más extendido y económico (incluso de uso libre) las hemos probado con nuestros trabajos y los ejemplos presentados.

De las experiencias que hemos adquirido con los instrumentos y métodos simplificados antes descritos aplicados, por ejemplo, a fachadas de edificios de tamaño medio (hasta 15 m de altura) podemos deducir algunas conclusiones interesantes. Comparando restituciones fotogramétricas con le-

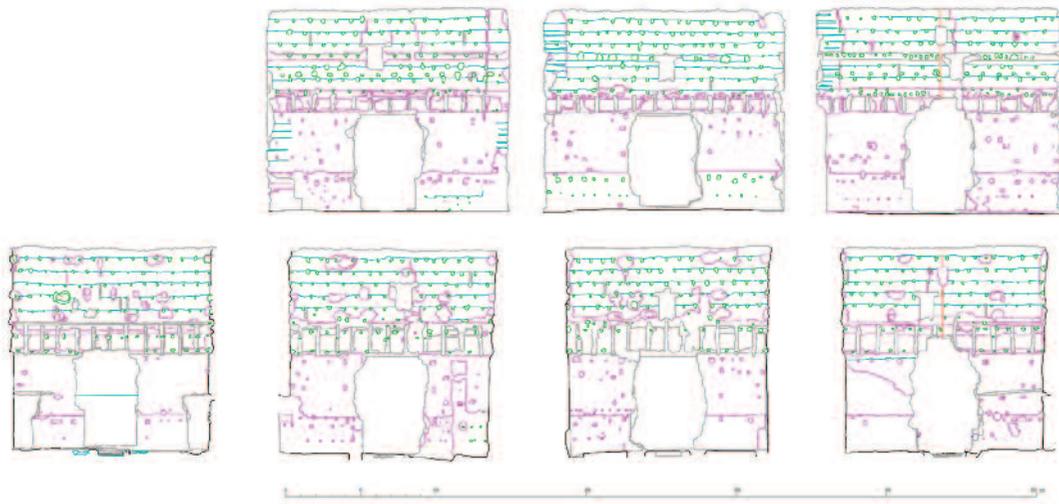
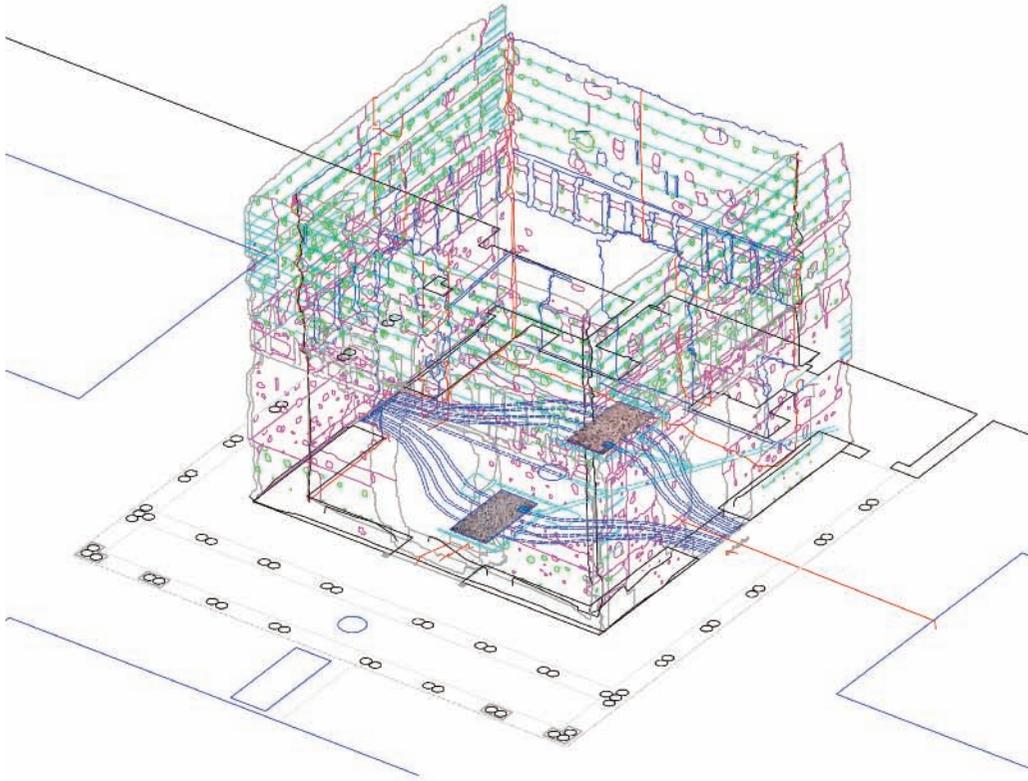


Fig. 19 Alzados y fotoplano del pabellón occidental del palacio de El Badi de Marrakech (Marruecos).



43

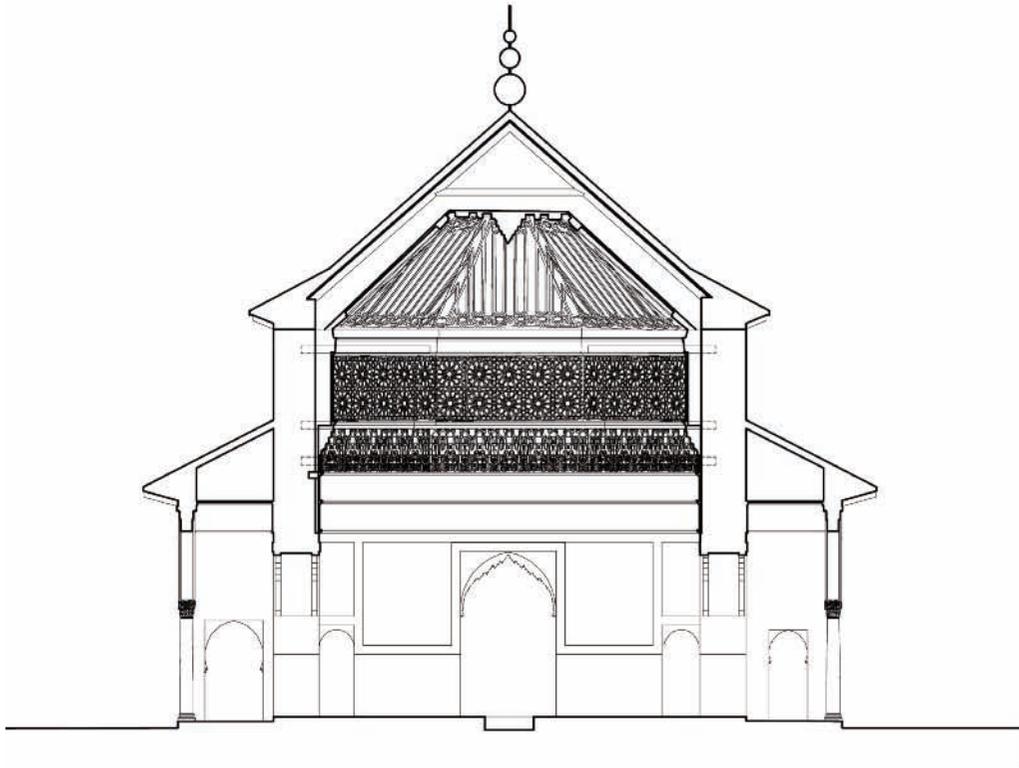


Fig. 20 Restitución en 3D y propuesta de hipótesis de reconstrucción del pabellón occidental del palacio de El Badi de Marrakech (Marruecos).

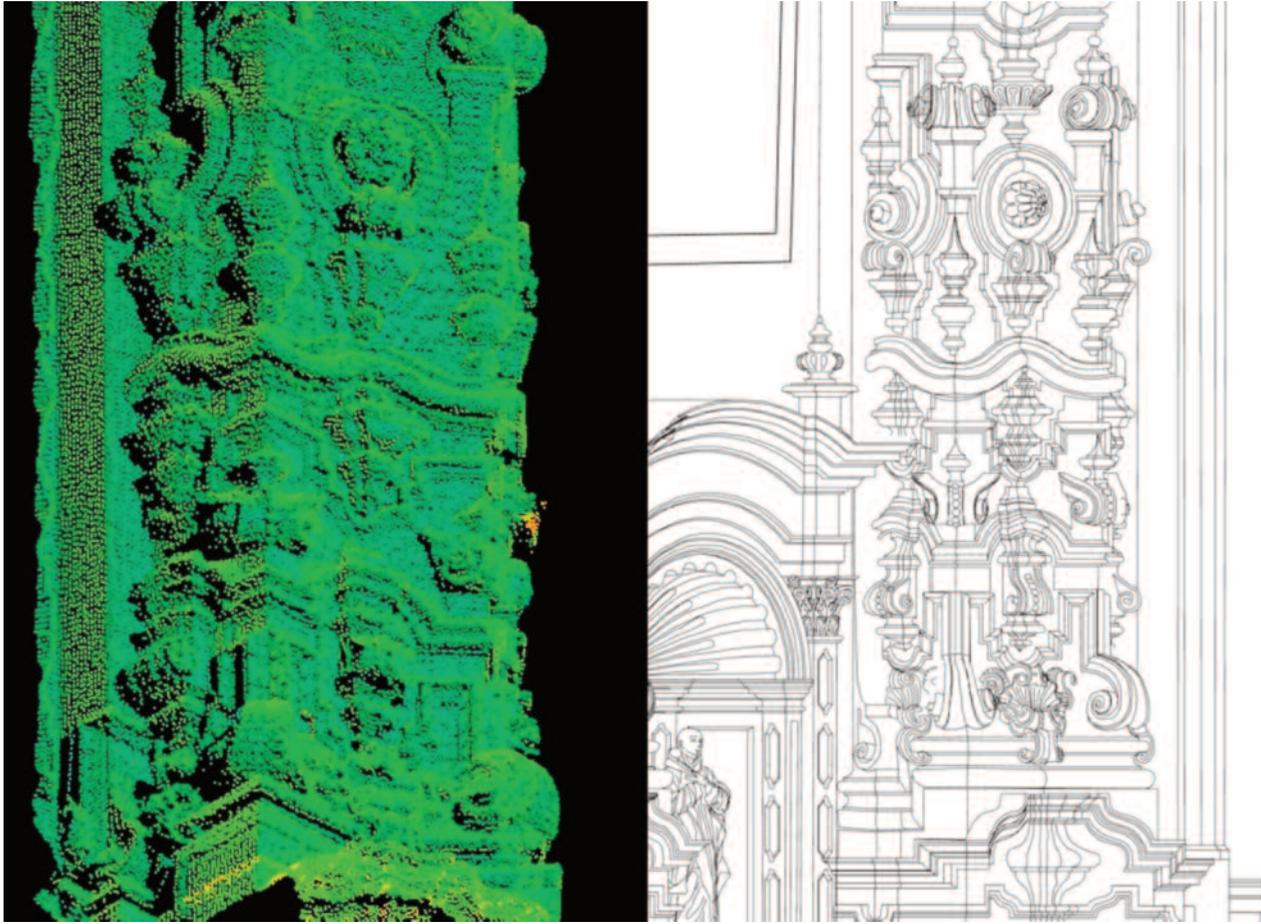


Fig. 21 Nube de puntos obtenida mediante escáner láser y restitución por fotogrametría de una pilastra de la sacristía de la Cartuja de Granada.

vantamientos realizados con medios manuales se aprecia que en aquellas partes en que ha sido fácil medir con la cinta métrica, los dibujos coinciden. Sin embargo, aparecen errores de cierta consideración en las zonas inaccesibles y en la ubicación de elementos que están en distintos planos y para los que no se ha realizado una nivelación que los relacione. Los errores cometidos en la medición con medios manuales, si se realizan con poca minuciosidad, resultan muchas veces excesivos incluso para una escala de 1/100. A pesar de ello, el tiempo de toma de datos suele ser notablemente largo usando esta técnica. La toma de datos con una cámara semimétrica o digital calibrada y apoyo completo con taquímetro puede reducir el tiempo de toma de datos en más de un 50 % del tiempo necesario usando medios manuales, pero además se logra una notable mayor precisión. La toma de datos con un control reducido, sin uso de taquímetro, logra un ahorro considerable de tiempo (hasta necesitar sólo un 5 % del tiempo de la toma manual y 20 % del tiempo requerido haciendo un control completo) sin aumentar excesivamente los errores. En cualquier caso, la precisión lograda es más que suficiente para di-

bujos a escala 1/100. Se considera además que el tiempo de restitución puede suponer entre un 50 y un 70 % del tiempo necesario para dibujar en limpio una medición manual.

Con ello creemos que la experiencia más importante es comprobar que se puede utilizar fotogrametría en levantamientos de monumentos y restos arqueológicos de pequeñas y medianas proporciones sin necesidad de recurrir a equipos sofisticados y costosos. En una palabra, creemos que los equipos disponibles en el mercado son susceptibles de integrarse en cualquier centro de investigación o de documentación, tanto por ser de un costo asumible, como por poder ser utilizados por personal sin una gran especialización en fotogrametría. En resumen, la fotogrametría ya no es una técnica sofisticada y costosa sino que está al alcance de cualquier institución o profesional con responsabilidades sobre los bienes culturales.

Como ya he expresado en muchas ocasiones, donde sigue residiendo realmente el problema es en la formación de las personas que deben ocuparse de la documentación del patrimonio para que sean capaces de operar con estos sistemas.

En este aspecto, también contamos con la experiencia de la impartición de cursos que en todos estos años hemos venido haciendo, tanto a nivel local en la Escuela de Arquitectura de Granada como internacional en distintos programas del IC-CROM. El aprendizaje del uso del software no presenta mayores problemas y es fácilmente asimilado por los alumnos, especialmente en la rectificación fotográfica. La restitución estereoscópica necesita normalmente más tiempo de práctica, del que generalmente no se dispone, por lo que los resultados pueden parecer a veces un tanto decepcionantes. El adaptarse a la visión estereoscópica y al manejo de la “marca flotante” no es inmediato. Se requieren algunos meses de práctica hasta lograr resultados plenamente válidos, pero si lo comparamos con el tiempo necesario para manejar con soltura otro tipo de software, comprobaremos que no es muy distinto. Lo importante es que para que este aprendizaje se generalice debe existir previamente una concienciación por parte de los potenciales usuarios y de aquellas personas que tienen bajo su responsabilidad, en los distintos niveles, la tutela y conservación del patrimonio. Los instrumentos existen y son eficaces; hace falta seguir usándolos y lograr que otros muchos los utilicen. La fotogrametría ya no es un sistema sofisticado y complejo sino algo asequible, y no es tanto sinónimo de precisión sino, sobre todo, de rapidez y eficacia en la documentación.

## Bibliografía

- ALMAGRO, A. 1992. APhotogrammetrie numerique pour la documentation du site archéologique de Madinat al-Zahra@, CIPA XIII International Symposium, Cracow 1990, Cracovia. p. 11-20.
- ALMAGRO, A. 1996, “Jardín con plantas (y alzados) de papel” Arquitectura en al-Andalus. Documentos para el siglo XXI. Barcelona-Granada: Lunverg, El Legado Andalusi. p. 205-284.
- ALMAGRO, A. 2000, Planimetría del Alcázar de Sevilla, Granada. Carpeta con 40 planos.
- ALMAGRO, A. 2004. Levantamiento Arquitectónico, Granada: Universidad de Granada.
- ALMAGRO, A. ZÚÑIGA, J. I. 2007, Atlas arquitectónico de la Catedral de Sevilla, Sevilla-Granada. Carpeta con 60 planos.
- ALMAGRO, A. 2008, Planimetría de la Iglesia Colegial del Divino salvador de Sevilla, Sevilla. Carpeta con 20 planos.
- ALMAGRO, A. Planimetría de la Cartuja de la Asunción de Nuestra Señora de Granada, Granada 2010. Carpeta con 30 planos.

# El dibujo del patrimonio y su vida gráfica

Javier Ortega Vidal

Escuela Técnica Superior de Arquitectura de la Universidad Politécnica de Madrid.

46

## Curriculum

Doctor Arquitecto y Catedrático de Dibujo Arquitectónico del Departamento de Ideación Gráfica de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de la Universidad Politécnica de Madrid. Director del Grupo de Investigación Dibujo y Documentación de Arquitectura y Ciudad.

## Resumen

En la encrucijada y debate actual sobre la aplicación de los nuevos medios en la documentación del patrimonio edificado, se destaca la necesidad de preservar los valores de la tradición del dibujo arquitectónico, proponiendo su papel nuclear en el concepto de Vida Gráfica como lugar de integración de los nuevos medios y los añejos fines para el progreso en el conocimiento y difusión del patrimonio arquitectónico.

## Abstract

At the crossroads and the current debate on the implementation of new media in the documentation of built heritage, highlights the need to preserve the traditional values of ar-

chitectural drawing, proposing its nuclear role in the concept of Graphic Life as a place of integration of the new media and the aged purposes, to advance the knowledge and dissemination of architectural heritage.

Son diversas las vidas de los edificios. Tal vez la más evidente sea la asociada a su devenir material, que transcurre entre su inicial construcción y su final desaparición. Pero esta mera evidencia física estaría falta de razón y contenido sin la consideración de otra existencia más o menos paralela y que podríamos enunciar en primera instancia como vida cultural o mental. Entre ambas, se pretende acotar aquí, al menos, una tercera vida: su existencia o devenir gráfico. Es esta última, centrada en el concepto del dibujo, la que va a ser objeto de una atención prioritaria.

A partir de estas premisas, trataremos de abordar un ensayo de consideración global de estas cuestiones en relación con dos aspectos de relativa actualidad. Sería el primero la incontestable irrupción de las nuevas tecnologías en la documentación y difusión del patrimonio edificado, siendo la segunda – en cierta sintonía con la anterior-, la posible revisión de las relaciones entre estos bienes y la colectividad humana. Se pretende englobar en esta genérica denominación la compleja casuística que se desarrollaría entre la consideración de cada individuo o ser humano en particular, hasta las

políticas o estrategias públicas de las instituciones a quienes compete la responsabilidad en la gestión de los denominados Bienes Culturales.

Parece oportuno entonces enunciar el concepto biografía o historia de la vida de un edificio, en el que tomando prestado del campo biológico el significado de la vida como la “fuerza o actividad interna substancial, mediante la que obra el ser que la posee”, tratemos de apuntar hacia la consideración integral de los diversos aspectos de los bienes patrimoniales arquitectónicos. Conviene advertir que este ensayo no apunta hacia una visión congelada de algo similar a una biografía histórica, sino hacia una consideración acorde con el devenir vital, en el que habría que actualizar constantemente estas estrategias en función de las circunstancias y condiciones siempre cambiantes en función de los tiempos. En este sentido, también conviene resaltar que esta posible vida sería una e indisoluble, entendiendo este triple espectro vital— material, cultural y gráfico — como una estrategia de análisis que pretende tan sólo estructurar un discurso razonado.

## La vida física o material

Desde este encuadre general, volvamos a considerar la trayectoria material de un edificio. Aludíamos antes al radical transcurrir de la ordenación física en el tiempo, entre las aco-taciones límite de la construcción inicial y su total desaparición. Ciertamente, estos límites extremos, aunque netos en su enunciado, no suelen ser de común aplicación en los casos habituales. Es así que muchos edificios se inician no pudiéndose precisar fácilmente cuando se acaban, si es que esto ocurre, de la misma manera que resulta a veces igualmente difícil establecer su final consunción, a no ser que desaparezcan por completo con motivo de alguna catástrofe natural o artificial. El devenir material de un edificio parece en general más próximo a un suceder o acaecer que a un llegar a ser. Frente a una consideración cerrada o de obra acabada, se reconocería en ello la casi inexorable condición mutable o transitoria de la arquitectura, tanto en lo que concierne a sus aspectos materiales como en lo que a sus usos o funciones se refiere<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> “De la vida de los edificios se ocupan hoy poco quienes escriben de arquitectura. Y, sin embargo, las obras de arquitectura se ven afectadas por el paso del tiempo de manera bien característica, singular y específica. Una obra de arquitectura envejece de modo bien distinto al que envejece un cuadro. El tiempo no es tan sólo pátina para la obra de arquitectura, y con frecuencia, los edificios sufren ampliaciones, incorporan reformas, sustituyen o alteran espacios y elementos, transformando la imagen, cuando no perdiéndola, que en su origen tuvieron. El cambio, la continua intervención, es el sino, se quiera o no, de la arquitectura...”. MONEO VALLES, Rafael: “La vida de los edificios. Las ampliaciones de la Mezquita de Córdoba”, *Arquitectura* n° 256, año LXVI, IV época, sep.-oct. 1985, Madrid COAM, pp. 26-36.

Siendo más evidente la condición cambiante de los destinos a los que un edificio sirve a lo largo de los tiempos -y que en la mayoría de los casos alteran su ordenación material- pocas veces se resalta el constante mudar de su materia constructiva original, bien sea por su mera obsolescencia, por los accidentes de diversa condición -intervenciones, destrozos bélicos, incendios, etc.- o por cambios de sistemas que se estiman pertinentes en relación con sus estrategias de conservación<sup>2</sup>. Cabría preguntarse entonces en donde radica la posible identidad de un edificio, aquello que nos permite denominar con cierta seguridad y precisión esta conformación siempre cambiante. Tal vez esa “fuerza o actividad interna substancial”, propia de la vida, tuviera algo que ver con su propia condición arquitectónica, ese conjunto de elementos y relaciones más o menos precisas que enhebran a modo de hilo conductor un determinado marco espacial de las actividades humanas<sup>3</sup>.

## La vida cultural o mental

Parece limitado entonces atender exclusivamente a la vida material de los edificios, sin considerar al mismo tiempo lo que antes denominábamos como vida cultural o mental. Y esto es así porque, en primer lugar, resultaría casi imposible generar una determinada realidad material sin haber establecido previamente las necesarias estrategias intelectuales para su realización. En términos arquitectónicos, y desde una amplitud del concepto que no pretende propiciar aquí mayores disquisiciones, parece claro que no se puede abordar una obra o ejecución material sin un determinado proyecto. Pero más allá de este misterioso, atractivo e indeterminado constructo mental germinativo, propio normalmente de un individuo inmerso en una determinada colectividad, esta condición mental se desarrolla y extiende en paralelo al transcurrir material de su existencia. Surgiría entonces el concepto de la valoración cultural de un edificio como una de las características fundamen-

<sup>2</sup> ORTEGA, Javier y ALONSO, Miguel Ángel: “The best spire in the Alcazar of Segovia: construction and perception” en *Teoría e pratica del costruire: saperi, strumenti, modelli*, G. Mochi dir., Università di Bologna-Fondazione Flaminia, 2005, pp. 939-946.

<sup>3</sup> “Pero la experiencia muestra que la vida de los edificios se nos manifiesta mediante la permanencia de sus rasgos formales más característicos en el tiempo y que, por consiguiente, no radica tanto en el proceso del proyecto como en la autonomía que adquiere un edificio una vez construido. Dicho de otro modo, el arquitecto levanta un edificio y crea un ente perfectamente comprensible en sí mismo gracias a unos principios formales inherentes a su arquitectura; la obra de arquitectura trasciende al arquitecto, va más allá del instante en que la construcción se produce y puede, por tanto, ser contemplada a lo largo de las luces cambiantes de la historia sin que su identidad se pierda con el correr del tiempo.” MONEO VALLES, Rafael: “La vida de los edificios. Las ampliaciones de la Mezquita de Córdoba”, *Arquitectura* n° 256, año LXVI, IV época, sep.-oct. 1985, Madrid COAM, pp. 26-36.

tales de su existencia, tanto en lo que a sus orígenes como a su devenir se refiere. Es así que algunos edificios estaban destinados a su apreciación futura antes de ser iniciados en función de la ambición de sus planteamientos, mientras que otros de menor ambición inicial acabarían alcanzando una determinada valoración cultural en función de diversas circunstancias. Entre la apreciación de los monumentos y las arquitecturas menores o anónimas, se desarrolla una amplia y diversa casuística, fruto en definitiva de la evolución historiográfica de la arquitectura y de las relativamente recientes estrategias patrimoniales emanadas de las diversas instituciones públicas y privadas. Este vector o dimensión cultural de la existencia de un edificio constituye por lo tanto una faceta de inexcusable atención, siendo difícil en última instancia desvincular estos aspectos de su devenir material, tanto a los efectos de su mera percepción social – individual o colectiva-, como a los efectos de su gestión administrativa. De hecho la mera ambigüedad o evolución semántica desde el Bien Patrimonial hacia el Bien Cultural así parece evidenciarlo.

## La vida gráfica

Antes de abordar la tercera faceta o dimensión, la que hemos denominado vida gráfica de los edificios, es necesario plantear algunas disquisiciones previas. Resulta un lugar común asociar con cierta inmediatez lo gráfico a una imagen más o menos figurativa. A partir de esta evidencia, conviene no obstante revisar mínimamente las acepciones del término gráfico en nuestro idioma, siendo la primera: “Perteneciente o relativo a la escritura y a la imprenta”. Parece así que se abre un tanto el espectro de los significados adquiriendo la escritura, esto es la traducción gráfica de la palabra o lenguaje verbal, una presencia tal vez inesperada. Constatada esta presencia, resulta interesante pasar a la segunda acepción de lo gráfico que nos amplía el significado inicial diciendo: “Aplícate a las descripciones, operaciones y demostraciones que se representan por medio de figuras o signos”. ¿Podría ser así voluntad de describir una de las claves medulares de lo gráfico?. Para no abusar de esta somera exploración semántica, finalicemos transcribiendo la tercera acepción que corresponde a su sentido figurado: “Aplícate al modo de hablar que expone las cosas con la misma claridad que si estuvieran dibujadas”.

Frente a la primera aproximación un tanto unidimensional de lo gráfico, este binomio de palabra y dibujo resulta sumamente atractivo. Al hilo del argumento aquí tratado, podríamos comenzar estableciendo algunas de las posibles relaciones entre las vidas de los edificios enunciando que uno de los enlaces básicos entre la vida material y la vida cultural de los mismos se podría basar en la palabra. Es así que el enunciado de la voluntad de construir, la descripción y valo-

ración de su proceso y resultado, más o menos entreverada en los manuales historiográficos, la literatura o la poesía, serían componentes inexcusables de estas resonancias que median entre el deseo, la presencia y la memoria, para establecer el amplio repertorio de relaciones entre las dimensiones materiales y mentales de un edificio. De hecho, hasta tiempos relativamente recientes, era tan sólo esta asociación entre la materia y la palabra la que procuraba la existencia o el desdoblamiento de lo que aquí denominamos como vidas paralelas de un edificio. En este sentido, ¿cuál sería la presencia o el papel del dibujo en estas relaciones y su posible protagonismo en la tercera vida que hemos enunciado?. Ante esta pregunta, cabría responder de manera encadenada que nos parece esencial la consideración del dibujo, que es el dibujo quien propicia el nacimiento de la tercera vida aquí enunciada y que esta vida gráfica ha experimentado un importante grado de desarrollo en tiempos recientes.

Volviendo al significado habitual de la posible vida gráfica de un edificio, podríamos englobar en ella todo el conjunto de imágenes a él relativas. Al dibujo, que probablemente fue la clave de su origen, y sin olvidar las tempranas contribuciones pictóricas, habría que adjuntar desde mediados del siglo XIX la fundamental aportación de la fotografía. El conjunto de dibujos, pinturas, fotografías y textos escritos sobre un edificio, constituiría en un primer escalón evolutivo el estricto campo en el que se desarrollaría esta vida gráfica. Mas al igual que hemos ampliado el campo de lo gráfico con la palabra escrita, ¿cabría ignorar en este sentido la posible presencia de las maquetas?. Tanto en lo que a los procesos de construcción o proyecto como en los de conocimiento o difusión de un bien patrimonial se refiere, resulta indudable que el modelo físico a escala reducida de un edificio no debería resultar ajeno a las cuestiones que nos ocupan.

Desde una consideración histórica resulta pertinente en este punto hacer un breve inciso para recordar de manera un tanto sintética o simplificada las tres categorías de producción de la arquitectura en el mundo griego: Anagrafhai, Syngrafhai y Paradeigma<sup>4</sup>. Prescindiendo de matices y denominaciones alternativas aludiría la primera al dibujo, la segunda a la palabra escrita en condiciones descriptivas o contractuales y la tercera al proceso de definición con modelos a tamaño natural como guía o pauta para su réplica. Entendiendo este nodo de la producción clásica como la decantación de antiguas maneras de proceder y como pauta de base y continuidad de la cultura occidental, parece oportuno

---

<sup>4</sup> RUIZ DE LA ROSA, José Antonio: Traza y Simetría de la Arquitectura. En la Antigüedad y Medioevo, publicaciones de la Universidad de Sevilla, 1987, pp. 117-124.

resaltar la constante presencia de la asociación entre el dibujo la palabra y la materia en lo que al mundo de la arquitectura se refiere.

A este conjunto de relaciones entre el proyecto, la realización y la apreciación de la arquitectura, entre el espacio real creado por la ordenación de la materia, el dibujo y la palabra convendría adjuntar también una observación de cierto interés. Suele ser incuestionable que la verdadera apreciación de la arquitectura tan sólo se puede producir desde su experiencia directa. Siendo esto probablemente cierto, ¿cabría ignorar la contribución del dibujo a la valoración y apreciación cultural de la arquitectura?. En nuestra era global adolecida de cierta neurosis viajera, parece pertinente observar que el dibujo permite “viajar” a muy bajo coste, conociendo mediante él muchas y muy diferentes arquitecturas sin la imperiosa necesidad de tener que visitarlas.

En este vector temporal y temático propio del mundo gráfico, tal vez sea el momento de considerar las recientes innovaciones tecnológicas al servicio del registro de los bienes patrimoniales. Desde la evolución de la toma fotográfica en sí misma considerada hacia sus sucesivas aplicaciones como la fotogrametría, al testimonio “objetivo” de un determinado estado temporal se adjuntó la posibilidad extraer datos dimensionales del objeto fotografiado. Esta evolución de cerca de siglo y medio de duración, aún hoy en pleno desarrollo, ha sido acompañada por una evolución paralela de los instrumentos de medición y registro de diversa índole, destacando en la actualidad las potentes aplicaciones del rayo láser en unión de las igualmente potentes aplicaciones informáticas, resaltando entre ellas la configuración paralela de un mundo virtual tridimensional. Siendo incuestionables las aportaciones actuales y las vertiginosas posibilidades que se atisban en un futuro cada vez más inmediato, no convendría olvidar en este momento la dilatada trayectoria del dibujo al servicio del proyecto, el conocimiento y la difusión del patrimonio edificado. Es así que a veces se escuchan cosas como “el dibujo ha muerto”, o se utilizan de manera indiscriminada estos potentes medios como fines ensimismados.

## El dibujo como construcción diferida de la arquitectura

En este contexto, reclamado y reivindicado el papel del dibujo como núcleo medular de la componente o vida gráfica de un edificio, parece oportuno preguntarse cuál podría o debería ser el entendimiento del dibujo en relación con el patrimonio arquitectónico. Desde un primer encuadre semántico, el dibujo es un conjunto de líneas trazadas sobre una superficie

que aluden a la figura de un cuerpo. Desde una acotación conceptual en su relación con la arquitectura, se propone aquí el entendimiento del dibujo arquitectónico como un arte específico cuya finalidad consiste en efectuar una construcción diferida de la arquitectura; enunciar “construcción” significa una actitud precisa aunque de muy amplio registro, y enunciar “diferida” significa que ésta es distinta de la construcción material en su naturaleza y en el tiempo. Es así evidente que las líneas sobre una superficie son distintas a la materialidad física de un edificio y que podemos dibujar un objeto arquitectónico antes o después de ser construido. De hecho para ampliar mínimamente estos aspectos, convendría resaltar que el material básico del dibujo, la línea, no existe como tal en la realidad física sino como una abstracción de límites, bien sea entre la materia y el vacío o entre las supuestas y sucesivas siluetas envolventes de los cuerpos. Por otra parte y desde este planteamiento, el dibujo del proyecto y el dibujo de levantamiento tan sólo se diferenciarían en el sentido del tiempo. Cuando se dibuja la arquitectura con este sentido constructivo, es en cierta medida indiferente el hecho de que se anticipe y genere a partir de él una realidad material que aún no existe o que se produzca esa imagen a partir de la realidad ya existente. Una vez evidenciados estos aspectos, lo que aquí se propone es que el dibujo arquitectónico, así entendido, permite establecer una peculiar resonancia entre las líneas y la materia a través de un atractivo reflejo mutuo del orden y la medida de la obra material y la obra dibujada. Gracias a la fértil interacción de los conceptos de orden-geometría y medida-escala, esta “construcción” plana estructurada en función de las orientaciones del espacio en las añejas categorías de la planta y las correspondientes secciones y alzados, creemos que ha sido y sigue siendo un instrumento privilegiado para el conocimiento de la arquitectura.

Dibujar la arquitectura dista de ser así un acto mecánico y previsible para erigirse en un verdadero compromiso entre la ciencia y el arte, entre un hacer más o menos asistido o pautado y otro hacer más o menos abierto e interpretativo. Dibujar la arquitectura significa al mismo tiempo establecer un constante equilibrio entre la abstracción propia e inherente al dibujo y la siempre presente ilusión o sugerencia figurativa en él igualmente enraizada. Y en este sutil juego de reflejos y resonancias las añejas categorías vitrubianas - la ichnografía o planta, la ortografía o elevaciones y la escenografía o visión en perspectiva- siguen desempeñando un papel fundamental en el análisis y el conocimiento de la arquitectura<sup>5</sup>. Sentirse fascinado entonces

---

<sup>5</sup> ORTEGA VIDAL, Javier: “Una muestra del dibujo de la arquitectura en la España Dorada”, en Las Trazas de Juan de Herrera y sus seguidores, Madrid, Patrimonio Nacional-Fundación Marcelino Botín, 2001. pp. 337-416.

por tecnologías como el scanner-laser resulta fácilmente comprensible, aunque pensar que esa analogía tridimensional epidérmica y fragmentaria sustituya o liquide al dibujo revela un pensamiento un tanto apresurado. Las capturas y elaboraciones tridimensionales suponen sin duda un avance espectacular que debe ser incorporado y explorado, pero ello no debe significar el abandono de las potencialidades del dibujo. De esta manera la estrategia planta-sección-alzado es mucho más que una convención proyectiva, es un lugar de pensamiento y conocimiento privilegiado de la arquitectura, bien sea para ser proyectada bien sea para ser comprendida. El desafío entonces no consistiría tanto en cambiar indiscriminadamente de recursos e instrumentos, sino en integrar en un discurso unificado todas aquellas implementaciones que nos permitan elevar el nivel del conocimiento sobre la arquitectura.

## Restitución y reconstitución

Pero antes de intentar una reflexión conjunta sobre las posibles vidas de los edificios, y en concreto sobre su vida gráfica enhebrada a través del dibujo, conviene llamar la atención sobre dos aspectos que no reciben habitualmente la atención que merecen. Sería el primero el juicio o atención cualitativa sobre el dibujo que pretende reflejar un estado del edificio y, en relación con ello, sería el segundo proponer una distinción semántica que permita clarificar a qué estado del mismo nos referimos en cada momento del discurso gráfico. Aunque supone una cierta simplificación en relación con su difusa etimología, proponemos aquí denominar restitución a aquellos dibujos que pretenden reflejar una realidad existente desde un enfoque objetivo y comprobable; nos encontraríamos así ante lo que se suele denominar dibujo de Levantamiento. En segunda instancia, se reservaría el término reconstitución para aquellos dibujos que pretenden reflejar uno o varios estados del edificio que ya no existen o que nunca existieron, pero que pudieron formar parte de su biografía. Obsérvese que la importante diferencia consiste en que en el segundo caso, ante los datos casi siempre incompletos, suele ser necesario introducir una determinada dosis de interpretación que nos gustaría asimilar a una cierta idea de proyecto<sup>6</sup>.

Levantar, dibujar o restituir la imagen concreta de un edificio tal cual es, como ya ha sido advertido, dista de ser un

acto fácil e inmediato. Confluyen en esta acción los medios disponibles para efectuar la operación junto a los fines y capacidades o destrezas gráficas de quién realiza el dibujo. Empezando por las finalidades, antes de precisar sus posibles y diversas aplicaciones, convendría enunciar cuanto antes que un dibujo de levantamiento o restitución de la realidad edificada no tiene sentido si no se produce a partir de él un cierto avance en el conocimiento de lo que se dibuja; sea así su aplicación encaminada a un proyecto de intervención, a una estrategia de estudio y análisis, a su mera catalogación y registro, o se pretenda utilizarlo como instrumento de difusión, el dibujo que se realice debería plantearse como objetivo deseable aumentar o elevar el nivel de conocimiento general sobre el bien documentado. Para ello, parece evidente que antes de dibujar algo se deberían conocer previamente los dibujos antes realizados y analizar su dimensión o valor cualitativo. Resulta curioso observar que en nuestra cultura inmediata esta simple atención preventiva no resulta fácil ni habitual por diversas razones. La primera es que el corpus gráfico sobre los bienes patrimoniales arquitectónicos es muy irregular; coexisten así monumentos bien documentados con sorprendentes lagunas o carencias de documentación gráfica sobre edificios de primer rango. En segundo lugar, una cosa es que los dibujos existan y otra que éstos sean conocidos y fácilmente accesibles; es también sorprendente la dispersión de los dibujos y las dificultades de acceso a los mismos. En tercer lugar, una vez conseguidos, habría que analizar o valorar su dimensión cualitativa; mas allá de su mera existencia, los dibujos sobre un monumento pueden estar mejor o peor realizados, siendo esto último lo más habitual.

Al no ser éste el lugar de un curso operativo sobre el levantamiento o restitución de la imagen de un edificio baste decir que, en relación a lo ya apuntado, un buen dibujo sería aquel que descubra y refleje alguna de las cualidades relativas a su orden y su medida<sup>7</sup>. Entendemos en ello que los rangos de “orden” pueden ser diversos al igual que ocurre con sus diversas “medidas”, extendiéndose aún más las posibilidades de descubrimiento al considerar la interactiva e indisoluble

<sup>6</sup> ORTEGA, J. y ALONSO, M. A.: “Reconstitución de la Capilla del Palacio de Aranjuez en el siglo XVI”, Reales Sitios nº 159, año XLI, 2004, pp.2-13; MARTINEZ, A. y ORTEGA, J.: “Investigación y Reconstitución Gráfica”, Actas del 13 Congreso internacional de expresión gráfica arquitectónica, Editorial de la Universitat Politècnica de Valencia, 2010, pp. 281-286.

<sup>7</sup> En este sentido conviene resaltar las recientes aportaciones bibliográficas sobre el Levantamiento en nuestro entorno cultural próximo como son las de: JIMENEZ, Alfonso y PINTO, Francisco: Levantamiento y análisis de edificios. Tradición y futuro, Universidad de Sevilla, Instituto Universitario de Ciencias de la Construcción, 2003; ALMAGRO GORBEA, Antonio: Levantamiento arquitectónico, Universidad de Granada 2004; A.A.V.V.: Investigando los Bienes Arquitectónicos, Departamento de Expresión Gráfica Arquitectónica de la Universidad Politécnica de Valencia, Biblioteca TC, 2005; VALLE MELÓN, J. M.: “Reflexiones sobre la documentación geométrica del Patrimonio”, Papeles del Patal nº 3, 2006, pp. 97-123.

relación entre ambos conceptos. En este sentido y desde la consideración evolutiva de los medios al servicio del dibujo del patrimonio, es excitante la ampliación del espectro de posibilidades que se abren en el registro gráfico del patrimonio; fotogrametría digital y estereoscópica en pantalla, aplicaciones láser y construcciones tridimensionales, rectificaciones y ortofotografía, termografías e infrarrojos, termoluminiscencia y georadar, registros no destructivos de los materiales, etc., junto a otras posibilidades por venir, suponen una novedosa situación sin precedentes. Mas, acorde con lo hasta aquí mantenido, esta ampliación en el registro de los diversos órdenes y medidas, casi siempre parciales y fragmentarias, creemos que deben seguir siendo integradas en una síntesis unitaria a través del dibujo tal y como aquí ha sido enunciado.

En este sentido, y complementariamente al concepto de restitución resulta pertinente insistir en el concepto de lo que hemos denominado reconstitución. La razón de ello estriba principalmente en la cierta fusión o confusión que se puede establecer si no se insiste en clarificar y delimitar ambos conceptos. Es así bastante más habitual de lo que normalmente se supone el uso de imágenes “reconstitutivas” para realizar una argumentación o interpretación sobre un determinado bien patrimonial. Son numerosos los ejemplos de argumentaciones gráficas sobre los monumentos que utilizan imágenes “inventadas” que no son sino el producto de diversas interpretaciones más o menos fidedignas, en todo caso subjetivas, que se superponen sin grandes prevenciones sobre los dibujos pretendidamente objetivos. Y no se pretende aquí negar los indudables valores cognoscitivos de estas aproximaciones gráficas, sino llamar la atención sobre estos aspectos y los posibles peligros de su uso indiscriminado, hoy si cabe potenciado por las nuevas posibilidades tecnológicas antes apuntadas. Este sencillo pacto terminológico permitiría clarificar y distinguir dos tipos de dibujos: los que pretenden establecer un reflejo objetivo de lo que existe en un determinado momento y aquellos otros dibujos que pretenden interpretar y transmitir otros tipos de aproximaciones.

Bastaría tan sólo recopilar las denominaciones verbales de este segundo tipo de dibujos para evidenciar la confusión que se produce en el campo de conocimiento al que nos referimos. Empezando por las propias palabras aquí propuestas es habitual enunciar así, indiferentemente, restitución o reconstitución, también a veces entremezcladas con los términos reconstrucción, restauración o recreación; a estos vo-

cablos de base se les suele añadir todo un elenco de adjetivaciones como ideal, conjetural, hipotética, histórica, etc., estableciendo una casuística combinatoria casi ilimitada que, si cabe, ha sido recientemente ampliada por el indiscriminado añadido de la noción de lo “virtual”, y más reciente aún por el de “realidad aumentada”<sup>8</sup>. Sin enredarnos ahora en nuevas disquisiciones semánticas, enunciemos tan sólo la tercera acepción lo virtual: “que tiene existencia aparente y no real”.

## La tradición y los nuevos medios del dibujo

Como hemos visto, entre apariencias y realidades lleva ya largo tiempo desenvolviéndose la biografía de los edificios y más en concreto su componente gráfica. No obstante, el término virtual, de reciente aplicación en el dibujo del patrimonio, se tiende a ceñir casi exclusivamente a las elaboraciones informáticas tridimensionales, adquiriendo por ello un cierto marchamo de deslumbramiento inmediato, a veces elemental. Ocurre además que la especialización relativa de estas producciones, desvinculadas del conocimiento específico de la cultura patrimonial, tiende a introducir nuevas aportaciones gráficas cuyos valores son en muchas ocasiones cuestionables. Se tiende a valorar así más el medio que el mensaje, introduciéndose nuevas componentes que suelen aportar más confusiones que claridades<sup>9</sup>.

Tanto el dibujo de restitución como el de reconstitución, gozan de una amplia tradición en la cultura arquitectónica que sería necesario conocer previamente para plantearse la posible aportación de los nuevos medios al añejo proceso del conocimiento y la difusión de los valores patrimoniales de la arquitectura. No se debería desprender de estas observaciones una cierta actitud retrógrada, sino recordar el sencillo enunciado de que tan sólo se puede superar aquello que previamente se conoce. Y en este sentido es preciso estar en guardia ante una equivocada e inmediata noción de progreso, olvidando que en todo tiempo han existido aportaciones puntuales de alto valor que han rebasado la media cultural propia de su tiempo. Desde un punto de vista complementario, es evidente también que el hecho de usar una tecnología avanzada no garantiza, en absoluto y por sí misma, la bondad o calidad cognoscitiva del contenido que se propone.

<sup>8</sup> REDONDO DOMINGUEZ, Ernest: “Un caso de estudio de investigación aplicada. La recuperación de la trama viaria del Barrio Judío de Girona mediante realidad aumentada”, Revista EGA nº 16, Valencia 2010, pp. 70-81.

<sup>9</sup> Valiosas y pertinentes son las aportaciones sobre estos aspectos de: FERNANDEZ RUIZ, José Antonio: “Criterios y método para la modelación digital del Patrimonio Arquitectónico”, Revista EGA nº 7, Valencia 2002, pp.73-78; ALMAGRO VIDAL, Ana: El concepto del espacio en la arquitectura palatina andalusí, un análisis perceptivo a través de la infografía, Madrid, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, 2008.

Teniendo en cuenta estas sencillas prevenciones, resulta sumamente excitante el panorama que se abre en la documentación sobre el patrimonio en nuestros tiempos. En lo que a la dimensión gráfica se refiere, sería necesario establecer en primer lugar las estrategias necesarias para localizar, recopilar y analizar todos aquellos dibujos o testimonios gráficos referidos al bien patrimonial. En segundo lugar, debería ser una labor prioritaria evidenciar aquellos aspectos susceptibles de ser mejorados por nuevos dibujos de restitución o levantamiento que establezcan una actualización de la información objetiva. Sería tan sólo en un tercer momento cuando, a partir de estos datos objetivos y planteando claramente las intenciones y limitaciones de la empresa, se podrían plantear los ensayos o “proyectos” inherentes a los dibujos de reconstitución sobre el monumento.

Un nuevo e importante aspecto sobre el que se llama poco la atención consiste en la extraña naturaleza del dibujo producido por medios informáticos. Aparte de la enigmática y algo perpleja consideración sobre su condición de original o copia y, en relación con ello, de la cierta dicotomía entre las características estructurales del dibujo y sus posibilidades de edición—bien sea en papel o en archivo de imágenes—nos encontramos ante una nueva situación que no ha sido suficientemente identificada. Habría que adjuntar a estas consideraciones su condición un tanto etérea y volátil, pues el soporte informático corre el constante peligro de su desaparición ante la vertiginosa y constante permuta de los soportes de la información y los programas de dibujo.

Frente a estos posibles inconvenientes habría que subrayar algunas de las nuevas posibilidades que se abren. Sería la primera, una vez cumplidas las secuencias informativas antes enunciadas, la posibilidad de disponer de manera casi directa de la documentación gráfica actualizada sobre un bien patrimonial; sea para un proyecto de intervención, sea para el estudio o la difusión del monumento, la disponibilidad del dibujo en soporte informático supone una característica nueva de cierta importancia, aunque no exenta de ciertos problemas de matiz que no es el caso precisar en este momento. Otra característica atractiva del dibujo informático consiste en las nuevas posibilidades que se abren en las relaciones entre el trabajo individual y el colectivo. Aunque este aspecto novedoso también podría ser matizado, resultan sumamente interesantes las experiencias de lo que podríamos etiquetar como “levantamiento colectivo”. Hasta tiempos recientes el dibujo de los edificios tendía a ser un arte de marcado acento personal; aunque siempre han existido determinadas y posibles estrategias de colaboración entre varios agentes, el dibujo sobre papel tendía a centrar la ejecución en una sola persona, produciéndose una clara distinción entre el dibujo original y las posibles copias. Frente a este

planteamiento tradicional, el dibujo de levantamiento en soporte informático permite nuevas estrategias de colaboración entre diversas manos, siempre que estén unificadas por una voluntad y unas determinadas reglas colectivas<sup>10</sup>. De esta manera, los medios informáticos actuales hacen posibles unas estrategias de integración de la información sobre el patrimonio hasta ahora nunca sospechadas.

En este sentido convendría detenerse un momento en otra de las nuevas facetas que ofrece el dibujo en soporte informático; nos referimos a las posibilidades de interacción entre los dibujos de dos y tres dimensiones. Aunque este tema exigiría un desarrollo en profundidad que rebasa los límites de este escrito, nos gustaría añadir a lo ya apuntado algunas consideraciones y experiencias que estimamos de cierto interés. La primera cuestión que debe ser nuevamente resaltada es la prevención frente a las apreciaciones inmediatas que manifiestan la “muerte” del dibujo bidimensional ante la irrupción de lo tridimensional. Con las razones esgrimidas anteriormente, nuestro punto de vista se basa en recoger e integrar en un nuevo contexto todo avance procurado por la técnica, preservando los recursos sancionados por una larga tradición en el campo del conocimiento de la arquitectura. El uso coordinado del sistema planta-sección-alzado es así un logro cultural sofisticado, cuyo objetivo prioritario no es otro que el control y el conocimiento de lo tridimensional; es por tanto un método de análisis en el sentido de separar y estructurar en aspectos parciales la complejidad de los hechos arquitectónicos. A partir de este enfoque, conviene investigar las posibilidades de interacción entre las dos y tres dimensiones, esto es, los procesos de ida y vuelta entre ambos tipos de construcciones gráficas, ya sea en relación con la captura de datos, ya sea en las elaboraciones dibujadas.

De hecho—al igual que ocurre en otros campos científicos como la medicina—el análisis y la comprensión de la información tridimensional suele necesitar la elaboración de un conjunto de secciones planas que permitan establecer con mayor facilidad la diagnosis y el conocimiento de los hechos. Tal ocurre con las nubes de puntos de un edificio capturadas por un scanner, en las cuales la capacidad de discriminación de los programas informáticos permite seleccionar los datos par-

---

<sup>10</sup> Algunos de los dibujos que acompañan estas notas son producto de esta estrategia colectiva y han sido realizados por los alumnos de la asignatura optativa “Determinación y restitución gráfica de la arquitectura” en la ETSAM. Las composiciones de planta-sección de la capilla del Palacio de Boadilla del Monte y del crucero de la iglesia del convento de la Encarnación, son dos ejemplos del amplio catálogo de las obras de Ventura Rodríguez, absolutamente inéditas hasta el momento, desde el punto de vista aquí tratado.

ciales para el apoyo y construcción de plantas, secciones y alzados. En un sentido complementario, resultan de gran interés las experiencias de producciones bidimensionales obtenidas a partir de construcciones tridimensionales; en las arquitecturas históricas a veces resulta más operativo “construir” y disponer espacialmente ciertos elementos complejos y repetitivos (bóvedas nervadas, capiteles, modillones, etc.), para obtener acto seguido sus proyecciones planas. Aunque esta estrategia no es fácilmente generalizable, resulta muy adecuada en los casos en que estos elementos se disponen en superficies curvas, como sería el caso de una ménsula dispuesta repetitivamente en el anillo de una cúpula.

## Los edificios, las ciudades y el territorio

Para cerrar este conjunto de consideraciones sobre los nuevos medios en relación con las añejas finalidades del dibujo que atiende al patrimonio edificado, convendría referirse mínimamente al marco o entorno ampliado de los edificios, esto es, la ciudad y el territorio.

Mencionando tan sólo de paso las nuevas formas de “ver” la ciudad, el territorio, el mundo e incluso el universo, que cambian y ofrecen nuevas posibilidades día a día, tiene cierto interés detenerse en algunas observaciones sobre un tipo de documento que no ha recibido la atención que merece: nos referimos al parcelario en soporte informático. Este tipo de documento, normalmente producido en los ámbitos municipales, se ha ido extendiendo progresivamente en las dos últimas décadas y supone una ayuda a la documentación del patrimonio que no ha sido suficientemente resaltada. Dando por supuesta una mínima calidad en su ejecución, este documento supone, en primer lugar, una ayuda no despreciable para apoyar el levantamiento de un edificio. Mas, atendiendo a su principal vocación, el plano parcelario es un documento fundamental para procurar y facilitar en gran medida la integración de los conjuntos de edificios en un rango de orden superior. Es en cierta manera un gran dibujo en blanco, un contenedor genérico que permite ser cargado de diferentes tipos de información temática estructurada en diversos rangos.

El parcelario en soporte informático permite así un alto grado de prestaciones en relación con el levantamiento o restitución del estado actual de los conjuntos urbanos, ofreciendo además un enorme interés en los trabajos o estudios que podríamos denominar reconstituciones urbanas. Dibujar la ciudad como es, como ha sido o cómo pudo ser, constituye un ámbito específico de investigación que a lo largo de los últimos quince años ha producido un conjunto de trabajos en cierta medida concretados y difundidos, constituyendo una línea de investigación en constante desarrollo<sup>11</sup>. Si el ám-

bito natural de este tipo de investigaciones urbanas es en principio el de la planta o “ichnografía”, esto es el dibujo bidimensional de las diversas huellas o improntas del tiempo en la ciudad, un segundo grado de aplicación con mayor énfasis en la difusión del conocimiento de la historia de las transformaciones urbanas, se establece en las elaboraciones gráficas tridimensionales<sup>12</sup>. Desde la planta hacia el volumen, 2D-3D, ciudad histórica y ciudad contemporánea, podrían constituir así los emblemas de un amplio conjunto de investigaciones sobre el patrimonio que abren nuevos horizontes, ampliados por las diversas posibilidades de elaboración y difusión brindadas por el desarrollo de los nuevos medios.

La última extensión del espectro relativo al patrimonio corresponde a la escala del territorio. Aunque el término se presta a ciertos abusos e indeterminaciones- es notable la constante alusión al paisaje, natural, cultural o intangible, como uno de los últimos emblemas que “venden” en estrategias o proyectos patrimoniales- y al igual que ocurría con la ciudad, la cartografía informática, ya corrientemente generada en tres dimensiones, permite un cúmulo de nuevas experimentaciones en el reflejo y consideración de los valores patrimoniales. En este ámbito resultan de gran interés las posibles contribuciones de dos áreas de acelerado desarrollo como son las relativas a las fotografías aéreas y a los sistemas de información geográfica. Con estos renovados recursos y sus posibilidades de interacción, se abre en definitiva un amplio espectro de posibilidades ante las que sólo cabe estar constantemente atentos y abiertos, sin perder el objetivo profundo de ampliar el conocimiento y la transmisión ampliada de los añejos valores patrimoniales.

## La biografía de los edificios y sus ámbitos: material, mental y gráfico

Establecido el esquema básico de un posible entendimiento biográfico de los edificios en su contexto, y habiendo tratado de precisar el papel del dibujo en el momento actual ante la irrupción de las nuevas tecnologías en el ámbito del patrimonio

---

<sup>11</sup> ORTEGA, J. y MARÍN, F. (dirs.): La Forma de la Villa de Madrid, Comunidad de Madrid-Fundación Caja Madrid 2005, MARTÍNEZ DÍAZ, A.: Espacio Tiempo y Forma. El entorno del Palacio Real de Madrid, Área de las Artes Ayuntamiento de Madrid 2007, MUÑOZ DE PABLO, M.J.: Camberí s. XIX. Trazas en la ciudad, Tesis Doctoral inédita. ETSAM/UPM, 2008.

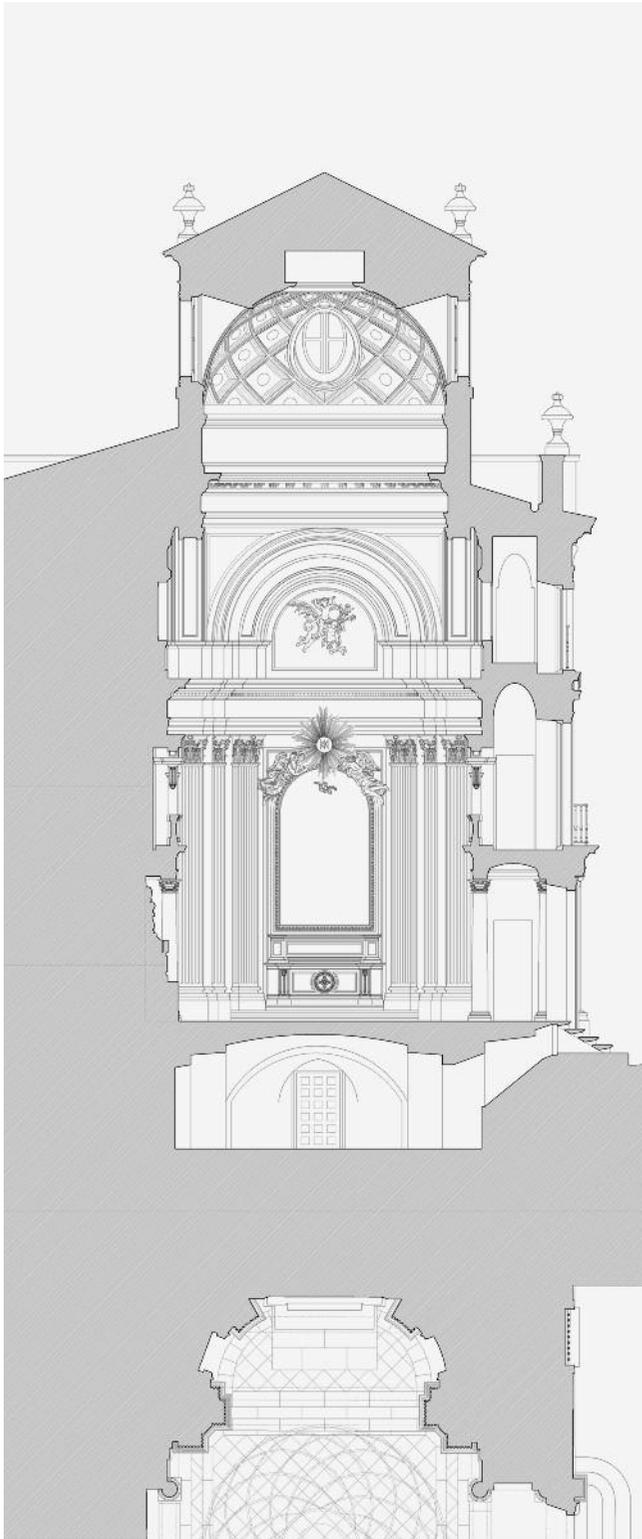
<sup>12</sup> ORTEGA, J., MARTÍNEZ, A. y MARÍN, F. J.: Entre los Puentes del Rey y de Segovia. Secuencias gráficas del río Manzanares desde el siglo XVI al XX, Área de las Artes, Ayuntamiento de Madrid, 2008. MARÍN, F. y ORTEGA, J. El Canal Real de Manzanares, Área de las Artes, Ayuntamiento de Madrid, 2009.

edificado, nos quedaría ahora sugerir unas ciertas consideraciones finales. Se trataría así de procurar el ensayo de una ordenación de algunos conceptos básicos que pudieran servir de pauta para actualizar momentáneamente la situación.

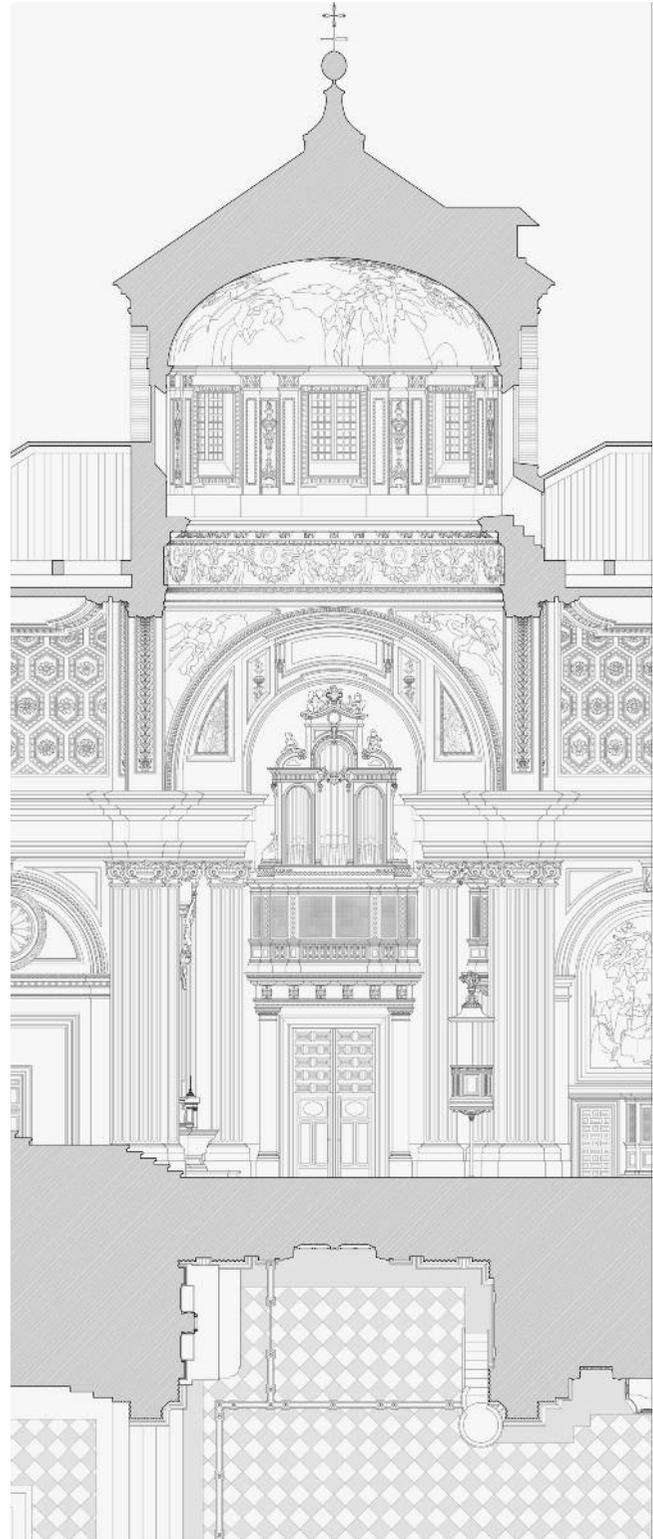
Acudiendo a un símil o metáfora elemental de la estructura atómica, lo que hemos denominado biografía o vida de un edificio se podría entender como un núcleo insondable envuelto por diversos ámbitos espaciales, que corresponderían a las categorías o dimensiones vitales hasta aquí descritas. Podríamos situar así un primer ámbito, próximo al núcleo, que correspondería a su devenir material. Un segundo ámbito lo constituiría lo que hemos denominado la vida gráfica, envolviendo a la zona material y por lo tanto algo más distante del núcleo biográfico. Sería finalmente el ámbito más lejano y amplio el que correspondería a la dimensión cultural o mental. Ocurriría así que este conjunto establecería las posibles relaciones y resonancias entre los diversos ámbitos, que tal y como ocurre en la estructura atómica, podrían adoptar formas más o menos determinadas y no resultar estrictamente concéntricas. Antes de abandonar el símil espacial consideremos por un momento algunas de sus posibles secciones planas, para observar ahora el núcleo vital rodeado por un triángulo en el que los vértices estuvieran ocupados por los tres polos: material, mental y gráfico. Podríamos situar en el lado que discurre entre los vértices material y gráfico todas aquellas aproximaciones, capturas y registros directos y pretendidamente objetivos, en principio no mediados por excesivas interpretaciones culturales. Más bien

ocuparía el dibujo la posición del segundo lado dispuesto entre lo gráfico y lo mental, evidenciando en ello que todo dibujo es producto de un acto de interpretación cultural, más o menos escorado hacia los conceptos de restitución o reconstitución antes enunciados. Finalmente ocuparía la palabra la posición preferente en el lado que discurre entre lo mental y lo físico; desde la mera descripción con sus diversos grados de erudición, hasta las posibles expresiones de sensibilidad y sugerencias brindadas por la literatura o la poesía, es difícil concebir la vida de un edificio sin la contribución del verbo.

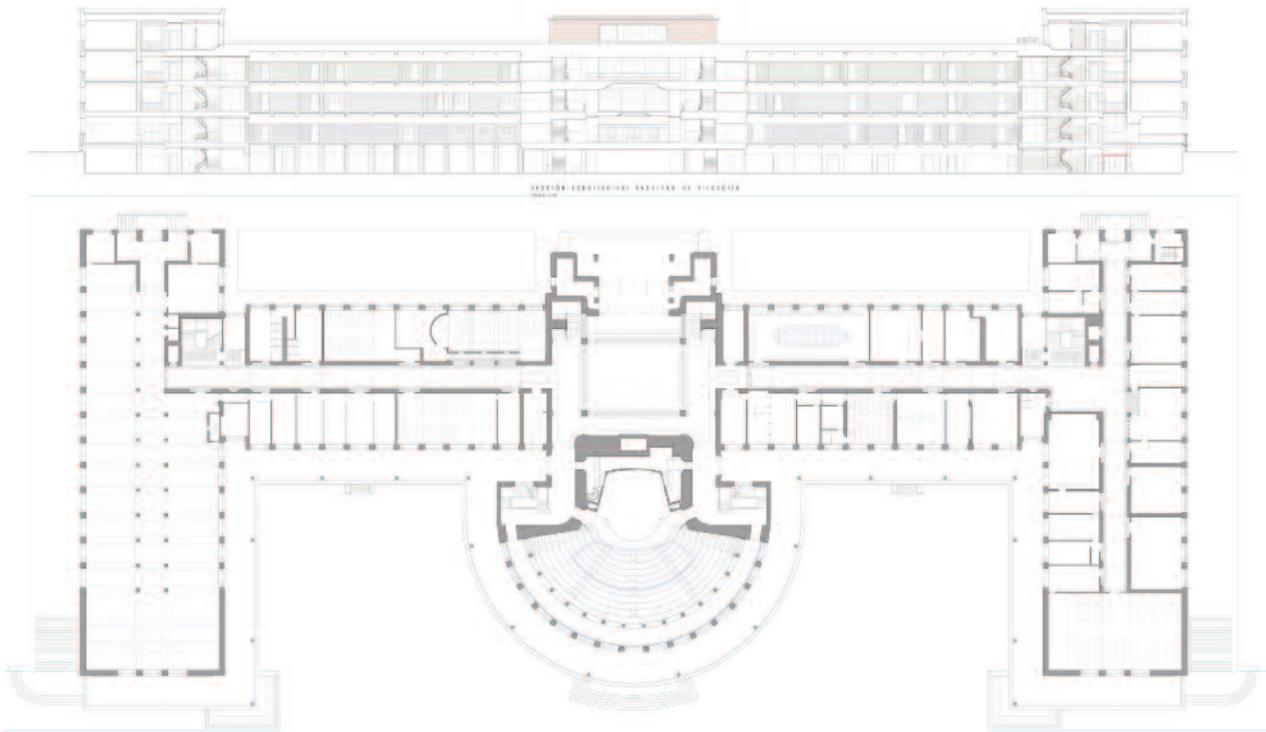
A modo de conclusión, constituye un desafío propio de nuestros tiempos la necesidad de estructurar todo el cúmulo de informaciones posibles sobre los edificios. Ya que no se trata de una tarea sencilla ni inmediata, lo que aquí se ha intentado es proponer el dibujo como núcleo medular de estas posibles estrategias, observando su posición en el complejo contexto de las diversas relaciones entre el bien patrimonial y la colectividad humana. El concepto biográfico aquí esgrimido tan sólo tiene sentido desde esta relación antropológica, bien entendido que esta metáfora vital, en principio ajena a la materia, podría servir como una opción para la ordenación y estructuración de estas relaciones. Bien sea en el sentido del ser humano hacia el edificio o viceversa, los canales de percepción material, gráfica o cultural serían tan sólo sugerencias o dimensiones que tratan de estructurar la complejidad entremezclada de los hechos para intentar comprenderlos y tal vez transmitirlos.



**Fig. 1** Composición de planta y sección de la Capilla del Palacio para el infante don Luis en Boadilla del Monte (Madrid), obra de Ventura Rodríguez hacia 1765. Trabajo de los alumnos de la asignatura "Determinación y restitución gráfica de la arquitectura" ETSAM 2001.

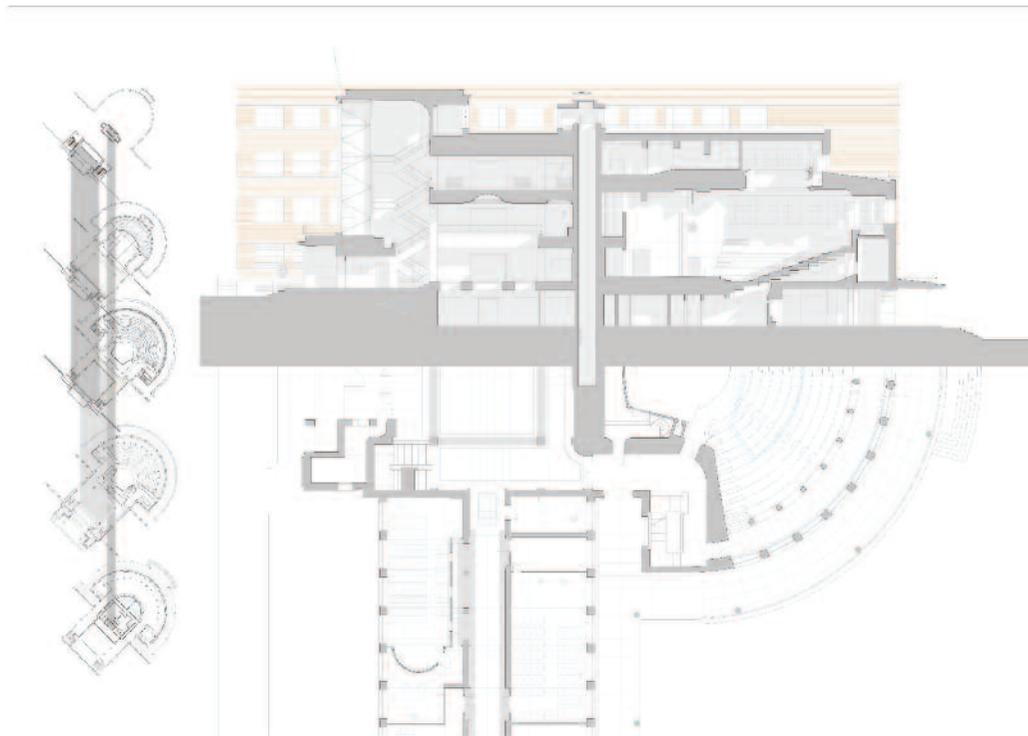


**Fig. 2** Composición de planta y sección del cruceiro de la Iglesia del convento de la Encarnación (Madrid), obra de Ventura Rodríguez entre 1756-70. Trabajo de los alumnos de la asignatura "Determinación y restitución gráfica de la arquitectura" ETSAM 2003.

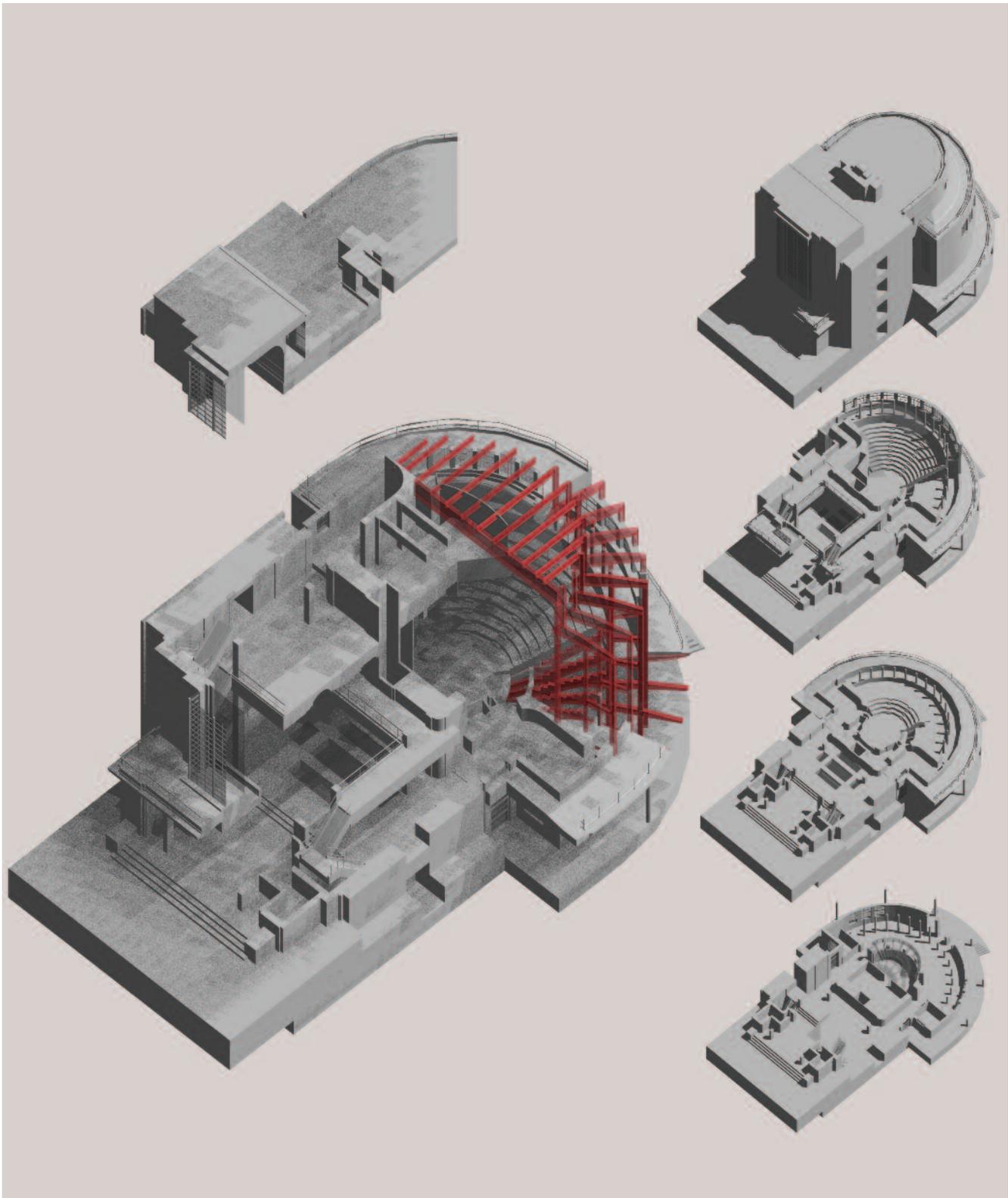


**Fig. 3** Facultad de Filosofía en la Ciudad Universitaria de Madrid, obra de Agustín Aguirre 1933. Estado actual de la planta baja y sección longitudinal. Trabajo de los alumnos de la asignatura "Determinación y restitución gráfica de la arquitectura" ETSAM 2006.

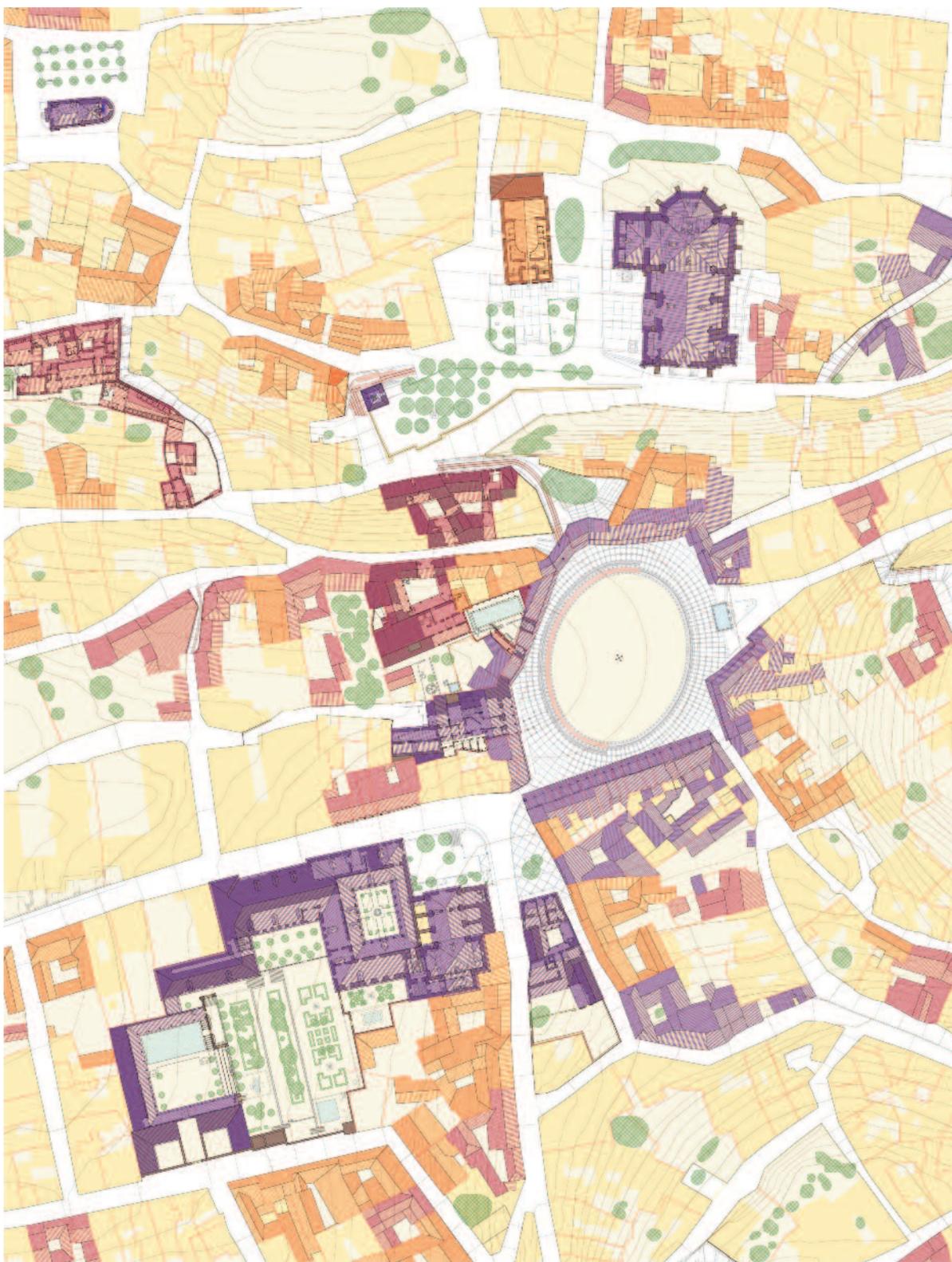
56



**Fig. 4** Facultad de Filosofía en la Ciudad Universitaria de Madrid, obra de Agustín Aguirre 1933. Composición de planta y sección del cuerpo central. Trabajo de los alumnos de la asignatura "Determinación y restitución gráfica de la arquitectura" ETSAM 2006.



**Fig. 5** Facultad de Filosofía en la Ciudad Universitaria de Madrid, obra de Agustín Aguirre 1933. Estudio tridimensional del cuerpo central. Trabajo de los alumnos de la asignatura "Determinación y restitución gráfica de la arquitectura" ETSAM 2006.



**Fig. 6** Fragmento de la planta de Chinchón (Madrid), como ensayo para el plan especial del casco histórico. Trabajo realizado para la Dirección de Arquitectura de la CAM (J. Ortega, M. J. Muñoz de Pablo, E. Mata, M. A. Alonso). 2003.

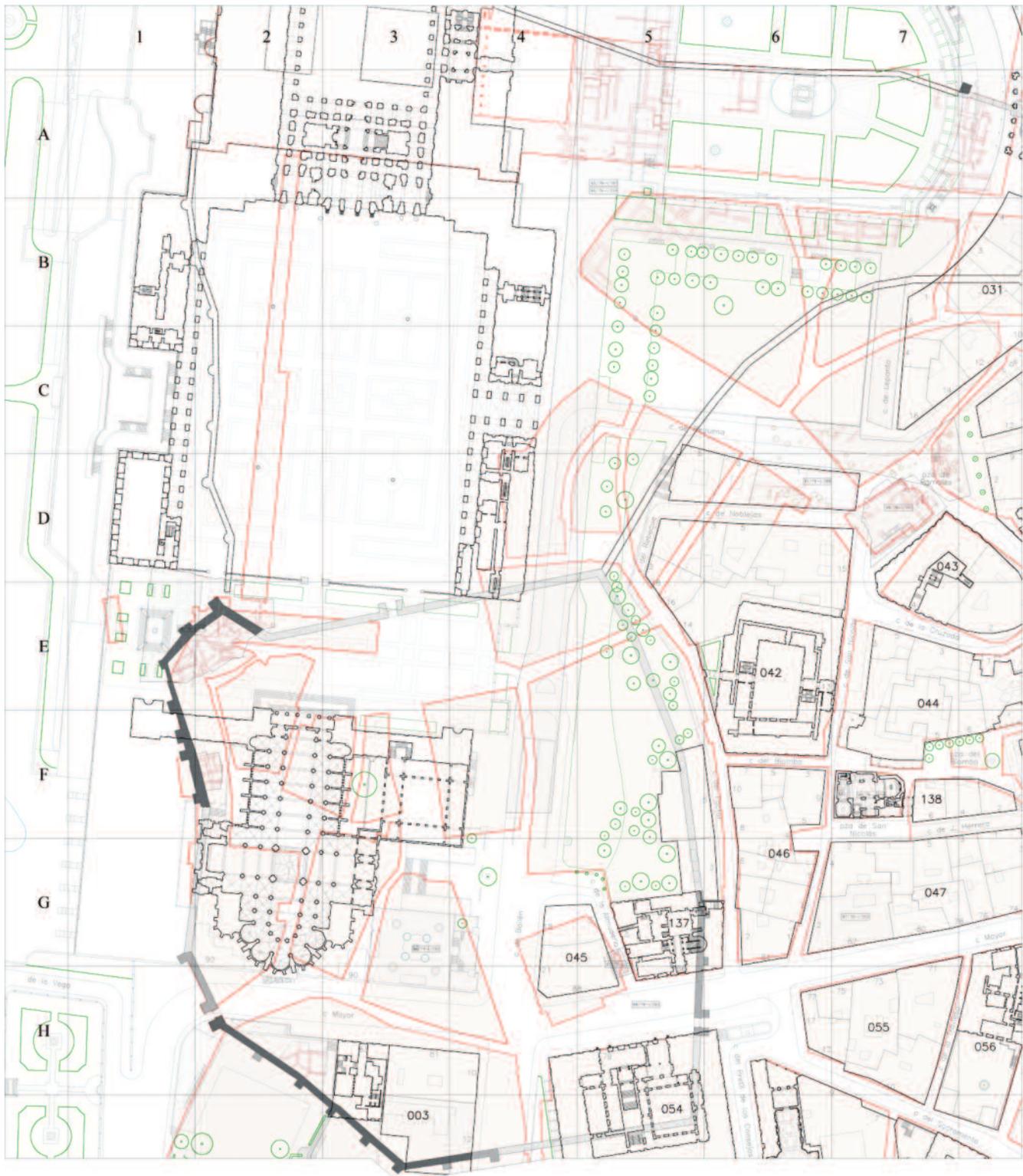
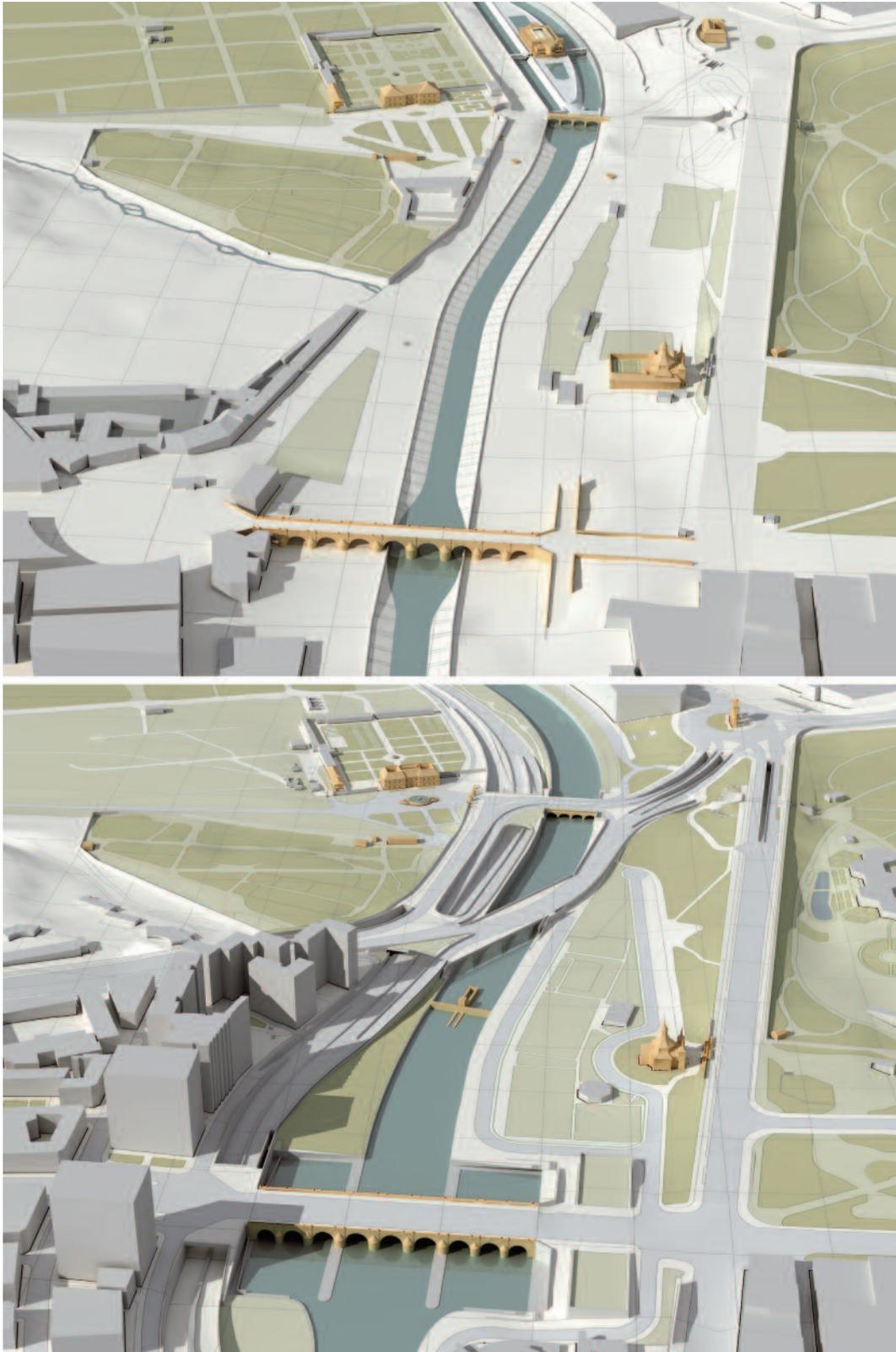


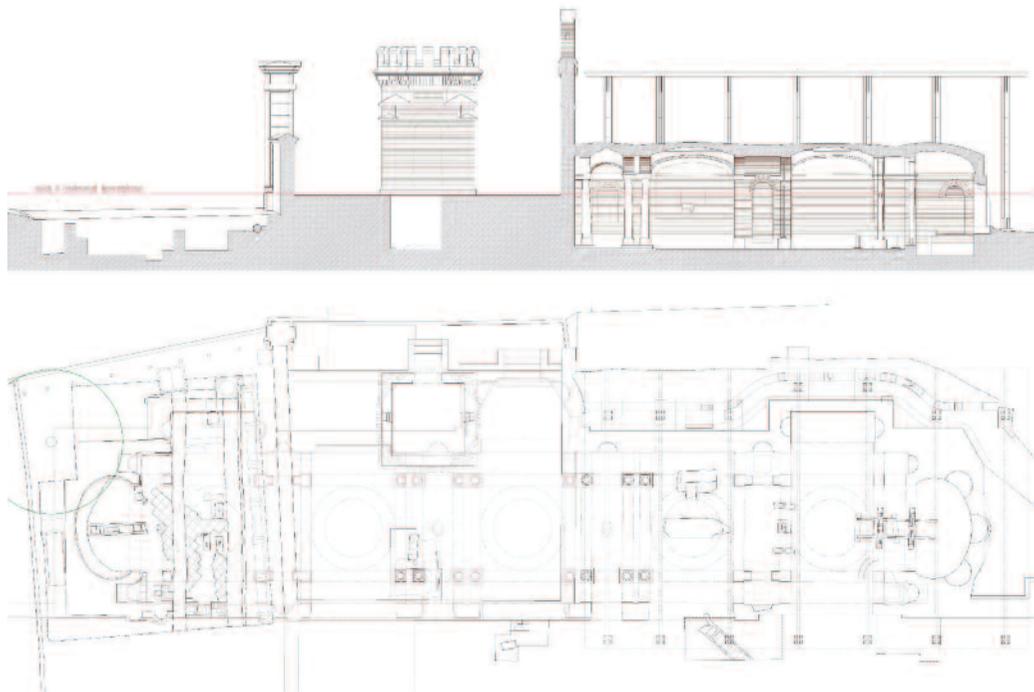
Fig. 7 Superposición de un fragmento de la planta de Madrid en los años 2000 (negro) y 1625 (rojo), con la traza del primer recinto amurallado donde se distinguen los grados de certeza de los distintos tramos. ("La Forma de la Villa de Madrid", CAM, 2005).



**Fig. 8** Plantas del entorno del río Manzanares hacia los años 1930 [izquierda] y 2000 [derecha], ("Entre los Puentes del Rey y de Segovia", Área de las Artes, Ayuntamiento de Madrid. 2008).



**Fig. 9** Reconstitución volumétrica del entorno del río Manzanares hacia los años 1930 [arriba] y 2000 [abajo], ("Entre los Puentes del Rey y de Segovia", Área de las Artes, Ayuntamiento de Madrid. 2008).

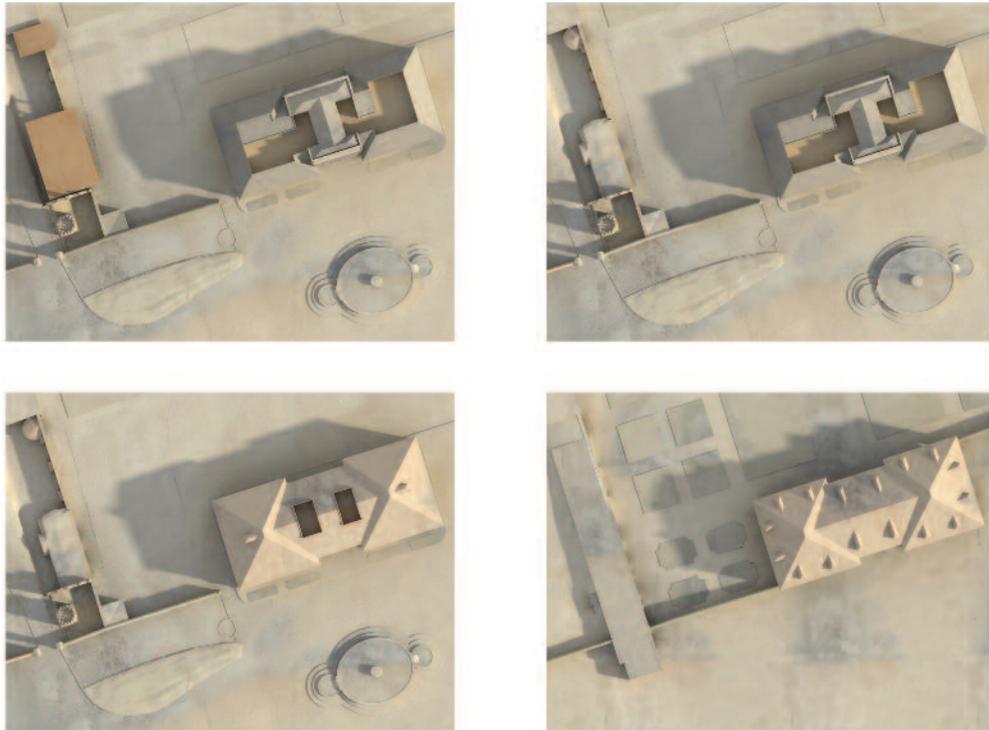


**Fig. 10** Planta y sección del estado actual de las Grutas del Reservado de la Casa de Campo de Madrid. Trabajo realizado para el Área de las Artes del Ayuntamiento de Madrid, (J.Ortega, F. Marín, V. Amezcua), 2007.

62



**Fig. 11** Reconstitución espacial de las Grutas del Reservado de la Casa de Campo de Madrid. Trabajo realizado para el Área de las Artes del Ayuntamiento de Madrid, (J.Ortega, F. Marín, D. Aragoneses, V. Amezcua), 2007.



**Fig. 12** Plantas del palacete y las Grutas del Reservado de la Casa de Campo de Madrid en distintos momentos. Trabajo realizado para el Área de las Artes del Ayuntamiento de Madrid. (J.Ortega, F. Marín, D. Aragoneses, V. Amezcua) 2007.



**Fig. 13** Reconstitución del estado del castillo de la Alameda en Barajas de Madrid. Ensayo de textura con acuarela sobre modelado infográfico (J. Ortega, F. Marín, M. Sobrino, D. Aragoneses y otros) de "El castillo de Madrid. Guía del castillo de la Alameda y su entorno" Museo de los Orígenes, Area de las Artes del Ayuntamiento de Madrid. 2010.

# La evolución de la documentación geométrica del patrimonio en un estudio privado.

## La importancia del dibujo

Alberto Martínez Rubio

Levantamientos Arquitectónicos AMR.

amr@levantamientos.com

64

### Curriculum

I. T. en topografía, por la E.U.P. de Mérida. Director gerente del estudio de levantamientos arquitectónicos y arqueológicos AMR. Especializado en documentación geométrica del patrimonio. He realizado más de 100 proyectos, tanto levantamientos arquitectónicos como arqueológicos.

Página web: [www.levantamientos.com](http://www.levantamientos.com)

Trabajos representativos:

- El Forte da Graça en Elvas (Portugal). Para la C.M. de Elvas.
- La Antiga Sé de Elvas (Portugal). Para el IPPAR.
- La Sede del Tribunal Constitucional en Madrid. Para Patrimonio del Estado.
- Conjunto arqueológico del Toledo Romano. Para el Consorcio de Toledo.

### Resumen

Vamos a mostrar la evolución de las distintas técnicas de medida empleadas en los levantamientos arquitectónicos, a lo largo de los últimos quince años y enseñar la calidad de los dibujos obtenidos, a través de varios trabajos que hemos realizado.

### Abstract

We show the evolution of different measurement techniques used in the architectural survey, over the past fifteen years and teaching quality of the pictures obtained through various jobs we have done.

### Comienzos en la Universidad. Fotogrametría Estereoscópica Analítica

#### Antecedentes

Comencé en el año 1993. Con una beca en el Laboratorio de Fotogrametría de la UEX. para hacer mi proyecto fin de carrera. “Levantamiento por fotogrametría terrestre de la Escena del Teatro Romano de Mérida” y varios trabajos más.

#### Equipos utilizados

- Restituidor analítico KERN con QASCO,
- Cámara métrica UMK100 d130\*180e mm
- Estación total Wild de precisión 1”, con equipo de poligonación.

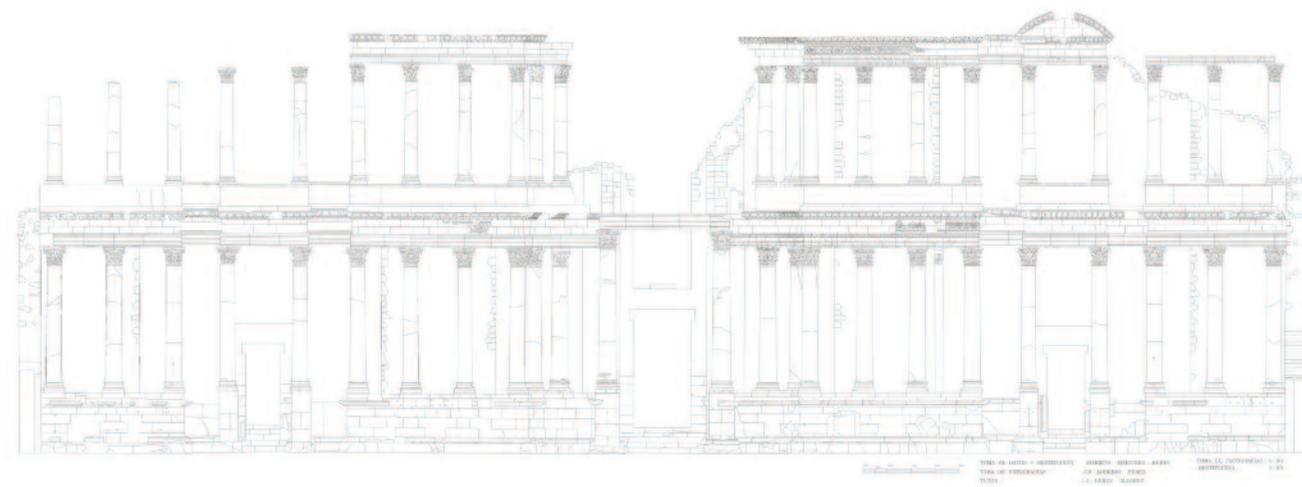


Fig. 1 Escena del Teatro.

### Ventajas

- Método rápido para dibujar alzados y grandes secciones con mucha ornamentación.
- Método preciso, en función de la escala de la fotografía.
- Menos tiempo en campo.

### Inconvenientes

- Toma fotográfica dificultosa, implica emplear medios auxiliares: andamios, cazoletas, mástiles telescópicos, etc.
- Zonas ocultas producen lagunas en los levantamientos y que rara vez se completan.
- La restitución solo es válida según el plano de proyección elegido para tomar los pares, que deben ser paralelo al objeto a medir.  
Ejemplo: al restituir la oreja de un santo visto de frente, la dibujamos como una línea. Pero cuando giramos el modelo para aprovecharlo para la sección, dicha oreja se sigue viendo como una línea y no nos vale. Tenemos que hacer un nuevo par y restituirlo.
- Método indirecto, las medidas se toman a través de las fotografías.  
La fotografía muchas veces engaña.
- Incompleto. Solo podemos hacer una parte de un levantamiento. Queda por representar las plantas y parte de las secciones.
- Subjetivo. Dos personas restituyendo darán resultados diferentes, dependerá de su sensibilidad, de sus conocimientos y del manejo del equipo.
- Equipo caro y difícilmente amortizable para construcciones sencillas.

- Delineación complicada. Es difícil dibujar con las manivelas, posarse correctamente, etc.

### Conclusión

La mayoría de los monumentos en que trabajamos, tenían fábricas muy sencillas y sin mucha ornamentación.

Por lo que la fotogrametría estereoscópica con los medios de entonces era “matar pulgas a cañonazos”.

65

## Trabajos de forma privada. Topografía clásica y fotografía analógica

### Antecedentes

Año 1996. Al terminar la beca en la Universidad y con pocos medios monté un pequeño estudio que se dedica a realizar levantamientos arquitectónicos y arqueológicos.

Por métodos topográficos obtenemos las coordenadas de los puntos que definen la estructura del monumento. Apoyándonos en ellos medimos con cinta el resto de la información que tenemos que representar.

Renunciamos a parte de la precisión, pero reducimos costes, sin renunciar a la calidad del dibujo. La mayoría de los monumentos que nos encargaban eran muy sencillos y prácticamente no tenían ornamentación.

### Equipos utilizados

- Una semiestación Pentax.PTS-10
- Una cámara analógica, de focal variable.



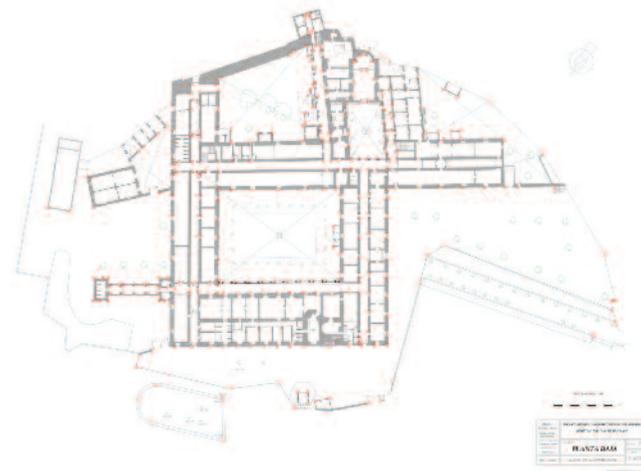
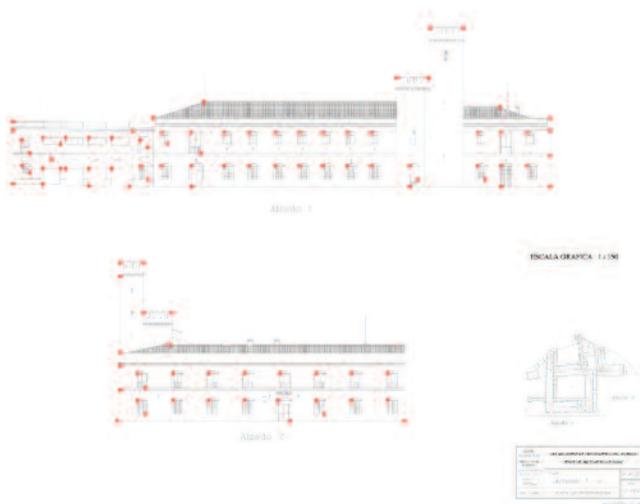


Fig. 4 Planta y alzados con puntos medidos del Hospital Militar de Badajoz.

- Software propio, para radiar fachadas. Puntos que estuvieran en el mismo plano.
- Software de retoque fotográfico. Photoshop.

#### Ventajas

- Método directo de medida. Tengo delante lo que mido.
- Rápido y sencillo de dibujar. A partir de los croquis.
- Económico. Los medios técnicos son asequibles.

#### Inconvenientes

- Menor precisión en alzados. Solo se miden los puntos principales.
- Necesidad croquis de las plantas, alzados y secciones donde anotar los puntos y las medidas con cinta.
- Más tiempo en campo. No es un inconveniente, permite un mayor conocimiento del monumento, al descubrir detalles y relaciones que en una visita rápida pasan desapercibidas.

#### Conclusión

Con ayuda de los arquitectos y dibujando croquis fui aprendiendo:

- A representar la arquitectura.
- Comprender lo que era importante representar y lo que no.  
Hacer croquis y tomar medidas directas son la mejor escuela para entender cualquier monumento.

## Gran avance. Topografía digital sin prisma, cámaras digitales y rectificación de fotogramas

### Antecedentes

Año 2.000

El método de la topografía masiva o escaneo selectivo es el que mejor se adapta al tipo de monumentos que hacemos. La estructura del edificio se mide de manera directa, y el relleno se dibuja auxiliado con fotogramas.

67

### Equipos

Se producen grandes avances técnicos que facilitan el trabajo de documentación. Adquirimos:

- La estación total Leica TCR. 405 que mide sin prisma, con alcance de 65 m.
- La cámara digital Nikon Coolpix 5000, con una resolución de 5 Mp.
- El programa de rectificación fotográfica Asrix.

### Ventajas

- Mayor precisión sin cambiar el método de trabajo anterior. Pasamos de tomar 100 puntos por trabajo a medir más de 10.000.
- Mayor rapidez:
  - Las fotografías sirven de croquis para los alzados, marcando sobre ellas los puntos medidos.
  - Rectificación de los fotogramas para los detalles.
  - Solo se mide con cinta en las zonas ocultas.

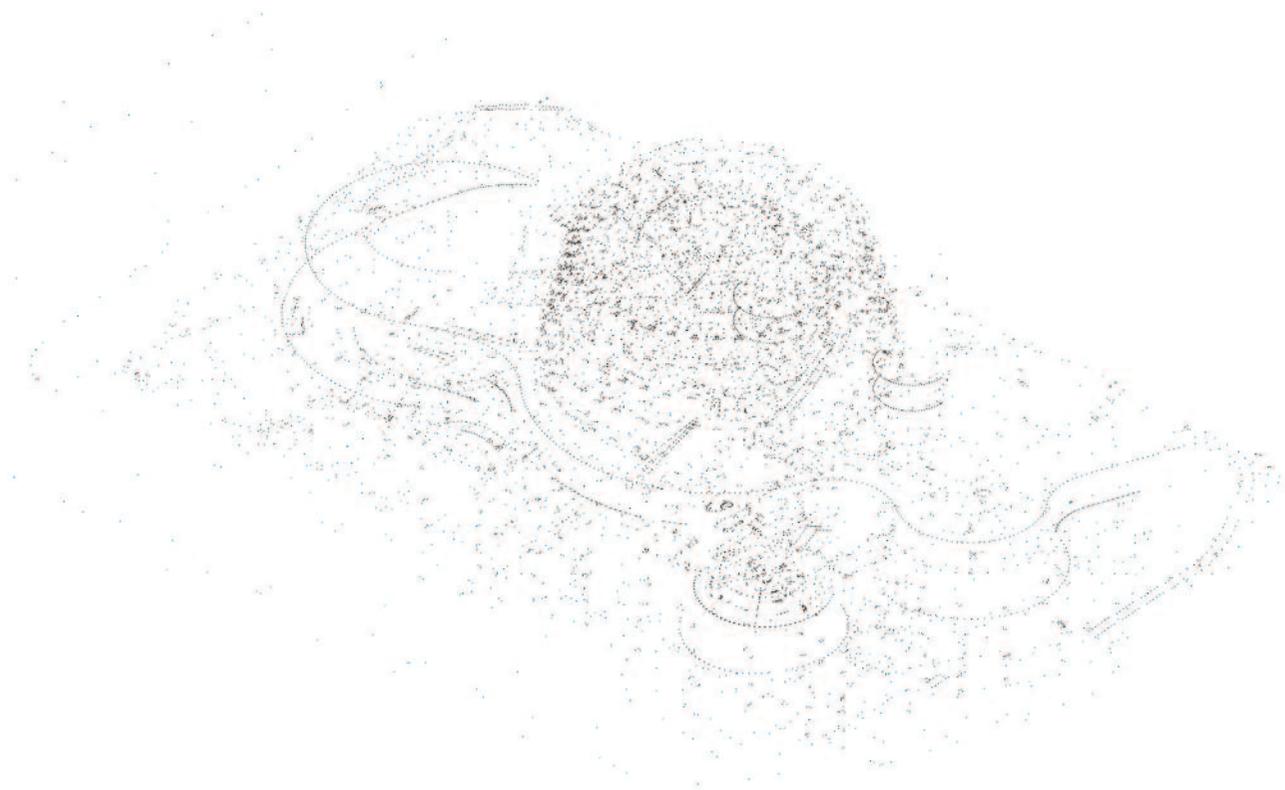


Fig. 5 Nube de puntos Tribunal Constitucional.



Fig. 6 Calatrava la Nueva sin piedras.

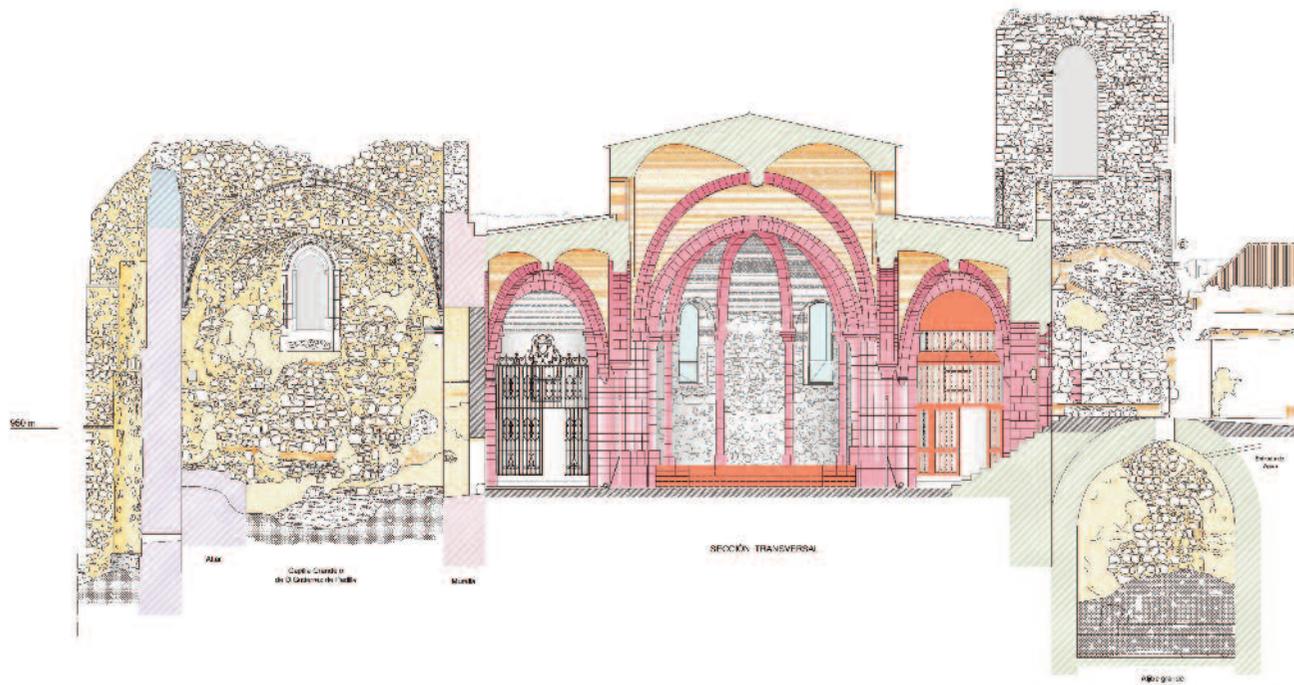
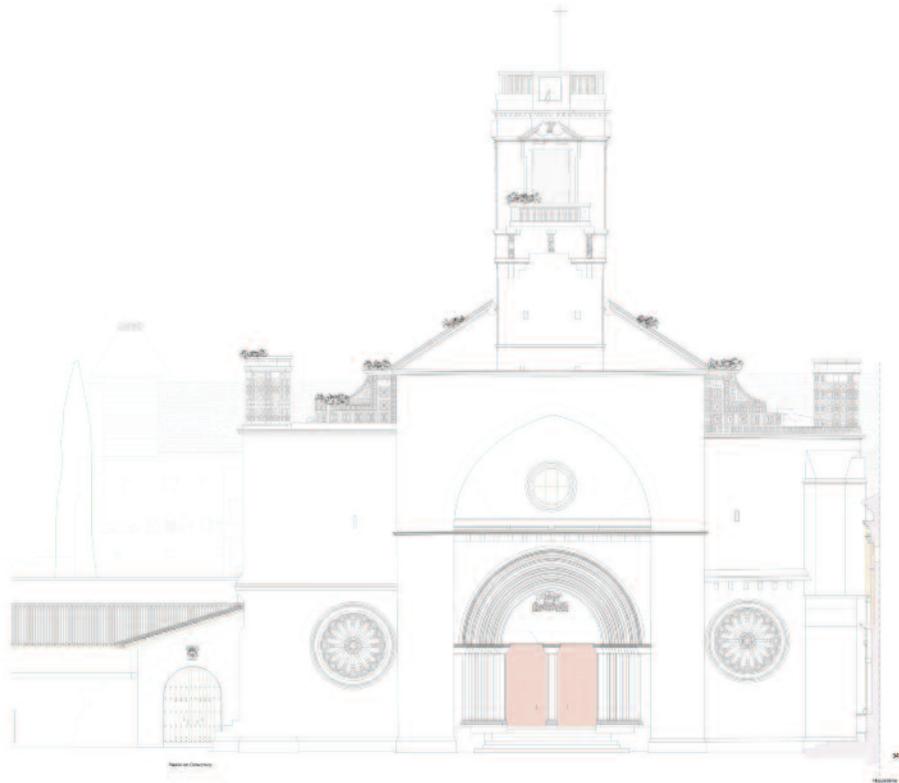


Fig. 7 Calatrava la Nueva con piedras.



Fig. 8 Alzado principal San Pedro de la Rúa de Estella.



**Fig. 9** Alzado principal La Oliva.

- Facilidad de dibujo. Con tantos puntos es muy sencillo dibujar.
- Comprobación encadenada.  
Para dibujar los alzados cruzamos la información con la planta, para dibujar las secciones cruzamos la información con los alzados. De este modo deben coincidir planta, alzado y secciones.
- Versatilidad, se adapta muy bien a todas las partes de un monumento.
- Buena relación calidad precio.

#### Inconvenientes

- Laborioso en zonas muy ornamentadas. ya que hay que radiar muchos puntos para contener los errores de la rectificación y de dibujo.
- Gestión de la información. Generamos mucha información que hay que guardar de forma ordenada, tanto de los puntos medidos como de las fotografías.
- Limitación del distanciómetro. El alcance era de 65 m. se quedaba corto, con objetos oscuros, como tejas de pizarra o zonas húmedas.

#### Conclusión

Este sistema es muy versátil, y homogéneo: resuelve las plantas, los alzados y las secciones por los lugares más inverosímiles y todo con la misma precisión.

#### Desarrollo de la fotogrametría y la topografía

##### Antecedentes

Año 2.005

Disminuye el precio de los restituidores digitales. Las cámaras digitales alcanzan gran resolución.

##### Equipos

Adquirimos:

- Una cámara Canon 1DS con 11.4 Mp.
- Objetivos calibrados de 24 mm y 50 mm, en el banco de pruebas de la UEx. con un programa desarrollado por Juan Antonio Pérez.
- Estación Total 407 de Leica. Alcance sin prisma de 110 m.

Probamos varios restituidores digitales y nos quedamos con:

- El Summit Evolution de la empresa DAT/EM Systems Internacional.

### Ventajas

- Restituimos bajo Autocad. Una vez hechas las orientaciones, con lo que no hay que aprender nuevos comandos.
- Posibilidad de alquilar el programa por meses.
- Dibujo con ratones 3D, que son más sencillos de manejar que las manivelas y por tanto de dibujar.
- Visión estereoscópica a través de gafas 3D, que facilitan la visión estereoscópica y por tanto el posado.
- Mayor alcance de la estación total.
- La mayor resolución de las cámaras digitales, permite distancias de trabajo mayores y por tanto menor número de pares.
- Trabajo íntegro en formato digital. Topografía, fotografías y restituidor.

### Inconvenientes

- Difícil amortización del equipo si no se utiliza a diario. Precio similar al de las estaciones totales.
- Los inherentes a la fotogrametría estereoscópica comentados anteriormente.

### Conclusión

La fotogrametría puede mejorar los alzados con mucho relieve, pero no sustituye a la topografía ni en plantas ni en secciones.

Aun así, en algunos alzados los resultados obtenidos mediante topografía masiva, no tienen nada que envidiar a la fotogrametría.

Como se puede ver en el ejemplo de las puertas del Palacio de Carlos V en Granada.

## Nuevas herramientas, el láser escáner y la fotogrametría convergente

### Antecedentes. Equipos

- La revolución del láser escáner

La primera vez que lo vi me pareció espectacular. Fui a la feria de Intergeo 2006 en Alemania, para ver todos los modelos de Laser Scanner que había en el mercado. Probamos el: Riegl z420i.

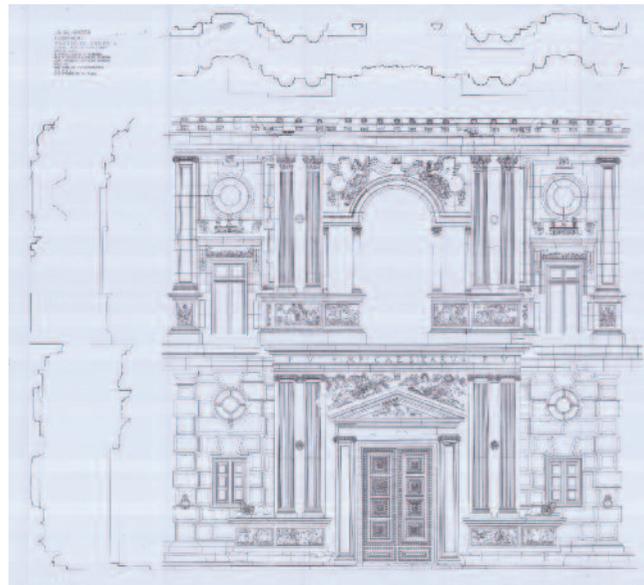


Fig. 10 Topografía masiva.

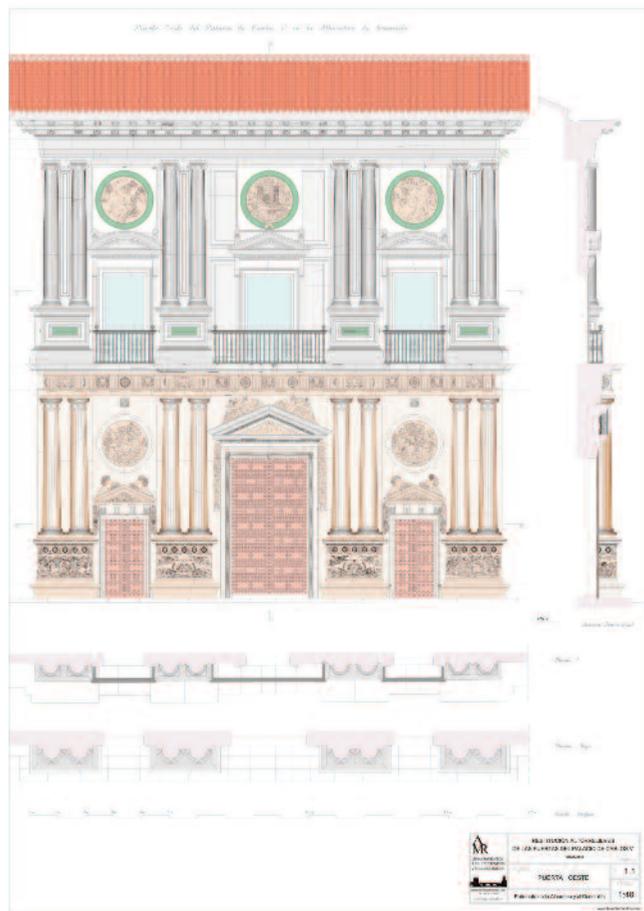


Fig. 11 Fotogrametría estereoscópica.

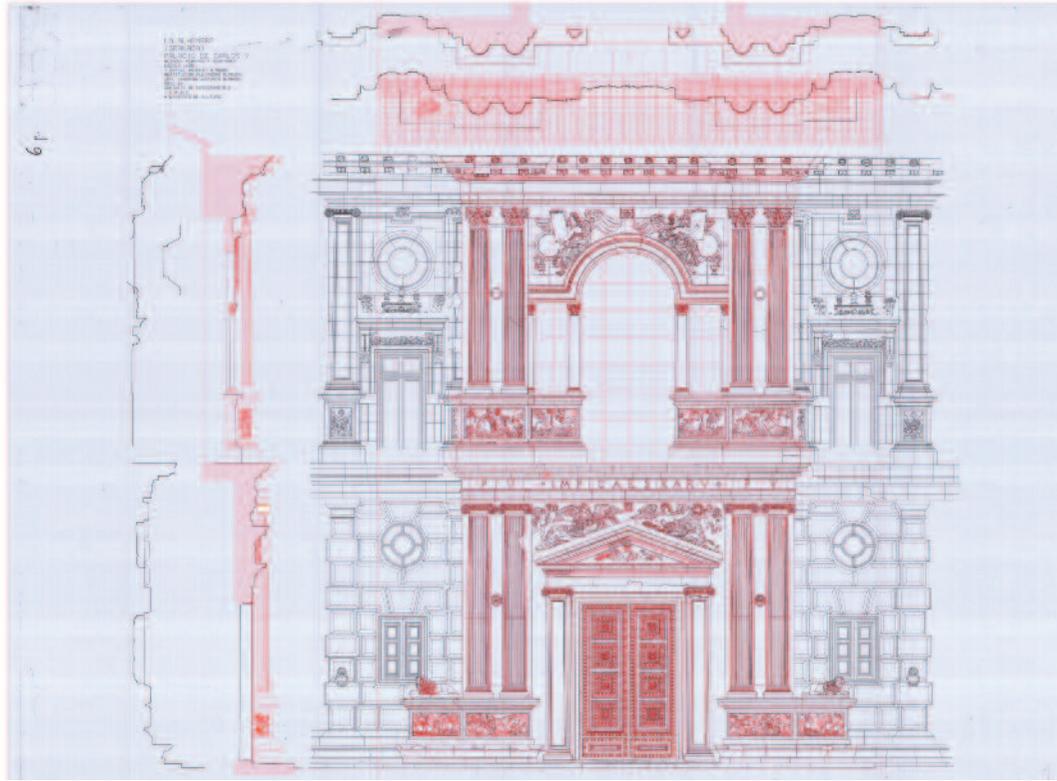


Fig. 12 Comparativa. Fotogrametría-Topografía.

72



Fig. 13 Pórtico Caslareina. Orto.



Fig. 14 Pórtico Casalareina. vectorizado.

Revolución silenciosa, son los programas de fotogrametría convergente. Hemos probado:

- Photomodeler Scanner.
- Ortoware de la empresa Metria.

#### Ventajas

Láser escáner:

- Muy preciso.
- Combina escaneo con fotogrametría para generar Ortofotos.
- Rápido en la toma de datos de campo.
- Genera modelos 3D. Los objetos representados son más reales: esta-tuas, sillares erosionados, capiteles, etc.

Fotogrametría convergente:

- Sistema preciso
- Barato.
- Genera de ortofotos.
- Facilidad en la toma de fotogramas.

#### Inconvenientes

Láser escáner:

- Caro, así como los programas para gestionar la información.
- Post proceso muy laborioso y requieren personal especializado.

Fotogrametría convergente:

- Requiere cierto esfuerzo para el aprendizaje.

Comunes:

- Sistema automático de medición. que no permiten aportar la experiencia del profesional que lleva años trabajando en patrimonio.
- Dificultad para obtener el dibujo vectorial.

#### Conclusión

- Hoy por hoy, los resultados obtenidos son un producto distinto a la representación vectorial de planas, alzados y secciones. Los resultados no son equiparables.
- Las Ortofotos nos pueden ahorrar el dibujo de los elementos en relieve

#### Proceso actual de trabajo

Lo ideal para realizar un buen levantamiento sería poder aplicar todos los sistemas de medida que tengamos a nuestro alcance:

- Métodos tradicionales: medidas con cinta y metro láser.
- Topografía con estación total.
- GPS.
- Fotogrametría estereoscópica. Terrestre y aérea.
- Fotogrametría convergente.
- Rectificación y ortofotogrametría.
- Láser escáner.

Que deben converger en el levantamiento arquitectónico óptimo, en función de las necesidades y el precio.

#### Productos obtenidos

- Planos en CAD 2D en formato vectorial.
- EL DIBUJO ARQUITECTÓNICO
- Planos raster mediante RECTIFICACIÓN y ORTOFOTOS.
- Modelos alámbricos en CAD 3D.
- Modelos reales 3D. Sólidos y nubes de puntos.

# PROYECTOS DE DOCUMENTACIÓN GEOMÉTRICA



74

Fig. 15 Convento de Las Reparadoras. Madrid. Planta.



Fig. 16 Convento de Las Reparadoras. Madrid. Alzado.





MODELOS 3D

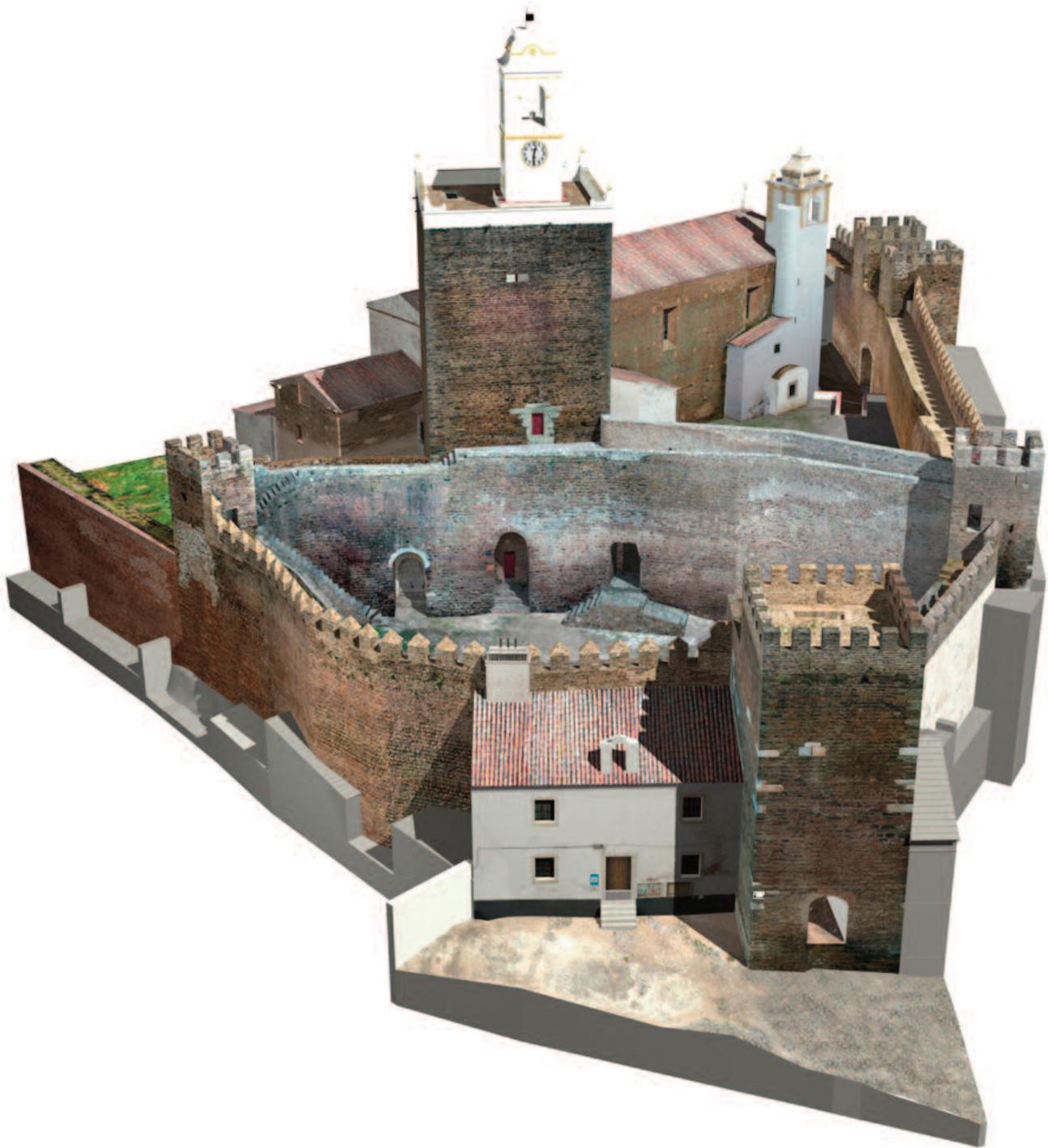


Fig. 21 Castillo de Alandroal, Portugal.



Fig. 22 Mezquita del Salvador (Toledo).



Fig. 23 Torre de Espantaperros (Badajoz).

# Cartografía en patrimonio: la métrica en la documentación. ¿Una realidad pendiente?

**Mercedes Farjas**

Universidad Politécnica de Madrid  
m.farjas@upm.es

**Francisco J. García Lázaro**

Universidad Politécnica de Madrid

**J. Julio Zancajo**

Universidad de Salamanca

**Teresa Mostaza**

Universidad de Salamanca

80

## Curriculum

Obtuvo el título de Ingeniero Técnico en Topografía en la Universidad Politécnica de Madrid (UPM) en 1982. Tras unos años en la Universidad Politécnica de Las Palmas de Gran Canaria, volvió a Madrid como Técnico de Grado Medio de la Administración Especial en el Ayuntamiento de Madrid. En 1989 obtuvo un puesto de profesor titular de Escuela Universitaria en la UPM, y durante esos años completó la licenciatura y el doctorado en Ciencias de la Educación y de Ingeniero en Geodesia y Cartografía. En 1996 obtuvo la Cátedra de Escuela Universitaria en la UPM.

## Resumen

Desde la Universidad Politécnica de Madrid, la Universidad de Salamanca estamos trabajando en la búsqueda de métodos de documentación métrica del patrimonio. En esta ponencia se mostrará la evolución en la captura de datos así como los resultados obtenidos a través de ellos, cuestionando en cierta medida el alcance real de la metodología y planteando la divergencia existente entre el desarrollo de herramientas tecnológicas de documentación y las tareas de análisis e interpretación de resultados históricos.

## Abstract

This presentation reports the research works on methods for digital metric recording of Cultural Heritage sites and elements, jointly conducted by the Technical University of Madrid (UPM) and the Salamanca University (USAL). The evolution of data capture equipments and methods, together with the resulting products, is described. In addition, the real scope of the achievements in these is, to some extent, questioned. Also, the gap between the level of development in metric recording tools and that of analytic and interpretative approaches is related.

## El método topográfico

La topografía se ha ocupado a lo largo del tiempo de conseguir la representación de superficies a partir de puntos ubicados en sistemas de coordenadas. Ya en la propia etimología del término se muestra este principio, (procede del griego *topos*=lugar y *graphen*=describir), así como en definiciones como la de Norman Thomas que en 1920 definía topografía como “el arte de determinar la posición relativa de los distintos detalles de porciones de la superficie terrestre”; Higgins que en 1943 señalaba “la topografía puede describirse

como el arte de realizar medidas sobre la superficie terrestre con el propósito de elaborar mapas, planos o determinar una superficie"; o Buckner que en 1983 se refiere a ella como "la ciencia y el arte de realizar las mediciones necesarias para determinar la posición relativa de puntos sobre, en, o debajo de la superficie terrestre, así como para situar puntos en una posición concreta".

Es desde esta perspectiva científica desde donde presentamos nuestro análisis sobre la metodología de documentación geométrica del patrimonio en el momento actual. La evolución de la topografía ha estado ligada a los adelantos tecnológicos, que se han reflejado en mejoras instrumentales. De la topografía de los grandes detalles (de los Atlas Nacionales) se pasó a la de pequeños (planos de detalle, topografía industrial, etc.), de las pequeñas escalas a las grandes. La mejora del instrumental, la aparición de la informática, los adelantos de la electrónica aplicada, la irrupción de la fotogrametría y el posicionamiento por satélite, son sin duda los aspectos más relevantes que han influido en este proceso de desarrollo. Estamos en una etapa en donde el instrumento de concepción óptica ha visto sustituir sus elementos por otros electrónicos, donde la medida de distancias ha evolucionado desde la cadena de agrimensor a la estadía vertical del siglo XVII, de ella a los equipos de medida electromagnética de distancias en la década de los 80 y de aquí a los instrumentos de GPS actuales y los equipos láser escáner. Por otro lado las distintas fases de la topografía: toma de datos, cálculo y dibujo; van perdiendo especificidad en el instrumental que usan y su mejora permite alcanzar con facilidad precisiones elevadas y evita la intervención humana en las distintas fases de los trabajos, obteniéndose con ello la reducción de errores accidentales y convirtiendo el proceso en un continuo, desde la toma de datos a la obtención de los resultados.

En este contexto evolutivo, comenzamos a ensayar con los sistemas láser escáner 3D, en el año 2003 gracias a la empresa Leica Geosystems. Para nuestro primer acercamiento a la tecnología, elegimos como objetivo la modelización de la estatua de Cibeles de Madrid. Tal como indicábamos en la referencia de prensa (Farjas y Sardiña, 2003: 70-71) la capacidad del equipo se extendía a modelar superficies casi continuas obviando la discretización en la toma de datos y la subjetividad en la selección de los puntos singulares que representaban al modelo.

Desde los primeros ensayos con técnicas tradicionales (Farjas, 2007) a los realizados en la actualidad, hemos encontrado cómo la métrica subyace a los proyectos de documentación, pero su uso no se ha extendido en el quehacer diario de los especialistas. En este trabajo presentamos ejemplos de aplicación, dejando abierta la perspectiva para que nos cues-

tionemos hasta donde se ha llegado, tanto en técnicas como en resultados. Por una parte tenemos tecnologías, equipos y procedimientos que se están aplicando en mayor o menor medida, pero no queda claro en qué grado esa medida está siendo utilizada por los analistas o gestores del patrimonio, y en qué medida ha supuesto a fecha de hoy una ayuda real.

A continuación vamos a describir el levantamiento del claustro de la catedral de Sigüenza y del monasterio de San Miguel de Escalada, como ejemplos de aplicación que muestren la línea metodológica general.

## Documentación tradicional: el claustro de la catedral de Sigüenza

En las metodologías que pudieramos denominar de levantamiento tradicional, queremos destacar el trabajo realizado por Silvia Peces Rata, para su proyecto fin de carrera de la titulación de Ingeniero Técnico en Topografía. En el curso 2006-2007 acometió llevar a cabo el levantamiento topográfico del claustro de la catedral de Sigüenza a escala 1/200. Se trata de un trabajo que no ha sido publicado.

Para llevar a cabo dicho levantamiento se implantó una red topográfica desde la que se efectuó la radiación de los puntos representativos, utilizando en la toma de datos la estación total TCR 705 de la casa Leica. Dicha estación permite realizar la medición de distancias mediante rayo láser visible sin necesidad de prisma reflector. El método utilizado para la observación de la red fue el de vuelta de horizonte, y para llevar a cabo el cálculo de las coordenadas finales de las estaciones, se realizó un ajuste mínimo cuadrático. Posteriormente mediante el método de radiación se determinaron las coordenadas de los puntos necesarios para la definición tridimensional del claustro. Previamente se habían confeccionado croquis de los detalles del claustro que se iban a radiar desde cada una de las estaciones, para anotar en ellos el número de cada punto radiado y facilitar la posterior edición de los planos. Se tomaron un total de 1524 puntos.

Las fases de captura y tratamiento de los datos necesarios para definir geoméricamente el claustro dieron como resultado una nube de puntos. Como se ha indicado la obtención de los puntos del levantamiento se realizó mediante topografía clásica con estación total con y sin prisma. Tras calcular las coordenadas planimétricas de los puntos que definían la planta del claustro, se obtuvo un fichero ASCII que se transformó al formato \*.dwg, con el objeto de poder volcar estos datos en un programa de diseño gráfico (CAD). El programa de CAD utilizado en este caso fue Autocad 2005. Con la nube de puntos en el fichero gráfico y con ayuda de los croquis de campo, se elaboraron los planos de cubiertas, los de la planta del claustro y planos de alzado del claustro a escala 1:200.

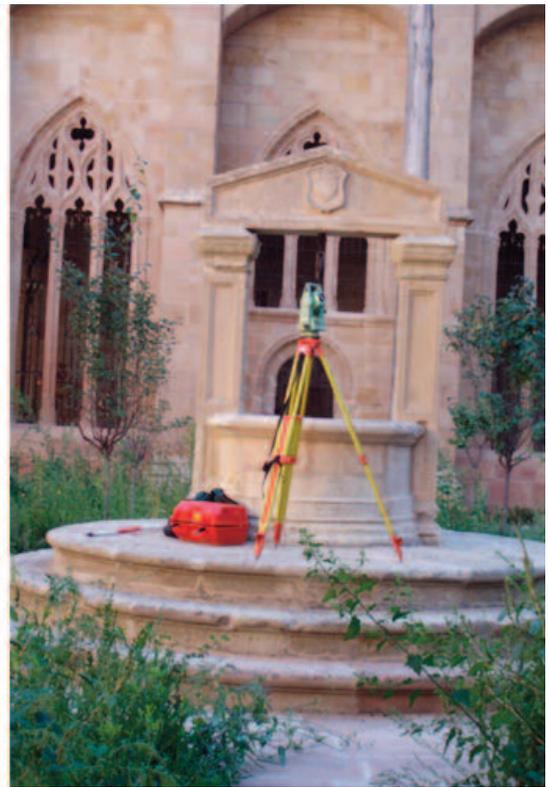


Fig. 1 Fotografía del claustro y del equipo utilizado en la toma de datos.

82

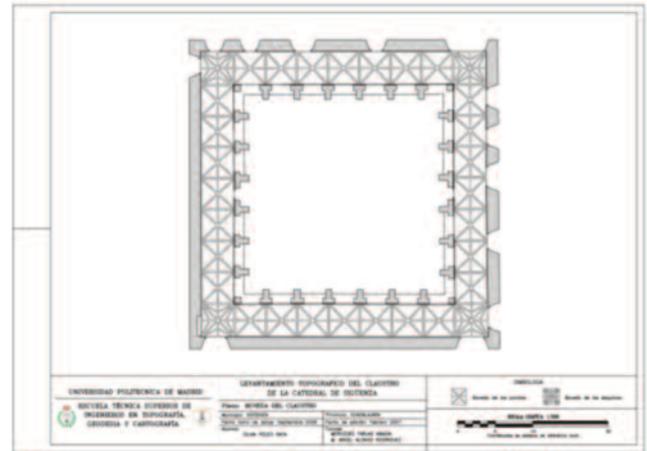
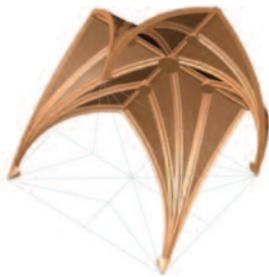
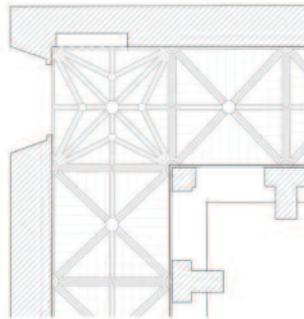


Fig. 2 Detalle de las bóvedas y del proceso de representación.

Fig. 3 Ejemplos de resultados obtenidos.

Con este mismo programa se realizó también el modelado tridimensional y se obtuvieron documentos métricos que describían el espacio levantado. El procedimiento general fue similar al realizado en anteriores trabajos con este mismo equipo (Alonso, Lopez-Mazo, Farjas y Ayora, 2002).

## Documentación con equipos láser escáner 3D: monasterio de San Miguel de Escalada

El equipo láser escáner terrestre es un instrumento de medida que realiza un barrido de la zona a levantar mediante un haz de luz láser, proporcionándonos nubes de puntos 3D. Para cada punto se obtienen sus coordenadas x,y,z en un sistema de referencia instrumental, así como la intensidad reflejada del haz. La captura de información métrica 3D es masiva y robotizada. En relación con esta metodología aplicada a la documentación métrica en arqueología se están publicando distintos trabajos (Farjas y Bravo, 2007), (Farjas et. al., 2010). Como ejemplo de aplicación y del modo de trabajo con este instrumental, incluimos a continuación un breve resumen del proyecto fin de carrera realizado en el curso 2008-09 por María Expósito García, levantando el monasterio de S. Miguel de Escalada, en León, proyecto que surgió como iniciativa de La Junta de Castilla y León que a través de la Dirección General de Patrimonio Cultural deseaba hacer una puesta en valor del Monasterio, declarado monumento nacional en 1886. Al igual que sucedía en el proyecto anterior este trabajo está sin publicar.

El levantamiento arquitectónico se efectuó por medio de la tecnología escáner láser terrestre (escáner GX 3D de la casa Trimble), combinandola con métodos de topografía clásica con la estación total TCR 405 y el equipo GPS System 500, ambos de la casa Leica.

Se comenzó estableciendo una red en la zona de trabajo, que fue enlazada con el sistema de referencia oficial ETRS89, proyección UTM Huso 30 N. De esta manera el proyecto se podría integrar en cualquier momento en la cartografía oficial española. La observación de la red se realizó mediante técnicas GPS utilizando tres equipos Leica modelo System 500, equipos bifrecuencia que pueden decodificar las frecuencias L1 y L2 en las que los satélites de la constelación NAVSTAR envían la información a los usuarios. El método utilizado en la observación de la red fue el método de posicionamiento estático relativo rápido por diferencia de fase en post-proceso, que consiste en hacer observaciones simultáneas, obteniendo líneas base entre los receptores estacionados sobre los vértices que se han observado en el mismo intervalo de tiempo.

El apoyo topográfico en este proyecto, consistió en la determinación de las coordenadas de una serie de puntos del monasterio y alrededores con la estación TCR405. Estos puntos

se distribuyeron homogéneamente por toda la geometría del monasterio, muro y excavación, y se corresponden con puntos naturales de las fachadas, tejado, contrafuertes, ventanas,... puntos bien definidos e identificables en la imagen generada por el láser escáner terrestre. Las coordenadas de dichos puntos se calculan en el mismo sistema de referencia.

Antes de comenzar con la captura de datos con el equipo láser escáner se debe realizar un estudio previo de la zona, para asegurar el buen desarrollo del levantamiento. El análisis previo sirve para evitar confusiones posteriores en la unión y registro de los diferentes barridos, minimizar redundancias, optimizar el tiempo de escaneo, estimar las precisiones por cada área y estudiar las limitaciones que provoca la propia geometría del edificio, como su altura, visibilidad, vegetación existente y otras causas. Una vez realizado este estudio se definen:

- Número de estacionamientos, situación y orden del levantamiento.
- Resolución necesaria en cada zona.
- Ubicación de las esferas para poder georreferenciar posteriormente el modelo.

El número de estacionamientos deberá ser el menor posible para asegurar el menor número de ocultamientos posible y un error mínimo en la fase de unión de los modelos. Dado que el escáner láser registra los puntos in situ en un sistema de coordenadas instrumental, que varía de un estacionamiento a otro, se tendrán que asegurar recubrimientos entre las estaciones escaneadas ya que se utilizaran puntos homólogos para relacionar las distintas tomas realizadas. En aquellos casos en los que no sea suficiente con el registro de las esferas. El modelo 3D es fácilmente georreferenciable con tres puntos materializados con esferas, pero para mejorar la precisión y obtener un error de ajuste estableceremos un mínimo de cuatro esferas por estacionamiento.

Aproximadamente el equipo capturó unos 5.000 puntos por segundo. La precisión de los puntos para distancias de 100 metros es de 2,5 milímetros y presenta una distancia máxima de radiación de 300 metros. Como hemos indicado anteriormente los archivos generados presentan una estructura: X, Y, Z, y el valor de reflectancia de la superficie donde el rayo incide. El programa utilizado para la toma de dato fue el PointScape 4.1. Se ejecuta desde un ordenador portátil, y permite capturar, manipular y mostrar las nubes de puntos obtenidas en el escaneo. Para el tratamiento de los datos se utilizó el programa RealWorks Survey 6.2.1 La metodología de trabajo fue la siguiente:

Para abarcar la zona de estudio se realizaron diez estacionamientos. ocho en los alrededores del edificio, uno en el interior del pórtico y uno más para materializar la excavación.

Una vez seleccionada la zona a escanear se configura la resolución a la que queremos escanear el objeto o ancho de

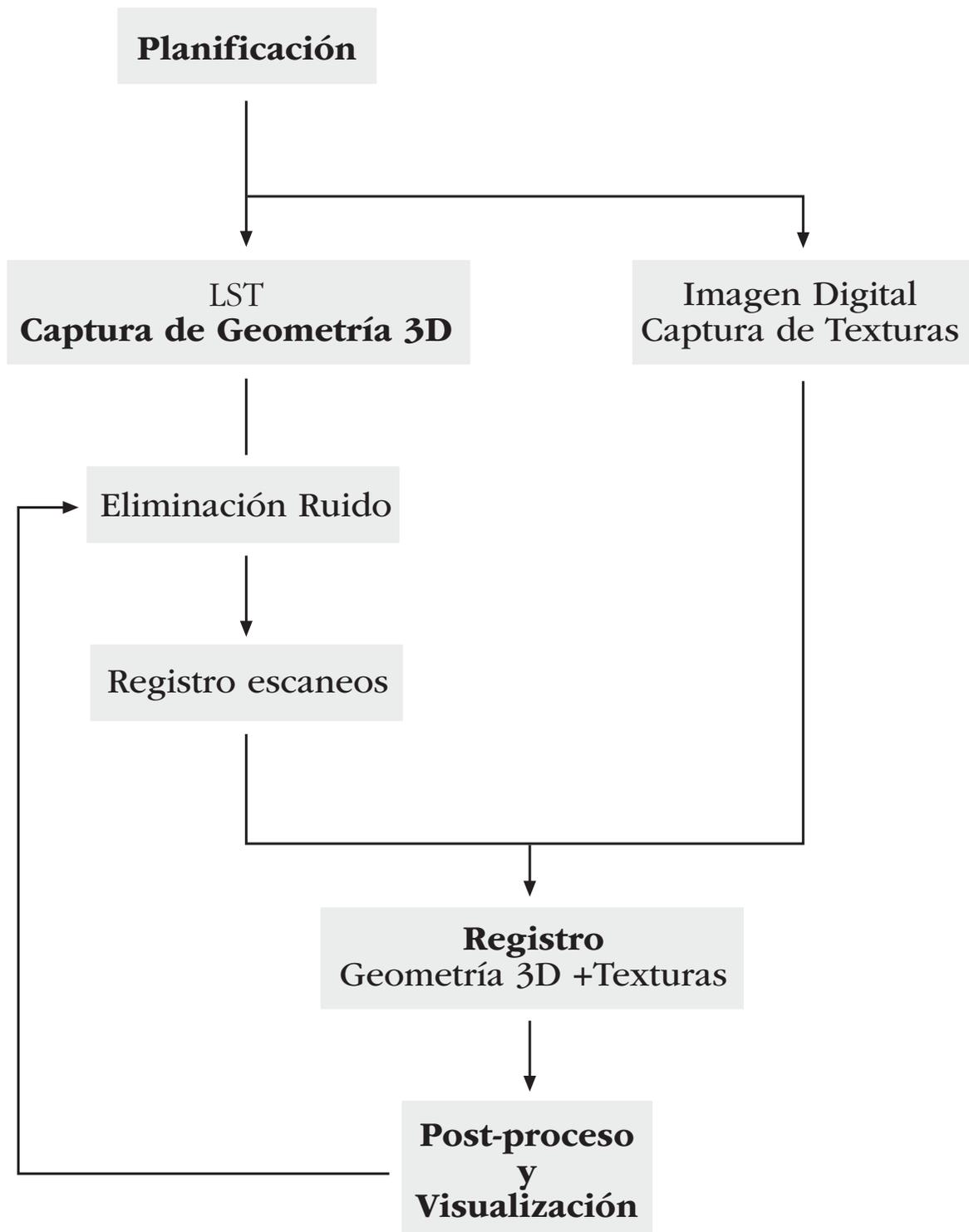


Fig. 4 Esquema de trabajo con el equipo laser escaner.



Fig. 5 Ejemplo de selección de la zona de escaneo y nube de puntos capturada.

mallá. Esta variará en función del área de escaneo. Así se establecieron las siguientes resoluciones:

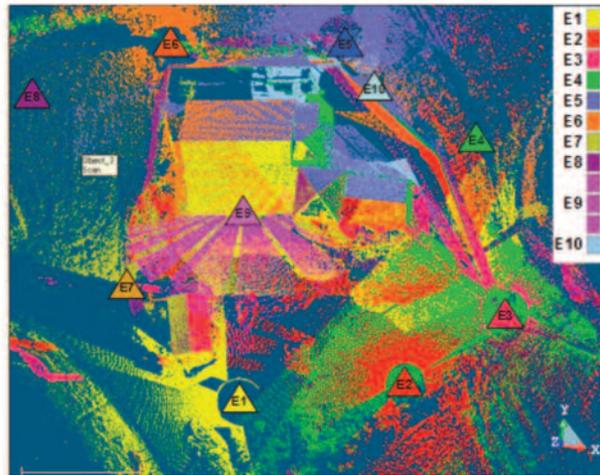
- Esferas: 2 mm
- Terreno: 200 mm
- Monasterio y edificio anexo: 30-40 mm, dependiendo de la zona
- Detalles (capiteles, ventanas,): 5 mm

En segundo lugar se establece la distancia aproximada del objeto. El valor de esta distancia será determinante para que el escáner registre los puntos con la resolución introducida. Y finalmente el número de veces que medirá cada punto. El escáner, al igual que la estación total en la medida de distancias, mide un punto un número de veces determinado, haciendo un promedio de las medidas. Así se establecieron 20 disparos para los puntos de control, esferas, y 4 disparos para el resto de objetos escaneados.

En la tabla 1 se muestran las estaciones indicando los objetos escaneados en cada uno de ellos, el número de puntos de cada objeto, duración del escaneo e imágenes captadas por la cámara que incorpora el escáner láser.

El levantamiento completo se realizó en 5 días, realizando un total de 131 escaneos desde 10 ubicaciones distintas, registrando un total de seis millones setecientos cuarenta mil puntos. Las oclusiones se redujeron planificando previamente las posiciones del láser aún así quedó parte de la excavación sin recogida de puntos dada su mala ubicación, por ello se tomaron puntos de relleno con estación total que se incluirán con posterioridad en la fase de tratamiento de los datos.

Se obtuvieron también un total de 275 imágenes, capturadas con el equipo escáner láser. Dada la poca resolución de estas imágenes y las dificultades en la toma, al estar la cámara integrada en el láser, las imágenes se obtuvieron también independientemente usando una cámara digital



Estaciones	Escaneos	Imágenes	Nº PUNTOS		
			Esferas	Objetos	Detalles
E1	24	18	70.892	647.390	173.900
E2	18	55	39.518	432.803	143.885
E3	11	0	123.841	231.319	0
E4	10	12	41.196	813.400	0
E5	12	47	146.273	888.905	0
E6	8	45	56.680	496.234	0
E7	9	36	34.683	490.324	0
E8	9	17	37.949	208.829	0
E9	19	31	70.274	896.086	127.574
E10	11	14	45.137	526.080	0
<b>TOTAL</b>	<b>131</b>	<b>275</b>	<b>666.443</b>	<b>5.631.370</b>	<b>445.359</b>
				<b>6.743.172</b>	

Tabla 1 Puntos registrados por estación puntos totales del proyecto.

Fujifilm de 8 megapíxel con un área de 3264 x 2448, que se utilizarán para la aplicación de texturas a nuestro modelo 3D.

El tratamiento de datos comenzó con la eliminación de aquellos objetos no deseados en el modelo, como pueden ser personas, vehículos, animales, u otros, que se encontraban en el escenario, en el momento de la toma.

El proceso de limpieza es manual dado que la lista de objetos a eliminar de cada escena variará de un proyecto a otro, por lo que no cabe esperar que sea un proceso enteramente automático en un futuro. El proceso de eliminación de ruido del escáner, si es un proceso automático y se basa en un algoritmo que elimina los puntos según una distancia mínima o un determinado número de puntos, de esta forma minimizamos el número de puntos válido por barrido.

Una vez concluida esta fase, contamos con 10 nubes de puntos, cada una en el sistema de referencia del sensor, por lo que los diez estacionamientos tienen sistemas de referencia diferentes. Para reconstruir el edificio original esta información debe ser registrada o alineada en un único sistema de referencia,



Fig. 6 Puntos registrados por estación puntos totales del proyecto.

que será arbitrario hasta que se realice la georreferenciación. El registro de estas nubes de puntos se puede realizar, bien usando zonas comunes de escaneo, es decir, con recubrimiento localizando puntos homólogos, o bien, usando objetos de puntería, en nuestro caso esferas que se encontraban repartidas por toda la zona a escanear. Ambas opciones se resuelven de la misma manera, mediante una transformación tridimensional de semejanza de 6 incógnitas, 3 giros y 3 traslaciones.

Una vez unido todo el modelo, para realizar la transformación de coordenadas, de la nube de puntos, del sistema de coordenadas instrumental al sistema de coordenadas ETRS89, se deben conocer puntos en ambos sistemas de coordenadas. Se utilizaron las coordenadas de las esferas, de las que conocemos las coordenadas en los dos sistemas.

Se considero necesario comprimir la información para reducir el modelo a un tamaño que posibilite su manejo. Esta reducción de puntos, se efectúa haciendo un muestreo de la nube. La herramienta permite seis tipos de muestreo: al azar, espacial, basado en el escaneo, en la intensidad, en la discontinuidad o topográfico. Nosotros elegiremos el filtro espacial, que permite elegir la resolución que deseamos en cada una de las zonas, es decir, la distancia a la que se desee que se encuentre un punto

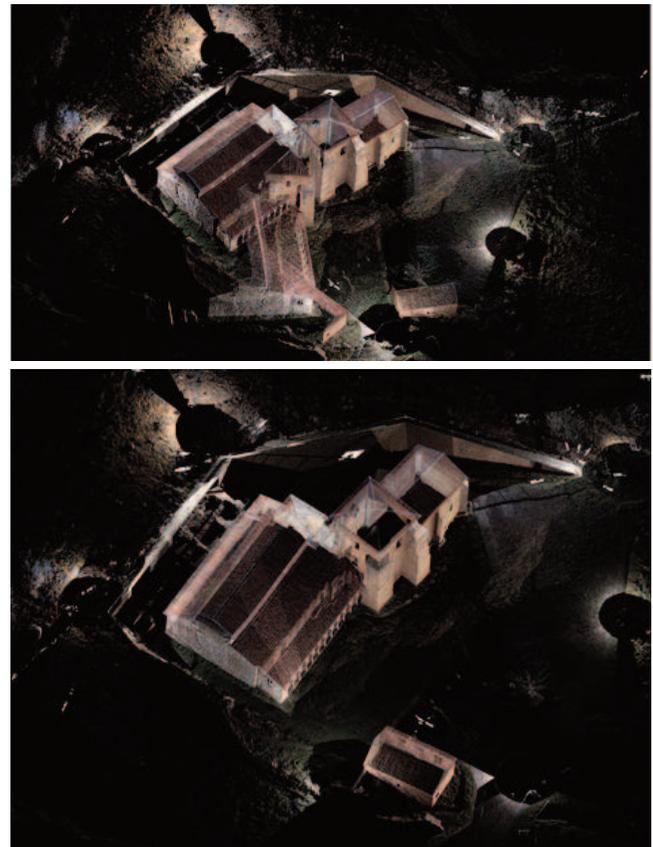


Fig. 7 Resultado de unir dos estaciones.

con respecto a otro. Dado que patrimonio arquitectónico establece la escala 1:100 y 1:50 en plantas, secciones y alzados y 1:25 para detalles significativos, la resolución escogida fue de 50 mm. para el modelo general de monasterio, excavación y edificio anexo y 25 mm. para los detalles, como capitel, ventanas, cancel; para el terreno se estableció una resolución de 300 mm.

Como se ha indicado, una vez realizado el filtrado, de 6.743.172 puntos iniciales, se paso a tener 1.384.538 puntos. Con este volumen de datos ya era posible continuar con el tratamiento de datos en el proyecto.

La siguiente fase fue la de construcción de una red de triángulos planos, con los que se define la geometría de los objetos representados y se creó el modelo sólido. A continuación se muestran algunas imágenes del modelo resultante.

Para dar al modelo un aspecto más realista, se le aplicaron texturas a partir de imágenes digitales. Las imágenes obtenidas fueron tratadas digitalmente corrigiéndolas de brillo y contraste para dar a todas una luminosidad parecida. Una vez tratadas las imágenes, se aplicaron las imágenes en el modelo. Para ello debemos hacer coincidir la imagen con la nube estableciendo relaciones entre la imagen y la nube de puntos, con puntos homólogos, identificación de líneas similares.

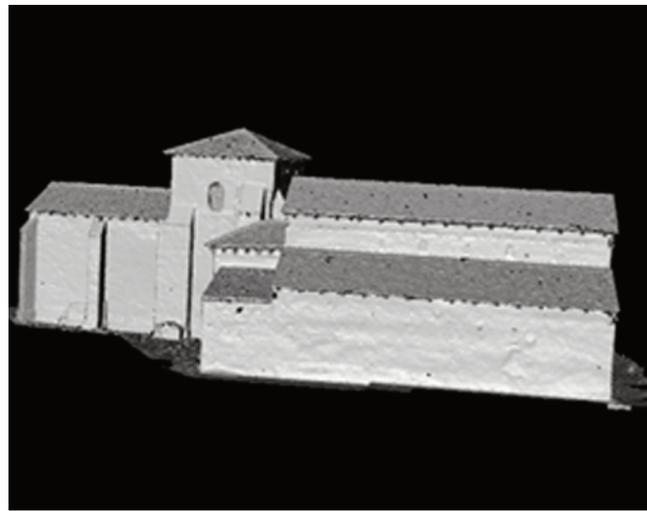
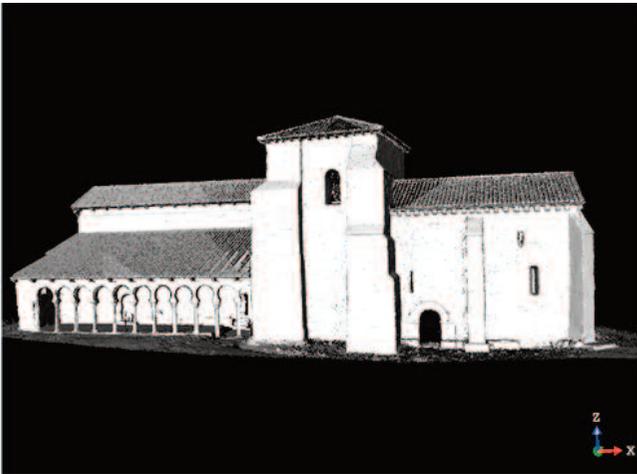
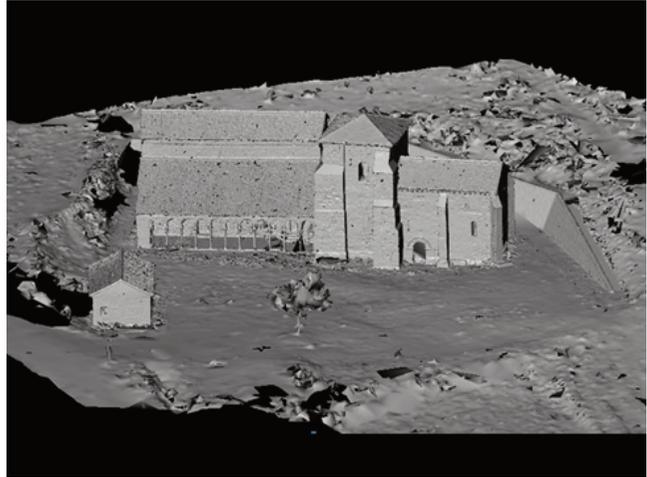
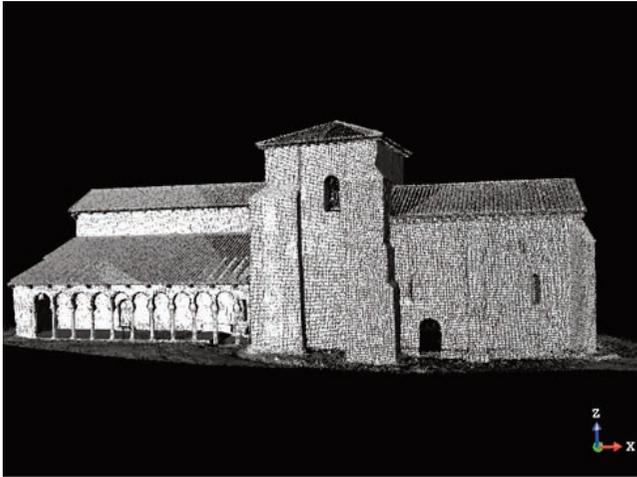


Fig. 8 En esta columna, de arriba a abajo, nube de puntos antes y después del muestreo espacial del Monasterio.

Esta fue una de las partes más complicadas, ya que se tuvo que hacer una selección de las fotografías que se iban a utilizar para aplicarlas como textura, realizando en ellas el tratamiento necesario para que no se notase cambio alguno de la tonalidad, debido a que las fachadas normalmente están constituidas por más de una imagen. La visualización de los resultados puede realizarse anteriormente a los procesos de tratamiento o procesado de datos. La calidad variará en función del tratamiento desarrollado. La documentación final presentada como registro del monasterio de San Miguel de Escalada incluyó:

- Modelo 3D del edificio del monasterio, a partir de los datos del láser escáner.
- Obtención de una imagen realista del modelo, es decir, con asignación de texturas a partir de imágenes realizadas in situ.
- Orto-imágenes arquitectónicas para su incorporación en programas comerciales de CAD.

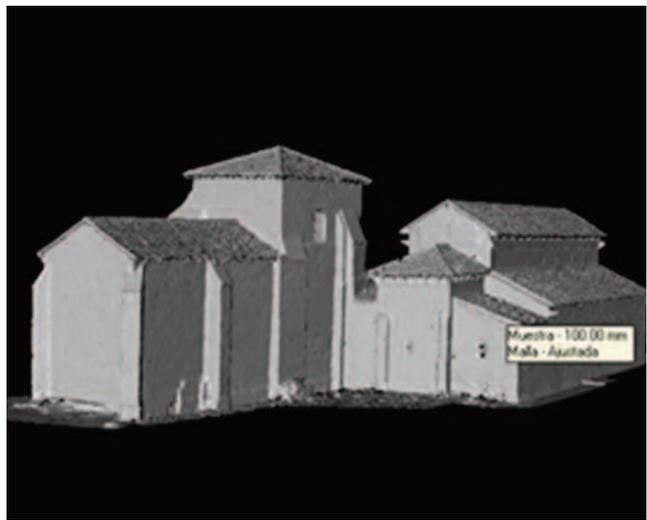


Fig. 9 En esta columna, de arriba a abajo, modelo sólido.



**Fig. 10** En esta columna, de arriba a abajo, aplicación de la imagen, señalando puntos homólogos y resultado final.

## Conclusiones

Desde la estación total tradicional, la estación sin prisma, o con los equipos láser escáner, el procedimiento de documentación es muy similar, siendo éstos un paso más en la captura de puntos singulares que representen la unicidad del elemento patrimonial.

La cuasi-continuidad en la toma y la captura de datos por un espacio predeterminado hace que deba plantearse un diseño claro y adecuado de qué, para qué y cómo. Por otro lado la captura masiva de puntos hace que sea realmente un problema el tratamiento de los mismos. Se está trabajando en algoritmos y herramientas de procesado automático, pero ahí es donde surge la pregunta sobre la representación final con respecto a la realidad. El qué, el para qué y el cómo, cobra aquí sentido. La fotogrametría, el modelado mediante fotografías y el tratamiento digital de imágenes como otra vertiente evolutiva que tiene su lugar en la documentación del patrimonio y está claro que con la interacción entre ambas tecnologías (adquisición directa de puntos con coordenadas o adquisición de imágenes georeferenciadas) está una línea con un enorme potencial en la documentación del patrimonio.

El objetivo perseguido en los dos proyectos expuestos era la obtención de una geometría completa y detallada del monumento. Ambos son ejemplos de aplicación de documentación métrica del patrimonio, y en relación con ellos, para finalizar, queremos dejar al lector la pregunta sobre qué productos o ejemplos serían útiles para su trabajo, teniendo en cuenta no sólo la utopía del modelado, sino su situación personal tanto en disposición de tecnologías, de presupuesto económico e incluso de formación en el tratamiento de datos georeferenciados y digitales. Se abren nuevos sistemas de documentación que nos acercan a una realidad digital y que por otro lado permiten ir mucho más allá superando el hiperrealismo en la representación, pero no sabemos en qué medida nos alejan de lo que realmente necesitamos.

## Agradecimientos

Este trabajo se desarrolla dentro del proyecto HAR2008-04118/HIST, financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación y los fondos FEDER; y del proyecto PADCAM (El Patrimonio Arqueológico y documental de la Comunidad Autónoma de Madrid: Sistematización, gestión, puesta en valor y difusión desde el ámbito local del marco europeo (CM)), financiado por la Consejería de Educación de la Comunidad Autónoma de Madrid.

## Bibliografía

ALONSO, M., LÓPEZ MAZO, A., FARJAS, M. y AYORA, F. (2002): "Levantamiento de la cúpula de la Basílica del Monasterio de San Lorenzo de El Escorial. Aplicación experimental de la estación total de lectura directa". *Topografía y Cartografía*, XIX, (Mayo-Junio 2002), pp 19-33.

BUCKNER, R. B. (1983): *Surveying measurements and their Analysis*. Third Printing, May 1991. Landmark Enterprises, Rancho Cordova, California. USA.

EXPÓSITO GARCÍA, M. (2009): Levantamiento mediante laser escaner 3D del monasterio de San Miguel de Escalada. Proyecto Fin de Carrera de la titulación de Ingeniería Técnica en Topografía de la Universidad Politécnica de Madrid. No publicado.

FARJAS, M. y SARDIÑA, C. (2003): "Novedades Técnicas: Presentación del equipo Cyrax 2500 de Leica Geosystem". *Topografía y Cartografía*, XX, 116, pp 70-71.

FARJAS, M. (2003): "Las ciencias cartográficas en la arqueología: la búsqueda de la métrica en los modelos de divulgación científica". *DATUM XXI*. Año II- número 3, Marzo 2003, pp 4-12.

FARJAS, M. & BRAVO, A. (2007): "Tecnologías de representación 3D en los procesos de documentación del patrimonio pétreo". En *Restauradores Sin Fronteras* (Ed.) , Ciencia, Tecnología y Sociedad para una Conservación Sostenible del Patrimonio Pétreo (pp. 47-57). Madrid.

FARJAS, M. (2007): *el registro en los objetos arqueológicos: Métrica y Divulgación*. Ed. Reyferr, Madrid.

FARJAS, M. et alii (2010): "Virtual Modelling of Prehistoric Sites and Artefacts by Automatic Point-Cloud Surveys", en Raghavendra Rao, N. (ed.) *Virtual Technologies for Business and Industrial Applications. Innovative and Synergistic Approaches*. Capítulo 12, pág. 201-217. Published by Business Science Reference (an imprint of IGI Global), Hershey, USA.

HIGGINS, A. L. (1957): *Elementary Surveying*. 7ª Impression, Longmans Green & Co., London.

PECES RATA, Silvia (2007): levantamiento topográfico del claustro de la catedral de Sigüenza a escala 1/200. Proyecto Fin de Carrera de la titulación de Ingeniería Técnica en Topografía de la Universidad Politécnica de Madrid. No publicado.

THOMAS, N. W. (1958): *Surveying*. 4ª Edición, Edward Arnold LTD, London.

# El papel de los rayos X e infrarrojos en la documentación gráfica del patrimonio; su presente y futuro

**Tomás Antelo**

Instituto del Patrimonio Cultural de España

tomas.antelo@mcu.es

**Araceli Gabaldón**

aragabaldon@yahoo.es

90

## Curriculum

Tomás Antelo Sánchez es operador de la instalación radiactiva del IPCE. Ha participado en numerosos análisis radiográficos, reflectográficos, con radiación ultravioleta, así como endoscópicos. Ha diseñado e instalado dispositivos específicos para la aplicación de las referidas técnicas en el IPCE, en otros centros análogos, así como en intervenciones in situ.

Araceli Gabaldón era supervisora de las instalaciones radiactivas del IPCE y del Reina Sofía. Ocupó el cargo de Físico especializado en conservación científica en el Departamento de Estudios Físicos del IPCE. Ha promovido el desarrollo de la reflectografía y de la radiografía junto a Tomás Antelo, obteniendo muchas mejoras tanto en la captación de imágenes como en la unión y calidad de las mismas.

## Resumen

Se hace un repaso del estado actual y el posible futuro de la documentación radiográfica y reflectográfica de infrarrojos, haciendo especial mención de la importancia que tiene el histograma al valorar objetivamente la imagen frente a la subjetiva del ojo.

## Abstract

A review of the radiographic and reflectographic infrared data state of the art and its future will be provided, special mention will be devoted to the importance of the histogram in order to give an objective assessment the image, opposite to the subjective assessment of the eye.

## Introducción

La primera pregunta que surge es si tiene sentido la utilización de radiaciones electromagnéticas en la documentación de obras de arte. Ya desde sus orígenes la fotografía ha sido muy utilizada para documentar. Sin embargo el uso de los rayos X o los infrarrojos no ha sido tan habitual, no obstante las técnicas que utilizan estos principios físicos se están utilizando cada día más.

De hecho ya a finales del siglo XIX, Roentgen hizo la primera radiografía de una pintura con muy buen resultado en aquel momento el procedimiento seguido fue innovador. Tenía que pasar medio siglo para que los estudiosos de los BBCC pensaran en la radiación infrarroja. Durante años usaron la fotografía infrarroja, hasta que Van Asperen de Boer da el gran salto con su tesis doctoral y diseña en colaboración

con Barnes un convertidor de imagen que transformaba la señal infrarroja en visible. Es importante aclarar que su ámbito de actuación es mucho más restringido que el de la radiografía, ya que hasta el momento su aplicación mayoritaria se ciñe al estudio de pinturas.

Como se ha expuesto la utilización de estas técnicas data de antiguo; son los procedimientos los que se han ido mejorando a lo largo del tiempo aunque de una forma lenta, habida cuenta de la precariedad de medios y de personal con los que habitualmente se cuenta en el campo en el que nos movemos.

Se caracterizan por no necesitar toma de muestra y porque su resultado queda plasmado en una imagen visible en la que la variación de una característica física local permite efectuar el diagnóstico. No estamos a favor de la definición de la industria “ensayos no destructivos” ya que con los objetos artísticos no se puede ensayar, por lo pensamos que utilizar el léxico médico que las denomina “técnicas para el análisis y diagnóstico por imagen” sería más adecuado.

Los rayos X en el procedimiento radiográfico, acercan a los estudiosos a la forma de fabricación del objeto, rectificaciones del artista, reutilizaciones sucesivas, estado interno, deterioro no visible producido por el paso del tiempo, posibles restauraciones, etc.

La radiación del infrarrojo cercano<sup>1</sup> actualmente tiene su principal aplicación en el estudio del dibujo subyacente de las pinturas, y con ese fin se desarrolló la reflectografía de infrarrojos. Aunque su alcance es menor que el de la radiografía, no deja de ser útil en los procesos de conservación y muy especialmente en la pintura mural donde no se puede aplicar la radiografía. Por otro lado, la información obtenida, puede proporcionar interesantes datos para conocer el proceso creativo del artista.

Es importante recordar que cualquier tipo de examen, por si solo da una información parcial del objeto; para que la información sea completa se deben unir los resultados obtenidos por distintas vías analíticas y valorarlos conjuntamente con los estudios histórico-artístico.

Como en cualquier rama del saber, se intenta continuamente los procedimientos analíticos. Debido a que los recursos económicos destinados a este campo, hay que nutrirse de las investigaciones llevadas a cabo en la industria o en la medicina y adaptarlas al patrimonio cultural, convirtiéndose su presente en nuestro futuro.

Al contrario que en la industria en este campo no existen

normas a las que acogerse y por lo tanto a las que referirse, por lo que para analizar con objetividad un documento, es muy importante conocer el procedimiento. En los informes se debe introducir un apartado en el que se especifique como se ha ejecutado dicho documento

Para entender el estado actual de estas técnicas es interesante mirar hacia el pasado.

## La reflectografía infrarroja, pasado, presente y futuro

La primera aplicación del infrarrojo cercano al campo de los Bienes Culturales (BBCC), fue la fotografía infrarroja con película. Su sensibilidad espectral comprendía la zona visible y la infrarroja hasta 1.350 nanómetros, siendo la imagen resultante la suma de ambas. Dado que la respuesta que se perseguía era únicamente la infrarroja, entre 700 y 1.350 nanómetros, la señal visible se convertía en parásita y para eliminarla se debía colocar un filtro en el objetivo de la cámara. Aunque la película era capaz de registrar hasta 1.350 nm, las cámaras existentes tenían el grave inconveniente de que sus registros llegaban hasta 900 nanómetros, por lo que no se podían traspasar determinados pigmentos. En lo referente al rango de niveles de gris, este era menor que el de película de blanco y negro, no obstante el documento obtenido se podía considerar muy aceptable.

La gran innovación vino, a mediados del siglo pasado, de la mano de Van Asperen de Boer, en sus estudios con motivo de su tesis doctoral, en la que abordaba el poder cubriente de capas de pinturas medievales. En ella llegó a la conclusión de que las imágenes obtenidas con una longitud de onda de alrededor de 2.000 nanómetros eran las más adecuadas para traspasar las capas de pintura.

En esta investigación utilizó un convertidor de imagen de la casa BARNES cuyo rango de actuación comprendía desde el visible hasta el infrarrojo, 2.200 nanómetros. La señal analógica de dicho convertidor se enviaba a monitor de televisión en el que se visualizaba la imagen; a este conjunto se le conoce como reflectógrafo o vidicón. Al igual que en el proceso de fotografía infrarroja, era necesario filtrar la visible<sup>2</sup> y el documento gráfico se obtenía fotografiando la pantalla del monitor.

El interés de las investigaciones de Van Asperen de Boer era debido a los diferentes grados de ocultación de los materiales pictóricos.

Al ampliar el rango espectral se tenía acceso a una zona impensable con la fotografía, pero la desventaja de este sis-

---

<sup>1</sup> De todas las técnicas que emplean la radiación infrarroja solo se van a tratar las que se circunscriben al infrarrojo cercano al visible -entre 850 nanómetros y 2.000 nanómetros.

---

<sup>2</sup> El que mejores resultados nos ha dado ha sido el 93 B+W.

tema estaba en su bajo rango espacial. Comparando esta señal analógica con la digital a la que tan acostumbrados estamos, diríamos la imagen tenía pocos píxeles<sup>3</sup>. La solución para tener una imagen de calidad fue la de acercar la cámara a la pintura con el fin de captar espacios mas o menos pequeños, según lo pidiera la obra y luego ensamblarlos, como si se tratara de un puzzle. Arduo trabajo, que suponía estar horas y horas para hacer el montaje. Desgraciadamente este sigue siendo el presente de muchos profesionales.

El reflectógrafo además de tener una respuesta espectral idónea para la captación del dibujo subyacente se caracteriza por su resolución espacial superior a la de los estándares de vídeo analógico. La aparición de sistemas capaces de digitalizar las señales analógicas fue un gran avance, aunque no fue fácil encontrar una tarjeta capaz de digitalizar la señal del vídeo sin pérdida de resolución<sup>4</sup>.

Después de una larga búsqueda<sup>5</sup>, se encontró una que satisfacía nuestras necesidades, instalada y funcionando en un

PC lo que supuso el siguiente avance en la composición del mosaico<sup>6</sup>. Con este método el trabajo resulta menos arduo, tanto en el tiempo de captación como en el composición del mosaico.

Desde que hicimos la captación de las reflectografías del retablo de santo Tomás de Avila, se habían ensayado diferentes formas de automatizar el sistema, pero no se encontró la solución final hasta que en el año 2005 se puso en marcha un proyecto VISIÓN ARTIFICIAL APLICADA A LA REFLECTOGRAFÍA DE INFRARROJOS MECANIZADA (VARIM)<sup>7</sup>.

<sup>3</sup> 625 líneas.

<sup>4</sup> Los sistemas de digitalización existentes en el mercado procesaban las señales CCIR de 625 líneas pero no aceptaban las 875 proporcionadas por la cámara.

<sup>5</sup> Queremos mencionar el interés que Salvador Giró de la empresa INFALMON, se tomo por buscarnos la tarjeta adecuada.

<sup>6</sup> Queremos agradecer a nuestro compañero Juan José Mariñez su asesoramiento y ayuda incondicional para tratar estos temas.

<sup>7</sup> Proyecto PROFIT en el que participaron el IPCE por el Ministerio de Cultura, la GATV por la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación y las empresas Infaimon y Servimatismos.

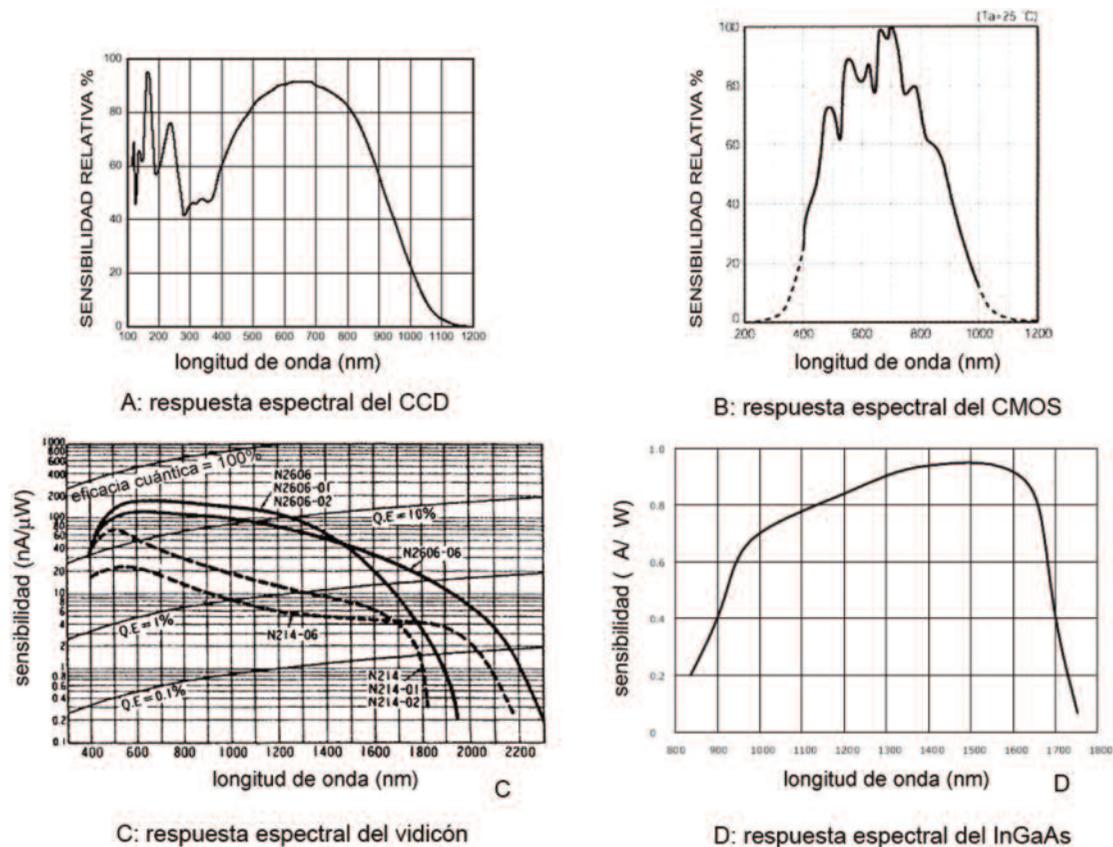


Fig. 1 Curvas de respuesta en el infrarrojo de los sistemas actualmente en uso.

El vidicon convive en la actualidad con las cámaras las fotográficas digitales y con las de sensores InGaAs.

Las cámaras fotográficas digitales se caracterizan por llevar incorporado sensores CCD (Coupled Charge Device) o CMOS (complementary metal-oxide-semiconductor), que tienen su mayor eficiencia cuántica en la zona infrarroja entre los 700 y los 1.100 nanómetros, siendo para esta aplicación el CCD el más adecuado de los dos, comparados con la película la mejoran considerablemente. Su empleo se ha extendido por su precio más asequible que el del vidicon. Pero siendo un gran avance, no se puede olvidar a la hora de analizar la documentación que su respuesta espectral en el infrarrojo cercano es muy limitada. Sin embargo su gran ventaja es la respuesta espacial, incomparablemente mejor que la de los otros sistemas.

El último avance ha sido la comercialización de las cámaras InGaAs, con sensores lineales o matriciales. Su respuesta espectral está restringida al campo infrarrojo, entre 900 y 1.700 nanómetros por lo que al no recibir señal del visible, se evita

el filtro. Aunque el rango de actuación en el infrarrojo es un poco menor que el del vidicon, la respuesta conseguida es de gran calidad. Son dispositivos ópticos electrónicos capaces de convertir en su interior la señal analógica en digital. Su refrigeración termo eléctrica proporciona mayor eficiencia al sistema.

Los sensores lineales están formados por una línea de fotodiodos (píxeles) y habitualmente oscilan entre los 512 y 12.000 elementos. Para formar la imagen ejecutan un barrido lineal, como el de los escáneres convencionales, desplazándose bien la cámara bien el objeto. El ancho de la imagen es fijo y depende del tamaño del sensor, mientras que la longitud es ilimitada al estar en función del número de pasadas que se programen. Estas cámaras son relativamente económicas, pero su contrapartida es que se requiere una muy alta precisión en el barrido.

Los matriciales, como su nombre indica están formados por una matriz de fotodiodos y la resolución de la imagen está



Fig. 2 Detalle de La Huida a Egipto del retablo de la iglesia de santa María de Trujillo (Cáceres): visible y reflectografía de infrarrojos.

condicionada al número de estos elementos. Los tamaños mas habituales son 320 pixeles x 256 pixeles y 640 pixeles x 512 pixeles. Al estar los fotodiodos posicionados de forma muy precisa en la matriz la imagen obtenida es muy estable. Una de sus grandes ventajas es que se pueden utilizar en aplicaciones híper - espectrales. Su gran contrapartida es su elevado precio. Actualmente en el IPCE se trabaja con una matricial de 640 x 512 y píxel de 20 micras, y su elección se hizo con vistas al futuro pensando en la investigación hiperespectral

## Proceso de obtención del documento infrarrojo

La imagen reflectográfica de la obra completa [Figura 2] se consigue al unir tomas unitarias, cuyo tamaño dependerá del motivo en estudio, y puede ser necesario actuar a dos niveles de proximidad, uno para la composición y otro de detalle a menor distancia con el fin de intentar discriminar otros detalles específicos de los trazos.

Aunque programas como VARIM tienen un software que compensa las deformaciones geométricas y las desigualdades de iluminación producidas en la captación, es primordial para la unión de las tomas unitarias que la iluminación este controlada y que el movimiento de la cámara sea paralelo a la obra.

En lo que respecta a las luminarias, las apropiadas son las incandescentes que emiten en la zona del infrarrojo. Dado las curvas que ofrecen las casas comerciales circunscritas al visible, no es fácil conocer su respuesta en el infrarrojo, so pena que se haga un estudio por un centro especializado, por lo que en los protocolos de trabajo hay que conformarse con dar la casa y el modelo de la luminaria.

Una vez situadas las luminarias y la cámara se debe decidir el número de fotogramas totales que se necesitan para componer una imagen con suficiente información, teniendo en cuenta que esta que puede llegar a ser del orden del Giga Bite<sup>8</sup>.

Decidido el tamaño se debe hacer un barrido para determinar los parámetros de la toma, brillo y contraste, que se introducirán utilizando el software de la cámara.

Si se utiliza VARIM, las imágenes unitarias se van observando en el monitor del sistema en tiempo real a la vez que se almacenan y se van colocan automáticamente en filas preparadas para su ensamble

Una vez obtenido el documento en soporte digital, puede ser necesario para su difusión transferirlo a papel, en estos caso hay que tener mucho cuidado con los tratamientos digitales para no perder detalles que pudieran desorientar en su estudio.

---

<sup>8</sup> 1Gigabyte = 1024Megabyte; 1 Megabyte =1024Kilobyte.

## El futuro de la imagen infrarroja

Para nosotros el futuro, que al escribir estas líneas ya ha empezado a materializarse, es el proyecto denominado: APLICACIÓN DE LA VISIÓN MULTIESPECTRAL EN EL RANGO INFRARROJO PARA EL ESTUDIO DE OBRAS DE ARTE (VISPECTRAL.)

El sistema que necesitábamos para iniciar la investigación consta de la cámara antes mencionada a la que puede acoplarse una lente difractiva multiespectral infrarroja (DMIR).

Las ventajas de obtener una información multiespectral precisa referida al infrarrojo cercano son múltiples ya que los datos proporcionados pueden ser filtrados por longitud de onda y poder observar detalles que pueden pasar desapercibidos, en una imagen de banda ancha.

Para ejecutar VISPECTRAL, que se puede entender como continuación de VARIM, se estableció un convenio de colaboración entre el Ministerio de Cultura (IPCE) y la Universidad Politécnica de Madrid (GATV)<sup>9</sup>.

Al trabajar en el infrarrojo, han sido necesario abordar otros aspectos ópticos; para afronta estos estudios se acudió a la Escuela de Óptica de Madrid<sup>10</sup>.

Por último pero no menos necesario, se acudió la Facultad de Bellas Artes de Madrid<sup>11</sup>, para que elaboraran unos patrones con los que calibrar los resultados.

## La radiografía, pasado, presente y futuro

Se puede decir que cualquier objeto es susceptible de ser documentado mediante una radiografía. Para su obtención se pueden usar rayos X, generados por sistemas electrónicos o rayos gamma producidos por la desintegración de los núcleos de los átomos de elementos radiactivos. Decidir el tipo de fuente generadora que se debe utilizar depende de la naturaleza y espesor del objeto a radiografiar, o bien de otros factores como puede ser la accesibilidad.

Siempre que se pueda, nuestra experiencia aconseja utilizar rayos X cuyo espectro da lugar a imágenes más bien contrastadas. En nuestra opinión, únicamente en áreas de muy difícil acceso o en objetos muy radioopacos sería interesante utilizar radioisótopos naturales o artificiales que con sus espectros discretos dan imágenes menos contrastadas.

---

<sup>9</sup> Los integrantes del proyecto son Tomás Antelo, Rocío Bruquetas, Marian del Egado y Araceli Gabaldón del IPCE y José Manuel Menéndez , Juan Torres y Carmen Vega por parte de GATV.

<sup>10</sup> Daniel Vázquez es la persona responsable de este trabajo.

<sup>11</sup> La profesora Consuelo Dalmau y la doctoranda Tamara Alba son las personas responsables de este trabajo.

Realmente la evolución de los equipos de rayos X no ha sido muy considerable, de hecho el que tenemos en el IPCE se adquirió en los años 80. Quizás se podría considerar como avance la mentalización que han sufrido los usuarios de este tipo de documentación de dirigirse a instalaciones industriales en lugar de a las médicas cuando necesitaban hacer una radiografía y las instituciones del ramo en dotarse de equipos industriales en lugar de médicos como se hacía en un principio.

En cuanto a los captosres de la radiación, a nuestro juicio, la película que no ha variado a lo largo de estos años, sigue siendo el sistema mas adecuado para la aplicación a los BBCC. Aunque se pensaba que con la aparición de los sistemas digitales esta iba a desaparecer, cada vez estamos más convencidos que esto no va ocurrir a corto plazo.

No obstante no se puede negar la existencia de los captosres digitales y estar al tanto de su evolución para adoptarlos en el momento preciso. Al ser sistemas nuevos, existen pocos antecedentes de su utilidad en el campo que nos ocupa, es por lo que se va a hacer una breve reseña y como se piensa que va a ser su introducción.

Los sistemas actuales se pueden dividir en dos grupos de radiografía digital indirecta o indirecta.

La indirecta (CR), utiliza placas de fósforo que están constituidas por fósforos (fotoestimulables) que son excitados al incidir sobre ellos un haz de rayos X formando, al igual que ocurre con la película, una imagen latente, que necesita ser revelada, por lo que el resultado obtenido no es tiempo real. Depende de la aplicación su principal ventaja puede ser la de utilizarla en el campo sin desplazar el sistema informático, pero sigue necesitando, como la película, un procesado. Otro dato a tener muy en cuenta, y que a nosotros no nos favorece, son los formatos en los que se presenta que obligarían a desistir de hacer radiografías en una sola toma, por lo que en el caso de grandes formatos habría que contar con un gran número de placas o trasladar el sistema de procesado, lo que no resultaría recomendable desde los puntos de vista ni económico y de tiempo.

En la directa (DR) los sensores puede ser de dos tipos: las líneas o arrays de diodos y paneles planos de silico amorfo (LDA).

Las líneas o arrays de diodos en principio parecían los más indicados para radiografiar pinturas ya que la línea se puede construir de la longitud que se necesite. Con ellos se barrería

la pieza actuando como un escáner y enviando la señal en tiempo real a un ordenador. Las pruebas que vimos en nuestra visita a YSLON<sup>12</sup> y la referencia que tenemos de algunas instalaciones que lo han adoptado, es que solo esta conseguido para líneas con un pequeño número de diodos.

Los LDA también dan la imagen en tiempo real y la que proporciona mayor resolución espacial, 50 mm, es la Hamamatsu. Lo que hemos visto la hace comparable a la placa digitalizada con nuestro escáner, con la ventaja de los 16 bit en niveles de gris frente a los 12 des escáner. Los grandes inconvenientes son sus pequeñas dimensiones, 124,8 mm.x124, 8 mm., y su precio.

Tuvimos la posibilidad de ver una demostración de estos dos últimos sistemas en la sede de YSLON en Hamburgo y llegamos a la conclusión de que actualmente su utilización para radiografías de pinturas no es muy aconsejable. Pesamos que cuando su uso este más extendido se aumentara el tamaño y se abaratará su coste, no obstante quizás se podían empezar a usar el LDA en piezas de muy pequeño formato.

## El documento radiográfico

La película como registro radiográfico proporciona una imagen que en primera instancia es una imagen latente, no es vi-



Fig. 3 Radiografía de una rejilla hecha en una sola exposición.

<sup>12</sup> Existe el archivo del área de laboratorios un informe que elaboramos Tomás Antelo y yo con motivo de nuestra visita a YSLON y queremos dar las gracias a la citada empresa por la invitación y la sinceridad con que nos permitió analizar los pros y los contras de los sistemas.



96

**Fig. 4** Radiografía de una escultura en madera policromada hecha en una sola exposición.



**Fig. 5** Detalles de la preparación para radiografiar el Guernica de Picasso.

sible, por lo que debe ser transformada mediante un proceso de revelado que da lugar a una imagen en niveles de gris.

Como se ha comentado no existen normas en el campo de las BBCC que permitan juzgar una radiografías. Por lo que es muy importante conocer la forma en la que se ha obtenido, equipo, película, procesado etc.

Partiendo de la base que salvo casos muy concretos se van a utilizar equipos de rayos X, saber el tipo de equipo es importante especialmente si se compara uno auto rectificativo con otro de potencial constante. En los primeros, de uso médico puede ocurrir que si aumenta la corriente de tubo, mili amperaje en el argot, la tensión se auto rectifique y se produzca una ligera variación de la tensión. Pero quizás el dato más significativo a tener en cuenta cuando se trata de objetos poco absorbentes que obligan radiar a bajas tensiones, sea el cerramiento de la ventana por la que sale la radiación. El mas apropiado es el berilio, ya que si es otro material con mayor número atómico, se pueden perder en los documentos pequeños matices del objeto.

Continuando con la película esta es comparable a la de una diapositiva en blanco y negro. Se caracterizara por el tamaño de grano del haluro fotosensible y si nos acomodamos a la norma industria ASTM, se clasifica en cuatro categorías.

La relación calidad y tiempo de exposición nos ha hecho decantarnos por la del tipo II en la mayoría de los casos.

La imagen obtenida de un objeto tridimensional es bidimensional, al ser una proyección cónica. Si la radiografía se hace en fragmentos, variando la posición del foco en cada uno de ellos, la proyección de un mismo elemento variara de una placa otra. Para evitar ese efecto es aconsejable hacer la radiografía en una sola toma [Figura 3] y [Figura 4]; este procedimiento exige cubrir completamente la parte de la escultura, pintura etc opuesta al tubo emisor de rayos X, por lo que la película en rollo es la idónea para este trabajo<sup>13</sup>. Por operatividad y por costes en el laboratorio, salvo raras excepciones se utiliza un solo formato de 30 centímetros de ancho.

La forma de proceder es muy sencilla, se cortan tiras de la longitud del objeto y se unen tantas como sea necesaria para cubrir el cubrir su ancho. De esta manera se ha trabajado el retablos sin desmontar de santa María de Trujillo, san Lorenzo de Toro o en la catedral de santo Domingo de la Calzada, etc. o con lienzos de gran formato, Fernando VII de

<sup>13</sup> El ancho puede oscilar entre 10 y 40 centímetros dependiendo del modelo y del fabricante.



Fig. 6 Negatoscopio del IPCE.

Goya de la Real Academia de Bellas Artes de San Fernando, los Zurbaranes de la sacristía de Guadalupe, el Guernica de Picaso del Reina Sofía, etc... [Figura 5]

El revelado de estas placas se lleva a cabo en una procesadora industrial, es importante no interrumpir la labor, hasta haber terminado con todas las placas, con el fin de mantener constante la regeneración de los baños.

Una vez revelada se visualiza en el negatoscopio y el efecto final observado depende de la intensidad de luz que deja pasar cada uno de los puntos de la placa<sup>14</sup>.

Dada la diversidad de tamaños de las obras que pasan por el laboratorio, en el IPCE se tiene varios negatoscopios, uno de los comerciales de 30cmx40cm, dos de formato medio y uno de gran formato [Figura 6]. Si las dimensiones del objeto no permiten su montaje en un de los equipos antes mencionados, se busca un lugar para exponerlas, ya que es muy importante verla montada completa por lo menos una vez, así se hizo con el Guernica o con del retablo de santo Domingo de la Calzada.

Nuestro interés desde que comenzamos a trabajar con estos documentos es que fueran útiles a los restauradores encargados de intervenir en las obra. Por eso una vez montadas, se quedaban expuestas el tiempo necesario para su estudio. Pero cuando los trabajos se superponían o un restaurador quería volver a visualiza, se provocaba una incomoda lista de espera. Este problema se minimizo con la adquisición de un escáner de alta gama. La máquina elegida, se caracteriza por leer densidades hasta 4,7, discriminar píxeles de 50 micrones de tamaño y tener una profundidad 12 bits por píxel.

El escáner facilito considerablemente el trabajo de todos, no solo porque los restauradores ya una vez visto el montaje en el laboratorio, se podían llevar la radiografía digital y tenerla cerca de la obra mientras trabajaban, además de poderla facilitar a otros técnicos del IPCE involucrados en el proceso de conservación.

Recordemos que la imagen que estamos observando es la respuesta de la película a la transmisión de la radiación por parte de cada uno de los componentes del objeto que se manifiesta en forma de niveles de gris. Como se ha adelantado cualquier objeto es susceptible de ser radiografiado y aún a riesgo de parecer reiterativos, volvemos a recordar la importancia del procedimiento para juzgar una radiografía habida cuenta que un tejido, de muy baja absorción radiográfica, puede dar lugar a un documento con iguales valores de gris que una pintura con soporte metálico de absorción media.

Decidir la densidad y el contraste que debe tener un documento radiográfico, sin tener una norma a las que atenernos, hace que sea el radiólogo el que decida cual es el documento mas acertado, es decir es subjetiva; por este motivo existe una gran diferencia entre las radiografías de archivos de distintos centros.

Los objetos artísticos no son como las personas, el radiólogo sabe muy bien como radiografiar un brazo, una pierna, etc., en nuestro mundo es muy distinto, ya que de antemano la orientación que se tiene de lo que se va a encontrar es mínima. La experiencia siempre orienta, pero nunca se sabe con certeza, de ahí que antes de efectuar la radiografía definitiva se haga una prueba en las áreas más significativas y con ella se decida la exposición final.

En los primeros trabajos, nos veíamos obligados a hacer más de una prueba, especialmente con pinturas sobre tabla del XV y XVI, para conseguir lo que entendíamos como un buen documento. Pruebas con muy pequeña diferencias de tensión, incluso de 3 kV, buscando la escala de luminosidades que diera más información del objeto.

Hablando de la escala de luminosidades que muestra una radiografía, debemos pensar en la densidad fotográfica y el contraste como factores que las caracterizan.

La densidad fotográfica<sup>15</sup> o ennegrecimiento de cada punto, se define como el logaritmo decimal del cociente entre la intensidad de la luz incidente sobre la película y la que ella transmite, por lo tanto es una magnitud adimensional y se mide con un densitómetro. Su valor, dependiendo del equipo utilizado, puede oscilar entre "0" área completamente blanca y "4,7"<sup>16</sup> área completamente negra.

Comenzamos nuestros primeros estudios densitométricos con obras de Pedro Berruguete, a la sazón pintor en cuya obra nuestra compañera Maria Yravedra estaba muy interesada, utilizando el densitómetro que tenemos en uso actualmente en el laboratorio, con el que se pueden leer densidades entre 0 y 4. Señalizábamos la misma zona en las radiografías adquiridas con diferentes exposiciones y con los valores obtenidos se elaboraron laborábamos unas tablas, en las que se ponía de manifiesto la importancia de la tensión en el contraste.

El contraste, puede ser global entendido como la diferencia del ennegrecimiento de la película en distintas áreas o puntual si se considera la diferencia entre valores de intensidad luminosa de puntos contiguos. En cualquier radiografía se debe observar un contraste, por pequeño que este sea, ya que en caso contrario todas las parte del objeto radiografiado tendrían la misma

<sup>14</sup> Se define como el logaritmo decimal del cociente entre la intensidad de la luz incidente y de la luz transmitida, por lo tanto es adimensional.

<sup>15</sup> Densidad fotográfica, ya que la imagen la observamos a simple vista, y es la fotometría la encargada de estudiar los efectos que tiene la radiación electromagnética de estimular el sistema visual.

<sup>16</sup> El ojo humano no es capaz discriminar densidades de 4,7.



Fig. 7 Imagen radiográfica de una pintura castellana.



**Fig. 8** Imagen radiográfica de la figura 7 tratada digitalmente. Obsérvese como se ha perdido información en algunas zonas.

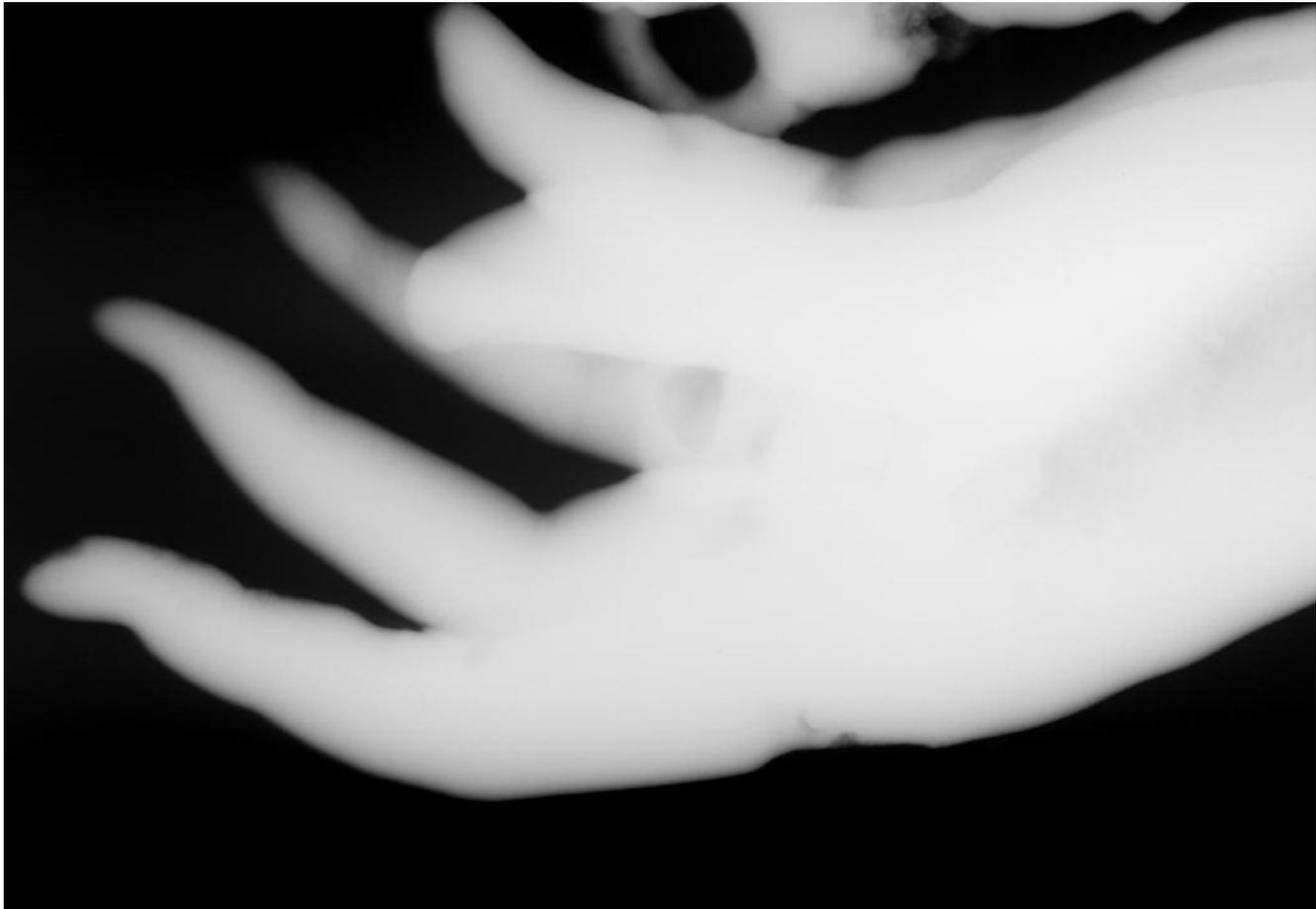


Fig. 9 Imagen radiográfica de la mano de una escultura metálica.

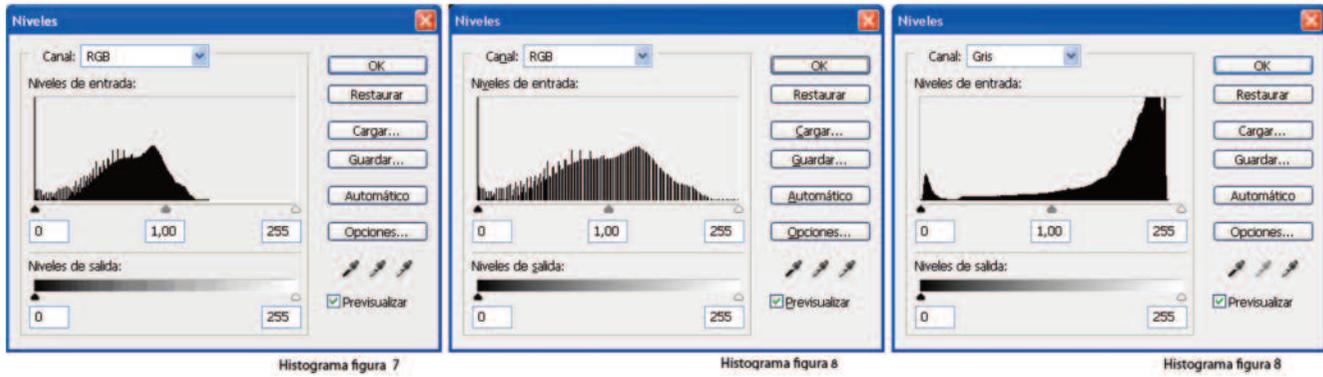


Fig. 10 Histogramas de las figuras 7, 8 y 9 obtenidos con Photoshop.

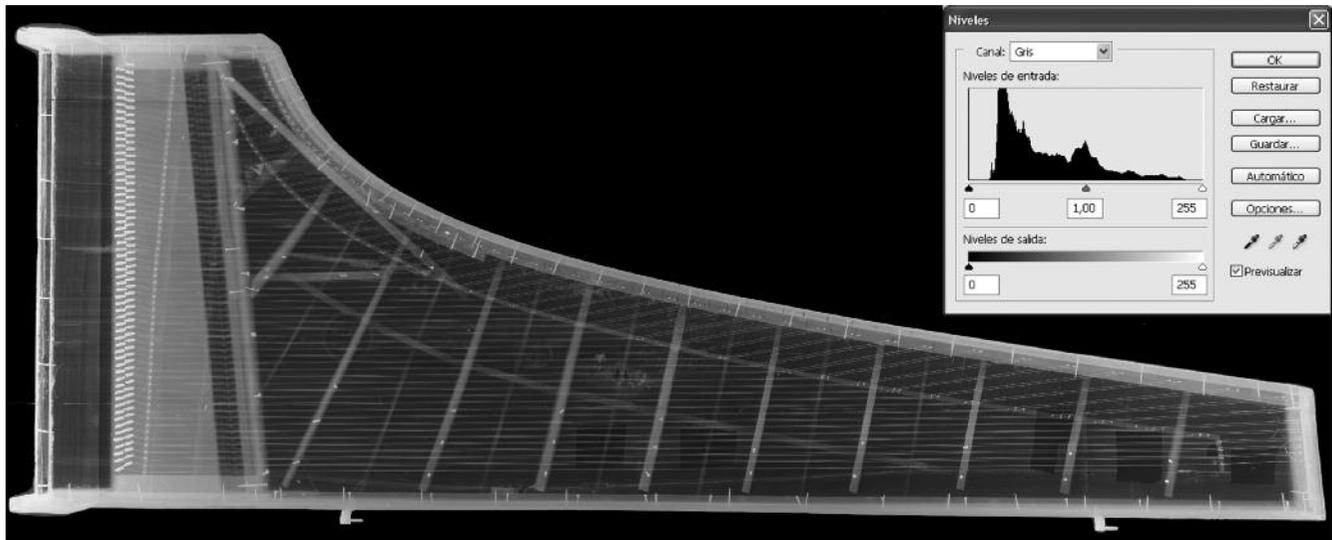


Fig. 11 Imagen radiográfica de clavecín y su correspondiente histograma obtenido con Photoshop.

102

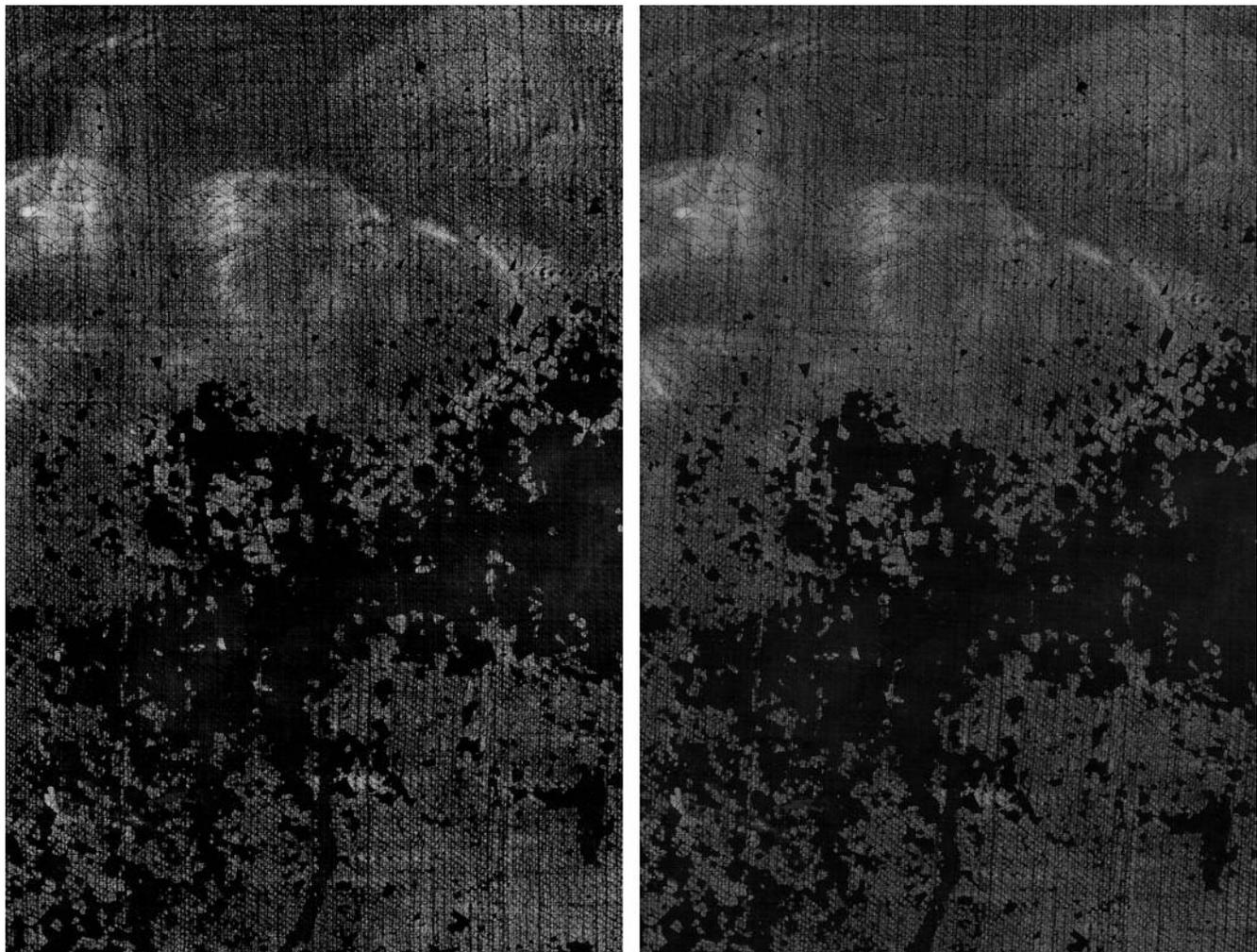
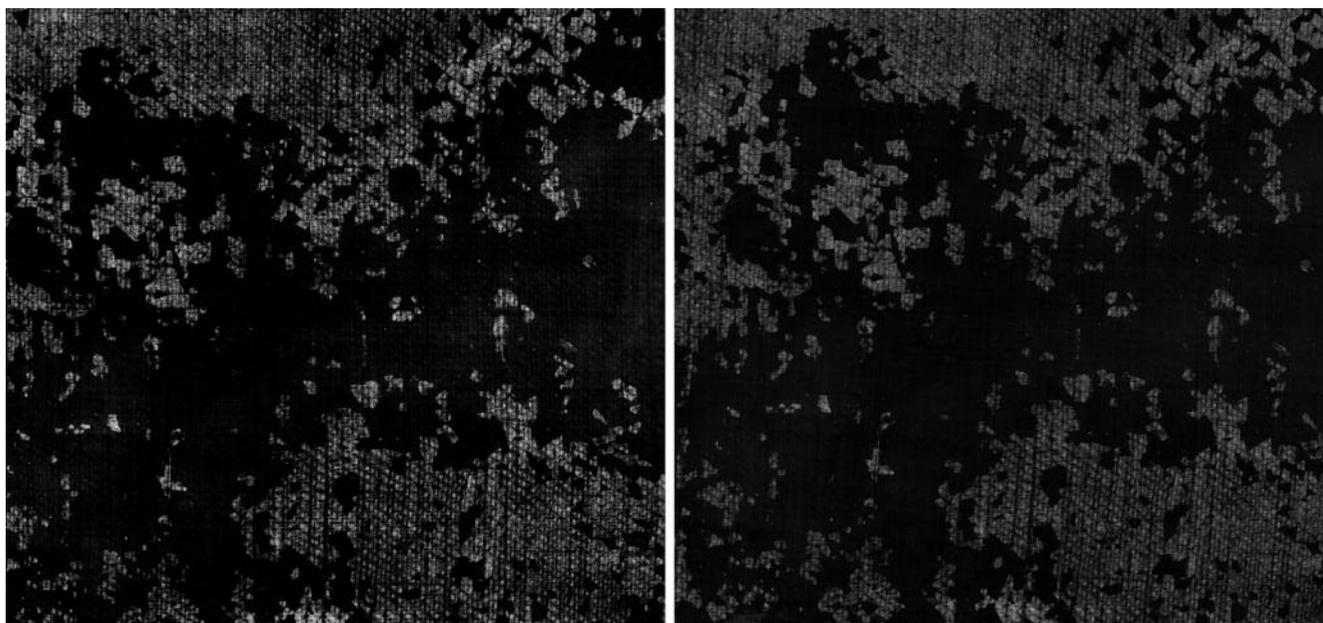


Fig. 12 Imágenes radiográficas de una misma pintura obtenidas con diferentes dosis de radiación, obsérvese el mayor contraste de la de la izquierda.



**Fig. 13** Detalle de las radiografías de la [Figura 12]: con el mismo tratamiento digital, obsérvese como es mayor la información en la de la derecha que es la menos contrastada.



**Fig. 14** Imagen radiográfica de una defensa de marfil en la que se ha hecho un corte transversal.

opacidad cosa muy improbable y no se podrían distinguir sus formas externas ni elementos internos. Un documento muy blanco indica falta de exposición y muy negro sobreexposición.

En el momento actual, gracias al nuevo escáner, se puede tener imágenes digitales de gran calidad, fundamentales para su estudio y difusión. Gracias a ellas se puede profundizar en el estudio radiográfico, especialmente analizando su histograma, que proporciona información objetiva de la escala de luminosidades de la placa, al clasificar sus niveles de gris.

El histograma, habitualmente es una gráfica, en la que en el eje de abcisas están los niveles de gris, situando a la izquierda el blanco y en negro a la derecha, por lo general en una escala de 0 a 255 y en de ordenadas la frecuencia de cada uno de ellos.

El histograma informa sobre el brillo y el contraste de la imagen y ayuda en los tratamientos digitales. Pero con estos procesos hay que ser muy cautos y diferenciar claramente las mejoras subjetivas de las objetivas. Entendemos por subjetivas aquellas que dan lugar a una imagen mas agradable al ojo

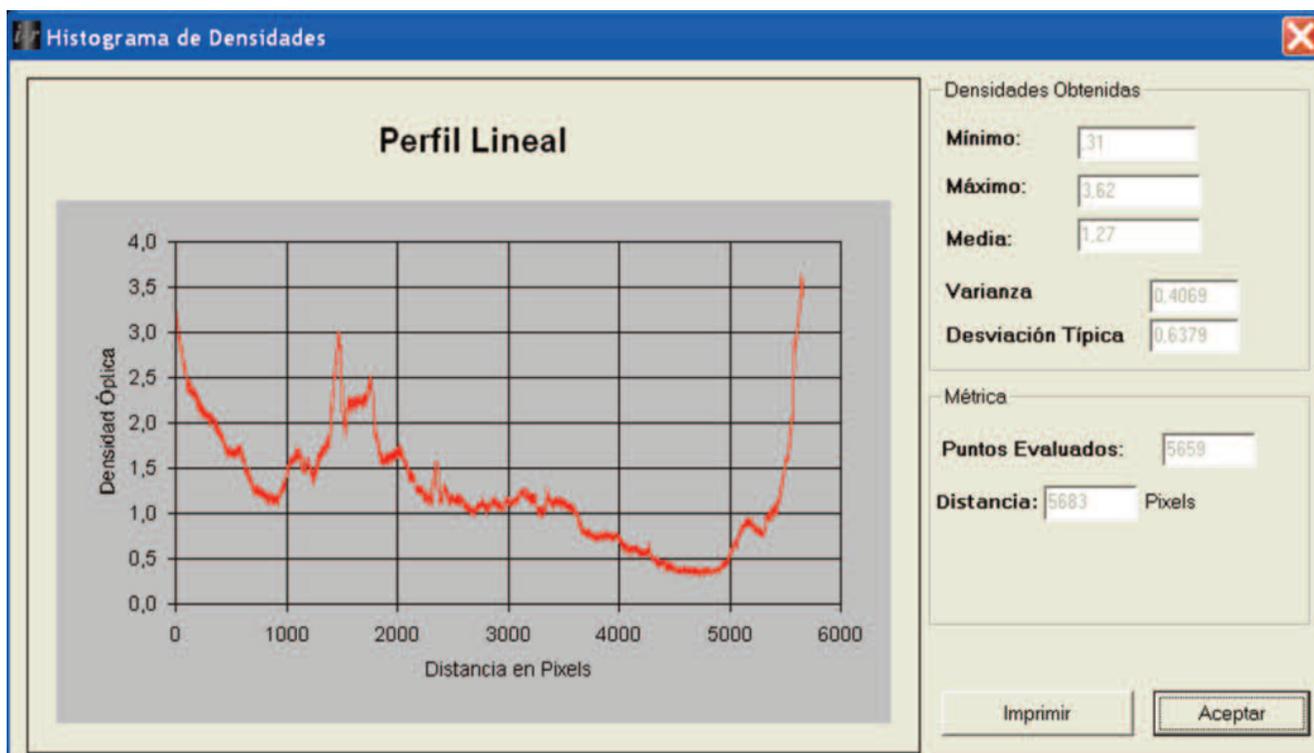


Fig. 15 Histograma de un corte longitudinal en la radiografía del objeto de la figura 14.

104

a riesgo de perder información y por objetivas las que teniendo muy presente el documento original, se le aplica sistemáticamente un tratamiento de imagen procurando no perder ningún dato de los contenidos por esta.

Su forma da idea de cómo es la imagen; un histograma desplazado hacia la izquierda pertenece a una imagen rica en tonos oscuros, pero esto no quiere decir que la radiografía no sea la correcta, sino que no se puede conseguir otro efecto so pena de perder información. La experiencia nos ha permitido observar que es una forma habitual de manifestarse las pinturas castellanas sobre tabla del XV o del XVI.

Por mucho que se expanda el histograma, nunca llegara a conseguir todos los niveles del 0 al 255.

Si el histograma esta desplazado hacia la derecha, en la imagen predominaran los tonos claros. A diferencia del caso anterior se presenta uno en el que la radiografía no es la más deseable ya que se necesitaría haber radiado a una tensión superior ya que algunas zonas del objeto no han sido penetradas suficientemente, con lo que aparecen blancas sin contenido de información [Figura 7], [Figura 8], [Figura 9], [Figura 10].

En lo que respecta al contraste, este vendrá dado por la forma de agruparse los niveles, las muy contrastadas tendrán la mayoría de estos distribuidos en los extremos, mientras que en las poco contratadas se agolparan en el centro.

A la vista de esto puede ocurrir que una imagen muy contrastada no sea la ideal, aunque a priori pueda resultar atractiva.

Cuando los materiales constitutivos del objeto son muy diferentes, tomar la decisión de cómo hacer la radiografía que represente a todos no siempre es fácil. La estrategia a seguir puede ser comenzar intentando hacer una que informe del conjunto y si no se consigue hacer varias bajo distintas condiciones. Un caso de los más significativos fue un clavecín del Museo Arqueológico Nacional. Esta pieza estaba construida con piezas de madera de distintos espesores, además de otros materiales habituales en este tipo de instrumentos. Se opto por hacer una única radiografía a una tensión elevada durante un periodo corto de tiempo [Figura 11].

En cuanto a pinturas de caballete, nuestra experiencia nos dicta que no se debe extremar el contraste, ya que aunque la imagen sea más agradable se puede perder información. [Figura 12] [Figura 13].

Hasta ahora se mostrado los histogramas de varias imágenes obtenidos con un programa fotográfico muy utilizado como es Photoshop, muy usado el procesado de imágenes. En ocasiones se necesitan otro tipo de funciones densitométrías para lo que se necesita otro tipo de programas, que por desgracia ya no están al alcance de cualquier usuario como es el IRAD que permite efectuar densitometrías

Un caso en el que se utilizo fue para el estudio radiográfico de unas defensas óseas, en las que se precisaba detectar posibles

alteraciones internas.[Figura 14]. Los distintos niveles de gris que presentaban las imágenes radiográficas fueron analizados mediante perfiles lineales correspondientes a cortes longitudinales y transversales que ayudaron a comprender la distribución de densidades compatibles con zonas de pérdida de materia ósea.

Era muy importante, en la medida de lo posible, informar sobre las líneas de fractura, lo que se pudo hacer con una de las piezas al analizar un corte transversal. Estas se correspondían con máximos del histograma [Figura 15]. Entendemos que el futuro pasara porque estos programas estén al alcance de la mayoría de usuarios.

En la exposición verbal también se han expuesto los trabajos que hemos realizados en grandes formatos, pero dado que recientemente ha sido publicado un trabajo acerca de esta aplicación hemos desestimado hacerlo en estas líneas<sup>17</sup>.

## Agradecimientos

A Alejandro Almazán, Ángeles Anaya y Miriam Bueso, Rocío Bruquetas Javier Laguna; José Manuel Lodeiro, Carmen Vega y a todos componentes del departamento de informática del IPCE.

## Bibliografía

ANTELO, T et GABALDÓN, A “Estudio radiográfico” en Zurbarán. Estudio y Conservación de los monjes de la Cartuja de Jerez, Madrid, 1988.

GABALDÓN, A “Estudio radiográfico” en El retablo de San Eutropio del Espinar, Madrid,1992.

ANTELO, T et GABALDÓN, A “Estudio radiográfico” en Nuestra Señora de África, proceso de restauración, Madrid, 1992.

ANTELO, T; GABALDÓN, A et YRAVEDRA, M “Comentarios a la imagen radiográfica del Crucificado de la Buena Muerte de la catedral de Madrid” en Madrid en el contexto de lo hispánico desde la época de los descubrimientos, Madrid,1994.

ANTELO, T et GABALDÓN, A “Sistemas de representación de filigranas utilizados en los laboratorios del

ICRBC” en Historia del papel en España y sus filigranas (I Congreso Nacional), Investigación y técnica del papel nº 124, 1995.

ANTELO, T; GABALDÓN, A et alii El tercer bronce botorrita, Gobierno de Aragón, 1996.

ANTELO, T; GABALDÓN, A et YRAVEDRA, M “Estudio radiográfico” en V.V.A.A Goya en la Fundación Lázaro Galdiano, Madrid, 1999.

GABALDÓN, A “Técnicas de análisis físico: radiografía y reflectografía de infrarrojos. Aplicaciones al estudio de los bienes culturales” en Ciencia, pensamiento y cultura, Madrid, 1999.

ANTELO, T; BRUQUETAS, R et GABALDÓN, A “Dibujo subyacente de la pintura del retablo” en El retablo mayor de la Catedral de Tudela: historia y conservación, Pamplona, 2001.

ANTELO, T; GABALDÓN, A et VEGA, C “Documentación reflectográfica de la obra de Pedro de Berruguete”, Actas del Simposium Internacional Pedro Berruguete y su entorno, Palencia, 2003.

ANTELO, T et GABALDÓN, A. “A propósito del dibujo” en Retablo de Carbonero el Mayor: Restauración e Investigación. Madrid, 2003.

ANTELO, T, GABALDÓN, A et alii “Estudio radiográfico de una escultura de aleación de base cobre que representa al Doríforo de Policeto”, X Congreso binacional de END, Cartagena, 2003.

ANTELO, T et GABALDÓN, A “La radiografía de la Piedad del Museo Thyssen Bornemiza y el Entierro de Cristo del Museo de Bellas Artes de Asturias. Análisis comparativo” en Ribera. La Piedad, Madrid, 2003.

ANTELO, T; GABALDÓN, A et VEGA, C "Proyecto VARIM (Visión Artificial aplicada a la Reflectografía de Infrarrojos) y sus aplicaciones", Tecnología y Qalidade nº 50, Oporto, 2005.

GABALDÓN, A “Estudio de obras con reflectógrafo IR” Curso teórico-práctico de tasación, peritaje y expertización de obras de arte. Universidad de León. Noviembre 2005.

ANTELO, T; GABALDÓN, A et VEGA, C “Técnica radiográfica aplicada al estudio de la pintura contemporánea”, VI Reunión del Grupo de Arte Contemporáneo del GEIIC, Madrid, 2005.

<sup>17</sup> ANTELO, T et GABALDÓN, C “Radiografía de gran formato” en Revista del Patrimonio Cultural de España, número 0, Madrid ministerio de Cultura, 2009.

ANTELO, T.; GABALDÓN, A. et VEGA, C. “El procedimiento radiográfico como técnica de estudio de los metales históricos”, 2º Congreso latino-americano de restauração de metais, MAST, Rio de Janeiro, 2005.

LÓPEZ, V.; OTERO, E.; MARTÍN COSTEA, A. et GABALDÓN, A. “Estudio metalúrgico de un casco griego”, 2º Congreso latino-americano de restauração de metais, MAST, Rio de Janeiro, 2005.

ANTELO, T.; GABALDÓN, A.; MARTÍN COSTEA, A. et VEGA, C. “Aspectos constructivos de algunos torques españoles determinados mediante análisis radiográfico” en Minería y metalurgia históricas en el sudoeste europeo, Madrid, 2005.

MARTÍN COSTEA, A.; LÓPEZ SERRANO, V. et GABALDÓN GARCÍA, A. “Sobre el origen y difusión de la siderurgia protohistórica en el Levante español: el conjunto minero-metalúrgico del término municipal de Seno (Bajo Aragón), Revista de metalurgia (CENIM-CSIC), volumen extraordinario, 2005.

ANTELO, T.; GABALDÓN, A. et VEGA, C. “La información obtenida por métodos radiográficos en el estudio de metales”, texto del curso cobre Patrimonio metálico, tecnología y conservación. Universidad de Alcalá de Henares. 2006.

106 ANTELO, T.; DEL EGIDO, M.; GABALDÓN, A.; VEGA, C. et TORRES, J. “El proyecto VARIM: Visión Artificial aplicada a la Reflectografía de Infrarrojos Mecanizada”, Innovación tecnológica en conservación y restauración del Patrimonio. Tecnología y Conservación del Patrimonio Arqueológico I, 2006.

GABALDÓN, A.; LÓPEZ, V.; MARTÍN-COSTEA, A. et OTERO, E. “Caracterización metalúrgica de tres piezas arqueológicas de materiales base cobre procedentes del Bajo Aragón” en Revista Metalurgia 42 (4), 2006.

GABALDÓN, A. “Líneas de investigación en el Departamento de Estudios Físicos del IPHE en 2006” en Arbor. Ciencia, pensamiento, cultura, vol CLXXXII, nº 717, Madrid, 2007.

ANTELO, T. et GABALDÓN, A. “Estudio radiográfico de la pieza” en OLCINA, M. (ed.) El báculo y la espada. Sobre un fragmento de escultura monumental romana de bronce de Lucentum, Alicante, 2007.

CHAMÓN, J.; BARRIO, J.; ARROYO, M.; PARDO, A.I.; ÁVILA A.L.; GABALDÓN, A.; ANTELO, T. et BUESO, M. “Inspección radiográfica de objetos dorados medievales de procedencia arqueológica”, Boletín de la Asociación Española de Ensayos no Destructivos (AEND) núm. 42, Madrid, 2007.

ANTELO, T.; GABALDÓN, A. et VEGA, C. “Sumas o Restas: incógnitas en torno al retablo de Arcenillas”, Sumas y restas de las tablas de Arcenillas. Fernando Gallego y el antiguo retablo de la Catedral de Zamora, Zamora, 2007.

GABALDÓN, A.; ANTELO, T.; VEGA, C. et BUESO, M. “Un espacio para lo invisible”, Ciencia y arte, Madrid, 2008.

TORRES, J.; POSSE, A.; MENÉNDEZ, J.M.; GABALDÓN, A.; VEGA, C.; ANTELO, T.; DEL EGIDO, M. et BUESO, M. “VARIM: A Useful System for Acquiring and Composing Images in Paintings Analysis Techniques”, (ISSN: 1646-9283), e\_conservation. The online magazine, núm. 4, April, 2008, pp. 27-42.

ANTELO, T.; GABALDÓN, A. et VEGA, C. “Fernando Gallego en Trujillo: estudios físicos” en Bienes Culturales, nº 8, Madrid, Ministerio de Cultura. 2008, pp. 61-74.

ANTELO, T.; GABALDÓN, A. et VEGA, C. “El retablo de Santa María La Mayor de Trujillo: dibujo subyacente” en Bienes Culturales, nº 8, Madrid, Ministerio de Cultura. 2008, pp. 75-88.

ANTELO, T. “Imágenes de los frescos restaurados” en PITA, J. M. San Antonio de la Florida y Goya. La restauración de los frescos, Madrid, 2008.

BRUQUETAS, R.; GABALDÓN, A.; ANTELO, T.; VEGA, C.; GÓMEZ, M.; MARTÍN DE HIJAS, C.; DEL EGIDO, M.; JUANES, D. et BUESO, M. “Estudio técnico de la pintura de Francisco de Goya Fernando VII a caballo” en Bienes Culturales, nº 8, Madrid, Ministerio de Cultura. 2008, pp. 117-132.

GABALDÓN, A.; ANTELO, T.; VEGA, C. et BUESO, M. “Un espacio para lo invisible”, La Ciencia y el Arte, Madrid. 2008. pp 25-37.

GONZÁLEZ-FANJUL, C.; ALBA, T. et GABALDÓN, A. “Bodegones atribuidos a Blas de Ledesma” en Bienes Culturales, nº 8, Madrid, Ministerio de Cultura. 2008, pp. 99-116.

TORRES, J.; POSSE, A.; MENÉNDEZ, J.M.; GABALDÓN, A.; VEGA, C.; ANTELO, T.; DEL EGIDO, M. et BUESO, M. “VARIM: A Useful System for Acquiring and Composing Images in Paintings Analysis Techniques”, (ISSN: 1646-9283), e\_conservation. The online magazine, núm. 4, April, 2008, pp. 27-42.

CHAMÓN, J.; BARRIO, J.; ANTELO, T.; GABALDÓN, A.; BUESO, M.; ÁVILA, A.L. y VEGA, C. "Inspección radiográfica de los objetos dorados medievales", BARRIO, J. y CHAMÓN, J (ed.). Proyecto Dorados: tecnología, conservación y restauración de los metales dorados medievales, Madrid, 2008.

ANTELO, T. et GABALDÓN, A. "Radiografía de gran formato", Patrimonio Cultural de España, núm. 0, Madrid, 2009.

ANTELO, T. et GABALDÓN, A. "Técnicas de imagen infrarroja digital aplicadas al estudio de los Bienes Culturales. Proyecto VARIM. Un caso particular: El retablo Mayor de la Iglesia de Santa María la Mayor de Trujillo (Cáceres)" en Innovaciones en las Tecnologías de la Información Aplicadas a la Conservación del Patrimonio, Cáceres, 2009.

TORRES, J.; POSSE, A.; MENÉNDEZ, J.M.; GABALDÓN, A.; VEGA, C.; ANTELO, T.; DEL EGIDO, M. et BUESO, M. "VARIM: A Computer Vision System for the Automatic Creation of High Resolution Reflectographic Mosaics", en el Congreso ELMAR.

GABALDÓN, A. et ANTELO, T. "Adenda: estudio radiográfico del San Francisco de Asís de la Catedral de Toledo", The Sacred Made Real. Spanish Painting and Sculpture 1600 – 1700, catálogo de la exposición, National Gallery, Londres, 2009-2010.

GABALDÓN, A.; ANTELO, T. et VEGA, C. "Fondos radiográficos de pinturas de Zurbarán en el IPCE" en Zurbarán. La obra completa, 2009.

ALBA, T.; GABALDÓN, A.; ANTELO, T. et DALMAU, C. "Aplicación de la radiografía al estudio del retablo de Santoyo, atribuido a la Escuela de Juan de Flandes" en Informes y trabajos núm. 4, Madrid, 2010.

ANTELO, T. y GABALDÓN, A. "Informe de estudios físicos", El relicario de Santa Lucía. Restauración, análisis y estudio histórico-artístico, 2010, Madrid (publicación electrónica).

ANTELO, T.; GABALDÓN, A. et VEGA, C. "Técnicas de imagen aplicadas al estudio de pinturas sobre tabla" en La pintura europea sobre tabla en los siglos XV, XVI y XVII: estudios técnicos, Madrid, 2010.

GABALDÓN, A. y ANTELO, T. "Examen radiográfico" en La Custodia-Relicario de los Sagrados Corporales de Daroca: proyecto de conservación y restauración, Zaragoza, 2010.

GABALDÓN, A.; ANTELO, T. et VEGA, C. "Estudio radiográfico del soporte de obras de dos autores castellanos del siglo XV: Pedro Berruguete y Fernando Gallego" en La pintura europea sobre tabla en los siglos XV, XVI y XVII: estudios técnicos, Madrid, 2010.

MARTÍN, A.; ANTELO, T.; BUESO, M. et GABALDÓN, A. "Estudio radiográfico de un conjunto de cabezas antropomorfas procedentes del complejo de Wunmonije, en Ifé (Nigeria)" en Informes y trabajos núm. 4, Madrid, 2010.

#### En prensa

GABALDÓN, A.; ANTELO, T.; MARTÍN, A. et BUESO, M. "La radiografía aplicada a los materiales arqueológicos" Actas del Curso de verano de la Universidad de Cantabria Arqueología y conservación preventiva: del yacimiento al museo. En prensa.

ANTELO, T.; BUESO, M.; GABALDÓN, A. y MARTÍN, A. La técnica radiográfica en los metales históricos. En prensa.

# La documentación patrimonial mediante sensores de imagen o de barrido láser

**José Luis Lerma**

Grupo de Investigación en Fotogrametría y Láser Escáner (GIFLE). Universidad Politécnica de Valencia.  
gifle@upv.es.

**Miriam Cabrelles**

Grupo de Investigación en Fotogrametría y Láser Escáner (GIFLE). Universidad Politécnica de Valencia.  
gifle@upv.es.

**Santiago Navarro**

Grupo de Investigación en Fotogrametría y Láser Escáner (GIFLE). Universidad Politécnica de Valencia.  
gifle@upv.es.

**Ana Elena Seguí**

Grupo de Investigación en Fotogrametría y Láser Escáner (GIFLE). Universidad Politécnica de Valencia.  
gifle@upv.es.

108

## Curriculum

José Luis Lerma García, ingeniero técnico topógrafo, doctor ingeniero en Geodesia y Cartografía, es profesor titular de Universidad de la Universidad Politécnica de Valencia. Miembro del comité ejecutivo CIPA (Comité ICOMOS/ISPRS para la documentación del patrimonio cultural). Autor de varios libros de fotogrametría y escaneado láser, ha publicado de manera extensiva en foros y revistas científicas relacionadas con la documentación arquitectónica y arqueológica, me gustaría destacar “Fotogrametría Moderna, analítica y digital”. Consultor internacional. Trabaja en la modelización automatizada del Patrimonio.

## Resumen

La documentación patrimonial puede realizarse de muy distintas maneras, si bien las cartas de conservación y restauración internacionales recomiendan que se realice de manera precisa y rigurosa. Este artículo repasa las técnicas de documentación

arquitectónico-arqueológica basadas en sensores de imagen y de barrido láser utilizando metodologías fotogramétricas. Se analizarán las distintas posibilidades que brindan los sensores de imagen a partir de una, un par o múltiples fotografías, los escáneres láser terrestres de media distancia o la combinación e integración de múltiples datos, dependiendo de la finalidad del trabajo, de los medios disponibles y de los recursos económicos.

## Abstract

The documentation of cultural heritage can be carried out following different approaches. However, international charts for the conservation and restoration recommend rigorous and precise documentation. This paper reports architectural and archaeological documentation photogrammetric techniques based on images and laser scanning. Different approaches will be analysed based on one, a pair or multiples images, midrange terrestrial laser scanners or the combination and integration of multiple data, depending on the aim of the work, available means and the financial resources.

## Introducción

La documentación del patrimonio cultural presenta diferentes vertientes, histórica, arquitectónica, arqueológica, métrica, estructural, química, etc. De hecho, la conservación y restauración de monumentos debe recurrir a todas las ciencias y técnicas que pueden contribuir al estudio y salvaguarda del patrimonio (The Venice Charter, 1964: 1).

La documentación gráfica del patrimonio puede abordarse de manera expedita mediante croquis o fotografías en combinación de cinta métrica, calibre o distanciómetro láser, o de manera rigurosa mediante técnicas topográficas y fotogramétricas. Si nos centramos en la componente métrico-topográfica como base y soporte científico de multitud de los estudios analíticos anteriores, presentes o posteriores al proceso de conservación y/o restauración, comprobaremos que en trabajos extensos y rigurosos, predominan los procesos fotogramétricos realizados a partir de imágenes fotográficas, y ya en la última década, mediante barreadores (escáneres) láser. Ello no implica que sólo y exclusivamente se deban realizar las labores de documentación topográfica mediante estas alternativas indirectas, sino que lo normal es que se combinen con procesos de medición directa a partir de cinta métrica, estación total o sistemas de posicionamiento global por satélite (GNSS). La decisión final dependerá de la complejidad y del tamaño del objeto, monumento o sitio (English Heritage, 2007: 3), y de otros aspectos como los requerimientos de coste, el plazo de entrega y el tipo de producto final (Patias, 2006: 4).

La documentación gráfica del patrimonio no es un fin en sí mismo, sino que sirve como medio de transmisión de la información a investigadores, expertos o público en general, que estando interesados en el objeto no pueden investigarlo por sí mismos (Böhler, 2006: 89). Las razones que justifican la transferencia de la información serían las siguientes:

- El objeto, monumento o sitio no es accesible.
- El objeto, monumento o sitio es demasiado grande o complicado para ser examinado de manera global y exhaustiva.
- Reducido horario de visita.
- Lejanía.
- Peligro de deterioro gradual debido a factores ambientales, polución, etc., y sobre todo, deterioro repentino debido a efectos humanos no controlados (actos vandálicos) o desastres naturales.
- Toma acertada de decisiones.
- Archivo y registro de los datos, reflejo del estado de conservación en el momento del levantamiento.

La documentación patrimonial a partir de imágenes fotográficas se remonta a los orígenes de la fotografía a mediados del siglo XVIII. Louis Dégarré anunció el revelado fotográ-

fico en 1839 (Wolf y Dewitt, 2000: 2-3). En 1858, C. Laussedat realizó su primer mapa a partir de fotos aéreas y terrestres. En 1858, A. Meydenbauer tuvo la idea de utilizar fotografías estereoscópicas para documentar edificios (Albertz, 2001: 21-25). Estuvo convencido de que había que documentar los elementos patrimoniales más relevantes de manera que pudieran ser reconstruidos en caso de destrucción. De hecho, su archivo de más de 20.000 placas negativas de vidrio se utilizó para reconstruir edificios en Prusia y otros lugares después de la 2ª Guerra Mundial. En 1893, Meydenbauer anuncia por primera vez la palabra fotogrametría (Lerma, 2002: 33). Posteriormente, vendrían las etapas de la fotogrametría analógica, analítica y digital en sus múltiples versiones: fotogrametría de objeto cercano, fotogrametría terrestre, fotogrametría aérea y fotogrametría satélite.

A partir de la etapa digital a principios de 1990 es cuando comienza paulatinamente a utilizarse la fotogrametría digital en las labores de documentación patrimonial, primero a partir de escaneado de película fotográfica y luego a partir de imagen digital. A finales del siglo XX, la automatización en los procesos de producción fotogramétrica comienza a ser una realidad gracias al avance científico en otros campos como la electrónica, la fotónica, el reconocimiento de patrones y la visión por computador.

La fotogrametría a partir de imágenes, inicialmente fotografías analógicas (que en su formato métrico se denominaban fotogramas), ahora sobre todo imágenes digitales a color o multispectrales, siempre se ha considerado una técnica de medición precisa, detallada, que proporciona datos tanto en 2D como en 3D de manera efectiva. Las ventajas que reporta las imágenes digitales en el proceso fotogramétrico son:

- Gran cantidad de información, independientemente de la escala, a resolución variable y configurable.
- Extracción de información métrica, muy precisa, sobre todo si los sensores de captura de imagen están bien calibrados.
- Datos en 2D o en 3D, en función de la información existente y del número de imágenes.
- Datos de textura extraídos a partir de las propias imágenes.
- Capacidades de visualización estereoscópica.
- Versatilidad de uso a partir de instrumental relativamente económico, sobre todo en el momento presente.

El poder trabajar con imágenes digitales rectificadas de objetos planos a partir de programas convencionales, o de superficies con relieve no continuas a partir de procesos de ortorrectificación con programas fotogramétricos, abrió las puertas al uso masivo de la fotogrametría digital en labores de documentación patrimonial. Las mayores desventajas de la fotogrametría desaparecieron, según el Prof. Patias (2006),

a raíz de: 1.- uso masivo de instrumental digital; 2.- uso de cámaras digitales convencionales de menor coste y mayor resolución; 3.- programas de fácil manejo y bajo coste aparecidos durante la última década; por último, y no por ello menos importante, 4.- consideración de estreñimientos geométricos que relajan las necesidades y requerimiento de apoyo topográfico.

A principios del siglo XXI el escaneado láser 3D revolucionó la captura automatizada de grandes nubes de puntos, permitiendo su adquisición de manera sistemática, a altas frecuencias (inicialmente cientos o miles de puntos por segundo), en tiempo casi real y junto con valores de intensidad o color asociados (Böhler, 2006: 90-91). El usuario accede directamente a las coordenadas XYZ proporcionadas por el escáner en lugar de a los datos crudos. Además, permite la medición en 3D de superficies complejas en cortos períodos de tiempo. Vale la pena reseñar que a pesar de la alta densidad espacial de puntos que proporciona, las entidades características, tanto lineales (bordes) como puntuales, no se miden directamente sino que deben modelarse a partir de la nube de puntos original.

Los escáneres láser son sensores activos, y pueden operar en entornos diversos que oscilan entre los pocos metros hasta kilómetros utilizando los principios de medición basados en el tiempo (Lerma et alii, 2008: 25-30), bien sea mediante pulsos (tiempo de vuelo) o mediante diferencia de fase. Los escáneres basados en el principio de triangulación están concebidos para operar a distancias mucho mejores, la mayoría a distancias inferiores al metro, con resoluciones y precisiones máximas. Una revisión exhaustiva de estos últimos puede consultarse en Blais (2004).

Los datos métricos pueden utilizarse en todas las etapas del ciclo de conservación, no solo en estudios preliminares en tareas de planificación y evolución, sino también en labores de diagnóstico, tratamiento y monitorización (Santana, Blake y Eppich, 2007: 239-253). Esta última tarea requiere fundamentalmente datos métricos y medidas repetidas en el tiempo que permitan prevenir o alertar de variaciones repentinas.

Este artículo revisa las técnicas fotogramétricas más utilizadas en la documentación patrimonial a día de hoy, desde las más simples, utilizadas para el caso de levantamientos o alzados de objetos planos en general (como es el caso de paramentos, techos y suelos), hasta las más rigurosas, que están optimizadas para modelizar el patrimonio en 3D (como por ejemplo: pórticos de iglesias, catedrales, torres o yacimientos arqueológicos). Se comenzará revisando la documentación patrimonial a partir de imagen digital, para pasar posteriormente al escaneado láser 3D y su integración mediante soluciones fotogramétricas para alcanzar modelados fotorrealísticos 3D de máxima calidad.

## Rectificación fotográfica

Se entiende por rectificación fotográfica el proceso que corrige los efectos de perspectiva de una imagen fotográfica. Por tanto, las posibilidades de aplicación de este tipo de productos son ilimitadas en el campo de la documentación, si consideramos que un buen número de elementos arquitectónicos son planos, o pueden descomponerse en planos, por ejemplo en fachadas, paredes, suelos, etc. Además, no requieren equipamiento especial: puede utilizarse cualquier cámara que esté exenta (o corregida) de distorsión óptica del objetivo. Dicha corrección se puede realizar de manera rigurosa a partir de métodos de calibración de cámaras mediante procedimientos multi-imagen (Lerma, 2002: 273-278) o también mediante una sola imagen a partir de líneas rectas o de plomada (Lerma, 2002: 278-280, Lerma y Cabrelles, 2007).

El proceso de rectificación de imágenes digitales se puede abordar de diferentes maneras. De hecho, existen varias alternativas métricas perfectamente útiles en las labores de documentación patrimonial (Almagro, 2008: 62, Lerma y Elwazani, 2006: 330-340; Elwazani y Lerma, 2007a: 47-50; Elwazani y Lerma, 2007b; Lerma, 2010): a) rigurosa a partir de un mínimo de 4 puntos de apoyo por imagen; b) rigurosa con mínima información métrica considerando puntos de fuga; c) de manera visual editando la imagen en programas usuales de tratamiento digital, acompañando el proceso de rectificación con el ajuste de escala en ambos ejes.

La Figura 1 muestra el resultado del proceso de rectificación de una sola imagen, recortada a la zona de interés: los mosaicos de cerámica valenciana. Compruébese cómo se corrigen las fugas existentes en la imagen de entrada tras el proceso de rectificación.

Suele ser usual que el proceso de rectificación requiera múltiples imágenes. Esta situación es bastante común y ocurre cuando: a) el monumento u objeto a representar no abarque el formato completo de la fotografía; b) la composición abarque diferentes objetos; c) el nivel de detalle no sea el apropiado a la escala, resolución o precisión requerida; d) aparecen elementos situados en frente del objeto o monumento. La solución pasa por realizar mosaicos de imágenes previamente rectificadas. Puede consultarse más información sobre rectificación fotográfica y formación de mosaicos, particularizados para escenarios exteriores con un solo edificio en (Lerma y Elwazani, 2006: 330-340), trozos de murallas (Almagro, 2008: 62), calles enteras en cascos urbanos (Elwazani y Lerma, 2007a: 47-50; Elwazani y Lerma, 2007b), o para reconstrucciones 3D de interiores de salas interiores como la expuesta en la Figura 1 (Lerma, 2010).

Las rectificaciones o mosaicos obtenidos están listos para ser integrados en eventuales bases de datos, sistemas de infor-



**Fig. 1** Sala de la Estación del Norte de Valencia (Feb. 2004). a) Fotografía utilizada en la rectificación; b) Detalle principal corregido de distorsiones. Fotografía: José Luis Lerma García.

mación arquitectónica/arqueológica o en sistemas de dibujo (CAD). Además, son imágenes con carácter métrico: se puede delinear o restituir en formato vectorial sobre la propia imagen. De esta manera, también pueden obtenerse planimetrías o alzados de precisión a partir de mediciones monoscópicas.

La rectificación fotográfica es un proceso rápido y económico. Sin embargo, solo es adecuado en monumentos u objetos que presentan superficies planas. Por tanto, no sería un producto apropiado a la hora de realizar representaciones de superficies o paramentos con fuerte orografía, discontinuidades y diversos niveles de profundidad. En dichos casos, se recomienda cualquiera de las alternativas siguientes: soluciones fotogramétricas a partir de pares de imágenes, múltiples imágenes (procedimiento automatizado), láser escáner o integración de imagen y láser.

## Fotogrametría a partir de pares de imágenes

La fotogrametría clásica fundamentalmente se basa en el principio de la visión estereoscópica, por medio del cual, el operador fotogramétrico restituye (delinea en 3D) pares de imágenes con recubrimiento (solape) previamente orientadas. Lo usual es trabajar con pares de imágenes capturadas con cámaras calibradas. Los productos finales son representaciones gráficas 3D que finalmente se representan por medio de dibujos de plantas, alzados, plantas y secciones, en formato vectorial.

La orientación de los pares estereoscópicos se puede realizar a partir de puntos de apoyo topográficos sobre el modelo, o bien a partir de simples referencias observadas en el propio objeto, como pueden ser la asignación de planos verticales y horizontales, medición de distancias, etc. (Almagro, 2008: 58-62). Esta segunda alternativa brinda menores precisiones que la opción rigurosa por medio de puntos de apoyo debido a la peor distribución geométrica de las referencias.

La fotogrametría clásica de pares de imágenes, basada en la medición manual y el dibujo artístico, exige una labor de interpretación, análisis y síntesis de lo que finalmente se representa. La desventaja del método radica en el coste temporal de la medición manual, la dificultad técnica encontrada por el personal no experto y fundamentalmente en la subjetividad del operador de restitución a la hora de representar el dibujo.

Existen escuelas que defienden la solución de la fotogrametría arquitectónica en su vertiente clásica frente a la incorporación imparable de las últimas tecnologías de escaneado láser (Almagro y Almagro-Vidal, 2007: 52-57). Entre otras desventajas se apuntan dos aspectos: por un lado, la forma tradicional de interpretar y asimilar la información a partir de planos; por otro, la asignación de las labores de interpretación al usuario final, generalmente conservador, arquitecto, etc.

La incorporación y aceptación de productos derivados a partir de procedimientos automatizados que generan nubes de puntos en 3D, bien sea a partir de procedimientos basados en imágenes o en escaneado láser, pasa por un cambio de mentalidad en el planteamiento de los modos de representación, y la existencia universal de herramientas informáticas sencillas que con ordenadores estándar permitan extraer la información esencial del levantamiento a partir de datos capturados automáticamente.

## Fotogrametría a partir de múltiples imágenes

Sin lugar a dudas, la solución fotogramétrica más precisa, potente y robusta pasa por el ajuste en bloque de múltiples imágenes, ya que puede adaptarse a cualquier tipo de cámara (métrica, semimétrica y convencional), indistintamente del formato. No existen restricciones en cuanto a la geometría del objeto, monumento o sitio. Además, si la cámara no está calibrada, la calibración de la misma puede realizarse simultáneamente al proceso de orientación externa de las imágenes (Lerma, 2002: 277-278).

Una vez orientadas espacialmente las imágenes, la generación de modelos digitales de superficie es posible aplicando técnicas automáticas de detección de entidades homólogas (Cabrelles et alii, 2010). Tras un proceso de filtrado y eliminación de puntos erróneos, es posible generar un modelo digital adaptado a la nube de puntos, así como texturizar a alta resolución el modelo a partir del contenido de información de color existente en las imágenes originales. De esta manera se obtienen modelos fotorrealísticos 3D de máxima calidad. La descripción del procedimiento fotogramétrico seguido se encuentra publicado en (Lerma et alii, 2010: 499-507). Un ejemplo de aplicación de esta metodología aparece reflejado en la Figura 2.

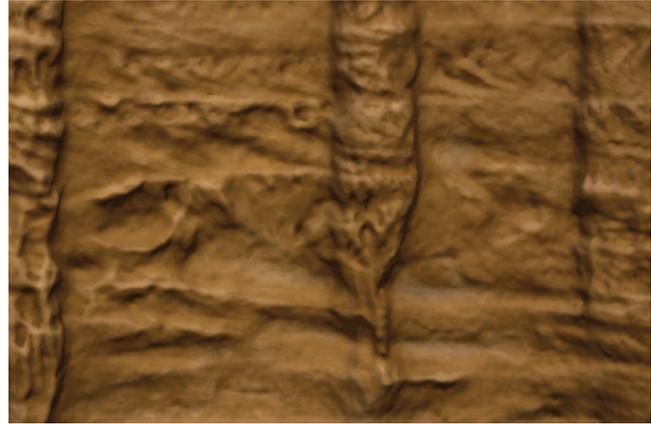
El uso simultáneo de múltiples imágenes aporta ventajas adicionales al uso de pares estereoscópicos: primero, proporciona redundancias y mayor fiabilidad a la solución final; segundo, permite detectar errores groseros; tercero, facilita la automatización de procesos; cuarto, permite homogeneizar la textura del modelo fotorrealístico resultante; y quinto, evita zonas con sombras u oclusiones.

## Escáner láser terrestre

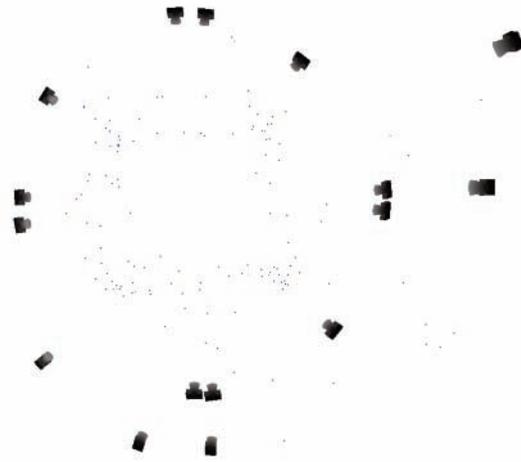
A día de hoy, existe una gran cantidad de escáneres láser terrestre en el mercado. Las dimensiones y el peso de los equipos comienzan a reducirse sustancialmente; el coste de los equipos va paulatinamente descendiendo, si bien es verdad que todavía continúan siendo elevados. No obstante, la rentabilidad de un



**Fig. 2a** Djinn Block Número 9 en el Parque Arqueológico de Petra (Jordania). Foto del Djinn Block a dos caras. Copyright: GIFLE.



**Fig. 2d** Djinn Block Número 9 en el Parque Arqueológico de Petra (Jordania). Detalle de modelo fotorrealístico 3D. Copyright: GIFLE.



**Fig. 2b** Djinn Block Número 9 en el Parque Arqueológico de Petra (Jordania). Fotos orientadas alrededor del Djinn Block. Copyright: GIFLE.



**Fig. 2e** Djinn Block Número 9 en el Parque Arqueológico de Petra (Jordania). Vista en perspectiva del modelo fotorrealístico. Copyright: GIFLE.



**Fig. 2c** Djinn Block Número 9 en el Parque Arqueológico de Petra (Jordania). Vista en perspectiva de la nube de puntos a color. Copyright: GIFLE.

equipo depende del uso, y en segmentos como mediciones industriales, tuberías, túneles, canteras, etc. su rentabilidad está más que garantizada, sobre todo si se desea extraer máxima información 3D en intervalos reducidos de tiempo.

La aplicación del escáner láser terrestre de media distancia se utiliza cada día más en labores de documentación patrimonial. Su uso está justificado en proyectos de levantamiento fotogramétrico en donde las dimensiones son grandes y sobre todo con geometría compleja tipo retablos, bóvedas, puertas (románicas, góticas, renacentistas...), esculturas, medallones, yacimientos arqueológicos, etc. Ello no quiere decir que sólo esta tecnología sea óptima, pero sí que se debe tener en cuenta, fundamentalmente si no se dispone de procedimientos fotogramétricos automatizados a partir de múltiples imágenes (Petti et alii, 2008: 303-315).

La Figura 3 muestra el resultado obtenido para el mismo caso de estudio de la Fig. 2, utilizando únicamente un láser escáner terrestre de media distancia. En concreto, se utilizó un equipo de media distancia panorámico (360° x 60°) basado en el tiempo de vuelo, modelo MENSİ GS100. Mide 5.000 puntos por segundo, y presenta una desviación estándar de 6 mm. a los 100 m.

La diferencia de la alternativa basada en imágenes frente a la alternativa basada en el barredor láser, una vez filtrados y registrados los datos de entrada, se muestra en la Figura 4. Para el caso de la fachada sur, obtenemos que en un 40.9% de los casos, las discrepancias están del orden de la precisión (desviación estándar) del escáner. Si consideramos los errores máximos, 2-2.5 cm, el 4,02 % estaría en el intervalo positivo y el 4.62% en el intervalo negativo. Además, se comprueba que no existen errores sistemáticos aparentes entre ambas soluciones. Por tanto, en este caso de estudio los resultados finales de la alternativa láser frente a los de la alternativa multi-imagen se pueden considerar equivalentes.

### Integración de escaneado láser e imágenes

El modelo 3D aporta información volumétrica esencial en tareas de monitorización y análisis de deterioros. Sin embargo, los modelos 3D pueden enriquecerse mucho más si el texturizado de los mismos se realiza de manera

rigurosa, analizando la mejor proyección de textura, eliminando sombras y equilibrando los colores. La solución fotogramétrica en estos casos es una garantía frente a alternativas de estiramiento de imágenes sobre los modelos. Puede comprobarse la diferencia de texturizado entre ambas alternativas, aproximada y rigurosa, en Biosca et alii (2007).

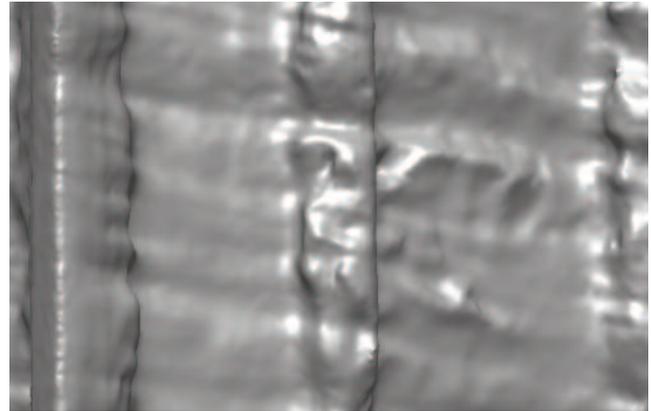


Fig. 3b Djinn Block Número 9: Detalle del modelo 3D. Copyright: GIFLE.

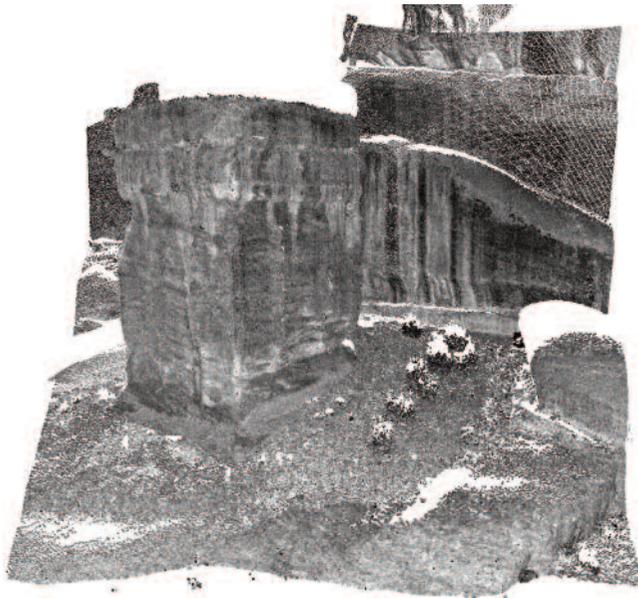


Fig. 3a Djinn Block Número 9: Vista en perspectiva de la nube de puntos con intensidad del láser. Copyright: GIFLE.

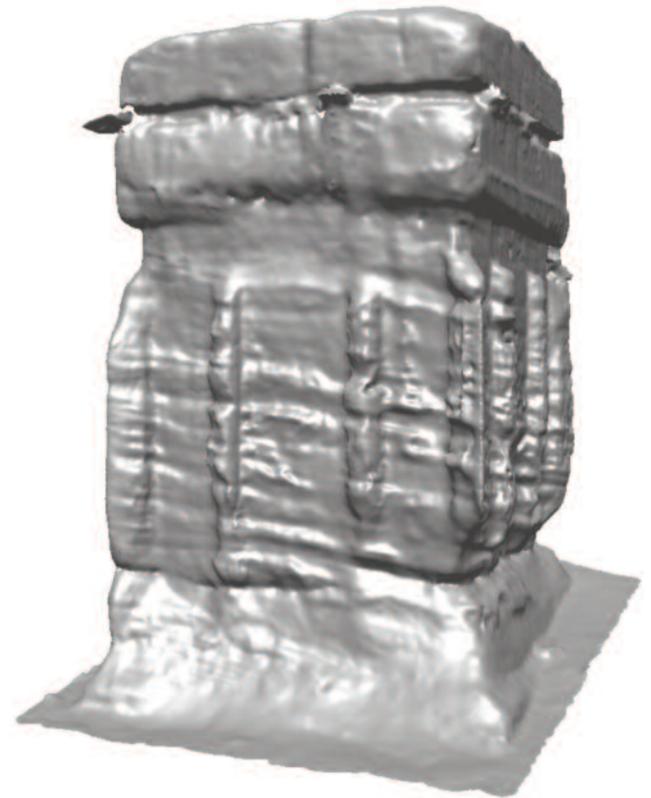


Fig. 3c Djinn Block Número 9: Vista en perspectiva del modelo 3D. Copyright: GIFLE.

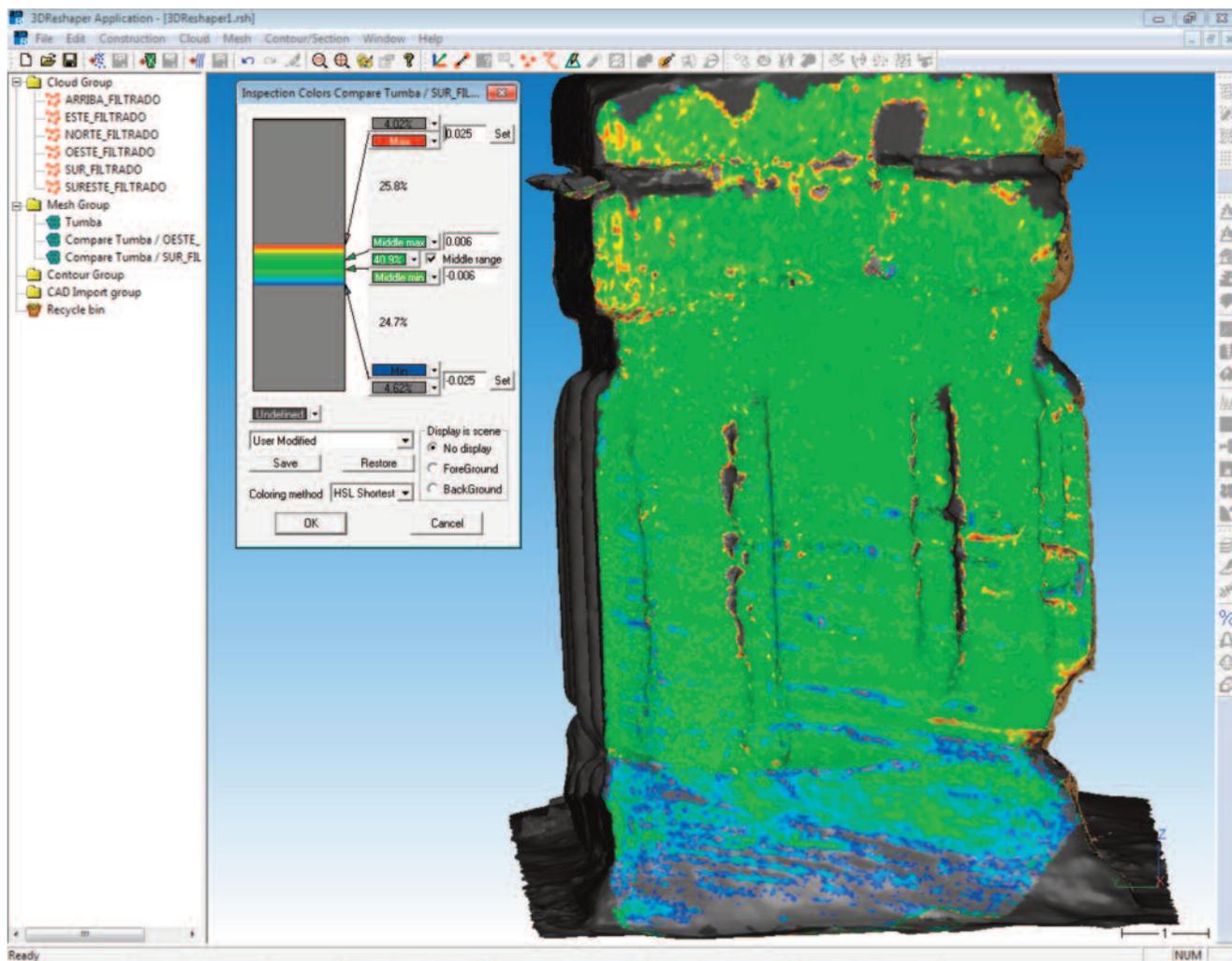


Fig. 4 Diferencia entre modelos provenientes de escaneado láser y de fotogrametría multi-imagen en dirección ortogonal a la fachada. Fachada sur Djin Block Número 9. Copyright: GIFLE.

A día de hoy uno de los procedimientos más recomendables para obtener modelos fotorrealísticos 3D integrando láser escáner terrestre y múltiples imágenes aparece descrito en Lerma et alii (2010). En dicho artículo se explota al máximo el potencial del escáner láser para derivar modelos y la fotogrametría multi-imagen para texturizar sobre éstos. No obstante, a día de hoy es posible y recomendable combinar ambas metodologías para lograr optimizar levantamientos utilizando procedimientos de multi-resolución y multi-escala: en algunos monumentos, sitios u objetos se utilizará solo una tecnología, en otros otra, y por lo general, ambas de manera integrada. Gracias a que cada proyecto o misión es diferente, la tecnología apuntada en este artículo está lista para ser integrada (junto con otras alternativas topográficas, por ejemplo GNSS) en SIGs arquitectónico-arqueológicos, sistemas CAD o aplicaciones web.

## Conclusiones

La documentación del patrimonio es una labor que ha venido desarrollándose satisfactoriamente a lo largo del tiempo mediante soluciones fotogramétricas. A día de hoy existen alternativas monoscópicas, estereoscópicas, multi-imagen y de barrido láser que pueden y deben ser consideradas en las labores de documentación gráfica del patrimonio. Unas requieren escasos desembolsos económicos iniciales; otras no. Sin embargo, unas no delegan a las otras sino que más bien se complementan.

Este artículo muestra los resultados alcanzados en los últimos años utilizando tecnología eminentemente digital. Nunca hay que perder de vista el objetivo, la misión del levantamiento y los recursos económicos disponibles, y eso exige máxima comunicación y diálogo entre los gestores patrimoniales y los técnicos en levantamientos fotogramétricos.

## Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo recibido por parte de la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID) al proyecto A/025999/09, así como la colaboración establecida con los socios jordanos Dr. T. Akasheh y Dr. N. Haddad.

## Bibliografía

ALBERTZ, J. (2001): Albrecht Meydenbauer – Pioneer of photogrammetric documentation of the cultural heritage, Proceedings 18th International Symposium CIPA 2001, Potsdam, Germany, 21-25.

ALMAGRO, A. (2008): “La puerta califal del castillo de Gormaz”, *Arqueología de la Arquitectura*, 5: 55-77.

ALMAGRO, A. y ALMAGRO-VIDAL, A. (2007): “Traditional Drawings versus New Representation Techniques”, CIPA 2007 XXI International Symposium, Atenas (Grecia), International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVI-5/C53: 52-57, <<http://www.isprs.org/proceedings/XXXVI/5-C53/papers/FP011.pdf>> [11 de noviembre de 2010].

BIOSCA TARONGER, J. M.; NAVARRO TARÍN, S. y LERMA GARCÍA, J. L. (2007): “Modelado tridimensional de una bóveda barroca mediante la combinación de láser escáner y fotogrametría”, 7ª Setmana Geomàtica, Barcelona, Spain, <<http://jllerma.webs.upv.es/pap021.pdf>> [11 de noviembre de 2010].

BLAIS, F. (2004): “Review of 20 Years of Range Sensor Development”, *Journal of Electronic Imaging*, 13(1): 231-240.

BÖHLER, W. (2006): “Comparison of 3D laser scanning and other 3D measurement techniques”, en Baltsavias, E., Gruen, A., Van Gool, L., Pateraki, M. (Eds.) *Recording, Modeling and Visualization of Cultural Heritage*, Taylor & Francis Group, London, 89-99.

CABRELLES, M., SEGUÍ, A. E., NAVARRO, S., GALCERÁ, S., PORTALÉS, C. y LERMA, J. L. (2010): “3D Photorealistic Modelling of Stone Monuments by Dense Image Matching”, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 38, 5: 121-124.

ELWAZANI, S. y LERMA, J. L. (2007a): “RECORDING FOR URBAN PLANNING: A CASE FROM MANAMA, BAH-

RAIN”, CIPA 2007 XXI International Symposium, Atenas (Grecia), *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVI-5/C53: 293-296, <<http://cipa.icomos.org/text%20files/ATHENS/FP057.pdf>> [11 de noviembre de 2010].

ELWAZANI, S. y LERMA, J. L. (2007b): “Recording Streetscapes”, Eppich, R. y Chabbi, A. (eds.) *Recording, Documenting and Information Management for the Conservation of Heritage Places*, The Getty Conservation Institute. Illustrated Examples, Los Ángeles (USA): 45-52. <[http://www.getty.edu/conservation/publications/pdf\\_publications/illustrated\\_examples3.pdf](http://www.getty.edu/conservation/publications/pdf_publications/illustrated_examples3.pdf)>, [11 de noviembre de 2010].

ENGLISH HERITAGE (2007): “3D Laser Scanning for Heritage. Advice and guidance to users on laser scanning in archaeology and architecture”, *English Heritage*, 1-44.

LERMA GARCÍA, J. L. (2002): *Fotogrametría moderna: analítica y Digital*, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia.

LERMA, J. L. (2010): “Heritage Recording Using Image-Based Techniques”, Ioannides, M., Alonzo, A., Georgopoulos, A., Kalisperis, L., Brown, A. y Pitzalis, D. (eds.) *Heritage in the Digital Era*, Multi-Science Publishing.

LERMA, J. L. y CABRELLES, M. (2007): “A Review and Analyses of Plumb-Line Calibration”, *The Photogrammetric Record*, 22(118): 135-150.

LERMA, J. L. y ELWAZANI, S. A. (2006): “Digital Rectified Imagery: A Survey Method for Design and Conservation Projects”, Second International Conference of the Arab Society for Computer Aided Architectural Design (ASCAAD 2006), Proceedings of ASCAAD 2006 Conference, Sharjah (Emiratos Árabes Unidos): 330-340.

LERMA, J. L.; NAVARRO, S.; CABRELLES, M. y VILLAVERDE, V. (2010): “Terrestrial laser scanning and close range photogrammetry for 3D archaeological documentation: the Upper Palaeolithic Cave of Parpalló as a case study”, *Journal of Archaeological Science*, 37: 499-507.

LERMA, J. L., VAN GENECHTEN, B., HEINE, E. y SANTANA, M. (2008): *Teoría y práctica del Escaneado Láser Terrestre*. Material de aprendizaje basado en aplicaciones prácticas. Proyecto Leonardo da Vinci 3DRiskMapping.

PATIAS, P. (2006): “Cultural Heritage Documentation”, International Summer School Digital Recording and 3D Modeling, Aghios Nikolaos, Creta, Grecia, Abril 24-29, 1-26.

PETTI, F. M.; AVANZINI, M.; BELVEDERE, M.; DE GASPERI, M.; FERRETTI, P.; GIRARDI, S.; REMONDINO, F. y TOMASONI, R. (2008): "Digital 3D modelling of dinosaur footprints by photogrammetry and laser scanning techniques: integrated approach at the Coste dell'Anglone tracksite (Lower Jurassic, Southern Alps, Northern Italy)", *Acta Geol.*, 83: 303-315.

Santana Quintero, M., Blake, B. y Eppich, R. (2007): "Conservation of Architectural Heritage: The Role of Digital Documentation Tools: The Need for appropriate teaching material", *International Journal of Architectural Computing*, 2(5): 239-253.

THE VENICE CHARTER (1964): «International Charter for the Conservation and restoration of Monuments and Sites (The Venice Charter 1964)», 2nd International Congress of Architects and Technicians of Historic Monuments, Venice, 1-4 <[http://www.international.icomos.org/charters/venice\\_e.pdf](http://www.international.icomos.org/charters/venice_e.pdf)>, [9 de noviembre de 2010].

WOLF, P. R. y DEWITT, B. A. (2000): *Elements of photogrammetry with applications in GIS*, McGraw-Hill, Boston.

# Técnicas no invasivas para el registro del patrimonio arqueológico

## C. Dietz

C.A.I. de arqueometría y análisis arqueológico,  
facultad de geografía e historia, Universidad Complutense de Madrid  
cdietz@quim.ucm.es

## G. Catanzariti

C.A.I. de arqueometría y análisis arqueológico,  
facultad de geografía e historia, Universidad Complutense de Madrid

## P. de la Presa

C.A.I. de arqueometría y análisis arqueológico,  
facultad de geografía e historia, Universidad Complutense de Madrid

## A. Jimeno

C.A.I. de arqueometría y análisis arqueológico,  
facultad de geografía e historia, Universidad Complutense de Madrid

118

### Curriculum

Dr. Christian Dietz, trabaja en el C.A.I. AAA de la Universidad Complutense de Madrid. Siendo químico analítico de profesión, está dedicado al desarrollo de metodología para el análisis y la datación de artefactos arqueológicos, a la prospección geofísica y a la aplicación de nuevas técnicas de imagen en arqueología.

### Resumen

Los métodos tradicionales para la prospección urbana y de campo en la investigación arqueológica y disciplinas relacionadas (fuentes antiguas, datos de archivos, cartografía histórica, procesamiento en SIG, colección de artefactos superficiales, ...), hoy día se complementan de forma creciente con un amplio rango de técnicas de detección remota. De

esta forma no solo se mejora el entendimiento y la valorización de yacimientos complejos, sino también se aportan herramientas hasta ahora no disponibles para aumentar la eficacia en la prospección, excavación, documentación y en el análisis de los artefactos recuperados. En este trabajo, se presentan ejemplos de una prospección por georadar y la documentación de un yacimiento empleando el escaneo por láser en tres dimensiones. También se discute la necesidad para la integración de los resultados obtenidos por diferentes técnicas.

### Abstract

Traditional approaches to urban and field survey in archaeology and related disciplines (ancient sources, archive data and historical cartography, GIS processing, surface artefacts collection...), are nowadays growingly supported by a wide

range of remote sensing techniques. These allow not only to better understand and valorise complex archaeological sites, but also provide previously unavailable tools to enhance efficiency in prospection, excavation, documentation and corresponding analysis of recovered material. In this work, these issues are highlighted by the presentation of a geophysical prospection making use of ground penetrating radar and the 3D reconstruction of an excavation by laser scanning. The need for integration of different techniques is also being discussed.

## Introducción

Progresivamente, va ganado terreno la arqueología preventiva, entendida como conjunto de actividades destinadas a evitar o a minimizar el daño de la obra pública o privada en el patrimonio arqueológico. La importancia, que se ha dado a este enfoque en la protección del patrimonio a lo largo de esta primera década del siglo XXI, viene marcada por la creación en Francia, en 2002, de L'Institut National de Recherches Archéologiques Préventives (INRAP) y en otros países europeos. Los restos arqueológicos no son infinitos, ni renovables y es evidente que la excavación de un yacimiento supone su destrucción total o parcial, por eso es necesario, antes de excavar, aplicar la tecnología necesaria, que nos aporte conocimiento, sacrificando lo menos posible los yacimientos, de ahí toda la importancia que adquieren las técnicas de detección remota. Es necesario excavar menos y documentar más, como se ha recogido ya en las legislaciones de algunas comunidades autónomas, que plantean la necesidad de crear “zonas de reserva” (Comunidad Valenciana y Castilla y León), como una parte no excavada de un yacimiento declarado BIC (Querol, ed., 2010).

Hay que pensar en el futuro, ya que las generaciones que nos sucedan tienen también derecho a la investigación y al disfrute del pasado, tratando de dar respuesta a las preocupaciones que se planteen en el futuro, que serán diferentes de las nuestras actualmente.

La evidencia arqueológica, tal como llega a nosotros, depende de algunos factores importantes:

- Lo que la gente pasada y presente ha hecho con ella (procesos postdeposicionales culturales).
- Lo que han conservado o destruido las condiciones naturales, como el suelo y el clima (procesos postdeposicionales naturales).
- Nuestra habilidad para encontrarla, reconocerla, recuperarla y conservarla.

No podemos hacer nada respecto a los dos primeros factores, que están a merced de los elementos o del comporta-

miento humano anterior. Pero el tercero avanza constantemente, en la medida en que comprendemos mejor los procesos de descomposición y destrucción y diseñamos estrategias de investigación y técnicas auxiliares para sacar todo el partido posible de la evidencia arqueológica, que ha sobrevivido hasta hoy (Renfrew, Bahn, 1993).

Desde esta perspectiva, cada vez es más necesario la aplicación de nuevas tecnologías en la investigación arqueológica, con el objetivo de desarrollar nuevas vías de estudio relacionadas con la documentación, análisis, divulgación y puesta en valor del registro arqueológico.

La arqueología es una disciplina compleja, que implica a agentes diversos, con perspectivas y objetivos diferentes sobre un mismo registro a documentar.

Además el registro no solo es relevante en tanto que documentación histórica, sino que es una parte esencial del territorio, desde una perspectiva actual, ya que ha pasado a ser un componente más de planificación y construcción del territorio, integrado en el paisaje. Por lo tanto, hay otros aspectos que deben de ser considerados en cualquier proceso de documentación arqueológica, además de los elementos singulares delimitables y describibles del registro:

- Valores e interpretaciones; es decir aquello que los elementos materiales significan o simbolizan para nosotros como arqueólogos, pero también lo que representan para otros colectivos (componentes inmateriales, difíciles de integrar).
- La temporalidad, ya que el registro arqueológico es histórico, y como tal es esencial en su propia definición.

La fragmentación como problema es otra de las limitaciones esenciales. A ello contribuyen básicamente la ausencia de criterios estandarizados para la documentación de la información arqueológica, la falta de una perspectiva integradora y el predominio de diferentes planteamientos teóricos en la investigación, pero sobre todo, una concepción del registro arqueológico o de patrimonio vinculado a yacimiento o sitio o monumento, lo que choca con otra perspectiva que considera los elementos arqueológicos (patrimoniales) como componentes del paisaje y por tanto su contextualización en el espacio.

Esto supone, desde una perspectiva arqueológica, que hay que superar la consideración de la excavación como único medio de obtención de datos, empleando una serie de técnicas integradas en un modelo de análisis global del paisaje (cartografía, fotointerpretación, topografía, prospección y excavación y documentación bibliográfica). Se trata no de utilizar nuevas herramientas para viejos procedimientos, sino herramientas nuevas para procedimientos nuevos (Machner, 1996; Parceró, González, 2007).

En este sentido, a lo largo de los últimos veinte años, se ha desarrollado toda una serie de métodos no invasivos de reconocimiento de superficie y de prospección del subsuelo. Estos incluyen, por un lado, la exploración desde plataformas situadas en el espacio (imágenes satélite, datos radar e infrarrojo) o en el aire (fotografía vertical e oblicua aérea, análisis multispectral, LIDAR), con aplicaciones en arqueología del paisaje y en la identificación de yacimientos hasta ahora desconocidos. Por el otro lado existen los métodos terrestres, más cercanos al objeto de estudio, como las prospecciones geofísicas, herramientas de documentación y visualización por escaneo láser, análisis basado en sistemas SIG, reconocimiento microtopográfico, DGPS o procesamiento de datos integrados. Entre ellos, este artículo desarrolla los métodos de la prospección por georadar y las nuevas técnicas de imagen, en particular el escaneo tridimensional por escáner láser.

### La prospección geofísica mediante radar de suelo (georadar)

La geofísica se puede definir como la ciencia que se encarga del estudio de la Tierra desde el punto de vista de la física. Esta disciplina emplea para su estudio métodos cuantitativos físicos, como la geoelectrica, los métodos electromagnéticos, sísmicos, gravimétricos y magnéticos. Los métodos geofísicos se pueden clasificar en pasivos e activos, donde los primeros hacen referencia a la medición de fenómenos que existen en la naturaleza y donde los segundos conciernen la medición de la respuesta del terreno a fenómenos inducidos artificialmente.

En arqueología la Geofísica se aplica principalmente para la búsqueda y el registro de yacimientos y estructuras arqueológicas enterradas, ayudando de esta forma a la mejor planificación y racionalización de las intervenciones arqueológicas indirectas, para la evaluación de yacimientos en áreas de posible alteración y para la identificación y recuperación de información en yacimientos destinados a ser destruidos.

En la actualidad, el método de prospección mediante radar de suelo, también conocido como georadar, constituye el método de más elevada resolución para la búsqueda y el registro de estructuras arqueológicas enterradas (Conyers 2004). Un radar de subsuelo (GPR en sus siglas en inglés) emplea ondas electromagnéticas de alta frecuencia (100-2000 MHz) que son transmitidas en el subsuelo y que por efecto de la presencia de discontinuidades vienen reflejadas hacia la superficie. Concretamente, un equipo georadar consta de una unidad de control, almacenamiento y visualización de datos conectada a una antena que emite y recibe la señal electromagnética a medida que ésta se desplaza a lo largo de una dirección preestablecida (fig.1).

En más detalle, la técnica consiste en la transmisión al subsuelo de pulsos electromagnéticos de duración breve (1-4 ns)



Fig. 1 Componentes de un equipo GPR (SEEKER SPR con antena 500 MHz).

y frecuencia elevada, que se propagan en profundidad con una cierta velocidad. Al encontrar una discontinuidad o superficie de separación entre dos medios diferentes, parte de la energía de los pulsos transmitidos vuelve a superficie en forma de una onda reflejada que la antena capta. Típicamente, para cada pulso transmitido en el suelo, un equipo georadar recoge una serie de 256 o 512 pulsos reflejados, durante un intervalo de tiempo de algunas decenas de nanosegundos. En los equipos más recientes la resolución horizontal puede alcanzar 1 cm, es decir que por cada centímetro de recorrido el sistema almacena una traza compuesta por 256 o 512 valores de amplitud de onda recibidos durante la ventana temporal establecida. Un ejemplo de traza de datos georadar está indicado en la figura 2.

Aquí, el pico de mayor amplitud es debido a la superficie del suelo mientras que los de amplitud más reducida se deben a la presencia de discontinuidades ubicadas a profundidad más elevada.

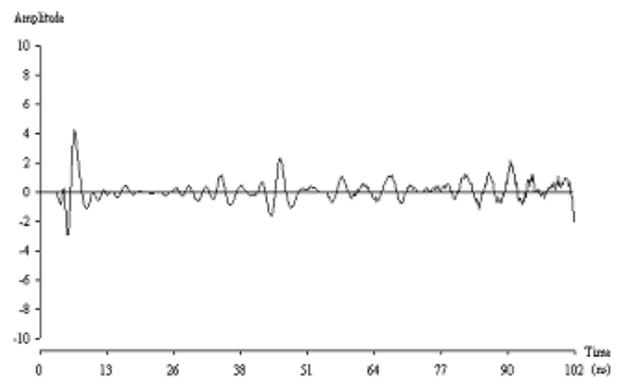


Fig. 2 Traza de datos georadar oportunamente filtrada y amplificada.

Los equipos georradar almacenan los datos en forma de perfiles denominados radargramas, es decir que se encargan de yuxtaponer y correlacionar en dos dimensiones todas las trazas registradas a lo largo de un perfil. El resultado está indicado en el ejemplo de figura 3, donde los datos de amplitud han sido representados empleando una escala de color: la gama azul-negra para los valores de baja amplitud y la gama amarillo-roja para valores elevados (tanto de polaridad positiva como negativa).

El tiempo de llegada a superficie de las señales (tiempo de retraso), está directamente relacionado con la velocidad de transmisión de las ondas electromagnéticas en el terreno investigado, y con la profundidad de la discontinuidad que las ha generado. Por otra parte, la intensidad de la señal recibida depende del contraste, en términos de parámetros electromagnéticos, entre la estructura o el material enterrado y su entorno.

En la práctica, una prospección georradar aplicada a la arqueología, consiste en la realización de una serie de perfiles paralelos, equidistantes entre 30 y 50 cm. y distribuidos según

una malla de adquisición regular. En cuanto a la elaboración y al procesado de los datos georradar, las operaciones básicas consisten en el filtrado y en la amplificación de la señal. Posteriormente, se realiza una correlación horizontal de los datos adquiridos según perfiles verticales, aplicando el método de las ventanas temporales móviles, lo que permite la obtención de cortes horizontales de tiempo/ profundidad que representan la distribución de las anomalías a lo largo de la superficie investigada y por profundidades crecientes.

Como ejemplo, en la figura 4 se ilustran algunos resultados relativos a una prospección georradar realizada en la zona de la zona de la Colina de Azäzo-Gännatä 'Iyäsus (Etiopía), en el marco del proyecto de investigación "Arqueología de las Misiones Jesuitas Ibéricas en el Lago Tana (Etiopía)" (Dirección General de Bellas Artes, del Ministerio de Cultura de España). Según se observa, el georradar permitió identificar claramente la presencia de anomalías (zonas con color rojo) relacionadas con la presencia de estructuras arqueológicas.

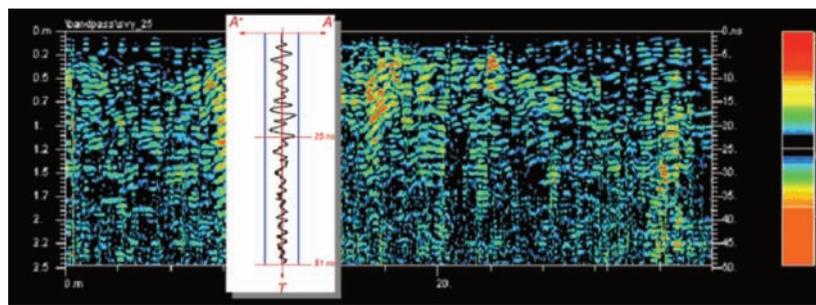


Fig. 3 Ejemplo de un radargrama.

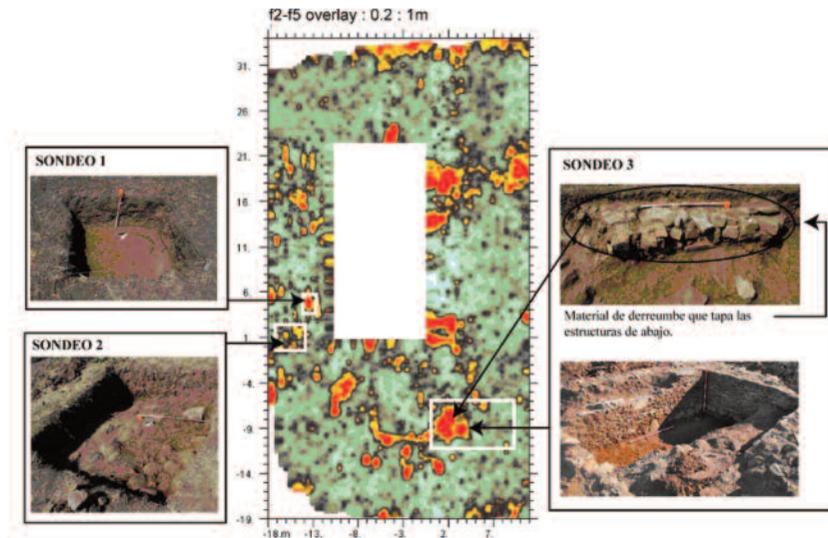


Fig. 4 Ejemplo de elaboración de datos georradar. Se ilustra un corte de tiempo profundidad (time/depth-slice) donde en rojo están representadas las anomalías de elevada amplitud relacionadas con la presencia de estructuras arqueológicas enterradas. Las excavaciones de calibración realizadas en correspondencia con algunas de éstas, confirmaron la presencia de estructuras de interés..

## Modelos tridimensionales en la documentación del patrimonio

En la documentación patrimonial, la demanda de modelos tridimensionales completos y válidos, tanto para fines científicos como divulgativos, ha experimentado un aumento significativo a lo largo de los últimos años. Esto se debe básicamente a que la fotogrametría, técnica tradicional para crear estos modelos a partir de la restitución estereoscópica o mediante técnicas de correlación, se puede ahora complementar y/o sustituir por sistemas de medición láser de largo alcance. Estos tienen la ventaja de poder capturar una gran cantidad de datos en un muy poco tiempo, aunque la posterior creación de modelos 3D a través de las nubes de puntos obtenidas todavía presenta una serie de dificultades.

En la figura 5, se presentan algunos de los modelos y características técnicas hoy día disponibles en el mercado. Un escáner láser se basa en un sistema directo de medida. Por lo general, se mide el “tiempo de vuelo” (TOF, en sus siglas en inglés) de un pulso de luz emitido por el láser, que es reflejado al incidir sobre el objeto. Determinando el retardo entre la emisión y la recepción de la señal se calcula la distancia al blanco. Con éste procedimiento se obtienen alcances típicos de 100 metros y precisiones de 3 a 10 mm.

Para acelerar este proceso, algunos equipos emplean la tecnología del “cambio de fase”, como se aprecia en la figura 4. Se mide la interferencia entre las fases del láser, consiguiendo

un muestro de hasta 250.000 puntos por segundo. Durante el escaneo de un objeto, el equipo realiza un barrido automático, midiendo distancias según un patrón previamente determinado.

Las coordenadas polares respecto al centro del sistema de coordenadas se consigue a través de unos codificadores, que determinan los ángulos horizontal y vertical de proyección del pulso. Con éstos elementos más la distancia obtenida se puede determinar las coordenadas espaciales de cada punto. El ángulo de apertura del haz emitido determina la resolución espacial de la exploración.

A la hora de capturar datos de un monumento, una excavación o un paisaje (Lerma García et al., 2008), hay que tener una serie de conceptos en cuenta. Antes de empezar, hay que definir, de forma precisa, la finalidad y los objetivos de la prospección a efectuar. Esto determinará la estrategia de la recopilación de datos y el ajuste de los parámetros técnicos del escáner, muy en particular la resolución adecuada, la cual afecta de forma directa el tiempo de escaneo y el peso de los datos resultantes. Como regla general, para objetos pequeños (p.e. una estatua) se emplea una resolución alta (2-4 mm.), para objetivos de tamaño mediano (p.e. un edificio pequeño), 10 mm de resolución se considera adecuada y para objetivos de tamaño considerable (p.e. el conjunto neolítico de Stonehenge), se puede bajar la resolución a valores alrededor de 100 mm.

122



1	Faro	Leica	Riegl	Topcon	Trimble
2	Photon 80	ScanStationC10	LMS-Z420i	GLS 1000	GX 3D
3	Phase shift	TOF	TOF	TOF	TOF
4	250 K p/sec	50 K p/sec	12 K p/sec	4 K p/sec	5 K p/sec
5	80 m	300 m	800 m	300 m	350 m
6	785 nm	532 nm	785 nm	650 nm	532 nm

Fig. 5 Listado de algunas marcas comerciales de sistemas de escaneo por láser (1: fabricante, 2: modelo, 3: tecnología de determinación de distancia, 4: velocidad de captura de datos, 5: alcance, 6: longitud de onda del láser).

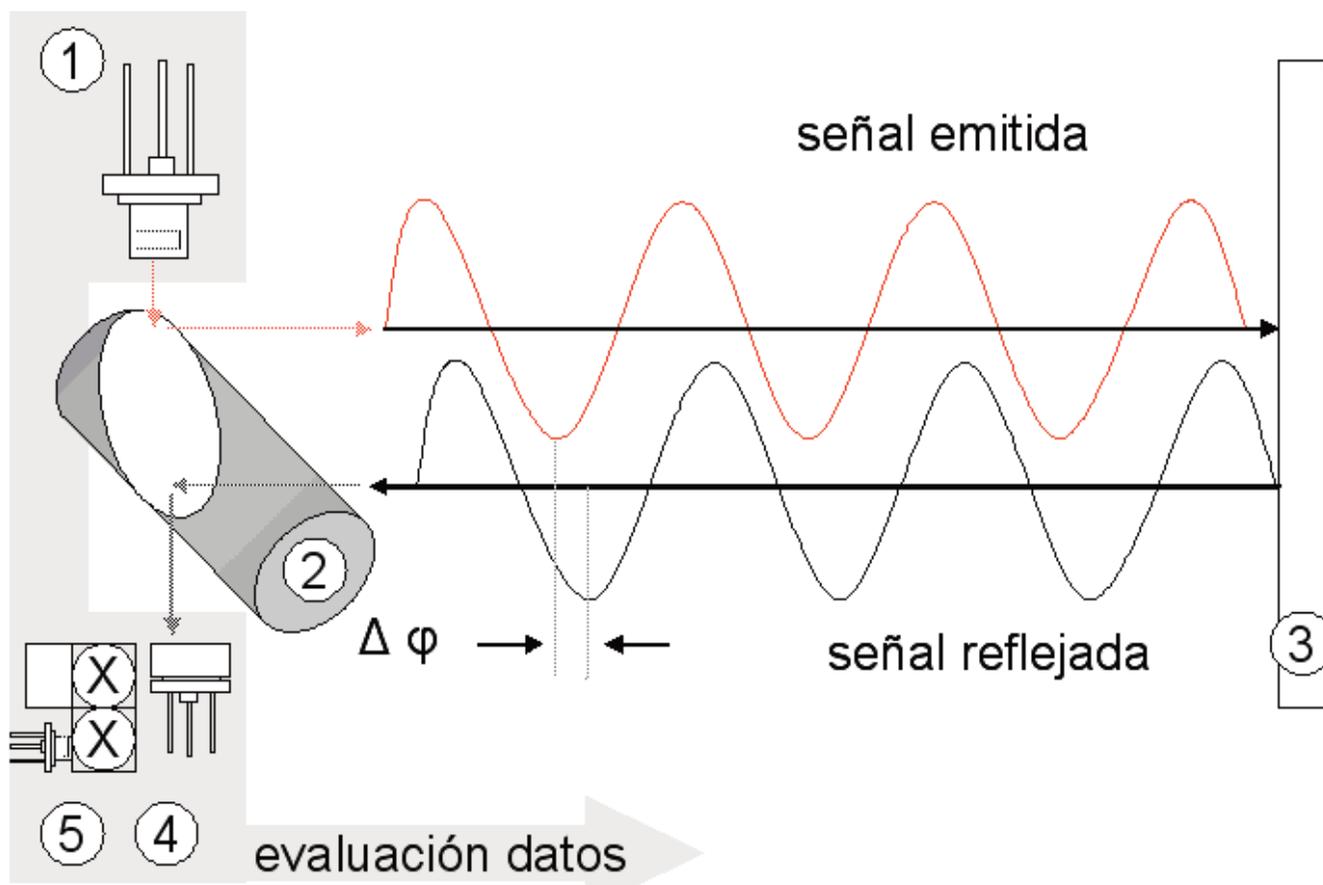


Fig. 6 Funcionamiento de un escáner láser con tecnología cambio de fase (1: diódo láser, 2: espejo giratorio, 3: objetivo, 4: fotodiodo, 5: oscilador de referencia y medida desfase).

Después hay que planificar las posiciones de escaneo de forma que el total de los escaneos cubra la mayor parte de sombras posible. Este paso también incluye la adecuada colocación de referencias (tablero cuadrículado, esferas en estaca), que se registran durante el escaneo y sirven para poder integrar las nubes de puntos crudos de cada escaneo en un único modelo tridimensional. Finalmente hay que elegir si se emplea la opción color, que permite tomar escaneos en los que cada punto de escaneo no sólo tiene su información 3D, sino también un valor de color (RGB) asociado a él. Esto se realiza combinando el escáner común con una cámara digital. La cámara digital se coloca sobre el escáner utilizando un soporte de cámara sin paralaje y es controlada por el software del escáner.

En la figura 7 se presenta la vista planar de una única nube de puntos, correspondiente a un escaneo de 360° en la excavación de una casa celtibérica situada en Ciadueña, (Almazán, Soria).

El proceso posterior de tratamiento la nube de puntos no estructurada es fundamental y viene impuesto por las nece-

sidades del trabajo. Se puede definir una etapa de pretratamiento, donde, se suelen aplicar una serie de filtros con el objetivo de eliminar puntos no deseados del modelo y para reducir el peso de los datos. Después se registran los diferentes escaneos para obtener el modelo tridimensional completo del objetivo, en muchos casos también es necesario asignar referencias geográficas exactas al modelo.

Dado que las superficies suelen ser complejas, una próxima etapa consiste en la triangulación (meshing), que es un método de obtener áreas de figuras poligonales, normalmente irregulares, mediante su descomposición en formas triangulares. La suma de las áreas de los triángulos da como resultado el área total, este formato de datos permite seguir con el procesamiento avanzado de los datos en programas informáticas externas al modelo de escáner empleado, como puedan ser AutoCad (secciones, cortes transversales) GeoMagic (modelos tridimensionales con texturas aplicadas), Surfer (mapas digitales de terreno) o 3D Studio (animaciones, reconstrucciones digitales), entre otros.

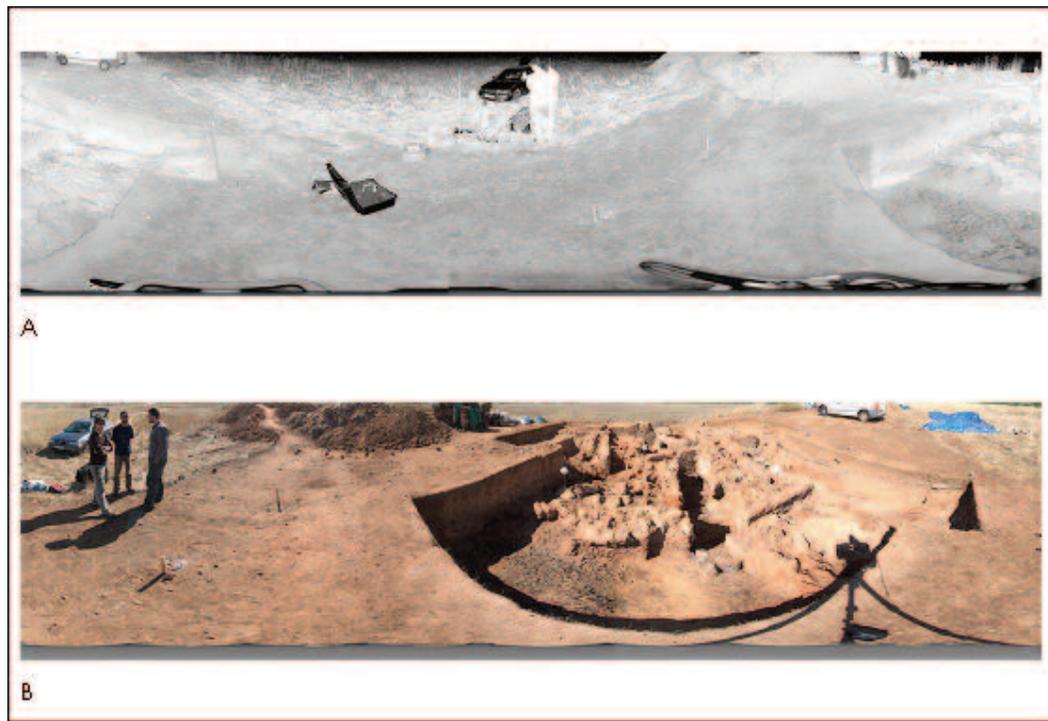


Fig. 7 Datos crudos (A) procedentes de escaneo por láser en vista 2D, (B) con opción color.

124

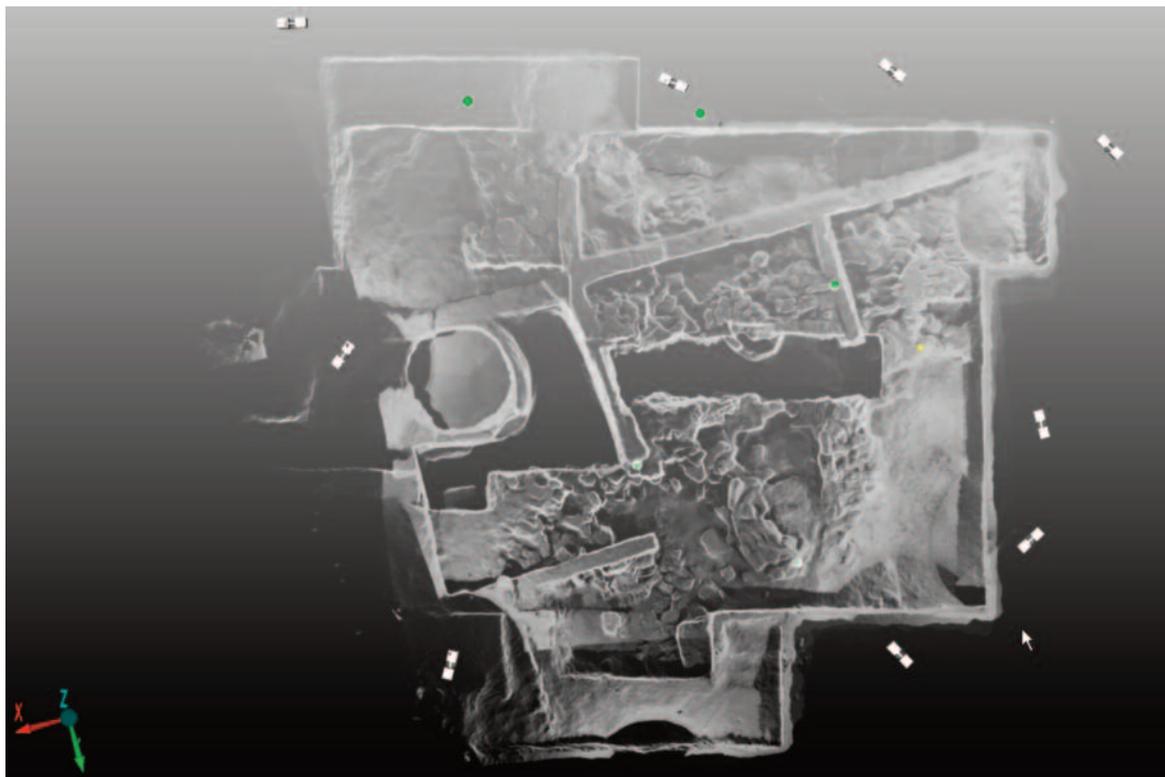


Fig. 8 Vista ortogonal del modelo tridimensional de la casa celtibérica de Ciadueña, las posiciones de los diferentes posiciones de escaneo y las referencias (verde) están marcadas.

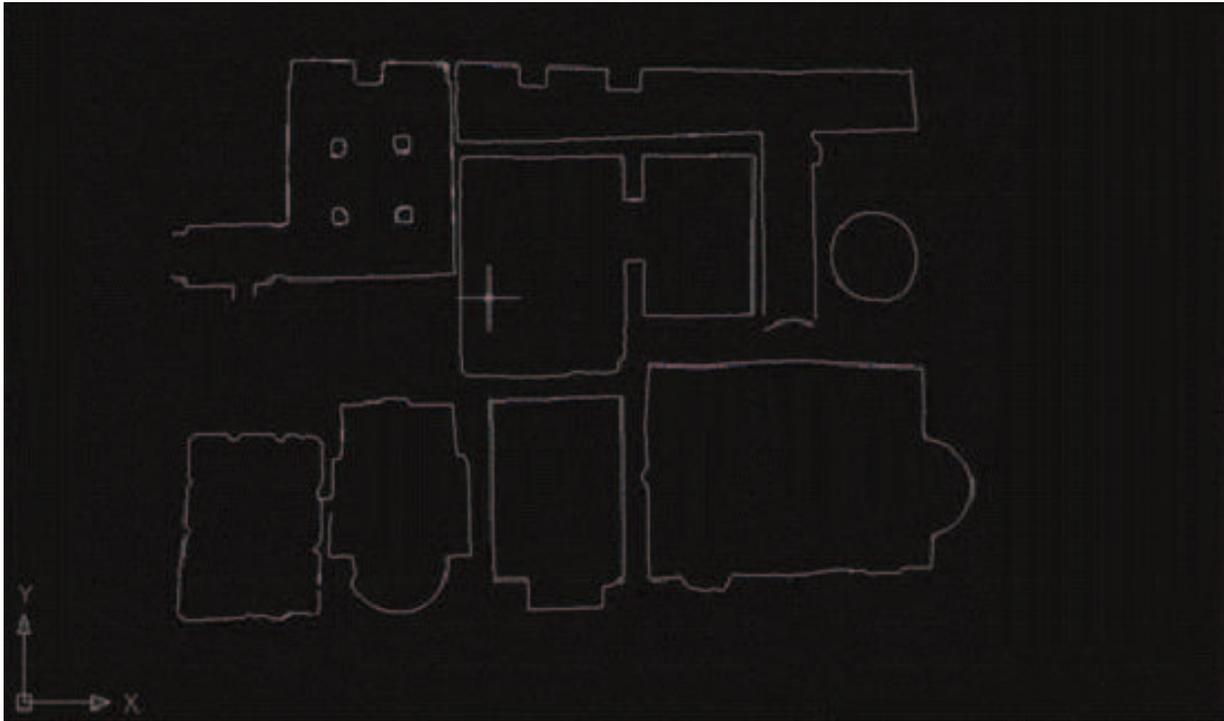


Fig. 9 Dibujo CAD, extraído de datos procedentes de escaneo por láser empleando cortes transversales, fuente <http://www.deltasphere.com.v>



Fig. 10 Modelo tridimensional con textura aplicada de la excavación de la casa celtibérica del siglo II d.C.

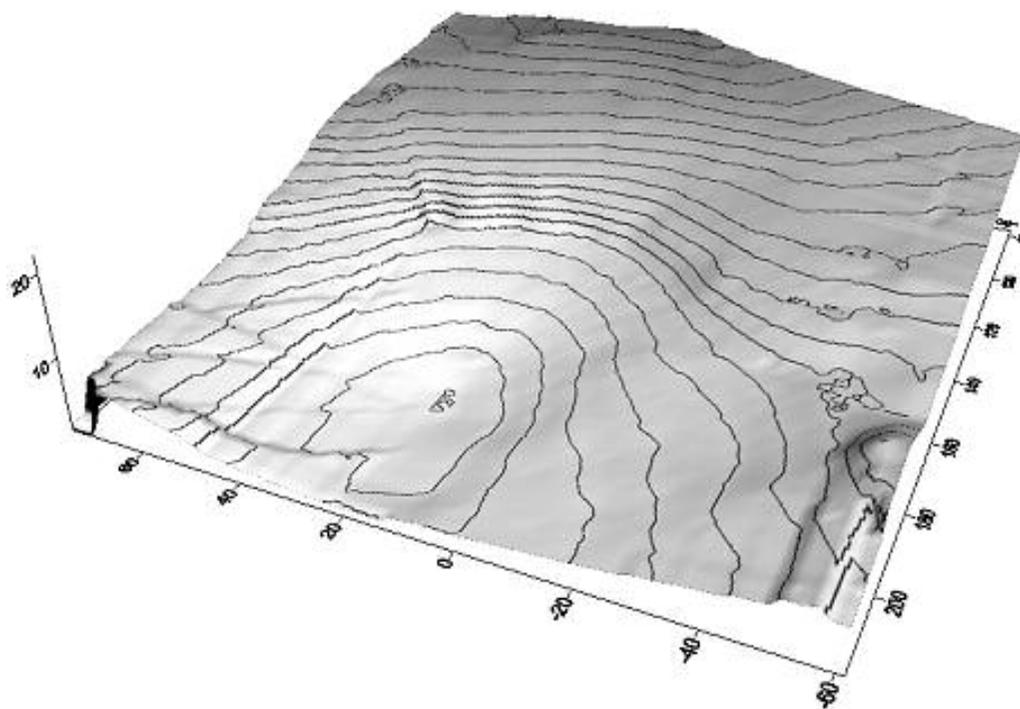


Fig. 11 Modelo digital de terreno del yacimiento Puig Ciutat (Vic, Catalunya)..

126

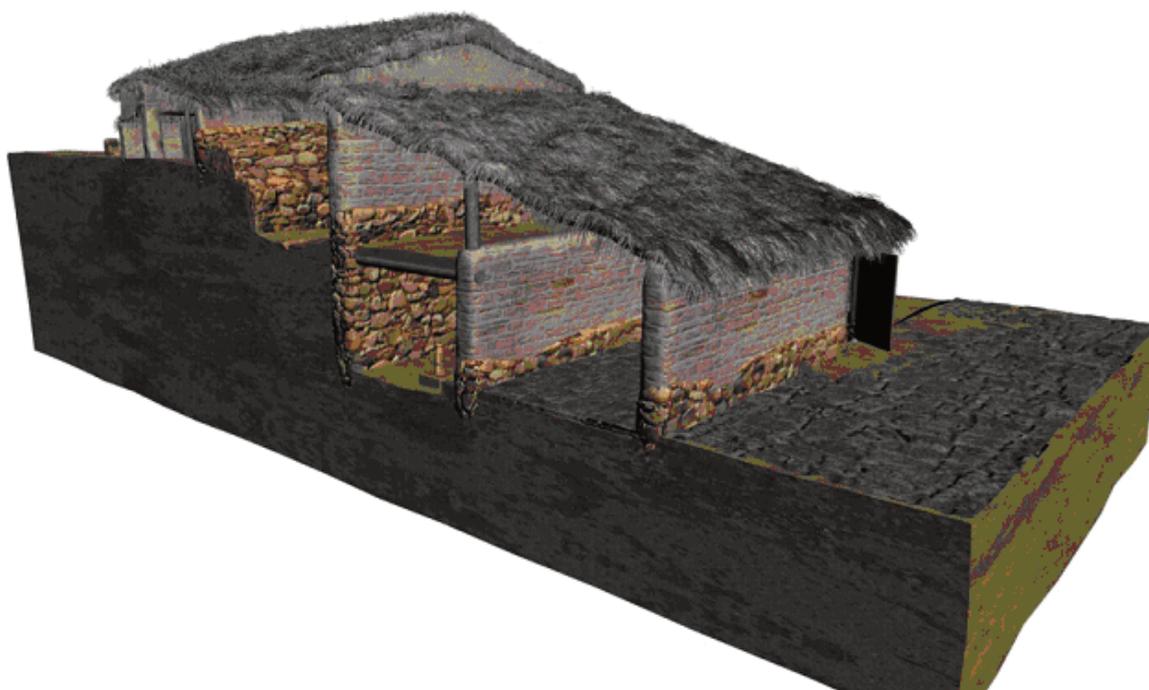


Fig. 12a Reconstrucción digital de una casa celtibérica (Numancia, Soria), Modelo elaborado por Dani Méndez.



Fig. 12b Reconstrucción digital de una casa celtibérica (Numancia, Soria), modelo elaborado por Dani Méndez.

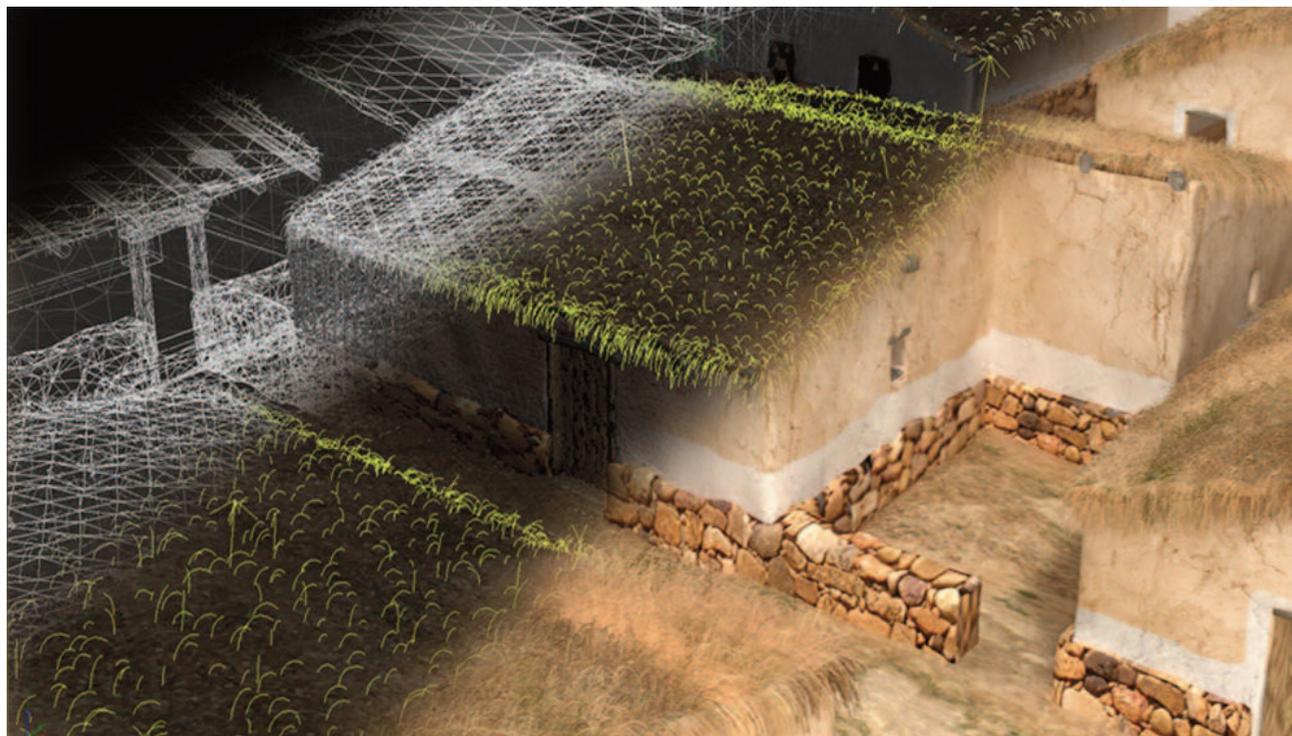


Fig. 12c Reconstrucción digital de una casa celtibérica (Numancia, Soria), modelo elaborado por Dani Méndez.

## Integración con datos procedentes de otras técnicas

Una característica esencial de las técnicas no invasivas modernas es que proporcionan datos en formato digital, facilitando no solo el almacenaje de los datos crudos y elaborados y el acceso futuro a ellos por otros investigadores, sino también la posibilidad de combinarlos con datos procedentes de otras técnicas e la incorporación en bancos de datos o sistemas SIG.

De esta forma se puede emplear un modelo digital de terreno de alta resolución, producto del escaneo por láser, para la corrección topográfica de radargramas, la información que ellas proporcionan se pueden a su vez complementar con la información que procede de prospecciones magnéticas u eléctricas, multiplicando así las herramientas disponibles para la correcta interpretación de un contexto arqueológico.

## Conclusiones

Hoy día, la arqueología dispone de una gama amplia de métodos no invasivos que aportan informaciones de superficie y del subsuelo, sin tener que recurrir a la excavación del

yacimiento. Estos no se emplean para sustituir una metodología ya establecida, sino para proporcionar herramientas nuevas para procedimientos nuevos. Entre las técnicas más utilizados destacan la digitalización por láser en 3D y el radar de subsuelo. La primera es una técnica no invasiva y rápida, que puede utilizarse para digitalizar cualquier estructura arquitectónica o de terreno, permitiendo su reconstrucción digital y modelación. También se usa para documentar, de forma continua, la evolución de excavaciones arqueológicas. La segunda proporciona información detallada sobre estructuras enterradas, llegando a profundidades considerables. Los datos procedentes de diferentes técnicas se pueden unir en modelos integrados, lo que permite una interpretación completa y fiable, basada en una gran cantidad de información.

## Bibliografía

CONYERS, L. B. (2004): *Ground Penetrating Radar for Archaeology*, Alta Mira Press, Walnut Creek, (CA, USA).

LERMA GARCÍA, J. L., VAN GENECHTEN, B., HEINE, E., SANTANA QUINERO, M. (eds.) (2008): *3D Risk Mapping*, Editorial de la UPV, Valencia..

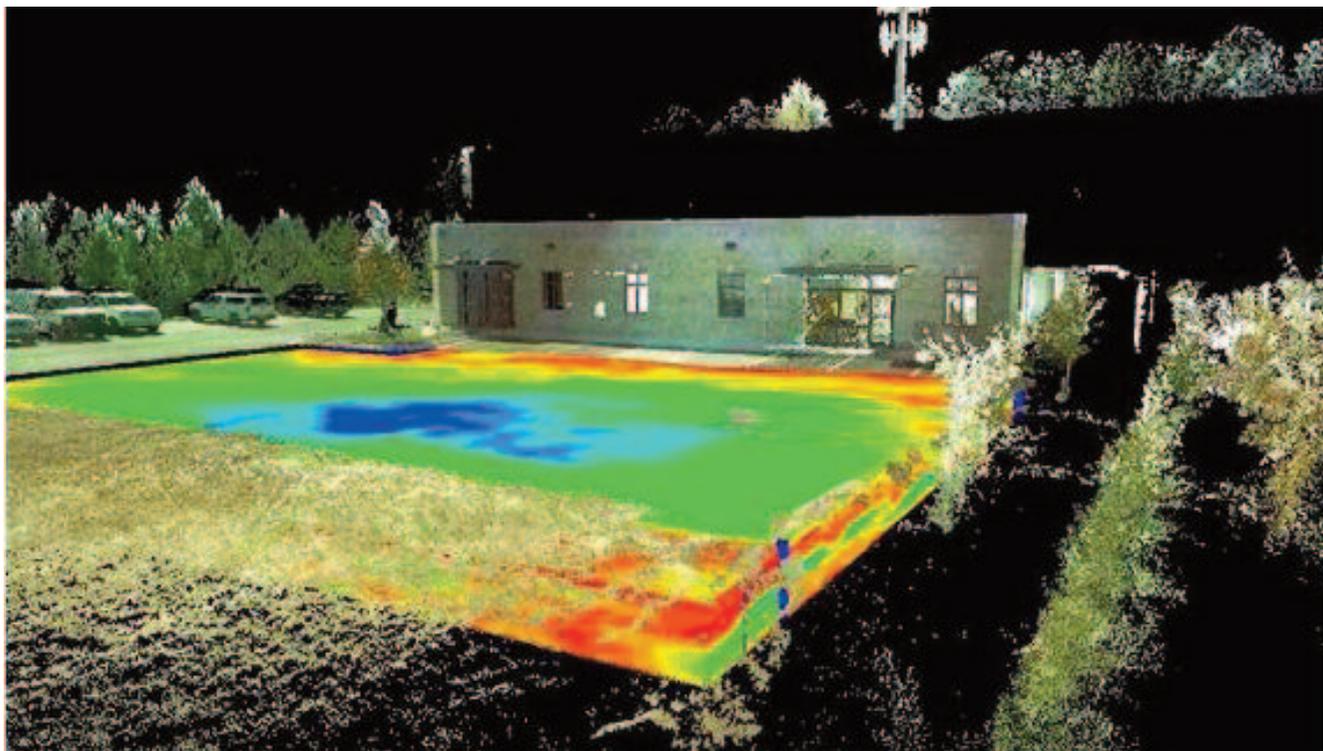


Fig. 13 Ejemplo de la integración de datos procedente de escaneo por láser y GPR, fuente: <http://gpr-survey.com>, land survey in Georgia

MASCHNER, H. D. G. (ed.)(1996): *New Methods Old Problems: Geographic Information Systems in Modern Archaeological Research*. Carbondale, Center for Archaeological Investigations. Illinois University.

PARCERO, C.; GONZÁLEZ, C. (2007): *Los SIG y la gestión de la información arqueológica*. V Simposio Internacional de Arqueología de Mérida: *Sistemas de Información Geográfica y Análisis Arqueológico del Territorio*, Mérida.

QUEROL, M. A. (2010): *Manual de Gestión del Patrimonio Cultural*. Akal, Madrid.

RENFREW, C.; BAHN, P.(1993): *Arqueología. Teorías, Métodos y Práctica*. Akal, Madrid.

# Tres niveles para la representación a partir de la aplicación de la tecnología escáner láser terrestre

Levantamiento en ortoimágenes de nube de puntos de las Termas y Bóvedas Romanas de Guadalmina en Marbella (Málaga). Levantamiento en ortofotografías de los paramentos que componen el ámbito basilical del Salón de Abd al-Rahman III en Madinat al-Zahra (Córdoba) y levantamiento tridimensional del Dolmen de Menga en Antequera (Málaga).

## Víctor Baceiredo Rodríguez

Ingeniero técnico en topografía. Univ. Politécnica de Mérida (Badajoz).

## Daniel Baceiredo Rodríguez

Especialista en el post-proceso de los escaneados y tratamiento de nubes de puntos, infografista 3D y técnico superior en delineación.  
tdtec@tdtec.es

130

## Curriculum

Víctor y Daniel Baceiredo Rodríguez de la empresa Gabinete técnico Baceiredo Rodríguez. Ing. Téc. Topógrafo y Técnico Superior en delineación respectivamente.

Realizan trabajos de documentación del patrimonio por diversas técnicas, topografía, fotogrametría, escáner láser y combinación de ellas.

Pudiendo destacar los siguientes trabajos:

- Para la Junta de Andalucía:  
Estudio Cartográfico de las Cubiertas de la Catedral de Málaga. Proyecto Cartográfico del Dolmen de Menga levantamiento mediante escaneado tridimensional de las Termas Romanas de Guadalmina. Escaneo tridimensional y levantamientos en ortofotografías de los paramentos que componen el ámbito Basilical del Salón Rico de Abd Al-Rahman III en Madinat Al-Zahra.
- Escaneo tridimensional y levantamientos en ortofotografías de los paramentos que componen el

Foro Romano de Cartagonova. Para el Patronato Cartagena Puerto de Culturas de Cartagena. AYUNTAMIENTO DE CARTAGENA

- Levantamiento en Ortoimágenes del Foro Romano de Turóbriga en Aroche, (Huelva). UNIVERSIDAD DE HUELVA

## Resumen

El tratamiento adecuado de la información que proporciona la tecnología laser escáner terrestre aplicada al registro del patrimonio histórico inmueble, exige disponer de conocimientos en el postproceso que posibiliten obtener un material dirigido tanto a la documentación como a su divulgación. Utilizando como elemento común la tecnología laser escáner terrestre, y bajo nuestra experiencia laboral, presentamos tres proyectos con niveles en la representación gráfica distintos, que constituyen cada uno, una fase independiente y secuencial en un trabajo de postproceso elaborado y desarrollado

en profundidad. El primer nivel sería la obtención de ortoimágenes de la nube de puntos; el segundo la consecución de una visión ortofotográfica, y el tercero, la realización de un levantamiento tridimensional texturizado.

Este último, consideramos que representa la elaboración integral de todas las fases, posibilitando al espectador obtener una visión global y detallada de cada parte compositiva, sin necesidad de ubicarse in situ, debido a la representación fidedigna del bien en 3D.

## Abstract

For an adequate treatment of the information provided by terrestrial laser scanning technology when applied to the registry of the cultural heritage buildings, post processing abilities are essential to obtain a material oriented for both documentation and publication for a wider audience. Using as a common element the terrestrial laser scanning technology, and from our work experience, we would like to show three projects with different levels in the graphic representation. Each project represents an independent and sequential phase in an elaborate post processing. The first level refers to a point cloud orthoimage capture, the second level makes possible to obtain an orthophotographic view, and the third refers to a 3D mapping completion.

As we see it, the 3D mapping comprises an elaborated integration of all the three phases and enables the viewer to obtain a global, detailed view of each component of the structure without the need of being physically present, due to the highly reliable representation of the 3D object.

## Introducción

Hoy en día no se concibe una catalogación o el inicio de una intervención en los bienes inmuebles del patrimonio sin la elaboración previa de una documentación métrica. Para generar un levantamiento de calidad se requiere una extracción de la documentación de campo exhaustiva, que junto con una interpretación gráfica correcta y una representación detallada, ofrezcan unos resultados adaptados y dirigidos a los equipos especializados en la investigación o intervención del bien. La base para el registro pasa por la creación de un perfil de la documentación a extraer que sea útil, estableciendo las necesidades y el grado de detalle requerido, donde el análisis de sus deformaciones en la geometría o morfología del objeto son básicas para un registro fidedigno.

El estudio puede ser para muy diferentes fines: una documentación histórica o arqueológica, una intervención arquitect-

tónica, la restauración, conservación o restitución estructural, general o particular de elementos compositivos. Cada caso requiere un nivel de representación distinto, que normalmente viene impuesto por el equipo multidisciplinar que vaya a participar en el proyecto de intervención, por lo que dependiendo del objeto de trabajo y el nivel de detalle a alcanzar se debería emplear la metodología más apropiada.

Todavía la documentación métrica se sigue centrando en planos de planta, secciones y alzados en 2D, siendo en la actualidad cada vez más necesarios los conocimientos en 3D que representen tridimensionalmente los estados actuales y permitan recreaciones virtuales con una infografía científicamente fidedigna. La reciente tecnología escáner láser es cada vez más utilizada para el registro del patrimonio histórico y la arquitectura, siendo en la actualidad el método de trabajo más completo en la toma de datos y a su vez complejo para generar documentación gráfica. Su rápida y abundante captura de la información topográfica, hacen de esta tecnología un sistema de medición innovador, dado que minimiza tiempos durante el trabajo de campo, revirtiendo por tanto en una reducción de gastos durante esa captura, ofreciendo a su vez un registro tridimensional preciso y muy detallado, imposibles de conseguir en tiempo y costes por métodos tradicionales. De hecho, no todo es la captura de la información. La enorme base de datos generada por el escáner láser supone un problema para el almacenaje y un post-proceso muy laborioso hasta obtener un modelo optimizado tridimensional. Además no podemos olvidar que hay que ofrecer un formato en los resultados válido y manejable para el estudio de cualquier equipo de profesionales involucrado en el proyecto, la mayoría de las veces no acostumbrado, o sin medios técnicos para manejar la información que esta tecnología ofrece.

Se presenta el levantamiento de tres de yacimientos, donde se ha pretendido ofrecer soluciones gráficas, planteando la elaboración de diferentes resultados.

Los ejemplos que presentamos son:

- Levantamiento en ortoimágenes de nube de puntos de las Termas Romanas de Guadalmina, en Málaga (Málaga).
- Levantamiento en ortofotografías de los paramentos que componen el ámbito basilical del Salón de Abd al-Rahman III en Madinat al-Zahra (Córdoba).
- Levantamiento tridimensional del Dolmen de Menga en Antequera (Málaga).

Trabajos desarrollados en profundidad y realizados minuciosamente donde el material presentado no solo satisface las necesidades en la documentación, sino que además se ha confeccionado una maquetación infográfica, que prepara la información para que disponga de posibilidades en su difusión.



Fig. 1 Extracción de la documentación mediante escáner láser, Salón de Abd al-Rahman III en Madinat al-Zahra. Infografía realizada por Daniel Baceiredo Rodríguez.

## Proceso de extracción topográfica mediante escáner láser

Lo importante ha sido conseguir un registro exhaustivo para generar una documentación detallada, para lograrlo se ha empleado tecnología escáner láser.

El proceso de trabajo para la extracción de la información topográfica, por orden de elaboración, ha sido el siguiente: planificación, colocación y georreferenciación de las dianas de referencia en coordenadas UTM, escaneado del interior y exterior del objeto de trabajo.

La planificación de la toma in situ es clave para el éxito del proyecto. Para ello se ha tenido en cuenta: la elección de la maquinaria, la planificación de las posiciones del escáner y obstáculos externos, los medios auxiliares, la colocación de las dianas y esferas, las posiciones de los suministros de energía, la disponibilidad del espacio, la iluminación y las condiciones climáticas.

Para la captura de datos topográficos se ha elegido el escáner FARO Laser Scanner LS 880. Tiene alto rendimiento para capturar nubes de puntos 3D. El escáner produce imágenes tridimensionales en donde cada píxel tiene su correspondiente coordenada X, Y, Z. y un valor de reflectancia de los materiales. Posee una alta productividad, con una velocidad de medición de 120.000 puntos por segundo, y alta precisión. La maquinaria incorpora un lector que mide del pulso láser la

longitud de onda emitida y recibida, calculando la distancia de cada punto y el valor de reflectancia; a su vez va unido a un espejo giratorio que obtiene el perfil del plano vertical a 320°, y un motor giratorio que cubre los 360° del plano horizontal. Las densidades en la nube de puntos son configurables.

Su unidad telemétrica<sup>1</sup> es: Rango: 0.6 m - 76 m, resolución: 0,6 mm-17 Bit distancia, velocidad de medición: 120.000 puntos por segundo, incertidumbre:  $\pm 3$  mm en 25 m, repetibilidad 20 mW, @10 m: 0.7/2.6 mm rms @ 90 % refl. | 1.3/5.2 mm rms @ 10% refl.(con filtros - sin filtros):@25 m: 1.1/4.2 mm rms @ 90 % refl. | 2.5/10 mm rms @ 10% refl.

Se colocaron las bolas de medición y dianas de referencia, situadas por todo el espacio de trabajo para garantizar un registro de al menos cinco por cada barrido, que sirvieran para la referenciación de los escaneados. En su georreferenciación global se ha utilizado el sistema de coordenadas UTM, establecido en el yacimiento arqueológico. Las estaciones topográficas han sido calculadas mediante poligonales de precisión perfectamente compensadas, desde donde se han obtenido las coordenadas de las dianas de referencia.

En el registro de superficies, la prioridad en las posiciones del escáner ha ido determinada por la búsqueda de las zonas de oclusión o zonas en sombra, asegurándonos de que el barrido se re-

<sup>1</sup> Technical Data for FARO Laser Scanner LS 880. [www.faro.com](http://www.faro.com)



Fig. 2 Vistas generales de las Termas de Guadalmina en Marbella (Málaga). Fotografía: Víctor Baceiredo Rodríguez.

alizaba con la menor ausencia de nube de puntos. Con el fin de reducir errores de incertidumbre se han desechado los puntos cuyas distancias superan los 15 metros, apostando en su lugar por un abundante número de posicionamientos de escáner. La georreferenciación precisa de un gran número de dianas y la cercanía al objeto en los posicionamientos del escáner, marcan la definición de las nubes de puntos y su exactitud.

Tras los escaneados, las nubes de puntos se han postprocesado mediante el software iQscene. Una vez verificada la validez de todas las nubes de puntos recogidas, se procede a una fase de filtrado, limpieza y alineación, con el fin de obtener una nube de puntos limpia, con el menor ruido posible, sin obstáculos y georreferenciada, a partir de la cual recabar la información necesaria y clasificarla por escenas de trabajo.

### Representación en ortoimágenes de nubes de puntos (escáner láser). Levantamiento de las termas romanas de Guadalmina, Marbella (Málaga)

Este yacimiento arqueológico se encuentra en la desembocadura del río Guadalmina, cerca de San Pedro de Alcántara, en Marbella (Málaga). Son unas termas romanas de finales del

siglo III, fabricada con hormigón y cantos rodados, en donde sólo en las dovelas de los arcos hay ladrillos y el pavimento conservado es de "opus signium". La edificación dispone de cuatro niveles: conducciones subterráneas calefactadas, planta baja, primera planta y cubierta. La planta baja es radiada y circular; el centro de la construcción lo forma una gran sala con una piscina en su centro, ambas de planta octogonal. Circundante en esta sala, existen cuatro nichos y cuatro entradas que dan acceso a las seis estancias y un depósito de aguas que la rodean. Estas estancias servían de piscinas y son también octogonales con bóveda circular de las que sólo se conservan sus cuatro lados internos. Cubre la sala central una primera planta con galería en anillo, que da entrada a varios habitáculos y corredores con una terraza plana. Cubría el centro del edificio una claraboya para aprovechar la luz cenital. Bajo la planta baja existen conducciones que unen las diferentes piscinas con la sala central que sirven de entrada de calor para todas las termas. En los alrededores de las Termas, se encuentran dispersos numerosos restos de las bóvedas, muros y cubiertas del edificio.

#### Objetivos

El presente proyecto surge del Departamento de Conservación y Obras del Patrimonio Histórico de la Delegación Pro-



Fig. 3 Ortoimágen en planta de las Termas de Guadalmina en Marbella (Málaga). TDTEC.

134

vincial de Málaga, Consejería de Cultura de la Junta de Andalucía, ante la necesidad de realizar una documentación técnica gráfica de los restos del yacimiento de las Termas Romanas de Guadalmina, que por el inicio de los estudios de intervención, resultaban primordiales para la correcta planificación del conjunto de las actuaciones.

El levantamiento pretende ser el documento de partida base para la representación de las propuestas de actuación, para el volcado y la localización de los resultados de futuros estudios y trabajos arqueológicos en el yacimiento, al mismo tiempo que una ayuda para su divulgación y puesta en valor. El proyecto consistió en generar la siguiente documentación:

1. Un registro global a través de nubes de puntos, capturada a través de escáner láser terrestre, clasificada por plantas y alzados, filtrada, limpiada de obstáculos y georreferenciada.
2. Ortoimágenes con detalle arqueológico de las diferentes plantas, secciones y alzados a escala 1/100, 1/50 y 1/20.

#### Metodología

Las Termas abovedadas de Guadalmina, poseen una complicada arquitectura; su geometría con volúmenes curvos, y las grandes dimensiones de los restos conservados configuran un

yacimiento muy peculiar y original. La abundancia de superficies irregulares conforma unos espacios difíciles de registrar por procedimientos convencionales. En teoría, para la correcta interpretación de esta volumetría curva y complicada sería necesario un levantamiento de numerosos puntos y la realización de un modelo digital tridimensional de sus superficies.

La elaboración del modelo digital sería una labor que requeriría un laborioso postproceso de los ficheros de campo. Por ello se planteó una directriz a largo plazo, con un desarrollo gráfico en dos fases de trabajo. Una primera, para la extracción de la documentación de campo, mediante tecnología escáner láser terrestre, y un postproceso más ligero de su información, que ofreciese unos resultados gráficos que aportasen una visión geométrica globalizada y a su vez definida. Se dejó para un futuro la elaboración de una segunda fase de trabajo, consistente en generar su correspondiente levantamiento tridimensional y su definición digitalizada en formatos CAD, facilitando con ello el estudio científico 3D de su geometría, la divulgación y el desarrollo virtual de su estado original.

Se estableció, por tanto, una metodología con unos resultados planimétricos basados en generar ortoimágenes de plantas y alzados a través de las nubes de puntos densas.

Para la extracción de una documentación topográfica completa y detallada fueron necesarios 67 escaneados en total, con una densidad en la nube de puntos de 4 mm. Estas fueron posteriormente



Fig. 4 Ortoimágenes en alzado de las secciones n°1 (N-E) y n°3 (N-O) de las Termas de Guadalmina en Marbella (Málaga). TDTEC.

filtradas, georreferenciadas y limpiadas de obstáculos externos al propio yacimiento. El software utilizado para el manejo de las nubes de puntos permite generar secciones y visualizar, vistas ortogonales y 3d del objeto. Mediante la captura de esta información visual se inicia un amplio proceso de trabajo que tiene como resultado final la ortoimagen, las cuales reproducen, con valor métrico bidimensional, las superficies y el objeto tal cual es, sin entrar en la interpretación gráfica ni en la definición digitalizada en formatos CAD.

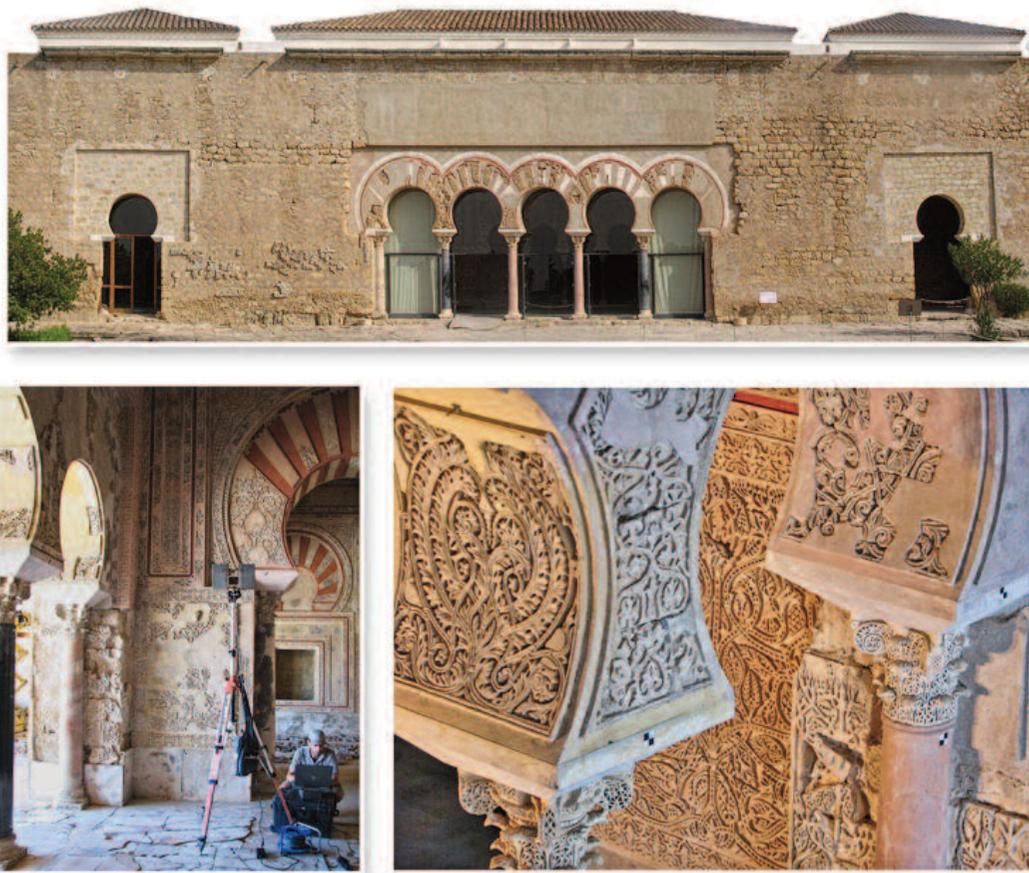
La generación de ortoimágenes a partir del modelo de nube de puntos resuelve además la proyección de las irregularidades en la profundidad de sus superficies, ya que cada pixel, que proporciona el valor de reflectancia de los materiales a 17bit, corresponde a un punto cuyas coordenadas se han extraído in situ sin interpolaciones matemáticas, viéndose reducidos los errores a la incertidumbre milimétrica que posee la maquinaria escáner láser.

Las ortoimágenes ofrecen una excelente y definida visión global de la información extraída y suponen la obtención de resultados gráficos métricos a un primer nivel en la representación, con un postproceso menos costoso; sin olvidar que el registro realizado permitirá futuros trabajos de digitalización vectorial en una segunda fase.

Se realizaron, pues, ortoimágenes de planta para el nivel de las áreas calefactadas, planta baja, primera y cubiertas, junto con cuatro alzados basados en dos planos de proyección que seccionan el edificio perpendicularmente. Todas las ortoimágenes realizadas están a escala 1/50, y por su alto detalle en la definición, optamos por generarlos a escala 1/20, ya que el detalle arqueológico se ve representado. Se han creado dos ficheros distintos para cada una, que van dirigidos a cubrir dos finalidades distintas: la inserción en formatos CAD, y su directa impresión a escala, con calidad fotográfica en formato “tif”.

### Levantamiento en ortofotografías de los paramentos que componen el ámbito basilical del salón de Abd Al-Rahman III en Madinat Al-Zahra (Córdoba)

El salón de Abd al-Rahman III, también denominado comúnmente Salón Rico, es el edificio más valioso de todo el conjunto arqueológico de Madinat al-Zahra y su cronología se sitúa entre el año 953 a 957. Era el salón de ceremonias, donde se recibía a los embajadores extranjeros y además el salón del



**Fig. 5** Vista exterior del Salón Rico, trabajos de escaneado en su interior y detalle de la ornamentación. Fotografía: Víctor Baceiredo Rodríguez.

trono, de ahí su rica decoración. La sala posee una planta basilical con tres naves longitudinales separadas por arcos de herradura soportados por columnas, y una gran nave transversal que servía de antesala, separada de aquellas por tres arcadas de herradura. Las cabeceras del fondo norte de las tres naves longitudinales están rematadas por tres arcos ciegos de herradura, siendo en el central donde el califa presidía las ceremonias palatinas. Estas tres naves longitudinales están separadas entre sí por seis arcadas con arcos de herradura. Su bella decoración hispano-omeya destaca por sus dovelas, las columnas de mármol rematadas por preciosos capiteles de avispero y sus lienzos decorados con finos paneles de ataurique realizados en mármol, con motivos simétricos vegetales de simbolismo cosmológico que representaban el árbol de la vida.

### Objetivos

Se trata de un levantamiento promovido por el conjunto arqueológico de Madinat al-Zahra, perteneciente a la Consejería de Cultura de La Junta de Andalucía. El objeto del proyecto

fue obtener una documentación técnica gráfica que describiese los paramentos que componen el ámbito basilical del Salón de Abd al-Rahman III, para los trabajos de documentación, conservación, restauración y restitución de piezas.

Para la representación de estos espacios se propuso la elaboración de 10 alzados ortofotográficos que describiesen los 16 lienzos que componen la nave transversal y las tres longitudinales del espacio basilical, imprimibles a escala 1/20. La necesidad de recoger correctamente la exuberante decoración del Salón Rico marcó la calidad del trabajo y la elección de una metodología que proporcionase gran resolución, en donde se reflejase fielmente tanto su estructura arquitectónica como el minucioso detalle del ataurique de sus lienzos.

### Metodología

Fue importante partir de los resultados del trabajo a los que nos dirigimos para determinar la metodología a seguir. Se planteó por consiguiente la posibilidad del levantamiento por fotogrametría, pero el abundante número de pares estereos-



Fig. 6 Trabajos de extracción de la documentación. Infografía realizada por Daniel Baceiredo Rodríguez.

cópicos, tendrían que haber estado realizados a una distancia muy reducida al objeto para que captasen la información del detalle del ataurique, por lo que se harían muy numerosos los puntos de apoyo a tomar y muy laboriosa la digitalización del micro detalle del relieve ornamental.

Se estableció por tanto una directriz, que a través de un registro con tecnología escáner laser terrestre, se procedería a la consecución de dos resultados. En una primera fase se obtuvo las ortoimágenes de las nubes de puntos densas y en una segunda la realización a través de ellas de una visión ortofotográfica; permitiendo la posibilidad de elaborar en un futuro, con la información obtenida, un modelo texturizado fotorealístico 3D.

Para ello se decide, a través del levantamiento en ortoimágenes de nube de puntos a alta definición, obtener un soporte métrico donde apoyar el barrido fotográfico bajo un proceso de rectificación de unidades mínimas diferenciales. La definición de estas ortoimágenes es de vital importancia. Un escaneado tridimensional del edificio que defina la ornamentación del ataurique y el relieve de su biselado (incisiones), debería tener una densidad en la nube de puntos submilimétrica, lo

que generaría una base de datos (n.º de puntos) no gestionable, a unos costes razonables, para este proyecto. Por ello se optó por realizar una captura con una densidad de 2 mm, que proporcionase la volumetría de las distintas piezas o placas y la geometría de los motivos que contienen los tableros del ataurique, sin entrar en el detalle del biselado ornamental. La definición gráfica del micro detalle se obtuvo mediante la creación de ortofotografías a alta resolución.

Para ello una toma de campo exhaustiva es importantísima y una buena planificación facilita la eficacia en las jornadas de trabajo in situ. Se dispuso de un andamiaje para la colocación de dianas de referencia y se planificó las posiciones del escáner para evitar las oclusiones o huecos en la nube de puntos, el cubrimiento de la mayor superficie posible y el suficiente solapamiento entre las mismas. Se realizaron finalmente 23 escaneados sobre las fachadas exteriores del edificio, 5 en las cubiertas, 69 posicionamientos en el interior y 8 escaneados más a distintas alturas del espacio basilical, ejecutando un total de 105 tomas en cinco días de trabajo.



Fig. 7 Detalle de la ortoimagen de nube de puntos generada en la arquería oriental de la nave longitudinal oriental. Salón de Abd al-Rahman III en Madinat al-Zahra. TDTEC.

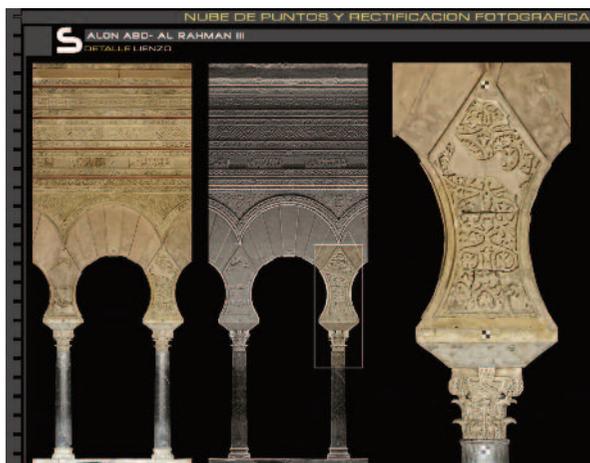


Fig. 8 Proceso de rectificación fotográfica de la ortoimagen del lienzo de cabecera de la nave longitudinal central. Salón de Abd al-Rahman III en Madinat al-Zahra. TDTEC.



Fig. 9 Proceso de rectificación fotográfica. Salón de Abd al-Rahman III en Madinat al-Zahra. TDTEC.

La creación y el registro de un buen barrido fotográfico de los lienzos también resultó clave para garantizar que los detalles ornamentales sean documentados con nitidez. Se utilizó la cámara digital Canon EOS-1Ds Mark III, previo conocimiento de las características internas de la misma. Se dispuso de una plataforma elevadora para poder realizar un registro fotográfico ortogonal a cada lienzo y se preparó un sistema de iluminación con focos, que facilitase la menor ausencia de sombras. Se partió de la necesidad de realizar en cada toma un solape de foto a foto, con vistas a disponer el objeto de trabajo con la menor distorsión posible.

Para la creación de las ortoimágenes se utilizaron los planos de proyección paralelos a cada lienzo. Se capturó la visualización 2D de la nube de puntos de cada escaneado, con su correspondiente valor de reflectancia, a través del software iQscene. Finalizándose con la unión de cada una de ellas, en un mismo sistema de coordenadas planas.

Tras la obtención de las ortoimágenes, se inició un proceso minucioso de rectificación del barrido fotográfico ortogonal, realizado a cada lienzo. Cada foto, que describe el mínimo detalle, se ajustó al modelo bidimensional de la nube de puntos, pieza a pieza, hasta obtener una imagen ortofotográfica del conjunto. De cada fotografía se utilizó sólo las zonas centrales. El proceso se hizo en pequeñas unidades diferenciales, y el apoyo fotográfico se realizó según las diferentes piezas y planos que presenta su superficie, en base a su perímetro y a la geometría que describen los motivos ornamentales en la ortoimagen.

Se rectificó mediante el software ITPimagen, gestión y transformación de imágenes. Esta aplicación permite realizar todo tipo de operaciones sobre imágenes digitales. Está diseñada especialmente para las necesidades de los proyectos de topografía, ingeniería civil, arquitectura y arqueología.

Para corregir la deformación utiliza una transformación proyectiva con cuatro métodos posibles de interpolación: vecinos cercanos, bilineal, bicúbica y Lagrange.

Posteriormente, con software de tratamiento de imágenes se corrigieron las pequeñas discontinuidades en elementos volumétricos y las correcciones radiométricas.

Las ortofotografías fueron insertadas en ficheros CAD a su correspondiente escala, con las secciones, la posición de cada diana de referencia y con una cuadrícula de 0.5 m. La resolución obtenida es de 300 ppi, con una definición métrica a escala 1/20, y en formatos imprimibles e: 1/10.

## Levantamiento tridimensional del dolmen de Menga en Antequera (Málaga)

Este trabajo ha supuesto para nosotros la utilización de diferentes metodologías para conseguir una documentación

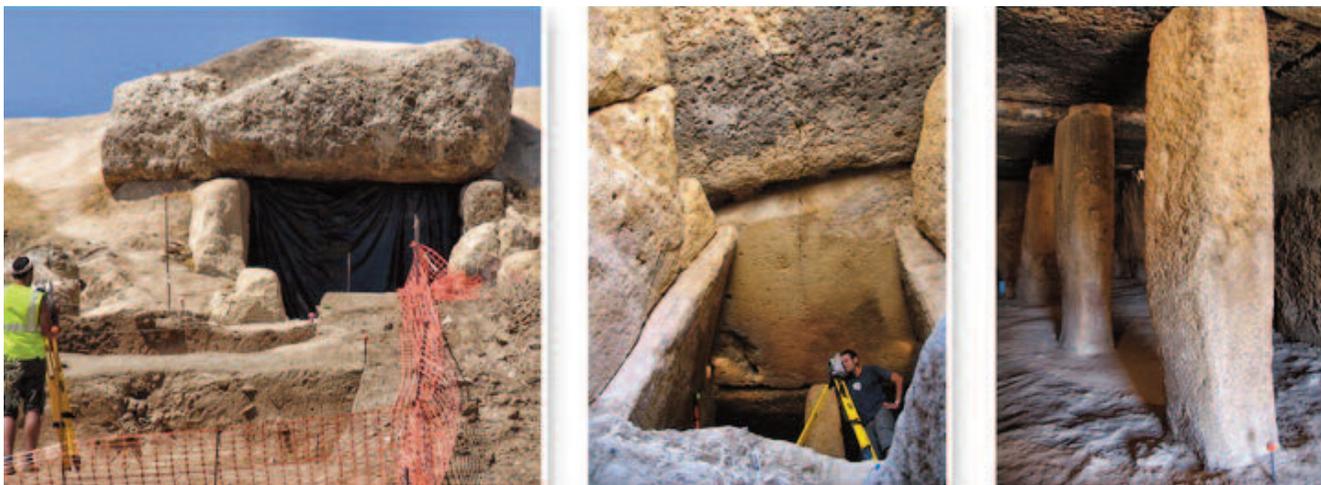


Fig. 10 Vistas generales del Dolmen de Menga en Antequera (Málaga). Fotografía: Víctor Baceiredo Rodríguez .

gráfica técnica lo más completa posible de este bien, tanto a nivel planimétrico, tridimensional, infográfico como divulgativo, abarcando desde su estudio global hasta el detalle cualitativo de cada superficie pétreo compositiva. Representa para nosotros un estudio integral gráfico que posee un desarrollo a fondo, y minucioso hasta obtener los modelos virtuales fotorealísticos, una infografía correcta y la generación de animaciones fidedignas.

El Dolmen de Menga, junto con el Dolmen de Viera y el Romeral, forman parte del conjunto arqueológico de los Dólmenes de Antequera en Málaga. El de Menga es un dolmen de galería cubierta y pudo ser construido en la Edad de Bronce, aproximadamente sobre el 2.500 a.C. Está compuesto por 24 ortostatos, de los cuales 20 forman las paredes y 4 la entrada, con una cubierta formada por 5 losas de gran tamaño, 3 pilares que sirven aparentemente de apoyo, un profundo pozo circular de 19,5 m. -ubicado al fondo, tras el último pilar -, y un gran túmulo artificial. Todo el conjunto tiene una longitud cubierta de 21,5 m, y una altura mínima de 2,66 m, resultando uno de los más interesantes de Europa.

Ante la escasa documentación planimétrica del bien, la dirección general de Bienes Culturales y la dirección del conjunto arqueológico, Consejería de Cultura de la Junta de Andalucía, decidió encargar la realización de una documentación gráfica que detallase minuciosamente el Dolmen de Menga y su entorno más cercano. A ello se sumaba la necesidad de reflejar en planos el avance y los resultados de las excavaciones que se estaban llevando a cabo, en el interior y exterior del dolmen, así como del registro detallado de los elementos constructivos compositivos.

Este proyecto se compone de un conjunto de trabajos cartográficos, planimétricos y de una exhaustiva infografía técnica, con los siguientes objetivos:

- Definir la geometría del Dolmen de Menga y su ubicación en el Recinto 1 (Dólmenes de Menga y Viera, junto con el Cerro denominado Marimacho), obteniendo unos planos a escala 1/1000 y 1/500.
- Desarrollo topográfico de detalle arqueológico del exterior del túmulo, mediante planos de secciones e:1/200 y de planta e:1/150 y 1/50
- Desarrollo planimétrico y morfológico de cada unidad compositiva y de la excavación arqueológica realizada en el interior y exterior del Dolmen, con planos de alzados y de planta a e:1/50 y 1/20.
- Realización de un levantamiento tridimensional y un conjunto de 16 videos en 3D, de carácter técnico y divulgativo, que muestran su ubicación en el entorno y de cada uno de los distintos elementos constructivos del dolmen (ortostatos, pilares, losas de cubierta y excavación), integrando en la imagen los datos técnicos, la topografía extraída y el texturizado real de cada pieza.

El proyecto final se ha presentado integrado en un portal digital multimedia que gestiona la visualización del reportaje fotográfico, el conjunto de planos realizados y el levantamiento 3D de la cartografía, sección del dolmen, de los alzados generales y de los elementos constructivos compositivos.

### Metodología

Con el fin de registrar una información topográfica completa del proyecto, se decidió utilizar la combinación de tres sistemas de trabajo distintos:

- 1.- Fotogrametría aérea para la cartografía del recinto 1 del conjunto arqueológico de los Dólmenes de Antequera.
- 2.- Topografía clásica y GPS para la obtención de bases

topográficas y el levantamiento de las zonas de los túmulos de los Dólmenes de Menga y Viera, junto con las catas arqueológicas realizadas en el exterior.

- 3.- Levantamiento mediante láser escáner, para obtener una base de datos de campo topográficos densa de las superficies de las piezas que lo componen, junto con la excavación interior en la base del Dolmen.

#### • Fotogrametría aérea

Se ha realizado el vuelo fotogramétrico a escala 1:3.000 a color, cubriendo con holgura el área de trabajo. Para obtener coordenadas de los puntos de apoyo y de las bases topográficas se ha efectuado la observación mediante sistema de posicionamiento global (G.P.S.), obteniéndose sus posiciones en el sistema U.T.M. Una vez obtenidas las coordenadas de los puntos de apoyo, se ha llevado a cabo el proceso de orientación digital de los modelos estereoscópicos de forma independiente. Para ello se emplea la estación digital DIGI. Se obtienen las coordenadas de los puntos de apoyo medidos y los elementos de orientación ( $X_0$ ,  $Y_0$ ,  $Z_0$ ,  $\omega$ ,  $\varphi$ ,  $\chi$ ) de cada una de las fotografías utilizadas.

El proceso de elaboración de los diferentes planos comienza a partir de las fotografías aéreas y los puntos de apoyo recogidos en campo que tras un proceso de restitución fotogramétrica daremos paso a la delineación de las curvas y detalles planimétricos. Con el fin de compatibilizar esta información se optó por un soporte para el levantamiento cartográfico en el entorno CAD, reflejándose su topografía mediante curvas de nivel cuya equidistancia es de 0.2 m y 1m para las curvas maestras.

Este primer documento gráfico aportó una visión global del recinto pudiendo ubicarse el Dolmen de Menga en su contexto.

#### • Levantamientos topográficos de detalle

Dando por hecho que la fotogrametría aérea no iba a definir con exactitud las zonas de arbolado, y necesitando una mayor precisión en los Túmulos de Menga y Viera se optó por hacer un levantamiento mediante topografía clásica con estación total, partiendo de coordenadas GPS obtenidas y radiando bases topográficas destacadas en algunas zonas. Se elaboró un levantamiento topográfico, con abundantes puntos, con una definición en el modelo digital del terreno de una equidistancia de 10 cm en las curvas de nivel.

#### • Escaneado láser

Para un registro completo del dolmen, en la toma de campo de la documentación milimétrica se hicieron 24 escaneados

en total, de los que 20 se realizaron en el interior permitiendo que todos los detalles de los ortostatos, losas de cubrición y el firme del suelo de la excavación interior fueran debidamente registrados. Con los restantes escaneados exteriores se consiguió registrar la topografía de los ortostatos situados en la entrada, así como parte de la geometría del túmulo y de la excavación que se estaba realizando frente a la entrada.

Por las características confinadas del proyecto, la distancia del equipamiento escáner a los puntos de referencia ha sido de escasos metros, por lo que el ajuste y posicionamiento del escáner dentro del sistema de referencia ha resultado muy preciso. La captura de la información, mediante la tecnología escáner láser terrestre, se ha realizado con una definición en la nube de puntos 3D mínima de 4mm, previa discriminación y filtrado de la información no necesaria.

#### • Levantamiento morfológico de las piezas que lo componen:

Para la creación de archivos CAD, se generaron secciones cada 1cm con el modelo a alta resolución, obteniendo un conjunto de planos, realizados en diferentes proyecciones con la morfología de las superficies de los ortostatos, losa de cubrición, pilares y la superficie del suelo de la excavación.

#### • Levantamiento tridimensional:

Una vez extraída la documentación de campo, se comenzaron las siguientes fases para el levantamiento tridimensional del dolmen.

- Filtración: se realizó una depuración de puntos obtenidos, con vista a poder filtrar y reducir la información. Con ello se evitó la superposición de puntos, la saturación de datos en zonas específicas, la eliminación de puntos externos a la zona de actuación, y un recálculo de puntos por zonas. Todo ello resultaba necesario para que se lograra una correcta poligonización en la siguiente fase del trabajo. Finalmente se dividió la información por sectores o zonas.
- Poligonización: filtrada toda la información, se procedió a la creación de los poligonizados, a través de una triangulación. En esta fase hubo una exhaustiva corrección de la teselación, a fin de evitar vértices, aristas y caras repetidas o abiertas, sellando todos los huecos existentes, y corrigiendo la dirección de las normales. Posteriormente se procedió a la reducción de polígonos de cada modelo, sin llegar a la pérdida de formas y detalles,

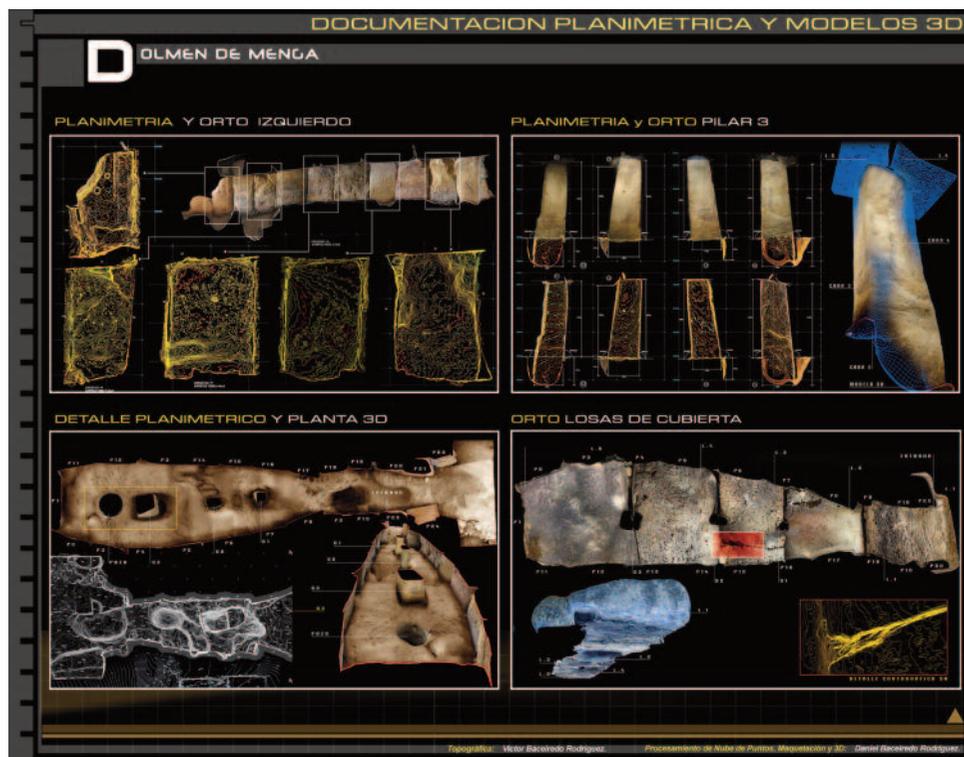


Fig. 11 Documentación planimétrica y vistas 3D del Dolmen de Menga. Infografía: Daniel Baceiredo Rodríguez.

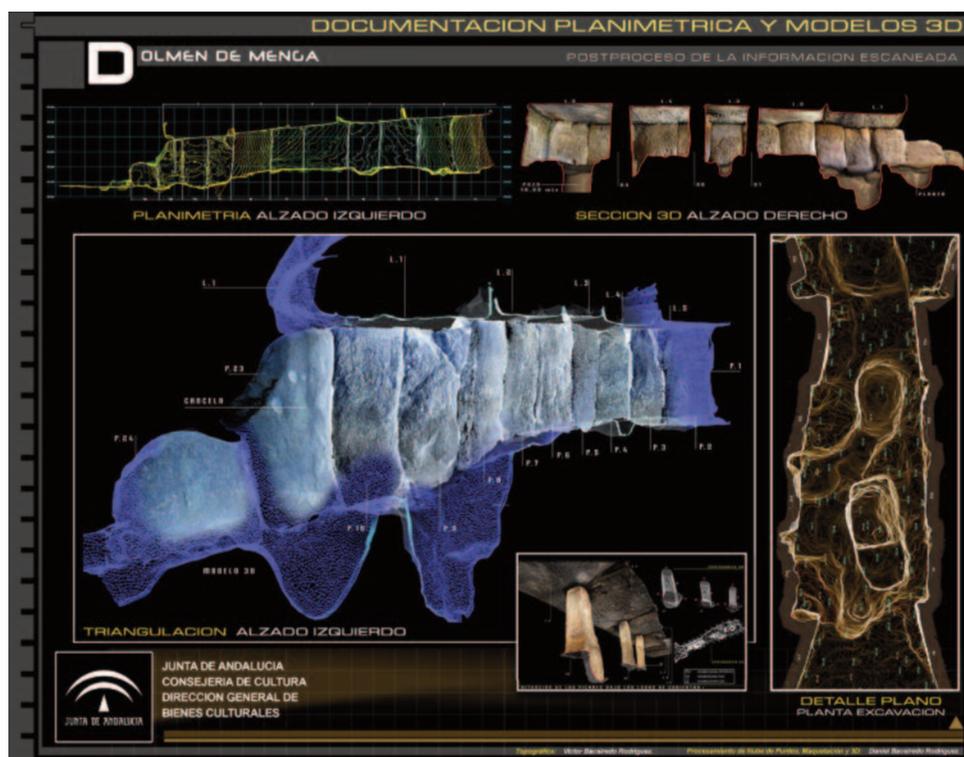


Fig. 12 Documentación planimétrica y vistas 3D del Dolmen de Menga. Infografía: Daniel Baceiredo Rodríguez.



Fig. 13 Encaje de la textura sobre el modelo. Infografía: Daniel Baceiredo Rodríguez.

142



Fig. 14 Modelo 3D fotorealístico del alzado derecho del Dolmen de Menga. Infografía: Daniel Baceiredo Rodríguez..

facilitando el manejo de esta pesada documentación. Cuadrangulizamos cada objeto en la medida de lo posible, para evitar la triangulación, procediendo a corregir las posibles aristas angulares, con vistas a mejorar el posterior proceso de renderizado.

Fue importante la realización de dos tipos de poligonizado. Uno dirigido a obtener digitalización vectorial, como los curvados morfológicos, secciones, etc., y otro para obtener infografías técnicas 3D. La primera se elaboró con la mayor información de nube de puntos posibles obteniendo un curvado lo más exacto posible del bien y de gran definición. La segunda se realizó a baja teselación obteniendo modelos 3D menos densos facilitando con ello el manejo de su tratamiento sin llegar a perder información o evitando la deformación de la volumetría y del detalle. De esta forma se consiguió, con archivos de salida menos pesados, el tratamiento a un texturizado real y a gran resolución, con un mayor aporte de realismo y veracidad a la documentación 3D técnica.

- Texturizado: la nube de puntos a color no da la definición suficiente para observar infografías técnicas 3D del detalle requerido, por lo que optamos por un soporte de imágenes externas al escáner para un texturizado sólido y de calidad real. Con la recopilación de las fotos ortogonales obtenidas de cada parte que componen el Dolmen, se procedió a la rectificación fotográfica, la corrección digital, se igualó las propiedades de la imagen en iluminación, formatos y tamaños; consiguiéndose una visualización más ajustada de las distintas texturas.

Se efectuaron proyecciones para la manipulación de los vectores U y V de la imagen, a fin de situar los vértices de texturas en la posición correcta en cada modelo 3D.

- Renderizado y postproducción: una vez texturizado, procedimos a la animación y creación de recorridos de cámaras. Los videos tienen una velocidad de 25 fps y resolución HD (1920 x 1080). Por último los resultados pasan por una fase de postproducción para la correcta composición de cada capa: textura, morfología, luz, sombras, oclusión, etc., insertando títulos, logos o banners, cortinillas y datos técnicos. Los formatos de salida fueron avi, quicktime (mac) o dvd.

## Conclusiones

En estos tres proyectos arquitectónicos, hemos ofrecido tres planteamientos distintos en la explotación de la información procedente de la tecnología laser escáner terrestre, que a su vez poseen una directriz común que permite el continuo estudio de la información. En los tres ha habido un proceso concienciado en obtener un material de calidad métrica y gráfica, con unos productos dirigidos a la propia divulgación técnica científica, y con formatos de salida manejables. Los tres ejemplos, tienen líneas de trabajo abiertas a obtener nuevos resultados con la información generada y plantean la posibilidad de gestionar documentalmente bienes del patrimonio arquitectónico a escalas presupuestarias distintas.

Agradecimientos a la colaboración prestada por las empresas INERTEK y APLITOP en la realización de estos proyectos.

## Bibliografía

R. WOLF PAUL, D. GHILANI CHARLES, (1997). "Adjustment Computations: Statistics and Least Squares in Surveying and GIS". Wiley-Interscience.

C. GONZÁLEZ RAFAEL, E. WOODS RICHARD (1992): Tratamiento digital de imágenes, Ed. Addison-Wesley/Diaz de Santos.

LERMA GARCÍA J. L. (2002): Fotogrametría Moderna: Analítica y digital. Ed. Universidad Politécnica de Valencia.

# ImaginArte. Aplicación de tecnologías 3D en museos y espacios singulares

Julio Ruiz García

j.ruiz@itma.es

144

## Curriculum

Doctor en Bellas Artes. Becado por la Full Bridge en USA, para estudiar las técnicas holográficas en Holographic Labs NY, San Francisco holographic School, Lon Moore lab( San Francisco), Lake Forest University, Rubén Núñez Lab NY. Asesoramiento en la aplicación de los hologramas “embossing” del Euro para la F.N.M.T. y para el pabellón de España en holografía en la Expo 92.

## Resumen

En el proyecto “ImaginArte” utilizamos las técnicas de formación de imágenes tridimensionales para obtener réplicas de las piezas de nuestro rico y variado patrimonio, incluyendo algunos de los principales hallazgos arqueológicos. El propósito de este proyecto es no sólo combinar la belleza de las piezas con el gran impacto visual que aportan las técnicas más vanguardistas sino también evaluar éstas como herramienta útil en la investigación científica.

Hasta la fecha hemos trabajado en el Museo Arqueológico Nacional de Madrid (MAN) y en algunas cuevas prehistóricas asturianas. Se ha demostrado que en los museos pueden ser muy útiles las recientes técnicas de holografía digital y realidad virtual.

En particular, esta última ha sido reconocida por los investigadores del MAN como una herramienta que sin duda será especialmente eficaz en trabajos de investigación. La holografía analógica, sin embargo, ha resultado particularmente útil en la realización de grandes ventanas de imágenes tridimensionales en los espacios de hasta 100 metros de profundidad de algunas cuevas asturianas donde hemos trabajado. Las técnicas de escáner tienen aplicación en ambos ámbitos: en los museos para confeccionar un valioso archivo en 3D que sirva para evaluar cualquier cambio en las piezas y su posterior restauración; en las cuevas para realizar réplicas de espacios que bien por su falta de accesibilidad o la necesidad de mantener determinadas condiciones ambientales deben permanecer cerrados. Por último, hay que señalar que las primeras pruebas para adaptar estas imágenes a la televisión en 3D han resultado alentadoras y sugieren que esta técnica puede ser útil para divulgar los resultados de este proyecto.

## Abstract

In the “ImaginArte” project we use the techniques of three-dimensional image formation to obtain replicas of the pieces of our rich and varied Heritage, including some of the major archaeological finds. The purpose of this project is not only to combine the beauty of the pieces with the great visual im-

pact provided by these innovative techniques, but also to evaluate them as valuable tool in scientific research.

To date we have worked in the National Archaeological Museum (NAM) of Madrid and some prehistoric caves of Asturias. It has been shown that in museums can be very useful the recent techniques of digital holography and virtual reality. In particular, virtual reality has been recognized by researchers at the NAM as a tool that will no doubt be especially effective in scientific research. Analog holography, however, has proved particularly useful in carrying out large windows of three-dimensional images in spaces of more than 100 meters deep of some Asturian caves where we have worked. Scanning techniques have applications in both areas: in museums as a valuable tool for obtaining 3D archives to assess any change in the pieces and their subsequent restoration, in the caves to make replicas of spaces that by lack of accessibility or by the need to maintain certain environmental conditions must remain closed. Finally, we note that the first trials to adapt these images to 3D TV are encouraging, suggesting that this technique can be useful to diffuse the results of this project.

## Introducción

El registro de las características tridimensionales del espacio y los objetos que contiene de manera que posteriormente y en cualquier lugar podamos reconstruir una imagen tridimensional del mismo ha constituido un continuo desafío. Desde mediados del siglo XIX en que se hicieron las primeras fotografías estereoscópicas se han investigado distintos procedimientos para reproducir una sensación de la percepción del volumen lo más parecida posible a la realidad.

Es ahora y de la mano de las nuevas tecnologías, cuando podemos tener una representación fiel de un espacio tridimensional. “ImaginArte” es la primera experiencia realizada en España en donde distintas técnicas de realidad virtual, holografía, escáner y televisión en tres dimensiones se utilizan simultáneamente con el fin de obtener imágenes tridimensionales de alta resolución y archivos de gran precisión que pueden ser utilizados como medios de divulgación o de estudio por parte de los conservadores de los museos.

La Fundación del Instituto Tecnológico de Materiales (ITMA), en el proyecto “ImaginArte”, integra distintas técnicas tratando de obtener archivos de imágenes tridimensionales con la mayor precisión posible. Las técnicas utilizadas son:

- Holografía analógica
- Holografía digital
- Escaneado en 3D y Modelización Digital Tridimensional (MDT)

- Técnicas de realidad virtual (VRs)
- Televisión con y 3D sin gafas (con la colaboración de la empresa Manterola)

Es evidente que es necesario realizar un estudio previo de las características de cada espacio o pieza para determinar la técnica que puede resultar más adecuada. Además el empleo de estas técnicas siempre va acompañado de la toma de fotos de alta definición con el material más moderno que sirve de material auxiliar y como técnica complementaria en los casos en que ninguna de las demás son aplicables.

En “ImaginArte” se pretende mostrar la belleza de las piezas, potenciándolas en toda su magnitud y ofreciendo tanto al público como al conservador la posibilidad de descubrir detalles de las obras desde ángulos y bajo aumentos en los que estas no podían apreciarse anteriormente. Así la utilización de estas técnicas, permitirá a los Museos no solo disponer de unas imágenes atractivas visualmente sino también utilizar estos archivos como una herramienta fundamental en la conservación y restauración de las piezas.

Este proyecto aglutina la experiencia de un equipo multidisciplinar, compuesto por expertos en fotografía y bellas artes, físicos, químicos e ingenieros. El objetivo es no sólo combinar la belleza de las piezas con el gran impacto visual que aportan las técnicas más vanguardistas sino también evaluar éstas como herramienta útil en la investigación científica.

## Holografía analógica

La holografía descubierta en 1947 y que le valió el premio Nobel en 1971 a su descubridor Dennis Gabor, no se utiliza en los museos debido a lo complejo de sus procedimientos. La necesidad de trabajar siempre en la oscuridad y con el aislamiento de cualquier mínima vibración que produzca un cambio del orden de una micra durante la realización de un holograma, han limitado la utilización de esta técnica al laboratorio. Los museos se han mostrado reacios a transportar las piezas a estos laboratorios y correr con los gastos de los seguros y los riesgos del transporte. Sin embargo, desde 1998 un grupo del actual ITMA trabaja en el desarrollo de nuevos protocolos de trabajo que permiten realizar los hologramas en el lugar donde se encuentra la pieza.

La resolución requerida en los medios de registro en esta tecnología está muy por encima de cualquier otra. En algunos hologramas es necesario registrar alrededor de las 10.000 líneas/ mm. Esta elevada resolución es también la causa de que por el momento no se pueda trasladar este tipo de imágenes por pantalla de TV, puesto que la cantidad ingente de información no se puede comprimir lo suficiente como para tener una imagen de calidad en tiempo real.

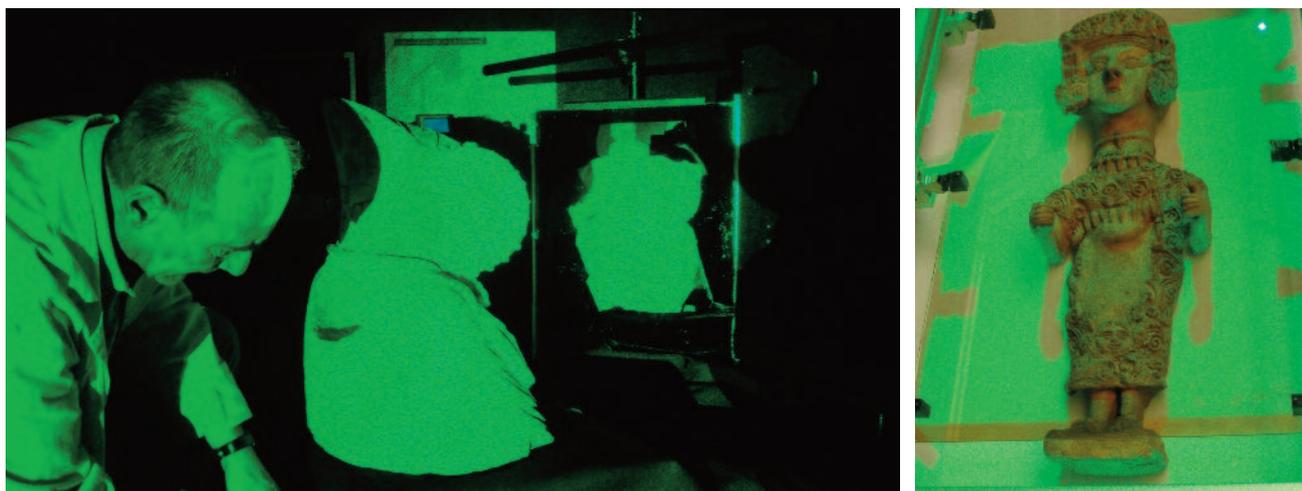


Fig. 1 Fotografías de la realización de un holograma de transmisión de la Dama de Elche y de un holograma de reflexión de la Dama de Ibiza.

La resolución requerida en los medios de registro en esta tecnología está muy por encima de cualquier otra. En algunos hologramas es necesario registrar alrededor de las 10.000 líneas/mm. Esta elevada resolución es también la causa de que por el momento no se pueda trasladar este tipo de imágenes por pantalla de TV, puesto que la cantidad ingente de información no se puede comprimir lo suficiente como para tener una imagen de calidad en tiempo real.

La utilización de esta nueva tecnología, nos permite conseguir imágenes holográficas de un tamaño del orden 1 m y en el color real, algo inabordable hasta el momento a grandes tamaños en la holografía tradicional.

Otro aspecto fundamental para valorar la utilización de esta nueva técnica en el archivo de imágenes de nuestro patrimonio, es que se realiza en dos etapas. En la primera se realizan una serie de fotografías con diferente perspectiva (entre 200 y 1.200 fotografías con un duración entre 12 y 60 minutos, respectivamente) y en la segunda se utilizan estas fotografías para realizar los pequeños hologramas que componen el holograma final. Así la primera etapa se puede realizar en el museo en cualquier condición de iluminación y sin necesidad de aislamientos antivibratorios. La segunda etapa se realiza con el láser en el laboratorio.

146

## Holografía digital

La moderna holografía digital supone un cambio considerable en los principios y requisitos de la holografía convencio-



Fig. 2 Preparación de las tomas en dos hologramas digitales.

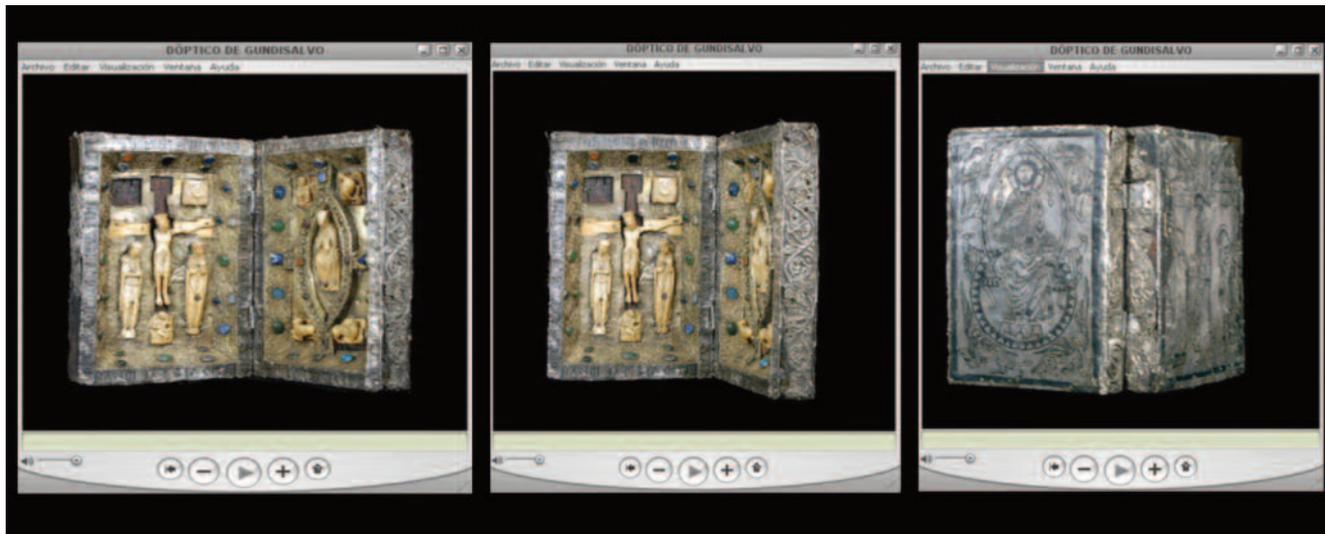


Fig. 3 Visión desde diferentes ángulos de un díptico preparado para poder incluirlo en la web.

El resultado es similar a un holograma de reflexión tradicional, con la diferencia de que en este caso la resolución es menor. Aquí la resolución nos la da el holo-píxel, resultado de la proyección de 3 imágenes RGB concentradas en un spot de unos 0,8 mm de diámetro.

## VRs

Una VR de un objeto permite verlo desde una gran variedad de ángulos y puntos de vista. La imagen se puede rotar y mover en la dirección y a la velocidad que necesitemos, y empleando un zoom, acercarse para verlo con todo detalle.

Se realiza una serie de secuencias de fotografías de la pieza a diferentes niveles. En cada secuencia se efectúa un recorrido de 360° en un plano horizontal alrededor de la pieza (entre 72 a 144 fotografías en función de la suavidad del movimiento que queramos dar a la imagen final). Así será posible tener una visión completa del objeto ya que podremos observarlo desde cualquier punto equidistante del centro del objeto.

Una de las ventajas de esta técnica es que la información puede ser colgada en la web aunque obviamente el tamaño final del documento aumenta proporcionalmente con el número de secuencias. La calidad de la imagen, sin embargo, depende del tipo de reconstrucción, web o presencial. En la web, el programa utilizado podría ser el conocido Quick Time. En la reconstrucción que llamamos presencial, por ejemplo en un museo se puede utilizar una pantalla de Full HD. En este caso, la imagen puede tener una mayor definición, permitiendo alcanzar por medio de la herramienta de

zoom y con un software realizado específicamente para este fin un gran aumento con una definición notable. El control se puede realizar con el ratón o por medio de una pantalla multi-táctil.

## Escáner en 3D

Desde el momento en que los arqueólogos comienzan a catalogar las estructuras y piezas encontradas en los yacimientos es necesario definir con precisión la forma y el tamaño de los objetos. Por ello tiene una gran relevancia el poder realizar una representación fiel de este patrimonio mediante modelos digitales tridimensionales con exactitudes que en este caso pueden llegar a unas pocas micras. Para lograr estos modelos 3D se utilizan escáneres de última generación que captan la información tridimensional mediante el uso de la luz, ya sea luz láser o luz blanca. Los resultados obtenidos son fieles a la realidad, lo que hacen de esta herramienta el apoyo ideal para catalogar, replicar o restaurar cualquier pieza.

Nuestro departamento de óptica y electrónica del ITMA cuenta con un escáner modelo SmartSCAN3D-HE, de luz blanca estructurada de la compañía Breuckman para la digitalización sin contacto de piezas de patrimonio.

Dado que al utilizar formatos de alta definición, tanto en el caso de las VRs, como en el caso del scanner, cuando las piezas son muy grandes, los archivos que se generan tienen gran tamaño también es necesario elegir la resolución con la que se va a trabajar. La resolución depende también del medio de representación final (a través de la web o directamente en la pantalla un monitor de un museo).



Fig. 4 Toma por scanner de luz blanca estructurada.

148



Fig. 5 Realización de un escáner de la Dama de Baza en el MAN.

## TV 3D auto- estereoscópica

La revolución que está produciéndose en el mundo de la televisión con la incorporación de la imagen 3D tras el fenómeno AVATAR, supone un cambio total en los conceptos de realización y grabación de contenidos, ya que ahora muchos de los telespectadores demandan emisiones y contenidos en 3D. La falta de contenidos en este formato presenta un claro problema, ya que el paso a este formato mediante adaptaciones de las grabaciones realizadas en 2D, no resultan tan convincentes como las realizadas y pensadas desde un inicio en 3D.

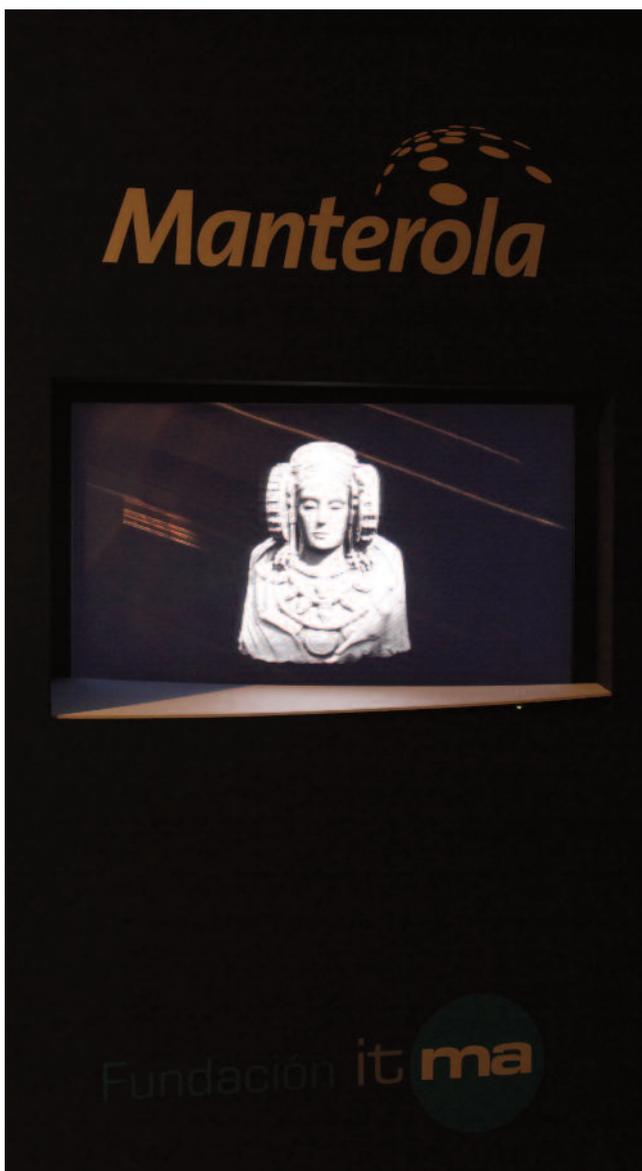


Fig. 6 Imagen tridimensional de la Dama de Elche incorporada a una TV autoestereoscópica.

Cuando se planteó el proyecto ImaginArte y ya antes del fenómeno AVATAR, consideramos la realización de tomas de algunas de las piezas para adaptarlas a las futuras TVs de 3D. Para incorporar nuestras imágenes en 3D a estas pantallas partimos de la toma realizada por el scanner y de las secuencias en las Vrs. Así disponemos de una gran variedad de planos y de distintos ángulos. La combinación de los dos tipos de imágenes mediante un software, nos permite poder determinar la distancia de la imagen al plano de la pantalla (fuera o dentro). En nuestro caso las imágenes 3D están pensadas para ser vistas en televisiones auto-estereoscópicas. A diferencia de las técnicas que hay actualmente en el mercado, basadas tanto en gafas pasivas polarizadas como activas, no necesitan ningún tipo de gafa lo que permite en el caso de su utilización en los museos ser vistas por varios espectadores a la vez sin necesidad de gafas. No obstante, hay que señalar que esta tecnología permite, mediante un simple cambio de parámetros, la aplicación y utilización de estas imágenes tanto en pantallas auto-estereoscópicas como con gafas.

## Fotografía HD

Ya se ha mencionado que el empleo de estas técnicas tridimensionales fue acompañado con la toma de fotografías de alta definición con el material más moderno. Con la intención de ofrecer un legado gráfico de alta calidad en donde, texturas, formas y colores adquieran un protagonismo desconocido en anteriores documentos fotográficos, la realización de cada una de estas tomas y especialmente de las piezas que no podían ser trasladadas, supuso un meticuloso estudio de iluminación de manera que no se pudieran realizar más de 2 o 3 piezas por día. Se realizaron distintas tomas, con diferentes grados de zoom, para ver la totalidad y algunos detalles de la pieza. En algunos casos estas fotografías se realizaron aprovechando la iluminación empleada para realizar las VRs.

El equipo utilizado en estos trabajos fue una cámara Phase One con respaldo digital P45+. Para cada toma se realizó un equilibrio de color mediante la carta de ColorChecker 24. Esto nos permitió un posterior ajuste del balance de blancos y equilibrio de color en función de la temperatura de color de la iluminación utilizada.

### Peculiaridades de los espacios donde se ha trabajado

#### a) Museo Arqueológico Nacional (Madrid)

La realización de las obras en la calle Serrano, en el exterior del museo, y las de remodelación en el propio museo durante



**Fig. 7** En la realización de los hologramas analógicos las dificultades se debieron a la necesidad de aislar el recinto de la luz, y especialmente a las vibraciones producidas por las obras de la calle Serrano frente al MAN.

la realización de este trabajo han supuesto la mayor dificultad en la obtención de los hologramas analógicos a causa de las vibraciones. Aunque se ha intentado hacer todos los hologramas que se habían planeado, sólo fue posible realizar los del tipo de reflexión con piezas relativamente pequeñas como la Dama de Ibiza o los cuencos de Astroki. Para estos hologramas se construyó un montaje especial con un aislamiento antivibratorio. Además, como en esta técnica es necesario trabajar a oscuras, fue necesario aislar una zona del museo con una cortina opaca a la luz.

Otra dificultad es que sólo se pudo trabajar durante los lunes (día en que el MAN cierra al público) para no interferir con la actividad normal del museo. Esto supuso, además de un aumento del presupuesto, que cada lunes se consumieran unas cuatro horas en el montaje, desmontaje y puesta a punto de los equipos. No obstante, en parte se pudo subsanar ese problema ya que la dirección del museo nos permitió prolongar el horario normal de trabajo ese mismo número de horas. Para aprovechar el tiempo se organizaron varios grupos de trabajo con lo que se simultanearon varias técnicas. Cada grupo trabajó en una zona del museo distinta para evi-

tar la interferencia de las distintas iluminaciones y en algunos casos se intercambiaron las piezas para minimizar el tiempo de las obras fuera de las urnas.

#### b) Cuevas prehistóricas

La aparición de láseres DPSS, con tamaños reducidos y gran potencia a finales de los 90 nos permitió pensar en salir del laboratorio para realizar hologramas de espacios de considerable profundidad como son las cuevas prehistóricas. Hay que señalar que una de las ventajas de los hologramas analógicos realizados con estos láseres es que la profundidad de las imágenes puede alcanzar hasta unos 100 m mientras que en los hologramas digitales es como máximo del orden de 1 m.

Se decidió empezar por una cueva situada cerca de nuestras instalaciones en Asturias. Esta conocida como la cueva de Tito Bustillo contiene algunas de las pinturas rupestres con más de 20.000 años de antigüedad, a la vez que unos espacios realmente bellos, tanto por su configuración como por los elementos geológicos que alberga.



Fig. 8 Preparación iluminación de holograma de campo profundo. Cueva Tito Bustillo.

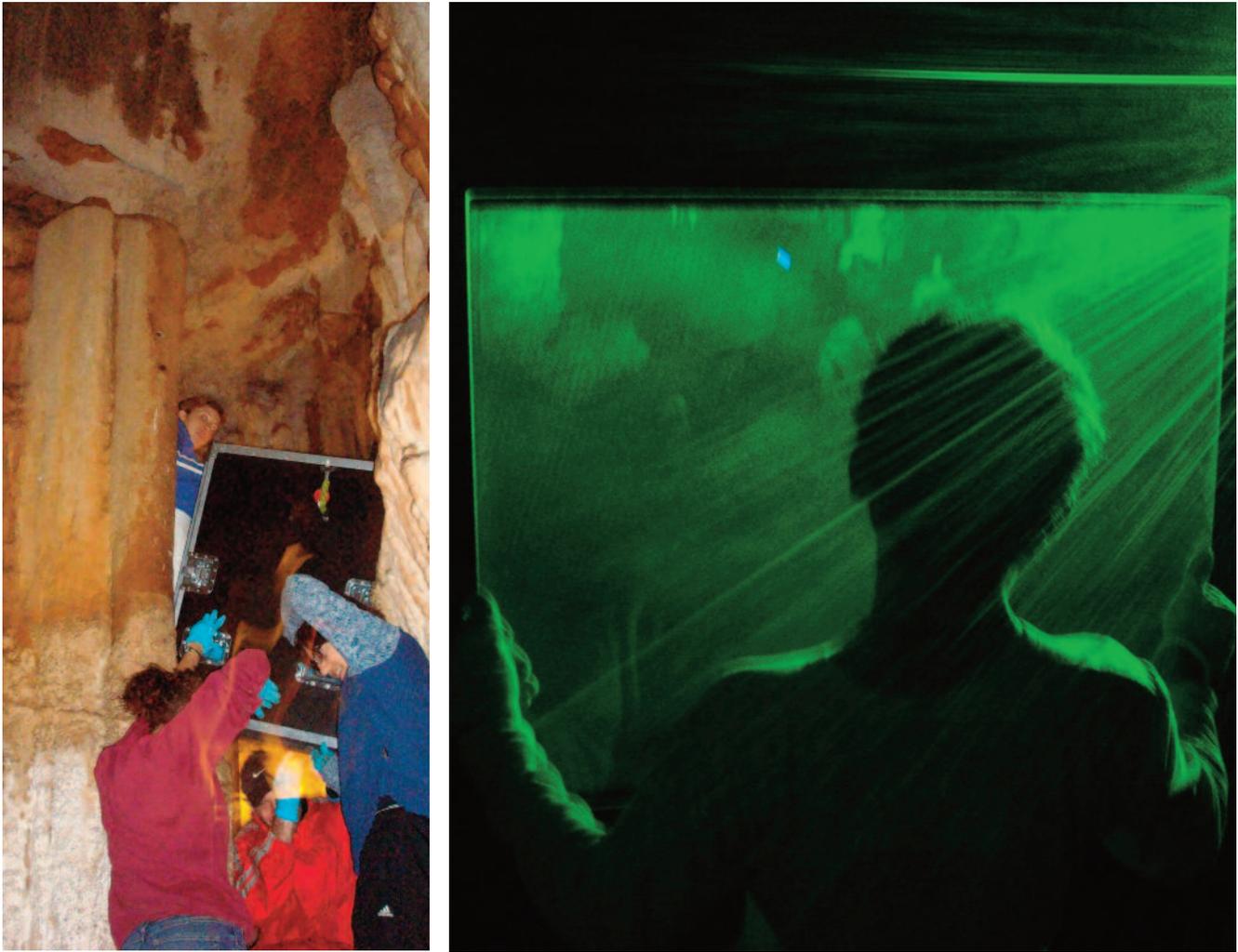


Fig. 9 Traslado de los equipos en la cueva y reconstrucción de una imagen holográfica



Fig. 10 Cueva de Candamo.

Antes de trasladarnos a la cueva se realizaron distintas pruebas con distintos esquemas ópticos en los sótanos de nuestro centro de investigación. Los resultados de estos experimentos nos permitieron diseñar los protocolos de trabajo.

También se han obtenido hologramas de gran profundidad en la cueva prehistórica de Candamo. En esta cueva se han realizado además hologramas digitales de algunas pinturas rupestres.

## Conclusiones

Durante nuestra actuación en el MAN (septiembre 2009-febrero 2010) y en algunas de las cuevas asturianas, Tito Bustillo (2004) y Candamo (2008), a raíz de la exposición de una muestra de las imágenes en el propio museo (junio 2010) y de su exhibición en otros lugares (Asturias, y Barcelona 2010) se han recogido las opiniones de una gran cantidad de personas interesadas en este proyecto. Aunque los puntos de vista son muy diversos se puede concluir que:

1. En los museos el mayor interés se centra en las imágenes obtenidas con las técnicas de realidad virtual. De forma unánime, esta técnica se ha reconocido no sólo como un buen método de divulgación sino también como una herramienta que será especialmente eficaz en trabajos de investigación.
2. Algunas de las imágenes de la holografía digital han suscitado también un alto interés y admiración especialmente por el público durante las exposiciones. Hay que señalar que las imágenes obtenidas con esta técnica son pioneras y que todavía hay que corregir algunas cosas para mejorar los resultados.
3. Los hologramas analógicos son difíciles de obtener fuera del laboratorio. Sin embargo con un montaje adecuado similar al empleado en el MAN es posible obtener imágenes de elevada calidad de objetos pequeños (hasta unos 30 o 40 cm). Son especialmente adecuados las piezas monocromas de oro o terracota.
4. El mayor interés de holografía analógica ha sido la realización de grandes ventanas (80 cm de anchura) de imágenes tridimensionales en los espacios de hasta 100 metros de profundidad de algunas cuevas asturianas donde hemos trabajado. Estas imágenes que provocan una gran admiración pueden ser observadas por varias personas simultáneamente. Se ha apuntado que este tipo de hologramas podría ser utilizado también en la realización de cualquier otro gran espacio monumental, como puede ser el interior de las Catedrales.

5. Las técnicas de escáner tienen aplicación en los museos para confeccionar archivos en 3D. Estos archivos sirven para evaluar cualquier cambio en las piezas y en su posterior restauración. También sirven para realizar replicas de espacios como las cuevas que por su falta de accesibilidad o la necesidad de mantener determinadas condiciones ambientales deben permanecer cerradas.
6. Cuando se utilizan formatos de alta definición, tanto en el caso de las VRs, como en el caso del escáner y especialmente cuando las piezas son muy grandes, los archivos que se generan tienen gran tamaño. En estos casos será necesario elegir la resolución con la que se va a trabajar. La resolución depende también del medio de representación final (a través de la web o directamente en la pantalla un monitor de un museo).
7. Las primeras pruebas para adaptar una combinación de las imágenes de realidad virtual y escáner a la televisión en 3D han resultado alentadoras. Su combinación y sugieren esta técnica como un método para divulgar a gran escala este tipo de imágenes.

## Equipo ImaginArte

- Escáner: Luis Rovés
- Fotografía y VRs: Santiago Relanzón
- TV 3D: Samuel Menéndez
- Holografía analógica y digital: Julio Ruíz y José Antonio Quintana
- Desarrollo del Software y postproducción: Bernardino Ruiz y Pablo de Arquer
- Dirección: Julio Ruíz

# Valorización, difusión y estandarización de la documentación geométrica del patrimonio

Jorge Angás Pajas

Scanner Patrimonio e Industria, Spin-Off Universidad de Zaragoza.

j.angas@3dscanner.es

154

## Curriculum

Doctorando del departamento de Ciencias de la Antigüedad de la Universidad de Zaragoza, ha desarrollado su investigación sobre documentación geométrica del patrimonio cultural con diversas estancias en la Università degli Studi di Siena (Italia) y en el Service Régional de l'Archeologie de la Region Midi Pyrénées (Francia).

Asimismo desde el año 2005 es el director técnico de la Spin Off de la Universidad de Zaragoza Scanner Patrimonio e Industria y de la empresa Tecnitop, además es miembro del grupo de investigación "Primeros Pobladores del Valle Medio del Ebro".

En los últimos seis años ha desarrollado múltiples proyectos de aplicación del láser escáner 3D, fotogrametría y topografía en industria, ingeniería civil y patrimonio tanto en territorio español como en el extranjero.

## Resumen

Durante los últimos años han surgido nuevas técnicas de documentación geométrica aplicadas al patrimonio cultural. Éstas han supuesto toda una revolución científico-divulgativa dentro de los campos de la arquitectura, el arte y la arqueología.

La utilización de estas herramientas han permitido la reproducción exacta, además de detallada, de cualquier estructura mueble o inmueble y sus posteriores análisis morfológicos. No obstante, la carencia de estándares o procesos normalizados, tanto en el desarrollo como en la gestión de los modelos tridimensionales, ha producido un menor aprovechamiento de todos sus recursos.

Dentro de estas nuevas técnicas destinadas a la documentación del patrimonio destaca la aplicación del láser escáner 3D. A través de la información generada por esta herramienta se obtiene un modelado 3D totalmente exacto y preciso del original, del cual se pueden realizar una gran cantidad de análisis posteriores para optimizar el conocimiento y la documentación del monumento. Esta técnica permite afrontar nuevos enfoques metodológicos gracias a la creación de bases de datos 3D.

## Abstract

During the last few years, new techniques for geometric documentation applied to Cultural Heritage have been developed. These techniques have triggered a scientific and non-specialized revolution in the fields of Architecture, Art and Archaeology. The use of these tools has allowed for the

precise and detailed reproduction of all kinds of personal and real property and their subsequent morphological analysis. However, the lack of a standardized or normalized process, both in the development and in the management of three-dimensional models, has curtailed the widespread use of the available resources.

One of these new techniques focuses on the documentation of Cultural Heritage sites, which stand out from the rest, by applying a three-dimensional laser scanning technology. The information generated by this tool, a totally accurate and precise 3D model, makes it possible to carry out subsequent analyses that will increase the knowledge and the documentation of the monument. This technique enables to confront new methodological focuses through the creation of 3D databases.

## El problema del patrimonio: su heterogeneidad y sus métodos de documentación gráfica

La propia heterogeneidad del concepto patrimonio diversifica de una manera amplísima los métodos y técnicas destinados para su propia documentación métrica o no métrica. Se convierte de esta manera en el campo o disciplina más difícil de documentar debido a la gran cantidad de variables que intervienen en su configuración. Podríamos distinguir dos disciplinas completamente diferentes, si hablamos por ejemplo de la documentación de una fachada arquitectónica y la documentación de una excavación arqueológica. En cada uno de estos ejemplos intervienen unos factores conceptuales diferentes relacionados directamente con un método diverso, que derivará a múltiples resultados postprocesuales. Asimismo, deberían intervenir en todos ellos un conjunto de recomendaciones que en base a una experiencia adquirida determinasen, para cada caso, un conjunto de normas o procedimientos definidos en unos estándares básicos. La determinación de estos, garantizaría la aplicación de un procedimiento científico, y lo más importante permitiría su propia verificación, integrando del mismo modo un conjunto de información asociada (metadatos) fundamental para la perdurabilidad e interoperabilidad de los datos registrados.

Pensamos que la utilización del conjunto de técnicas e instrumentación debe ser empleada como medio y no como un fin. En muchas ocasiones, se ha generado un desequilibrio en proyectos de documentación geométrica donde el porqué, cómo y cuándo han sido sustituidos directamente por infografías suficientemente mediáticas. Si bien, el carácter didáctico de estas últimas es indiscutible deberían de entenderse como resultado de un proceso científico-divulgativo, realizando una optimización de todos los recursos utilizados en el propio proceso de documentación geométrica.

Resulta curioso observar como a finales del siglo XVIII encontramos esta misma disyuntiva entre la representación métrica y no métrica del patrimonio. En este caso el protagonista es el autor de la traducción de la obra de Vitruvio “Los diez libros De Architectura”, José Ortiz y Sanz, intentando normalizar un sistema de representación, de los cánones de Vitruvio, “que niegue el valor poético de las ruinas” (Vitruvio, 2007: 27). Realiza de manera empírica un acercamiento a la tipología para comprender con mayor precisión los problemas conceptuales que plantea la obra vitruviana.

De este modo Ortiz y Sanz, defiende un modo de representación basado en unos cánones geométricos, criticando las ilustraciones “pintorescas” que plasmaban los viajeros y anticuarios en los libros de viajes “ya que las imágenes están excesivamente animadas por los golpes de claro y oscuro del pincel” (Ortiz, Viaje arquitectónico, op. Cit., p. IV). En el prólogo de Delfín Rodríguez indica las normas que habría que seguir para la representación arquitectónica, describiendo “Se han de tomar geoméricamente las plantas y alzados de todos los edificios antiguos... enteros o en ruinas...” (Vitruvio, 2007: 26-27). En la actualidad podríamos trasladar con cierta cautela este debate metodológico de finales del S. XVIII a la problemática presente como metáfora conceptual entre la representación geométrica y la puramente infográfica. Sin embargo, resulta indiscutible afirmar que todos aquellos dibujos idealizados de finales del XVIII que realizaban los viajeros, han contribuido, si bien idealizados, de una manera u otra a documentar un sinfín de escenas y monumentos de un patrimonio cultural hoy posiblemente ya perdido.

Gracias a la documentación del patrimonio cultural a través de la tecnología láser escáner 3D se consigue un elemento clave en la fiel representación y caracterización de cualquier elemento patrimonial. Además, de un verdadero archivo documental geométrico del yacimiento totalmente reproducible diacrónicamente como base documental, utilizándose igualmente como herramienta de control de cualquier tipo de alteración en su morfología.

Sin embargo, la escasez de estándares o procesos normalizados que incluyan procesos relacionados con la geometría, resolución empleada, datos arqueológicos o arquitectónicos, tanto en el desarrollo como en la gestión de los modelos tridimensionales, ha derivado en un menor aprovechamiento de todos sus recursos a posteriori. Si bien encontramos algunas recomendaciones básicas en ICOMOS, y alguna carta específica sobre visualización de la información tridimensional como la Carta de Londres ([www.londoncharter.org](http://www.londoncharter.org)) y más recientemente la Carta de Sevilla.

Respecto a la problemática de fijar una normalización del método, Valle Melón (2007:155) lo solventa en una síntesis sobre el “establecimiento de unos criterios de organización y estanda-

rización de los resultados de la documentación geométrica del patrimonio”. Todo ello debe suponer un avance en la gestión de la información obtenida, alejándonos de aquella etapa que únicamente se enumeraba minuciosamente la instrumentación y metodología utilizada para cada proyecto, sin intentar establecer una metodología normalizada para cada proyecto.

## Un largo camino historiográfico en la documentación del patrimonio

Desde la prehistoria uno de los objetivos del ser humano ha sido representar el medio del que forma parte. Esa representación nos sirve hoy en día como documentación del medio y tiene una concordancia directa con el entorno. Por ello en muchas ocasiones carece de significado si la extraemos del medio donde fue realizado y del que forma parte. De este modo, en la labor actual de documentar, habría que entender el propio concepto de documentación, intentando incluir todos aquellos elementos indispensables para comprender desde una perspectiva global el medio físico donde se integra.

Uno de los ejemplos más notables, es el caso del Canto de Abautz (Navarra), este canto datado en el periodo Magdaleniense (13.660 calBP) representa a través de micrograbados diversos zoomorfos así como el entorno inmediato donde fue hallado (Utrilla, Mazo, Sopena, Martínez-Bea, Domingo, 2009: 99-111). Resulta un ejemplo excelente para explicar el doble valor que posee un objeto mueble arqueológico hallado dentro de su contexto cultural. Por un lado, sin duda, es el ejemplo más antiguo conocido de representación cartográfica del hombre del paleolítico en un objeto mueble, del medio físico que habita. Por otro lado, este mismo útil carecería de significado si hubiese sido privado del contexto cultural al que pertenece. Tiene por ello una relación directa con el conjunto de cultura material, unidades estratigráficas y medio físico donde fue hallado. De estos últimos datos de contextualización arqueológica podemos establecer un paralelismo conceptual, relacionándolos como los diversos metadatos de la representación del entorno que incorpora el propio canto. Estos metadatos constituyen la parte fundamental que explica, el cómo, dónde y cuándo fue configurada la propia representación del medio. Carecer o ignorar esta información codificada, descontextualiza el objeto y deriva en un desaprovechamiento casi total de toda la documentación que hace falta transmitir. No hay duda que la perdurabilidad e interoperabilidad de la información va a ser uno de los campos de aplicación y desarrollo en los próximos años. Aunque sin duda, no existe comparación posible respecto al soporte que pueda asegurar una perdurabilidad, como el ejemplo de Abautz, de casi 14.000 años.

Resulta ineludible hablar de estándares aplicados al patrimonio y no mencionar la obra de Vitruvio y los principios que recomienda en todo monumento: ordenación, disposición, eutritmia, simetría, decoro y distribución (en griego economía). Esta última relacionada con la ecuanimidad y equilibrio en el que debe ejecutarse cada proyecto (Vitruvio, 2007: 8-9).

Existen otros factores que en base a nuestra experiencia interfieren en la documentación geométrica del patrimonio. La relación que existe entre todos ellos configura en muchas ocasiones dificultades de gestión y organización de la propia documentación. Los factores conceptuales se corresponderían con la base de una pirámide donde apoyan el resto de agentes. Si no existe una idea clara del porqué debe realizarse un proyecto, mediante un conocimiento y una posterior comunicación (Forte 2006:23-40), difícilmente podemos generar una metodología específica del proceso, y aún más difícil podremos apostar por una tecnología u otra que se adapte a nuestra metodología de trabajo. La tecnología en los últimos años ha recorrido un camino totalmente diacrónico a la metodología actual, carente de una vertebración y normalización. Todavía más, la tecnología ha incidido en una moda de la sociedad actual en la que muchas ocasiones hemos sido arrastrados por una tendencia, sin especificar el objetivo científico. Otros factores, comunes a cualquier proyecto, son los económicos y los políticos, en base a la adecuación de los recursos disponibles y a la selección de un monumento patrimonial en vez de otro en base a criterios políticos.

Un último apartado relacionado con la propiedad intelectual ha resurgido en los últimos años, debido a la ley de protección de datos, difuminando muchas veces las verdaderas competencias y límites entre ambas partes. Delimitar previamente el alcance, competencias y límites de la difusión mediante acuerdos de confidencialidad resulta una tarea imprescindible.

## Hacia una definición de las estándares básicos en la documentación del patrimonio

El propio proceso de normalizar o estandarizar se puede dividir en tres premisas básicas: UNIFICACIÓN, ESPECIFICACIÓN Y SIMPLIFICACIÓN. De esta manera creemos que para normalizar las dificultades de gestión y difusión que poseen los datos adquiridos por el escáner, es necesario apostar, en primer lugar, por la generación de aplicaciones compatibles con un software a nivel de usuario. Este hecho permite una simplificación de datos tridimensionales, además de conseguir complementar el binomio científico y divulgativo. Asistimos a una búsqueda cuya finalidad sea integrar un método que gestione de manera sencilla el registro tridimensional del patrimonio cul-

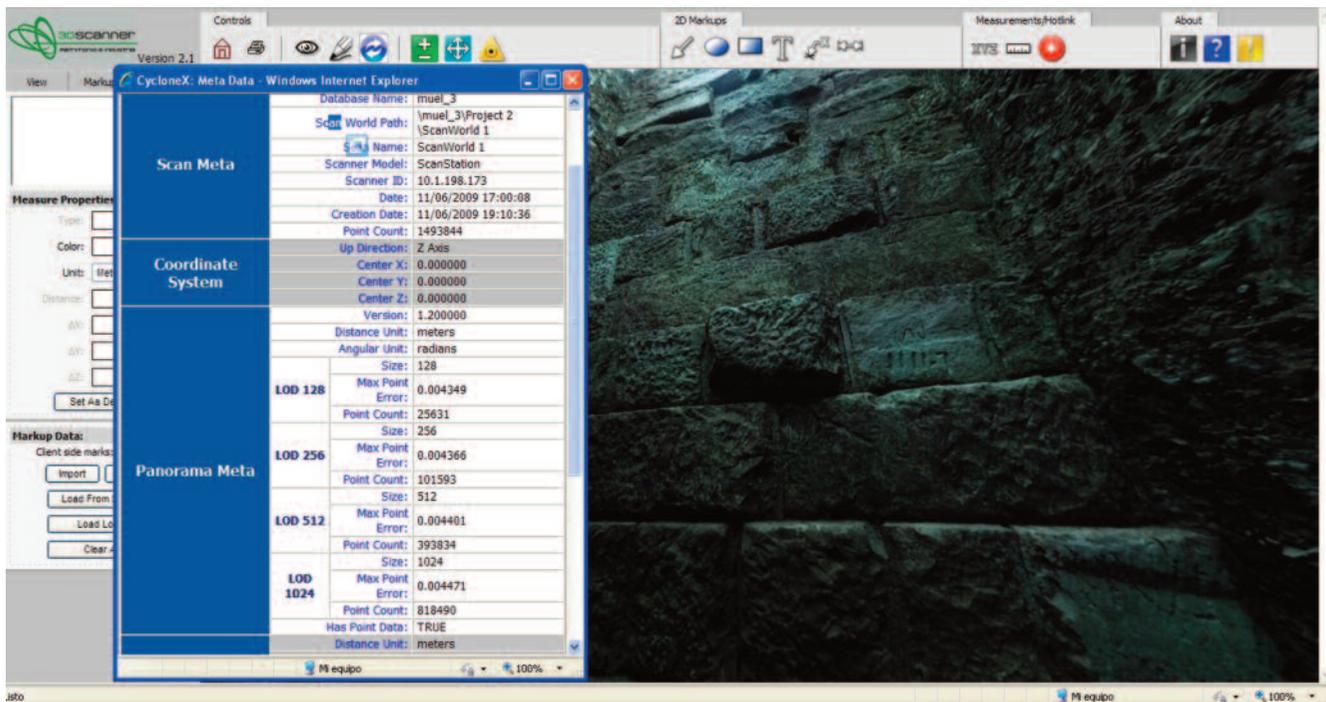


Fig. 1 Visualizador métrico del escaneado de una cata arqueológica en la presa romana de Muel (Zaragoza). Proceso de interacción de gestores sobre un entorno web vinculado con archivos xml editables con metadatos.

tural. Si bien esta idea de vincular modelos 3D con bases de datos bidimensionales no es nueva, en alguna ocasión ha sido realizada con éxito con el apelativo “democratizing the process of heritage conservation” como el ejemplo del barrio de Chinatown en Vancouver entre los años 2005-2007 desarrollado por la University of British Columbia (Canadá), a través de sencillas bases de datos del tipo Access o Filemaker que pudiesen ser consultadas de manera pública (Roecker, 2008: 345). Actualmente comprobamos la proliferación de softwares específicos que gestionan bases de datos relacionadas con la arquitectura con los famosos Building Information Modelling (BIM).

La interoperabilidad resulta fundamental en todo este proceso, entendiendo formalmente la capacidad para comunicar, ejecutar programas o transferir datos entre varias unidades funcionales relacionando los sistemas informáticos. El hecho fundamental es no buscar nuevas herramientas o programas de gestión, sino adaptarlas a las ya existentes, añadiendo metadatos semánticos y ontológicos a la llamada “web semántica”. Como ejemplo, existe toda una disciplina en línea de desarrollo, con el concepto de la utilización de los datos semánticos de la web 3.0, denominado Infraestructura de Datos Espaciales (IDE) o Space Data Infraestructure (SDI). Su objetivo es organizar y enlazar con otras IDE, en forma de servicios web, los metadatos y la gestión de archivos asegurando la interoperabilidad. Actualmente, su utilización, hasta el momento, es geográfica a través del Consejo Super-

rior Geográfico (<http://www.ideo.es>). De manera muy sucinta conviene definir este término, entendiéndolo como una red descentralizada de servidores que incluyen datos, atributos geográficos y topográficos, metadatos, métodos de búsqueda, visualización y valoración de los datos espaciales.

Existen cuatro puntos que hemos sintetizado, claves en la relación entre la asimilación de lo conceptual, su metodología, la elección del instrumental necesario y su posterior difusión cultural.

1. Registro del elemento patrimonial en su estado actual. Como resultado de la creación de un archivo documental geométrico en una fecha concreta. Aplicación de la metáfora conceptual del término industrial “as built” (véase apartado siguiente). Interactuación y comparación de procesos de registro relacionados con otras disciplinas INGENIERIA – INDUSTRIA – MEDIO AMBIENTE. Todo esto supone un nuevo lenguaje que nos permite registrar la realidad. Salvaguardando los anacronismos pertinentes con otras disciplinas exógenas (véase apartado 4) establecer puntos de contacto con otros sectores contribuye a la adquisición de una visión global en cómo organizar y gestionar la información. Intercambiar metodologías de trabajo para el ensayo de su viabilidad será uno de los objetivos en los próximos años, sobre todo a

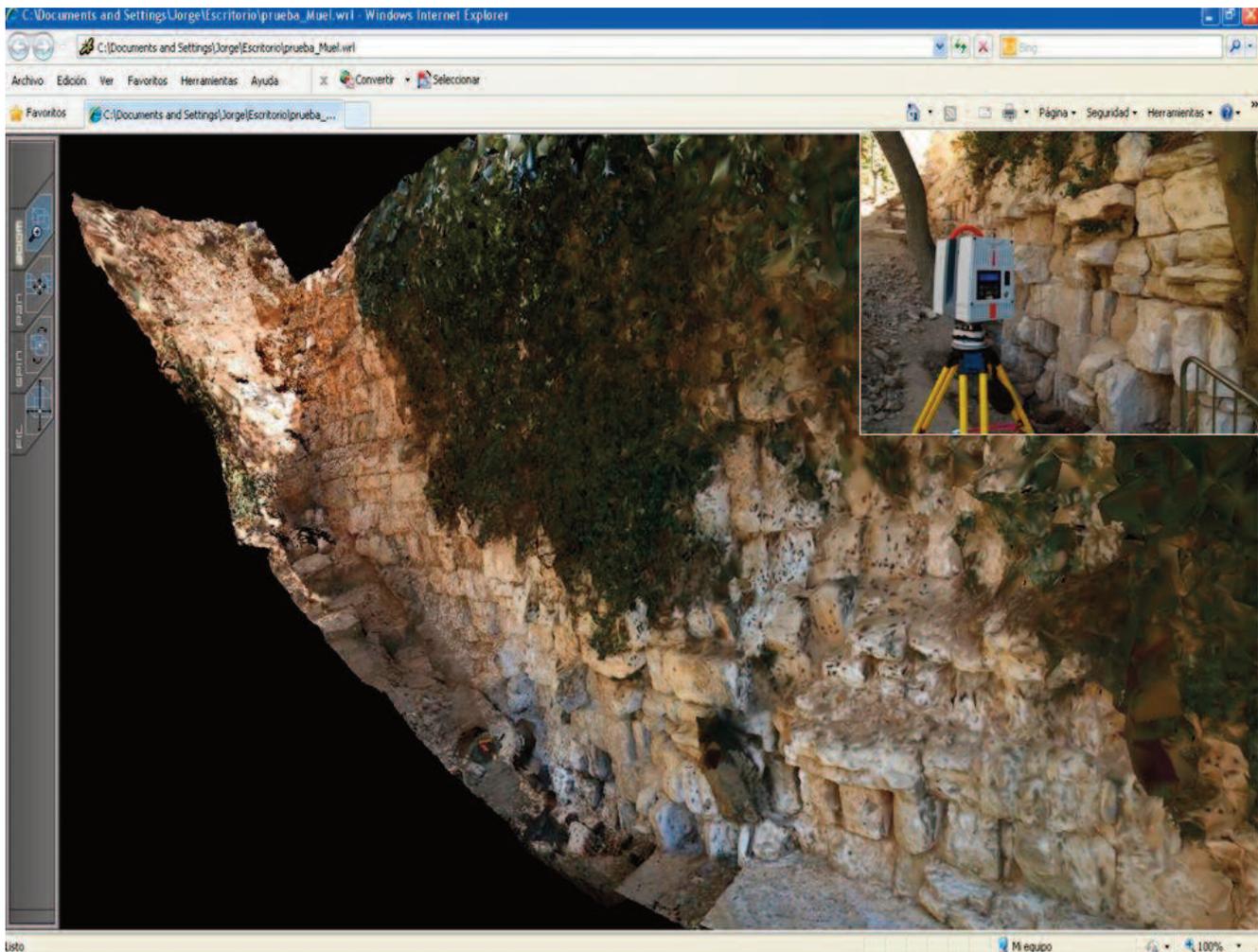
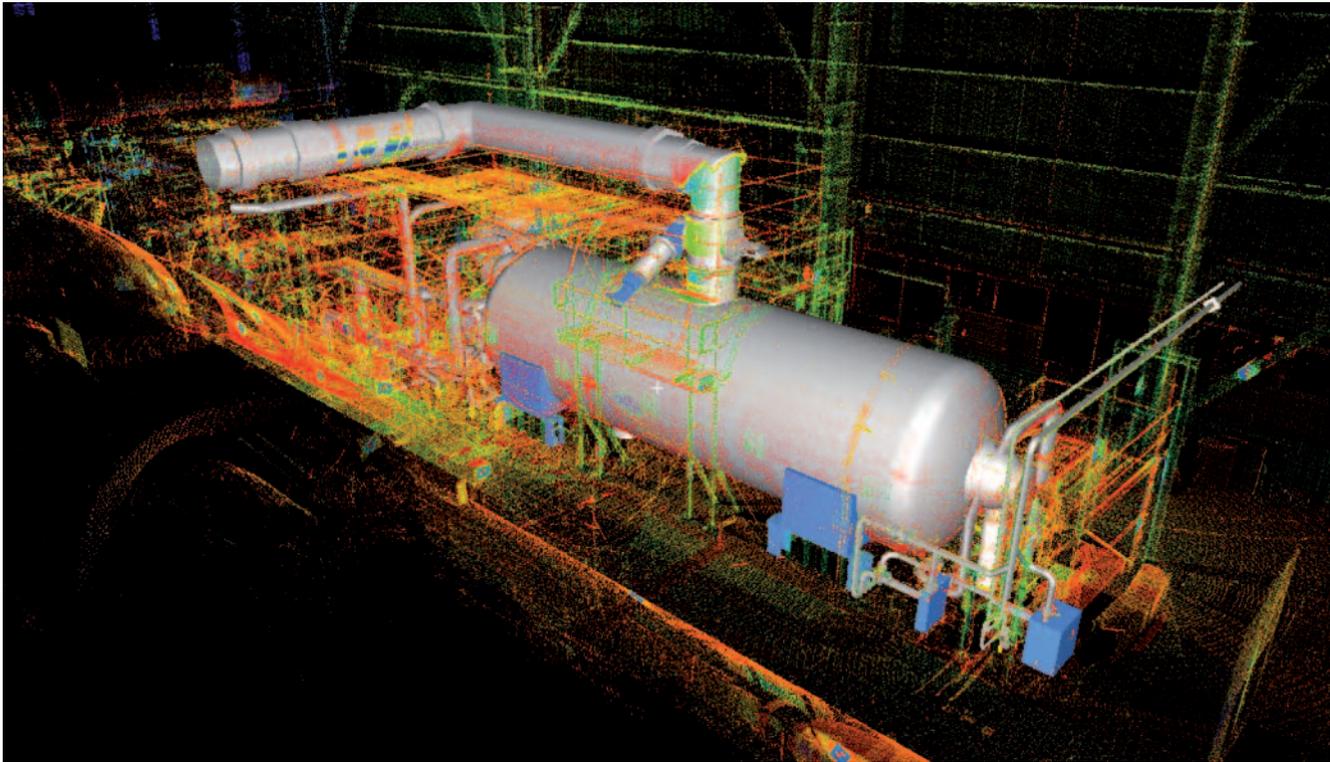


Fig. 2 Visualización de la presa romana de Muel (Zaragoza) en html mediante un formato de código abierto vrml.

2. Estandarización de procesos. Control de calidad y comprobación a través de procedimientos. Con ello se facilitaría la comprensión de la cadena de procesos que corroboran el resultado final, pudiendo analizar de manera individual cada uno de ellos.
3. Proceso de “democratización” de resultados 3D que proporcionen una difusión y divulgación y con ello una comprensión al gran público. Para todo ello existen ya congresos específicos dentro del campo arqueológico dirigidos hacia los formatos denominados de código abierto como el ArcheoFoss 2010. Open Source, Free Software e Open Format nei processi di ricerca archeologica in Foggia (Italia). Un ejemplo de ello es el software libre de procesamiento y edición de mallas tridimensionales desarrollado por el Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR) de Pisa denominado Meshlab.
4. Metodología interdisciplinaria en el proceso de estudio coordinada por un técnico o investigador principal, limitando de este modo la segmentación del proceso, que se traduce en una pérdida en la cadena informativa. La finalidad debe contribuir a la propia divulgación de toda esta información para que se creen los mecanismos necesarios y contribuya a un cambio conceptual, metodológico y finalmente instrumental. Un posible camino es la creación de bases de datos “democratizadas” a través de entornos web fácilmente configurables con diferentes grados de acceso, con el objetivo de alcanzar una mayor divulgación del monumento o yacimiento arqueológico de manera gráfica y, sobre todo, geométrica. Esto posibilita, de un modo rápido y preciso, la visualización de cualquier elemento o parte de su estructura. Así se logra un desarrollo combinado, que sirve para una mayor valorización y divulgación



**Fig. 3** Proceso de modelado en el sector industrial de una nube de puntos en reflectancia, adquirida mediante un láser escáner 3D de diferencia de fase, de un componente de una turbina.

de la información obtenida, además de contribuir al estudio científico interdisciplinar, resolviéndose los diferentes vacíos metodológicos y de conceptualización tridimensional.

### Métodos, técnicas de documentación y estandarización en otros sectores

En todo este cambio conceptual sobre el método de documentación del patrimonio, en muy pocas ocasiones se ha observado de qué manera resuelven esta problemática otros sectores. Resulta obvio señalar que cada profesional utiliza el método que mejor se adapta a las necesidades que persigue. Si utilizamos la tecnología láser escáner 3D observamos como la fase de registro es común en todas las disciplinas, registrando y analizando cualquier objeto o estructura en múltiples campos o disciplinas ya sean patrimoniales o no. Estos datos pueden estar relacionados bien con la documentación, conservación y restauración del patrimonio cultural (arqueología, arquitectura, paleontología), o bien conectados con otros sectores afines a la ingeniería inversa para generación de planos as built en industria u obra civil (Angás, Leorza, 2009: 39-43). El propio carácter interdisciplinar permite su relación

con otro tipo de aplicaciones pioneras relacionadas con estudios medioambientales, con el fin de predecir y controlar la erosión de suelos, documentación del paisaje mediante SIG, análisis espectrales de pinturas rupestres (Sebastian, Uriarte, Angás, Martínez-Bea, 2010), estudios de zonas de difícil acceso y estudios hidráulicos (Playan, Zapata, Burguete, Salvador, Serreta, 2010 28(3):245-256).

De este modo observamos como en muy pocas ocasiones ha existido una interacción con otros procesos de registro utilizados en otras disciplinas como la ingeniería, industria y el medio ambiente. De la ingeniería, por ejemplo, podemos extraer como metáfora conceptual el término industrial “as built”, como registro de lo real. En estos sectores existe una mayor estandarización de procesos que trascienden en un control y comprobación de la calidad del método, utilizándose de esta manera como principio de autenticidad del registro realizado.

A través de la información generada por esta herramienta se obtiene un modelo 3D del original totalmente exacto y preciso, del cual se pueden realizar una gran cantidad de análisis posteriores para optimizar el conocimiento y la documentación del monumento. Asimismo, esta técnica permite afrontar nuevos enfoques metodológicos gracias a la creación de bases de datos 3D. Existen ejemplos de aplicación industrial sobre los nuevos avances en la gestión y estandarización

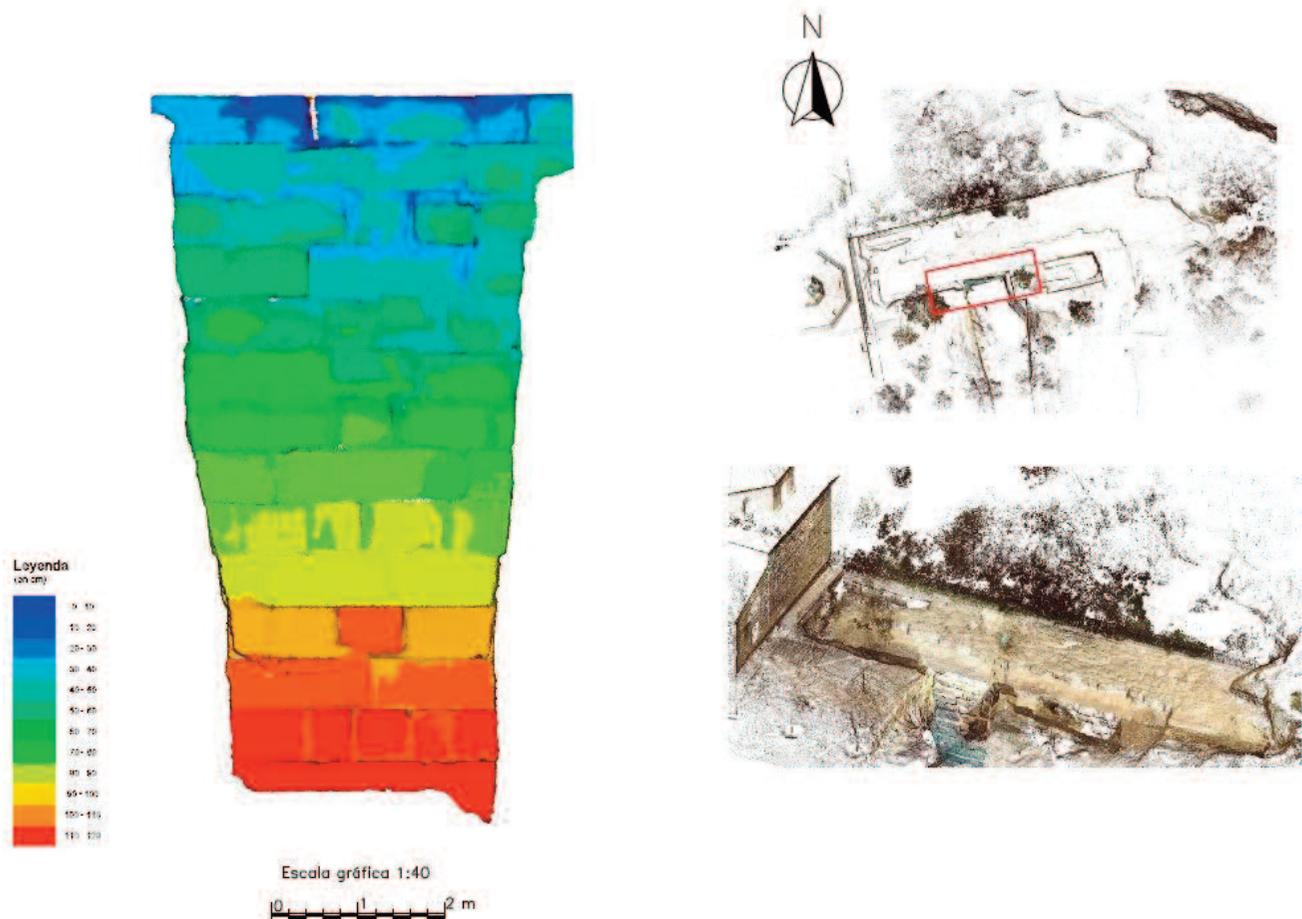
de información tridimensional adquirida mediante láser escáner 3D vinculada a bases de datos (Angás, Jordi, Pontes, Mach, Tarrasa, García, 2010: 58-61). Si analizamos muy sintéticamente la regulación de estándares en la industria, parte de los resultados y de las experiencias de las principales empresas del sector, podemos comprobar como gracias a las recomendaciones estipuladas por los organismos reguladores de cada país se establecen unos procedimientos específicos para cada tarea (Smith, Van Laan 1987: 17-39).

### Conclusiones para la organización de la información tridimensional

Un problema que se plantea es el trabajo de postproceso, estrechamente relacionado con las dificultades que existen a la hora de gestionar la información tridimensional. La aplicación de esta herramienta en el último decenio ha provocado

la aparición de otros conflictos en torno a la gestión de la información tridimensional que resumimos a continuación:

1. Almacenamiento de la información generada. Creación de un archivo documental para asegurar la perdurabilidad de la información, tanto del archivo bruto como de las sucesivas copias incrementales. Podemos distinguir en este apartado el archivo documental de la información original adquirida y las sucesivas copias con una resolución diferente o no al original, acorde con los objetivos y las capacidades informáticas disponibles en ese momento. Resulta por ello necesario estandarizar hacia formatos de almacenamiento genéricos tipo ASCII o similares de código abierto que garanticen una compatibilidad a largo plazo con cualquier software. Además siempre resulta necesario conocer toda la información contenida a través de plantillas de metadatos que expli-



**Fig. 4** Representación bidimensional de un mapa de elevación de una cata arqueológica de la presa romana de Muel (Zaragoza). Mediante este tipo de representación se detecta el desplome real del alzado.

quen y documenten del mismo modo el proceso de documentación, relacionándose de la misma manera con el proceso de almacenamiento.

2. Un cambio conceptual en los nuevos soportes digitales. La representación historiográfica de las diferentes vistas arquitectónicas: planta, alzado y sección, ha perseguido a lo largo de la historia un modo o intento de aparentar diferentes vistas isométricas jugando con la perspectiva. Actualmente se produce una incongruencia metodológica puesto que la información tridimensional que ahora ya si disponemos, la representamos de manera bidimensional. Únicamente buscando una captura de pantalla lo suficientemente sugerente para justificar el modelo tridimensional registrado. Esta incongruencia metodológica representa un largo camino hacia un cambio conceptual que resuelva la cultura

metodológica de la que somos herederos, introduciendo como posible solución los nuevos soportes digitales.

Para el control estructural de paramentos e inspecciones estructurales, existen como solución los mapas de elevación sobre un plano de referencia que representan cualquier posible desplazamiento de su estructura a través de una escala cromática relacionada con diversas tolerancias métricas (véase figura 4).

Intentar recoger y asimilar los continuos cambios tecnológicos actuales y aplicarlos correctamente desarrollando un método científico, para cada caso, al patrimonio cultural es una carrera continua que requiere un aprendizaje constante. Esta innovación tecnológica ha avanzado mucho más rápido que su propio aprendizaje y aplicación metodológica, sin un corpus procedimental que organice verdaderamente los procesos. Esta estandarización, nombrada en el apartado ante-

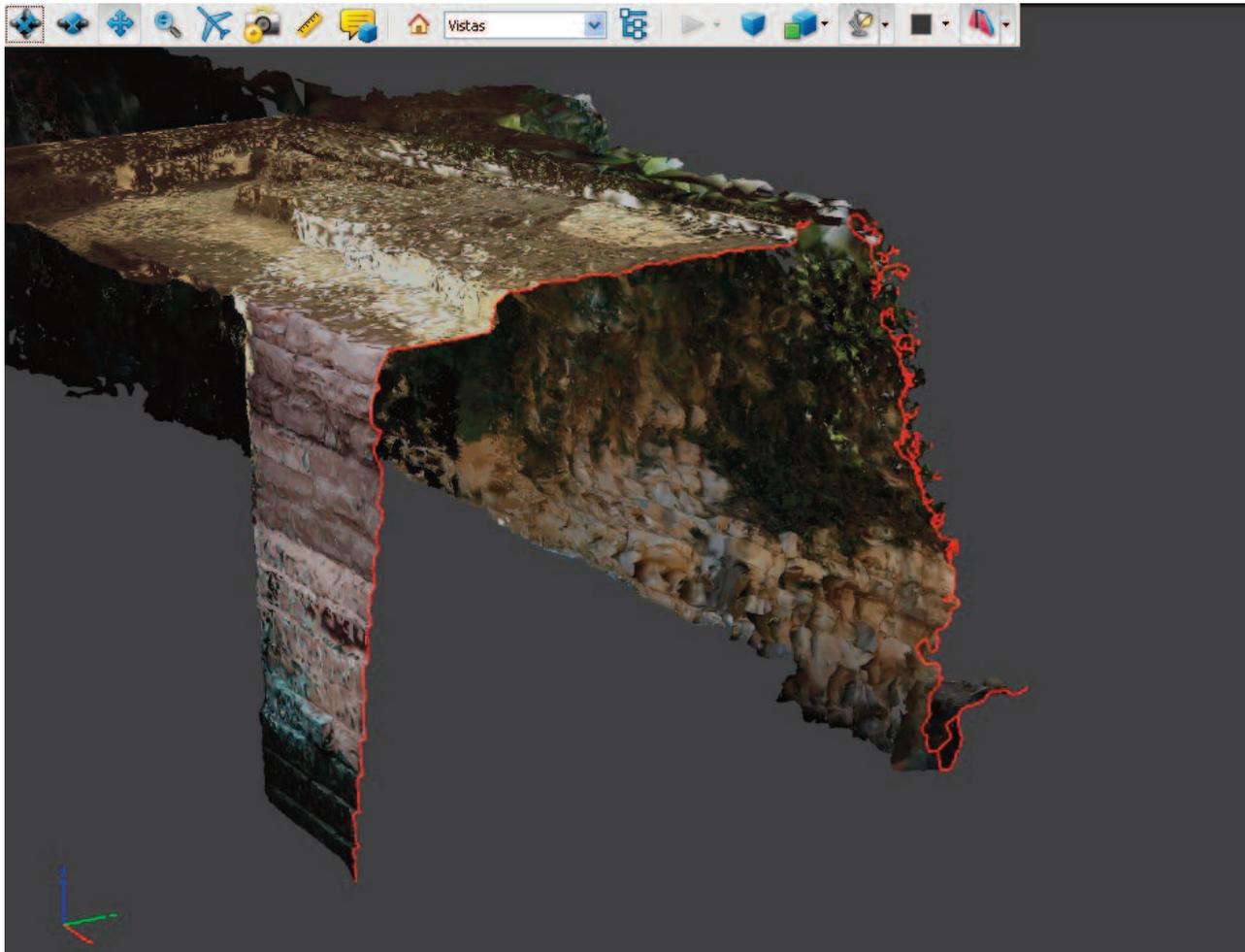


Fig. 5 Vista de la sección del modelo 3D mediante un formato pdf 3D. A través de este visualizador métrico de libre acceso se puede organizar la información en diferentes capas con secciones, integrándose como formato con un soporte digital.

rior, debería contar independientemente de la técnica utilizada con las siguientes premisas y el desarrollo de las mismas:

- 1 Unificación, facilitando en primer lugar, la integración de bases de datos compatibles con servidores web actualizables con diferentes escalas de acceso y edición.
- 2 Simplificación, con formatos comunes e intercambiables de software libre fácilmente comprensibles a nivel de usuario del tipo: \*.html, \*.pdf (3D), \*.U3D, \*.vrm, \*.skp, \*.stl, \*.xml. Contribuyendo a un fácil entendimiento y por consiguiente conceptualización de la información tridimensional con formatos fácilmente accesibles.
- 3 Especificación, a través de estándares que recojan las recomendaciones necesarias para la verificación de su geometría. El componente métrico en cada proyecto es fundamental, para poder obtener medidas y localizar coordenadas absolutas o relativas, como punto fundamental de partida para derivar el proyecto hacia alternativas infográficas, cumpliendo el binomio científico divulgativo, siempre partiendo del mismo archivo documental a través de un orden lógico de desarrollo.

162

Es importante no perder la referencia fundamental de establecer en cada proyecto unos objetivos bien definidos, y constituir un equilibrio entre tiempo, costes y escala de trabajo. Respecto a este último, resulta un factor determinante el tipo de escala aplicada en su representación y adecuación del proyecto al medio físico o virtual donde finalmente se va a representar. La relación entre la adecuación de la resolución y el tiempo de postproceso de los datos resulta directamente proporcional.

En conclusión, a modo de reflexión final, el carácter híbrido entre el conjunto de profesionales que se dedican a la documentación del patrimonio (arquitectos, ingenieros topógrafos, arquitectos, matemáticos, arqueólogos) debe ser una constante fija que apueste por un continuo aprendizaje e interdisciplinariedad que evite una segmentación del proceso de investigación, transmisión y difusión de la información en beneficio de la propia documentación del patrimonio cultural.

## Bibliografía

ANGÁS, J.; JARDI, X.; PONTES, A.; MACH, I.; TARRASA, F.; GARCÍA, M. (2010): "Determinación de elevaciones reales de tuberías para ANAV y CNAT mediante tecnología de escaneo láser 3D". *Revista de la Sociedad Nuclear Española*, 310, 58-61.

ANGÁS, J.; SERRETA, A. (2010): "Assessment, dissemination and standardization of geometric data recording of Archaeological Heritage obtained from 3D laser scanning". *Virtual Retrospect 2009*. CNRS Burdeos, 190-195.

ANGÁS, J.; SERRETA, A. (2010): "Valorización y difusión del patrimonio arqueológico mediante un entorno web 3D. Documentación de Santa María de Iguacel (XI D.C.) mediante láser-escáner 3D". *Virtual Archaeology Review (VAR)*, 1.

ANGÁS, J.; BEA, M.; ROYO, J. I. (en prensa): "Documentación geométrica mediante tecnología láser escáner 3D del arte rupestre en la cuenca del Matarraña (Teruel)". Seminario de documentación gráfica del arte rupestre. Cuadernos de Prehistoria (Yecla, Murcia).

ANGÁS, J.; LEORZA, R. (2009): "Tecnología láser escáner 3D", *Tecniberia*, 21, Madrid, 39-43.

CAMPANA, S.; FRANCOVICH, R. (2006): *Laser Scanner e GPS. Paesaggi archeologici e tecnologie digitali*, 1, Firenze.

FORTE, M. (2006): "Tra conoscenza e comunicazione in archeologia: considerazioni in margine alla terza dimensione", Campana S., Francovich, R. (Ed.) *Laser scanner e GPS. Paesaggi Archeologici e tecnologie digitali*, 1, Firenze, 23-40.

GUTIÉRREZ, F.; ANGÁS, J. (2009): "Documentación geométrica de la muralla romana en el nº 2-4 de la Calle Mártires de Zaragoza mediante escaneo láser 3D", *Kausis*, 95-102.

IAKOVLEVA, L.; PINÇON, G. (1999) : "Un habitat orné en abri sous-roche au Magdalénien Moyen, Angles-sur-Anglin (Vienne, France)". *Trabajos de Prehistoria* 56 (1), 41-52.

LODEIRO, J. M. (1995): aplicaciones de la topografía en la documentación arquitectónica y monumental, Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos en Topografía. Madrid.

MARTÍNEZ, M.; ANGÁS, J.; SEBASTIÁN, M. (2010): "Metodología", Martínez Bea, M. (Ed.) *Las pinturas rupestres del Abrigo de La Vacada (Castellote, Teruel)*, Monografías arqueológicas prehistoria, 43, Zaragoza, 33-41.

PLAYÁN, E.; ZAPATA, N.; BURGUETE, J.; SALVADOR, R.; SERRETA, A. (2010): "Application of a topographic 3D Scanner to irrigation research". *Irrigation Science*, 28(3):245-256.

RODRÍGUEZ, A.; VALLE, J. M.; LOPETEGUI, A. (2007): "Time transcendence, metadata and future utilization in 3D models of point clouds for Heritage elements". *Virtual Re-trospect*, 115-123.

ROECKER, I. (2008): "Democratizing the Process of Heritage Conservation, Research, and Practice: An Internet-based Knowledge Assembly and Visualization Tool", *Digital Media and its Applications in Cultural Heritage*, 341-355.

SEBASTIAN, M.; URIARTE, A.; ANGÁS, J.; MARTÍNEZ, M. (2010): "Documentación sistémica del arte rupestre mediante el análisis espectral del escaneado 3D de las estaciones pintadas de Aragón, España. El caso concreto del abrigo de La Vacada (Castellote, Teruel) y el Covacho del Plano del Pulido (Caspe, Zaragoza)". *Virtual Archaeology Review (VAR)*,1.

SMITH, P.; VAN LAAN, T. (1987): "Codes, Standards, and Regulations". *Piping and pipe support systems. Design and engineering*.17-39.

UTRILLA, P.; MAZO, C.; SOPENA, M. C.; MARTÍNEZ-BEA, M.; DOMINGO, R. (2009): "A paleolithic map from 13,660 calBP: engraved stone blocks from the Late Magdalenian in Abauntz Cave ( Navarra, Spain)". *Journal of Human Evolution*, 57, 99-111.

VALLE, J. M. (2007): *Documentación Geométrica del Patrimonio: propuesta conceptual y metodológica*. Tesis doctoral inédita. Universidad de La Rioja.

VITRUVIO, M. (2007): *Los diez libros De arquitectura*. Traducción y comentarios de José Ortiz y Sanz. Prólogo de Delfín Rodríguez Ruiz.

# Hacia una integración de los sistemas de documentación, información y gestión del patrimonio. Resultados y retos

## J. Finat Codes

Modelización, biomecánica y visualización avanzada del patrimonio, Lab 2.2, Edificio I+D, Parque Científico.

## F.J. Delgado del Hoyo

Modelización, biomecánica y visualización avanzada del patrimonio, Lab 2.2, Edificio I+D, Parque Científico.

## R. Martínez García

Modelización, biomecánica y visualización avanzada del patrimonio, Lab 2.2, Edificio I+D, Parque Científico.

## J.J. Fernández Martín

Laboratorio de fotogrametría arquitectónica, ETS de arquitectura de Valladolid

## J.I. San José Alonso

Laboratorio de fotogrametría arquitectónica, ETS de arquitectura de Valladolid

## J. Martínez Rubio

Laboratorio de fotogrametría arquitectónica, ETS de arquitectura de Valladolid

164

## Curriculum

D. Javier Finat Codes. Doctor en Matemáticas. Profesor de Visión y Geométrica Computacional de la ETS de Ingeniería Informática de la Universidad de Valladolid, Coordinador I+D del Clúster DAVAP (Documentación, Análisis y Visualización Avanzada del Patrimonio).

## Resumen

La integración de los sistemas de documentación, información y gestión del patrimonio afecta a procesos de gran com-

plejidad debido a la heterogeneidad de escenarios, técnicas, metodologías, herramientas y servicios a desarrollar por diferentes técnicos. El enfoque desarrollado por el cluster DAVAP [Documentación, Análisis y Visualización Avanzada del Patrimonio] propone una articulación entre los tres Sistemas mencionados referenciada a un modelo 4D actualizable a lo largo del ciclo de vida de la intervención [captura de datos, modelado, diseño, planificación, ejecución y seguimiento]. Todos los sistemas están referenciados a un único modelo actualizable; a partir de la aplicación de diferentes técnicas de levantamiento (fotogramétrico, láser, visión computacional) se superponen sobre este modelo diferentes capas [de forma similar a los Sistemas de Información Geográficos] de información.

## Abstract

The integration of the systems of Documentation, Information and Management of Cultural Heritage, affects highly complex processes due to the heterogeneous scenes, techniques, methodologies, tools and services to be developed by the different technicians. The approach developed by the cluster DAVAP (Documentation, Analysis and Advanced Display of the Heritage) suggests the articulation of the three systems referring to a 4D model that can be updated along the process of intervention (recording, modeling, design, planning, implementation and monitoring). All of the systems refer to an updatable model. Once different survey techniques are applied, different layers are overlapped on the model of information, in a similar way to the Geographical Information Systems.

## Un marco estructural

La gran heterogeneidad de objetos, la diversidad de herramientas y, de forma más específica, la complejidad de los objetos de patrimonio sobre los que se desea intervenir, plantea retos formidables para el desarrollo de una metodología común de utilidad para expertos y ciudadanos en general. La necesaria y creciente especialización ha dado lugar a una parcelación del saber que dificulta la comunicación entre expertos procedentes de diferentes áreas. La complejidad de los objetos de estudio y la diversidad de aspectos a considerar ha dado lugar a un consenso generalizado sobre la necesidad de desarrollar equipos pluridisciplinarios formados por expertos en diferentes áreas. La comunicación interna es ya un hecho en la mayor parte de los miembros de dichos equipos y ello ha dado lugar a una transferencia de conocimientos con mutuo enriquecimiento de conocimientos y habilidades, dando lugar a expertos multidisciplinares, capaces de hacer compatible y adaptar el conocimiento científico con la aplicación artesanal de modelos y técnicas más apropiados para el objeto. Sin embargo y en relación con la difusión y accesibilidad a los materiales, la mayor parte del trabajo realizado sigue siendo sólo accesible a los expertos que lo han desarrollado ó incluso tan sólo a las entidades que han financiado el trabajo, realizado en su mayor parte con fondos de entidades públicas o privadas sin ánimo de lucro. Ello condiciona la transferencia de conocimiento entre equipos multidisciplinares ya existentes, así como la puesta en valor de los activos patrimoniales a través de diferentes canales de difusión. En este trabajo centramos la atención en los aspectos que afectan al desarrollo de un esquema común que facilite la transferencia de conocimiento entre equipos multidisciplinares.

Una primera cuestión a resolver es el desarrollo de un soporte común para el conocimiento que pueda integrar los materiales disponibles, el procesamiento y análisis de dichos materiales y, por último, las intervenciones a realizar. Para ello, proponemos una articulación entre sistemas de documentación, de información y de gestión etiquetada como DIMaS [Documentation, Information and Management Systems], que pueden ser interpretados como componentes de una estructura común multipropósito. Con ello se pretende desarrollar una estructura que inicialmente permita incluir hechos y relaciones referidas al objeto; en una segunda etapa, dicha estructura debe facilitar que el análisis regresivo (a partir de la práctica sobre “hechos”) y constructivo (a partir de modelos o esquemas previos) puedan tener cabida y complementarse entre sí.

## Documentación híbrida

La documentación objetiva afecta al exterior y al interior de los objetos. Ello plantea desde el principio la necesidad de recurrir a diferentes técnicas que permitan capturar el objeto en diferentes rangos visible y no visible, asociados a la respuesta del objeto en un medio en relación con la emisión y captura de las señales producidas; este enfoque incluye la percepción humana, aunque en este caso, esté limitada por el rango en el que operan nuestros sentidos. Los datos capturados son preprocesados y representados a diferentes escalas. Un modelo geométrico proporciona un soporte para incorporar información procedente de otros sensores asociados a técnicas no-destructivas.

El trabajo desarrollado por el cluster DAVAP (Documentación, Análisis, Visualización Avanzada del Patrimonio) que incluye el LFA (Laboratorio de Fotogrametría Arquitectónica) y el Grupo MoBiVAP (Modelado, Biomecánica y Visualización Avanzada del Patrimonio) de la Universidad de Valladolid utiliza herramientas de modelado basadas en técnicas de fotogrametría y escaneos láser para la captura de datos.

La fotogrametría (obtenida a partir de información terrestre, aérea o satelital) proporciona un marco conceptual de referencia para el modelado 3D; a esta versatilidad responde el dictum de “Fotogrametría para todo”. A la vista de las facilidades y la ingente labor a realizar, este dictum podría ser complementado con “Fotogrametría para todos”, actualmente posible gracias a la especificación de una metodología y la disponibilidad creciente de un gran número de herramientas de bajo coste. Para que la documentación generada sea reutilizable es conveniente adoptar una metodología de amplio consenso (las reglas 3x3x3 de CIPA, típicamente) y especificar los metadatos correspondientes a la captura de información para facilitar la interoperabilidad posterior entre

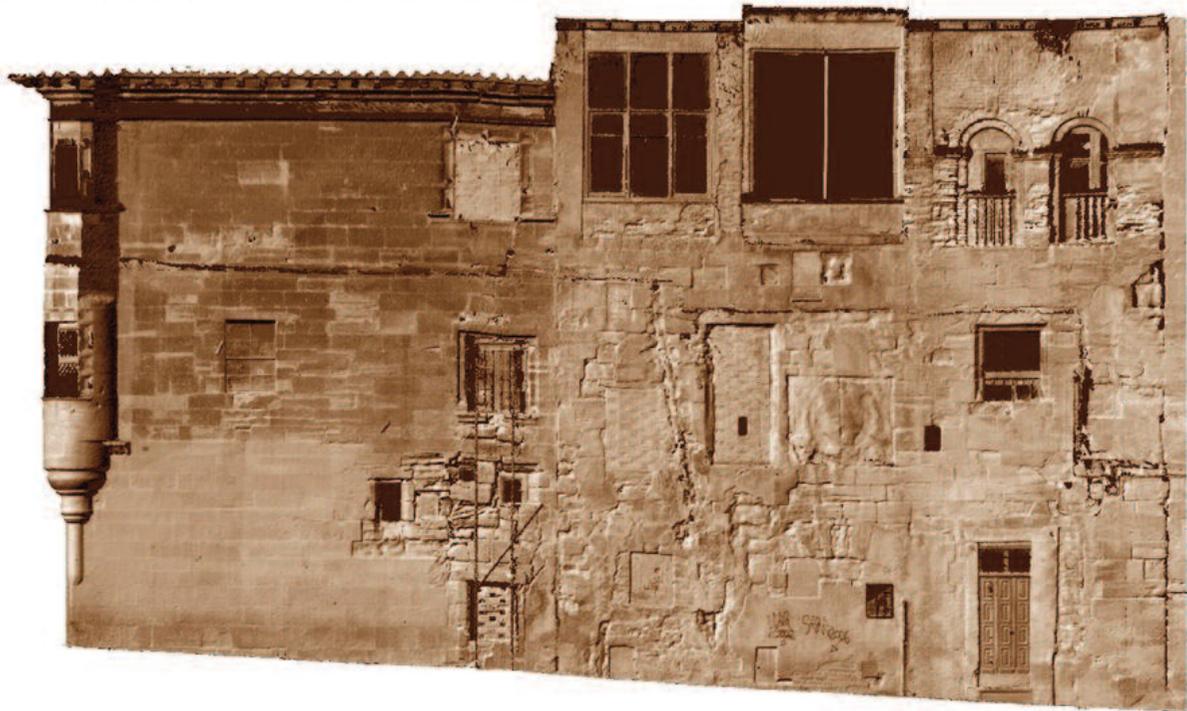


Fig. 1 Palacio de Haro. Ortofoto. Fuente: LFA.

166

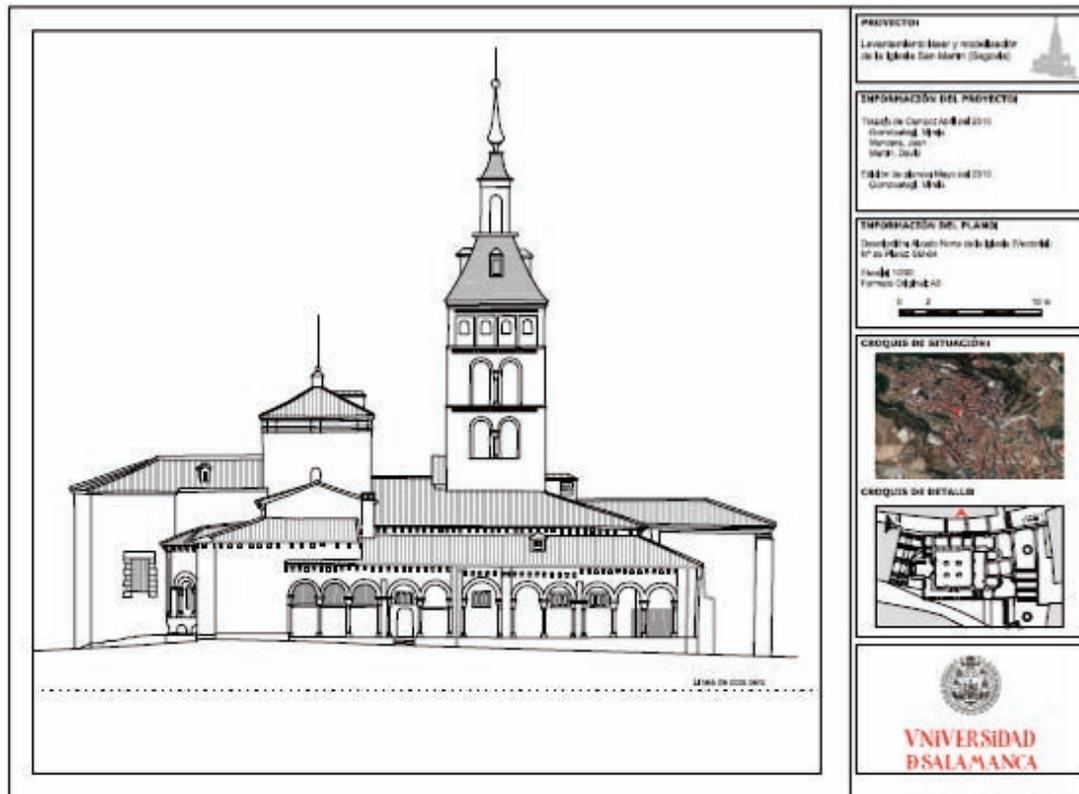


Fig. 2 Plano técnico escala 1/200 alzado Iglesia San Martín, Segovia. Fuente: LFA.



Fig. 3 Modelado sólido Iglesia San Martín, Segovia. Fuente: LFA.

herramientas a lo largo de todo el ciclo de vida de una intervención de conservación ó restauración.

Obviamente, un modelado 3D exhaustivo presenta dificultades y costes específicos más elevados que los asociados a un levantamiento fotogramétrico terrestre convencional. Es necesario evaluar dificultades y costes en función de los objetivos y del presupuesto disponible, pero ello afecta a las condiciones “externas” con respecto a la documentación. Esta cuestión afecta asimismo a la selección de las metodologías y dispositivos más apropiados para la documentación 3D del objeto y su entorno; actualmente existe una gran diversidad de dispositivos que proporcionan información geoméricamente referenciada vinculada al objeto o, preferiblemente, a una red topográfica para el objeto y su entorno. En consecuencia, actualmente el modelo de referencia debe ser volumétrico (permitiendo extraer secciones o realizar proyecciones a voluntad), digital (para poder realizar cualquier tipo de procesamiento o análisis), escalable (para que pueda ser gestionado a diferentes niveles de detalle), abierto (permitiendo dibujar, exportar a diferentes formatos o insertar datos ó metadatos, comentarios o vincular otros documentos multimedia) y estar debidamente georeferenciado.

Siendo significativos los desarrollos de modelado e implementación computacional realizados hasta la fecha, se plantea el problema de cómo integrarlos con sistemas de información para avanzar en el conocimiento a partir de otros casos de uso. Este problema tiene un gran número de vertientes que afectan al carácter siempre incompleto de la información ó al carácter de- y re-constructivo de la información a partir de los datos y análisis proporcionados por diferentes expertos. Responder a este problema requiere adoptar una metodología similar a la de los Sistemas de Información Geográficos (SIG) con la distinción básica entre diferentes tipos de datos (raster y vectoriales) para los objetos, el tratamiento por capas para los diferentes tipos de expertos y un amplio surtido de herramientas software para las tareas a realizar.

### Complejidad de la integración

La integración de la documentación capturada por diferentes dispositivos y de acuerdo con diferentes metodologías sobre un modelo geométrico requiere la elaboración de protocolos para la captura de datos, la especificación de una arquitectura software compatible con prerrequisitos y funcionalidades de

la aplicación a desarrollar, y la adaptación a diferentes dominios de conocimiento relativos al objeto (arquitectónico, escultórico, pictórico, p.e.), las tecnologías afectadas (fotogrametría u otras técnicas no-destructivas, p.e.) y los procesos (constructivos, de conservación ó restauración). Esta heterogeneidad y la necesidad de transferir información entre expertos y fases que se desarrollan a lo largo del tiempo plantea la necesidad de:

- 1) Un desarrollo de protocolos para la toma de datos; las reglas 3x3x3 de CIPA para la fotogrametría presentan un amplio consenso y los investigadores del cluster DAVAP han desarrollado una metodología similar para documentación basada en láser 3D.
- 2) El almacenamiento de datos referenciándolos adecuadamente: los Dublin Core Standards (DCS) propuestos por la Unión Europea son de uso extendido pero son claramente insuficientes. Es necesario complementarlos con metadatos para Patrimonio y para los documentos multimedia vinculados en los que se almacena la información.
- 3) La especificación de metodologías para el modelado de objetos, el papel jugado por cada experto y las tareas que realiza. Las relaciones entre los diferentes tipos de modelos (polilíneas, estructuras de alambres, nubes de puntos, mallas, superficies adaptadas a objetos) proporcionan bancos de pruebas para tareas de I+D vinculadas al procesamiento y análisis de la información.
- 4) La utilización de formatos abiertos y herramientas Open Source, minimizando la utilización de formatos propietarios no reutilizables. El coste de las licencias pagadas por todo tipo de entidades impide el desarrollo de la I+D, es económicamente insostenible e imposibilita el trabajo entre diferentes expertos por la falta de interoperabilidad entre formatos propietarios ó entre herramientas no interoperables.

Las imágenes digitales ó las nubes de puntos (almacenadas como ficheros ASCII, p.e.) no plantean problema relacionado con formatos propietarios; por ello hay que centrarse en la interoperabilidad entre herramientas. La clave para avanzar en la interoperabilidad es el desarrollo de Ontologías. La red Europea Herein se constituyó en 1998 para proporcionar un soporte al desarrollo de Ontologías para patrimonio cultural, pero es necesario desarrollar ese germen inicial adoptando un esquema más abierto.

En informática, una Ontología es una representación del conocimiento con sus correspondientes léxicos (palabras clave), thessauri (definiciones ó descripciones) y taxonomías (reglas lógicas). Al más “bajo” nivel una representación se

realiza mediante diagramas entidad-relación que representan las “conexiones” que hay entre diferentes conceptos asociados al objeto físico (¿qué es?), a los expertos (¿qué técnicas puedo aplicar?) y a las tareas (¿cómo voy a intervenir?). La aplicación software accede a repositorios que soportan bases de datos relacionales, realizan búsquedas sobre palabras clave y contenidos relacionados (actualmente a nivel de texto) y devuelven respuestas en función de los perfiles del usuario y de las tareas en las que está involucrado.

#### Un marco colaborativo para buenas prácticas

El patrimonio cultural es un signo de identidad y memoria colectiva de los diferentes colectivos de la UE. La persistencia de hechos y valores comunes, así como la heterogeneidad de sus representaciones, está dando lugar a una valoración creciente del patrimonio, que al mismo tiempo requiere una nueva mirada para interpretaciones y generación de nuevos contenidos. Asimismo, está universalmente reconocido que el patrimonio cultural como algo “vivo” e inagotable desde el punto de vista de las interpretaciones que es necesario actualizar y contrastar. Tras estos lugares comunes, el problema que se plantea es ¿cómo diseñar e implementar estrategias óptimas que faciliten el acceso y disfrute para todos de este tipo de bienes, así como la generación de nuevos contenidos? Esta cuestión afecta a tres cuestiones cruciales como son la accesibilidad, la actualización/generación de contenidos y la sostenibilidad de las actividades relacionadas con dichos contenidos.

- a) Accesibilidad: una política muy activa de la Unión Europea sobre documentación digital a gran escala está permitiendo acceder a contenidos digitales. La situación en España no es óptima, pues cada agente (público ó privado) lleva a cabo la documentación digital del patrimonio sin especificar metadatos o la metodología adoptada; asimismo, buena parte de los materiales digitalizados no son accesibles vía web. A la vista del volumen de información y de la utilización política que se hace de estas cuestiones, es impensable pensar en un repositorio común. Por ello, la accesibilidad es un requerimiento para el sistema de documentación. A efectos prácticos, es necesario adoptar un esquema de red distribuida de repositorios a través de los cuales se pueda acceder y compartir contenidos. De forma simultánea es necesario llegar a acuerdos sobre metadatos y metodologías que faciliten compartir recursos y suministrar contenidos como respuesta a búsquedas en la red, incluyendo capacidad para procesar y analizar contenidos de forma automática sobre archivos multimedia. El

cluster DAVAP ha desarrollado en el proyecto singular estratégico PATRAC (Patrimonio Accesible: por una I+D+I sin barreras) una Ontología para accesibilidad al patrimonio.

- b) Actualización y generación de contenidos: Los archivos digitales abiertos facilitan un soporte para enlazar con contenidos multimedia en diferentes soportes (incluyendo formatos propietarios). Esta facilidad permite incorporar interpretaciones sobre un soporte común de cara a facilitar diferentes análisis ó incluso “narrativas” vinculadas a los contenidos digitales. La actualización y generación de contenidos afecta sobre todo a los sistemas de información. De cara a los expertos en conservación ó restauración de patrimonio, ello incluye la posibilidad de desarrollar “sesiones clínicas” sobre bienes de interés cultural, incluyendo diagnósticos. Además de las herramientas convencionales para la inserción manual de documentos multimedia, las tecnologías de información y comunicaciones permiten generar contenidos a partir del procesamiento y análisis de la información; en particular, las técnicas de reconocimiento del contenido (CBIR: Contents Based Image Retrieval) es una de las áreas de mayor desarrollo de los últimos diez años en visión computacional y permite realizar búsqueda, hallazgo, indexación y clasificación de contenidos mediante sistemas expertos específicos. El cluster DAVAP desarrolla herramientas para el reconocimiento tanto en imagen como en objetos digitales 3D.
- c) Sostenibilidad: consiste en satisfacer las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer su propias necesidades (WCED 1987). Se refiere al uso de los recursos y a la orientación de las inversiones y del desarrollo tecnológico e institucional, de manera que se garantice un desarrollo y uso de los recursos actuales que no comprometan la salud y el bienestar de las generaciones futuras. La sostenibilidad del patrimonio afecta al objeto físico (materiales, edificios, infraestructuras) y al marco de actuación (social, económica y medioambiental). La sostenibilidad afecta sobre todo a los sistemas de gestión y se convierte en uno de los principales requerimientos de las políticas integrales de conservación, restauración y accesibilidad al patrimonio por parte de los diferentes agentes institucionales y privados. Es necesario compatibilizar la diversidad de agentes y ámbitos de actuación con los requerimientos y objetivos de una política sostenible

en patrimonio. La sostenibilidad afecta a los materiales (diagnóstico integral, especificación del nivel de intervención y de las técnicas a utilizar), los edificios u objetos (comprensión, durabilidad, integración de procesos) e infraestructuras necesarias (para garantizar mantenimiento, seguimiento, expansibilidad, incluyendo evaluación geoambiental del entorno si procede).

Desde el punto de vista de las tecnologías de la información y la comunicación, el desarrollo de este marco colaborativo requiere resolver la provisión de servicios en una red distribuida y avanzar en la interoperabilidad entre estándares, lo cual afecta a aspectos tales como

- Contextualización de objetos contenidos en diferentes soportes multimedia.
- Estandarización en la metodología para la gestión de contenidos, desarrollando metadatos de nivel superior a los Dublin Core Standards
- Mejoras en motores de búsqueda (Internet 3.0) que sean compatibles con las herramientas de reconocimiento semi-automático en multimedia.

Todos ellos afectan al desarrollo de Ontologías para contenidos multimedia en los que el cluster DAVAP trabaja actualmente en relación con la provisión de servicios. Por coherencia con los objetivos de las jornadas, en este trabajo se da más peso a los aspectos relacionados con sistemas de documentación, en detrimento de los aspectos que concierne a sistemas de información y de gestión.

169

## La documentación como soporte “objetivo”

### Modelado 3D para “comprender” el objeto

Para proporcionar un soporte a la integración entre los 3 sistemas (documentación, información y gestión), proponemos como referencia un modelo geométrico para el objeto material. Un modelo geométrico no puede ser único, pues (1) el objeto material evoluciona a lo largo del tiempo –incluyendo deterioros o su posible desaparición (requiriendo en ese caso su re-construcción virtual)-, (2) se puede mostrar a diferentes resoluciones -niveles de detalle para diferentes zonas- y (3) es necesario contextualizarlo -incluyendo la interacción intelectual o emocional con el “observador”-. El carácter geométrico (aunque no único) de la representación y la metodología regresiva-constructiva asociada a cualquier geometría facilitan un soporte “objetivo” sobre el que superponer diferentes lecturas ó interpretaciones bien documentadas y razonadas, más allá del relativismo de los postmodernos para quienes cualquier interpretación vale (lo cual acaba anulando



Fig. 4 Modelado 3D: soportal iglesia San Martín, Segovia. Fuente: LFA.

el diálogo) y más acá de recreaciones puramente especulativas. La racionalidad propuesta es consustancial a la metodología adoptada, en la medida en que las hipótesis (método regresivo) y principios (método constructivo) se hacen explícitos facilitando, no sólo una interpretación consistente e históricamente validable, sino la comunicación entre los ámbitos mundano y académico en los que se inscribe la producción y el análisis de cualquier objeto de patrimonio.

- Modelado 2D versus 3D: una documentación profesional 2D de objetos 3D es de gran valor y es la única disponible en muchos casos hasta época muy reciente; por ello, debe ser incorporada al repositorio como objetos digitales vinculados al modelo global del objeto físico. Sin embargo, por su propia naturaleza, la geometría 3D no se puede reducir a 2D. Se concibe al contrario, la geometría 2D se incluye de múltiples formas (en particular como secciones o proyecciones) en modelos 3D.
- Precisión y fidelidad del modelo en relación con el objeto: para algunos objetos (dibujos, grabados), la representación plana es suficiente. Sin embargo y de cara a intervenciones, ni siquiera la representación 2D es suficiente actualmente para telas o pinturas. ¿Cómo va a serlo para objetos volumétricos (típicamente de escultura o arquitectura) cuya naturaleza 3D genera una interacción de la obra y, por tanto, del espectador ó analista con el espacio circundante? Las representaciones mediante proyecciones sobre planos dominantes (planta, alzado, vistas laterales) o por secciones (longitudinales ó transversales con respecto a ejes ideales, p.e.) proporcionan una ayuda inestimable en ausencia de información 3D y pueden llegar a facilitar la interpretación así como facilitar una guía para la (re)construcción. A pesar de su innegable belleza y precisión o de la utilidad en entornos de construcción, las representaciones 2D no pueden reemplazar a una documentación 3D del objeto que incluye como casos particulares todas las secciones ó proyecciones sobre planos dominantes antes mencionadas, las representaciones (realistas o idealizadas) del objeto 3D y su interacción con el entorno. Incluso, la propia representación 3D es insuficiente, pues el aspecto externo se va modificando en el transcurso de una intervención, por lo que el modelo debería ser 4D (incluyendo el tiempo) para dejar constancia de las diferentes fases de conservación ó restauración.
- Selección y compleción de la documentación: cualquier labor de documentación implica una selección de información y, por tanto, una metodología (en

ocasiones implícita) para la selección y el pegado a diferentes resoluciones. Ello plantea diferentes problemas relacionados con la especificación de criterios para seleccionar los datos y completar la información. Asimismo, los requerimientos del cliente imponen la necesidad de proporcionar representaciones planares (típicamente en CAD) de los objetos, lo cual se realiza mediante una reproyección sobre planos dominantes; la comparación entre diferentes secciones o reproyecciones extraídas a partir del modelo 3D permite identificar y evaluar problemas estructurales de difícil detección en las interpretaciones basadas en fotogrametría terrestre convencional. El software UvaCad (Utilidad de Visualización Avanzada Con asistencia al dibujo) desarrollado por el cluster DAVAP cumple todos estos prerequisites. Además facilita herramientas relacionadas tanto con operaciones geométricas elementales (secciones y proyecciones, transformaciones y herramientas para una navegación interactiva), como con operaciones radiométricas (incluyendo la reproyección del color para estimar características de los recubrimientos, p.e.), incluyendo interoperabilidad con otras herramientas de diseño o exportación a diferentes formatos de uso frecuente en la documentación del patrimonio, ingeniería ó construcción. Las secciones (rodajas de la nube de puntos) pueden ser generadas a voluntad con el grosor, en la dirección y la frecuencia que se deseen. La reproyección de las secciones sobre un plano permite exportar los archivos digitales a los formatos usuales de diseño o de CAD para su posterior retoque si fuera necesario. Los archivos así generados tienen información métrica añadida (procedente de la nube de puntos) a diferentes niveles de resolución sobre el mismo modelo, pudiendo incorporar archivos multimedia para objetos no-geométricos (representaciones del terreno en excavaciones arqueológicas, p.e.).

#### Multiresolución para seleccionar información

Desde las etapas más tempranas de la documentación, es claro que diferentes zonas requieren diferentes niveles de detalle. Para una documentación digital discreta (píxeles 2D ó vóxeles 3D, existen estrategias de refinamiento ó, por el contrario, de agrupamiento que permiten gestionar la información relativa a superficies ó sus bordes (siluetas ó contornos aparentes). En el caso 2D existe un gran número de algoritmos que permiten extraer, agrupar, suavizar ó perfilar bordes que pueden ser elevados a objetos 3D mediante técnicas de

reproyección dando lugar a poligonales. Sin embargo, la elevación automática da lugar a problemas que actualmente se resuelven de forma manual.

El remallado de las nubes de puntos permite gestionar diferentes resoluciones de forma simultánea, adaptándose a diferentes tipos de condiciones en los bordes. Sin embargo, en el caso 3D aún no se dispone de herramientas tan avanzadas como las disponibles para el caso 2D. Algunos de los problemas abiertos más significativos están asociados a la fusión semi-automática de la información procedente de imágenes y de escaneos (optimización simultánea adaptada al ajuste de haces), reproyección de texturas (patrones espaciales) sobre superficies de curvatura arbitraria, los modelos de propagación adaptativos (para rellenado ó suavizado), ó dibujo en 3D (enlazado semi-automático de polilíneas).

Algunas cuestiones más simples asociadas a la introducción del marco geométrico para compartir diferentes documentos multimedia conciernen a la inserción y gestión de la información contenida en documentos multimedia referenciados al modelo digital del objeto físico. La disponibilidad de un objeto navegable (como colección de superficies que acotan un sólido) facilita dicha inserción que, actualmente, se realiza de forma interactiva, es decir, cliqueando sobre la superficie e insertando el documento.

172

### Monitorización para interpretar la evolución del objeto

Según el esquema desarrollado por el cluster DAVAP, la documentación se actualiza de forma semi-automática gracias a una monitorización asociada a redes de sensores que evalúan (con ó sin contacto) características a lo largo del ciclo de vida de la intervención; ello permite incorporar información sobre la aplicación de técnicas no-destructivas que se superpone al modelo 2D/3D a lo largo del tiempo, permitiendo el acceso por capas a los diferentes expertos. Para que sea realmente eficaz, esta fase de documentación 3D/4D debe ir acompañada de una estimación de valores críticos para materiales y comportamiento estructural. El cluster DAVAP ha desarrollado una monitorización para resolver cuestiones de Accesibilidad y facilitar servicios a personas dependientes ó discapacitadas en el Museo Marítimo de Barcelona y en una zona del casco histórico (entre San Martín y Parque de El Salón) de Segovia dentro del proyecto PATRAC. Asimismo, se han desarrollado monitorizaciones para facilitar el seguimiento de intervenciones en ingeniería civil (puentes de la M30, rellenado de presas), pudiendo adaptarse esta metodología a entornos de patrimonio que presente problemas estructurales (iglesia de Villamorón, Burgos) ó de materiales.

## Sistema de Información para el Modelado Integral (SIMI)

Para poder abordar la diversidad de contenidos y funcionalidades que se han esbozado más arriba, un sistema de información para patrimonio debe adoptar una estructura modular próxima a la de un Sistema de Información Geográfico (SIG en lo sucesivo). El enfoque tradicional utiliza fichas asociadas a un levantamiento fotogramétrico del objeto sobre las que se realizan anotaciones relacionadas con las patologías detectadas, que en una fase posterior se procesan manualmente. Esta metodología fue desarrollada por el LFA y el IPCE en relación con las intervenciones de conservación y restauración realizadas en la fachada de San Gregorio de Valladolid en 2004.

La disponibilidad de modelos digitales 2D ó 3D compartidos por diferentes usuarios permite acceder a cada capa específica por parte del usuario autorizado, para insertar la información sobre un único modelo. Lejos de ser un documento estático, la información centralizada se actualiza de forma dinámica y facilita un seguimiento preciso de las anotaciones e intervenciones, que pueden testarse por parte del cliente (en local ó remoto), valorando las mismas e insertando los comentarios que procedan. Para el desarrollo de la aplicación se ha adoptado inicialmente una arquitectura software similar a la de un SIG, a la que, en una fase posterior, se ha añadido una capa semántica (común a los sistemas de documentación y de gestión). Esta capa facilita no sólo compartir y transferir información entre diferentes sistemas (y los módulos correspondientes), sino que hace accesible la aplicación informática a cualquier usuario autorizado, gracias al uso de palabras del lenguaje ordinario (léxico) que se encuentran conectadas entre sí mediante diferentes significados (thessauri) y se gestionan mediante diferentes tipos de lógica (de clases para los objetos, de predicados para relaciones entre objetos y descriptiva para las diferentes “narrativas”). Este esquema es muy complejo para ser descrito con detalle en este trabajo, por lo que nos limitamos a algunas pinceladas.

Un SIG es un sistema de hardware, software y procedimientos diseñados para soportar la captura, la gestión, el análisis, el modelado y la presentación de datos espacialmente geo-referenciados de cara a resolver problemas de diseño, planificación, gestión y visualización sobre un soporte digital. Un SIG se puede ver como:

- Una aplicación automatizada para producir mapas ó representaciones, es decir, una aplicación orientada a la generación automática de una asignación entre inputs y outputs.
- Un inventario que permita el acceso directo a bases de datos existentes con protocolos para el procesamiento de

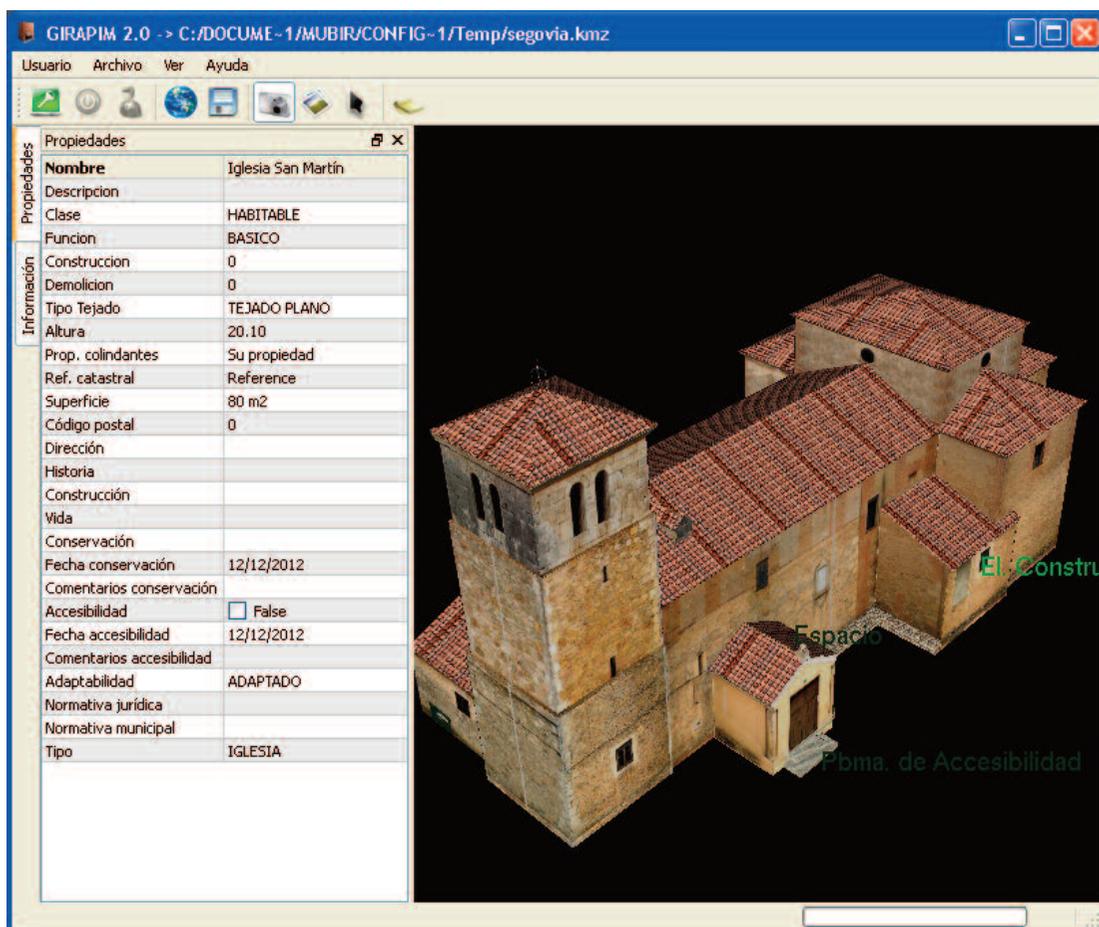


Fig. 5 Sistema de información de modelado integral. Fuente: MoBiVAP.

información y búsquedas por contenido. En nuestro caso, el inventario se gestiona mediante bases de datos relacionales (RDB) diseñadas sobre SQL y que soportan funcionalidades ligadas a contenidos espaciales (PostgreSQL).

- Un módulo para el procesamiento y análisis de la información contenida en diferentes documentos multimedia atendiendo a los requerimientos del usuario. Este módulo incluye herramientas para la minería de datos y la evaluación temporal (correlaciones) y espacial (co-varianzas) de patologías identificadas en casos de uso, así como las soluciones aportadas.
- Un módulo de visualización avanzada que permite navegar, explorar, extraer información, generar informes para comprender, analizar y explicar la distribución de objetos en el entorno territorial, que será cada vez más importante conforme el volumen de datos espaciales digitales vaya creciendo.
- Opcionalmente, puede contener un soporte para el análisis espacial y toma de decisiones facilitando

nuevos usos a partir de las RDB y proporcionando a los usuarios herramientas de búsqueda y análisis, aunque este módulo se engloba en el sistema de gestión propiamente dicho.

Las estrategias para la resolución de problemas en sistemas de información siguen una combinación de diferentes operadores, algoritmos y conjuntos de parámetros. Hay que tener presente que no existe una secuencia única de operadores y algoritmos asociados que sea válida para todos los rangos de escala, propuestas de aplicación y combinación de clases de hechos. Por ello, para cada función objetivo propuesta debe adoptarse una estrategia híbrida (compatible con la presentada en la fase de documentación) y mostrar que es óptima con respecto a los objetivos seleccionados y las funciones de coste especificadas. Este enfoque se ha desarrollado para pequeños entornos urbanos afectados por áreas de rehabilitación integral correspondiente al plan Villas del Renacimiento (2005) que ha afectado a 4 pueblos de la provincia de Palencia, aunque en este caso, debido a los requerimientos del cliente, la aplicación se desarrolló sobre ArcGIS, con los consiguientes problemas de



VISTA AEREA DE PAREDES DE NAVA

Fig. 6 ARI, Tierras del Renacimiento. Fuente: Clúster DAVAP.

falta de interoperabilidad con las herramientas de procesamiento y análisis de la información contenida en imágenes o nubes de puntos que se trató de forma independiente.

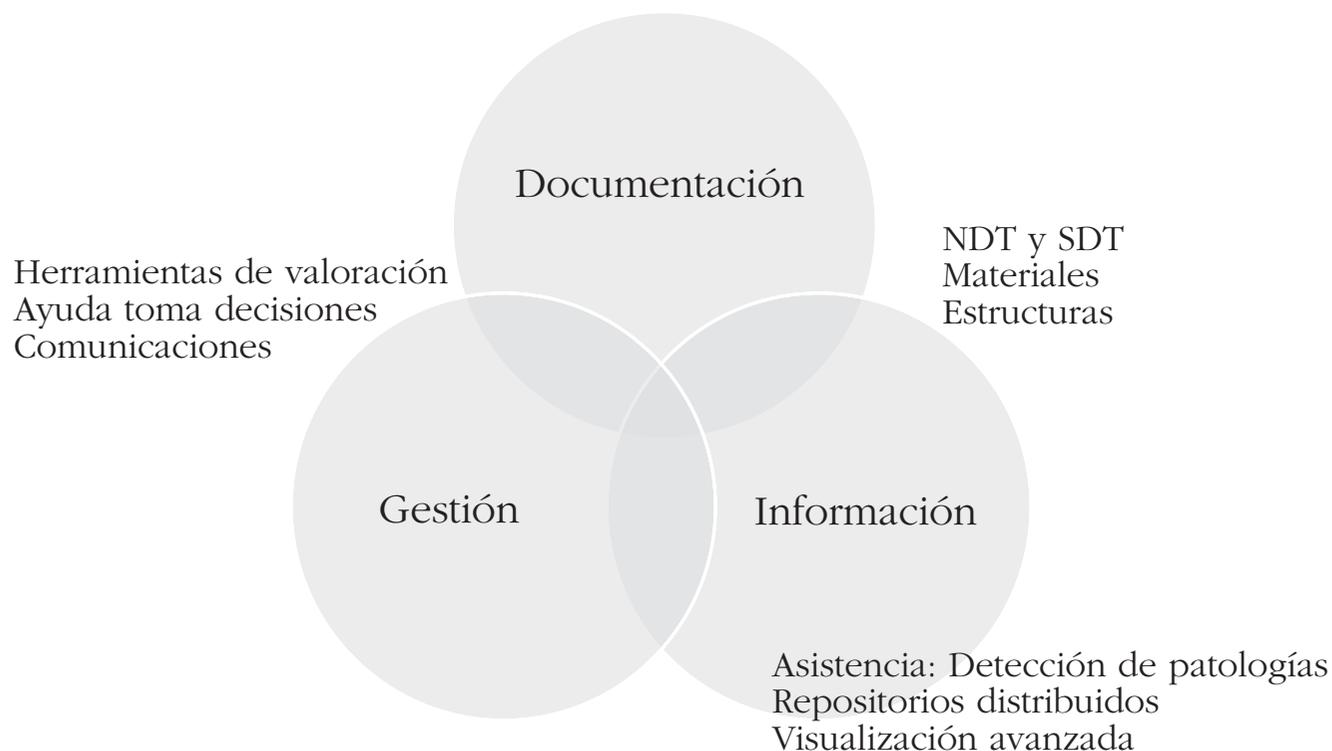
La estructural modular afecta a las componentes (diferentes dominios de aplicación), a los expertos (identificar y especificar el proyecto, seleccionando las herramientas más apropiadas) y a las tareas a realizar (documentación, procesamiento y análisis de la información). Todo ello afecta a datos contenidos en diferentes repositorios, que incluyen metadatos a diferentes niveles (el nivel 0 corresponde a los DCS), documentos multimedia relativos a contenidos y datos específicos de cada documento. Los datos específicos incluyen los datos vectoriales y raster (típicos en SIG estáticos) asociados al procesamiento y análisis de imagen o de documentos 2D/3D, así como los propios de documentos de texto o vídeo. Todos los datos se encuentran referenciados al modelo 2D ó 3D del objeto. Esta metodología ha sido aplicada por DAVAP para un SIG orientado a tareas de restauración y conservación para los pórticos de la catedral de León; debido a los requerimien-

tos del cliente la aplicación se desarrolló sobre soporte 2D con diferentes capas para facilitar la inserción de información por parte de diferentes expertos.

Las funcionalidades relacionadas con la búsqueda, extracción y gestión de contenidos similares requiere una capa semántica que se superpone al SIG utilizando una referenciación geométrica de todos los elementos insertados. En Octubre de 2008, Open Geographic Consortium (OGC) ha recomendado CityGML como estándar para desarrollar aplicaciones basadas en SIG que incluyan la posibilidad de intervención. El cluster DAVAP ha desarrollado un módulo de CityGML orientado hacia la provisión de servicios relacionados con accesibilidad al patrimonio para edificios históricos (Museo Marítimo de Barcelona) y para pequeñas zonas de cascos históricos (zona de San Martín en Segovia).

Los casos de uso desarrollados hasta la fecha son un primer paso hacia el diseño e implementación de Sistemas de Información y Modelado Integral (SIMI) que actualmente se desarrollan en el marco del proyecto ADISPA.

## Representación simbólica



175

Fig. 7 DIMaS, Representación simbólica. Fuente: Clúster DAVAP.

### Hacia una integración con Sistemas de Gestión

La gestión está orientada hacia intervenciones de conservación y restauración. Por ello, un Sistema de Gestión del Patrimonio debe estar relacionado con los Sistemas de Documentación e Información, incluyendo módulos que faciliten:

- Una evaluación de daños ó problemas detectados y que permita asesorar sobre la necesidad/urgencia para la intervención, incluyendo una Valoración de la solución. Este aspecto se ha abordado en el Proyecto PATRAC desarrollando un módulo de Optimización Multicriterio para asistir la toma de decisiones en relación con la Accesibilidad.
- Una Planificación incluyendo una simulación espacio-temporal del proceso de intervención. Ello requiere el diseño e implementación de herramientas de visualización del proceso de intervención. Actualmente, existen herramientas software

BIM (Building Information Modelling), que facilitan la visualización de procesos y construidas las IFC (Industry Foundation Classes). Estas herramientas se gestionan mediante una capa de contenidos semánticos pero están muy orientadas hacia la construcción convencional y aún no se ha resuelto la interoperabilidad entre IFC y CityGML.

A los pasos anteriores hay que añadir los que afectan al proceso de intervención propiamente dicha que incluyen la

- Ejecución (obra) de la intervención, lo cual requiere una realimentación con la planificación actualizando información de forma remota. Esta actividad se ha desarrollado en relación con la intervención realizada en los pórticos de la catedral de León.
- Seguimiento, mediante una monitorización discontinua (toma periódica de datos) como continua (redes de sensores que envían información periódica) sobre el estado actual. La información asociada

## Prerequisitos para el flujo de trabajo → Problemas a resolver



176

Fig. 8 DIMaS, Problemas a resolver. Fuente: Clúster DAVAP.

al seguimiento se actualiza sobre el modelo 3D según el esquema 3M (Modelado, Multiresolución, Monitorización) expuesto más arriba dando lugar a una documentación 4D que facilite una asistencia a intervenciones en diferentes entornos y a diferentes escalas.

Es necesario tener siempre presente que la gestión de intervenciones está orientada no sólo hacia la conservación y restauración, sino hacia la difusión a diferentes niveles, como un retorno a la sociedad que financia las intervenciones. Dentro de la difusión, la puesta en valor afecta al disfrute y la sostenibilidad del Patrimonio, lo cual requiere mejorar la comunicación entre los diferentes agentes (incluyendo divulgaciones que hagan más atractivos los activos patrimoniales, modificando la narrativa usual), así como la compatibilidad entre los “hechos” culturales, la generación ó incluso la cre-

ación de contenidos a partir de los existentes y la gestión de la documentación correspondiente en diferentes soportes multimedia, de acuerdo con ontologías específicas de Patrimonio.

### Conclusiones y retos

**Documentación:** Afecta sobre todo al Modelado y Monitorización

- La geometría del objeto proporciona un elemento común de referencia sobre el que insertar diferentes documentos, interpretaciones y simulaciones.
- Aproximación híbrida a la documentación: Todas las técnicas para la toma de datos (foto-

grametría, multi-espectral, diferentes láser 3D, luz blanca estructurada, etc) son útiles y corresponde a los expertos decidir las más apropiadas en función del objeto, de los costes y de la urgencia.

**Sistemas de Información para un modelado integral:** afecta sobre todo a la comunicación entre los diferentes agentes que intervienen en el proceso

- Infraestructuras: repositorios distribuidos y organizados según metadatos comunes y gestionados mediante bases de datos relacionales.
- Identificar metodologías óptimas según diferentes casos de uso.
- Utilización de formatos y herramientas abiertas. Ontologías para todos.
- Interoperabilidad entre diferentes metodologías.

**Hacia una integración con la gestión para la intervención:** proporciona soporte para la asistencia a la toma de decisiones, priorización, agenda, intervención y seguimiento

- Sostenibilidad para el edificio (aspectos materiales y estructurales) y su entorno, preservando su integridad
- La comunicación a partir de la contextualización y del diálogo con el entorno.
- Relectura en función de nuestros parámetros, aspectos historiográficos y más allá: reivindicación de la “Reconstitución” como interpretación.

## Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación, dentro del proyecto ADISPA, BIA2009-14254-C02-01/BIA2009-14254-C02-01, todo ello enmarcado en el proyecto singular estratégico “Patrimonio Accesible: Por una I+D+i sin barreras” (PATRAC) del MICINN, Ref<sup>o</sup> PSE 380000-2009-002

# Arqueología virtual bajo el horizonte de ARQUEOLÓGICA 2.0

Alfredo Grande León

Universidad de Sevilla.

alfredogrande@arqueologiavirtual.com

*«La memoria es un motor fundamental de la creatividad; esta afirmación se aplica tanto a los individuos como a los pueblos, que encuentran en su patrimonio los puntos de referencia de su identidad y las fuentes de su inspiración»*

UNESCO

Convención sobre la protección del Patrimonio Mundial. 1972

178

## Curriculum

La actividad profesional del profesor Alfredo Grande está muy volcada en la educación y en la investigación multidisciplinaria encauzada a reconstrucciones virtuales de carácter arqueológico, siendo pionero en la creación de hipótesis virtuales en la década de los 90 y en la definición conceptual del término hipótesis virtual arqueológica. Humanista de formación y enamorado de la historia, es licenciado en Bellas Artes especialidad en Conservación y Restauración de Bienes Culturales, Museología y Museografía. Su inusual perfil profesional se centra en tres pilares muy distintos y complementarios: humanismo, tecnología y pedagogía.

## Resumen

El 16 de Junio de 2009 se inauguró en el conjunto arqueológico de Itálica, Sevilla, el I Congreso Internacional de Arqueología e Informática Gráfica, Patrimonio e Innovación, ARQUEOLÓGICA 2.0, organizado por la Sociedad Española de Arqueología Virtual, SEAV. En él, se dieron cita más de doscientos especialistas de un centenar de universidades e instituciones internacionales de más de veinte países. Este foro privilegiado nos ofrece un horizonte singular de la realidad pasada, presente y futura de

las nuevas tecnologías de visualización aplicadas a la arqueología y el patrimonio y nos presenta claramente la situación de España en el conjunto internacional.

## Abstract

On June 16, 2009 was inaugurated at the archaeological site of Italica, Seville, the First International Conference on Computer Graphics and Archaeology, Heritage and Innovation, ARQUEOLÓGICA 2.0, organized by the Spanish Society of Virtual Archaeology, SEAV. It was attended by more than two hundred specialists from hundreds of universities and institutions from over twenty countries. This unique forum offers a unique horizon about the past, present and future of 3D computer visualization technologies applied to Archaeology and Heritage and clearly presents the situation of Spain in the international set.

## Virtualidad y patrimonio

El patrimonio como concepto cultural ha evolucionado a lo largo del tiempo. Se parte de la idea tradicional, según la cual el patri-

monio, está constituido por un conjunto de bienes que tienen un reconocimiento oficial y social, el cual otorga un valor especial a determinados edificios u objetos que se convierten en los tesoros más valiosos de un pueblo o de una cultura determinada y que por tanto, deben ser preservados y legados a las generaciones futuras. Pero hoy en día, la noción de patrimonio se amplía hacia el conjunto de elementos que remiten a la identidad de los pueblos: el entorno, las costumbres, las tradiciones, el paisaje, el urbanismo, el arte, el lenguaje, etc.. El patrimonio se extiende como un producto común de la geografía y de la historia.



Fig. 1 Ciudad romana de Carteia. Algeciras. Cádiz.

El patrimonio cultural basa su importancia en vincular a cada individuo o comunidad con su historia. Encarna el valor simbólico de las identidades culturales y es la clave para entender a otros pueblos.

La conservación, protección y la puesta en valor del patrimonio cultural, presenta un reto de innovación, no solo cultural, también tecnológico y profesional, que exige un esfuerzo por crear y desarrollar instrumentos de gestión adecuados y productos de nueva generación.

Pero... ¿cómo podemos preservar, revalorizar y transmitir el patrimonio?

En la actualidad, la política cultural, debe ir dirigida a tener presente esta nueva valoración, fomentando proyectos basados en la dinamización del patrimonio y la interpretación del mismo, asegurando de este modo un desarrollo sostenible del patrimonio cultural. No ignoramos que los proyectos patrimoniales tienen una clara dimensión social, la sociedad del ocio cada vez más consume y demanda cultura, a la vez, que desarrolla y fomenta el sector económico del turismo. Turismo y cultura constituye una realidad conjunta, mostrándose como uno de los motores con mayor dinamismo y creciente motivación.

En el afán por recuperar los testimonios de la herencia cultural del pasado para la construcción del futuro, el hombre cuenta en la actualidad con dos aliados excepcionales, la arqueología y la tecnología. La arqueología se ha preocupado de desenterrar, estudiar y valorar aquellos restos que sobrevivieron al paso del tiempo. A través de ellos conocemos mejor nuestra cultura, nuestros orígenes, la forma de vida de nuestros antepasados, sus costumbres funerarias, sus prácticas económicas e, incluso, aquellos mecanismos sociales por los que se regían. Es una importante fuente de información y forma parte de la memoria histórica que cada comunidad tiene y que, por lo tanto, se debe estudiar, proteger y transmitir a las generaciones venideras.

En cuanto a la tecnología, hoy es más amplio que nunca el abanico de posibilidades que ofrece las nuevas tecnologías para el desarrollo del conocimiento. La evolución vertiginosa de la tecnología cambia nuestra relación con el mundo, y también la visión que de él tenemos. El patrimonio y la tecnología son, por tanto, expresiones de una misma esencia: la vida en el contexto de la historia.

Humanismo, ciencia y técnica se necesitan en la intersección de lo novedoso con el tiempo, en esta sociedad tan tendente a la especialización. Es necesario la creación de un espacio común, donde la más avanzada tecnología ayude al diagnóstico, recuperación o preservación de nuestra memoria.

De todas las herramientas informáticas desarrolladas por el hombre en su revolución tecnológica del final del siglo XX, es la denominada realidad virtual, la que ha irrumpido

en el mercado con más fuerza, poniendo a disposición de cualquier usuario una tecnología incipiente pero con un horizonte impresionante de desarrollo.

El concepto agrupa dos ideas aparentemente opuestas realidad y virtualidad que acuñan una paradoja evidente, cada una de las palabras que componen este término resultan ser conflictivas a la hora de buscarles una definición única y exacta. El término realidad parece estar estabilizado en un sentido positivo o real, “que tiene existencia verdadera y efectiva”. El término virtual viene definido “como aquello que tiene virtud para producir un efecto, aunque no lo produce de presente”, quedando como resultado “una realidad no real”.

Philippe Quean lo define así “un mundo virtual es una base de datos gráficas interactivas, explorable y visualizable en tiempo real en forma de imágenes tridimensionales de síntesis capaces de provocar una sensación de invasión en la imagen. En sus formas más complejas, el entorno virtual es un verdadero espacio de síntesis, en el que uno tiene la sensación de moverse físicamente”.

Técnicamente entendemos por realidad virtual al sistema o interfaz informático que genera entornos sintéticos tridimensionales a tiempo real (o no), representación de algún aspecto del mundo real o ficticio a través de medios electrónicos o representaciones de la realidad, en el cual el usuario tiene la sensación de pertenecer ha dicho ambiente sintético o incluso interactuar con él. La realidad virtual establece una nueva forma de relación entre el uso de las coordenadas de espacio y tiempo, supera las barreras espacio-temporales y configura un entorno en el que la información y la comunicación se nos muestran accesibles desde perspectivas hasta ahora desconocidas.

La realidad virtual se encuentra en su estado inicial. Las posibilidades, en todos los campos, producen vértigo. Tam-



Fig. 2 CAVE de realidad virtual intrusiva / interactiva. Estados Unidos.

bién lo producen sus posibles consecuencias, según los usos a los que pueda destinarse.

Los mundos virtuales desarrollados por la realidad virtual son potencialmente una poderosa herramienta científica, una novedosa forma de diversión, un extraordinario vehículo de información / comunicación y un estimulante medio de expresión artística. Desde la investigación científica a los museos virtuales, incluyendo, entre otros, la medicina, la arquitectura, el diseño industrial, las telecomunicaciones, la ingeniería o la publicidad, cada vez son más los sectores en los cuales paulatinamente se empiezan a utilizar técnicas propias o cercanas a la realidad virtual.

Algunas de estas aplicaciones se encuentran aún en fase experimental, mientras que en otros casos se trata de sistemas que empiezan a ser utilizados regularmente en las tareas que fueron concebidos. Las aplicaciones más importantes de la Realidad Virtual en la actualidad:

- **MEDICINA.** Es uno de los campos más importantes para las aplicaciones de realidad virtual. Así como la medicina cuenta con una basta diversidad de áreas de estudio, de igual manera la realidad virtual se aplica para bastantes disciplinas. Aplicaciones destacadas son: formación; reciclaje profesional y simulación; ayuda a la inserción de discapacitados físicos; cirugía y microcirugía; psiquiatría y psicología; tratamientos de pacientes de cáncer y terapias de rehabilitación y diagnosis.
- **ARQUITECTURA Y URBANISMO.** Una de las aplicaciones naturales de la realidad virtual ha sido la simulación de proyectos arquitectónicos. El equipo alemán Art + Com fue uno de los primeros en montar instalaciones inmersivas para reproducir los proyectos de reconstrucción de la ciudad de Berlín. Uno de los aspectos más interesantes de la aplicación es la posibilidad de modificar o crear inmersivamente la geometría del diseño, que es distinto a prepararla previamente, de esta manera, se han resuelto un importante número de edificaciones contemporáneas de rango internacional, como el Museo Guggenheim. Aplicaciones destacadas son: diseño de edificios y de interiores; ordenación urbanística y territorial; promoción y presentación de proyectos; estudio de impacto medioambiental y recreación de edificios histórico-artísticos.
- **CIENCIAS.** Son numerosas las aplicaciones de la R.V. en el campo de las ciencias, ya sean naturales, sociales o industriales. Aplicaciones destacadas son: aerodinámica virtual; matemáticas y astrofísica; ingeniería molecular; geología y biología y meteorología y astronomía.

- INDUSTRIA. Los desarrolladores virtuales han intentado especialmente implementar aplicaciones en diversas áreas industriales. En distintas etapas del proceso productivo se ha previsto la ocupación de simuladores tridimensionales y dispositivos interactivos. También el diseño de los productos puede ser mejorado con medios virtuales. Naturalmente la modelación tridimensional es un aspecto importante en este tema, pero también, la capacidad de visualizar todos los detalles volumétricos, el desplazamiento de piezas interiores, probar distintos acabados e incluso alternativas de montajes, constituyen una relevante aplicación de la realidad virtual. Aplicaciones destacadas son: diseño y maquetación de productos; diseño de maquinaria; experimentación y pruebas; mantenimiento de maquinaria; mantenimiento de cadenas de producción; optimización de recursos; visualización de datos complejos; manipulación remota de robots y ayuda para la concepción de robots.
- DEFENSA E INDUSTRIA AEROESPACIAL. La industria militar o de defensa ha sido como ya hemos visto una importante promotora de la investigación virtual. Sólo mencionar el entrenamiento aeronáutico nos demuestra la importancia de esta disciplina en la defensa. La preparación de pilotos civiles y militares con instalaciones virtuales tiene ventajas evidentes, costo, tiempo, experiencia, entre otras, lo que ha revolucionado el mundo de la aeronáutica y de la tecnología espacial. Aplicaciones destacadas son: simuladores aéreos, terrestres y submarinos, entrenamiento de combate y prácticas de tiro; sistemas de control y supervisión de operaciones; planificación y narración de misiones espaciales y entrenamiento de astronautas.
- ENTRETENIMIENTO. El interés primario de la realidad virtual ha sido el entretenimiento tecnológico, de hecho, la mayor experiencia para el gran público con esta tecnología son los videojuegos o juegos electrónicos, los cuales han nacido como curiosidades científicas, pero se han consolidado rápidamente. Importante en la evolución del entretenimiento virtual lo tuvo la iniciativa de la empresa británica Virtuall, que desarrolló a principio de los años 90 varias instalaciones individuales y grupales en diversas ciudades del mundo. Aplicaciones destacadas son: juegos y atracciones para recreativos; juegos de realidad virtual para el hogar; cine y televisión; teatro virtual; ediciones multimedia; publicidad y sexo virtual.

Pero, ¿qué ocurre con el patrimonio?

Como hemos podido apreciar es extensísimo el campo de actuación de la realidad virtual en nuestra sociedad. Sería

harto preocupante que el área de las humanidades y en especial el patrimonio cultural no hubiera sido explorado por estas nuevas tecnologías.

## Arqueología virtual. Una nueva disciplina

La arqueología se ha preocupado de desenterrar, estudiar y valorar aquellos restos que sobrevivieron al paso del tiempo. A través de ellos conocemos mejor nuestra cultura, nuestros orígenes, la forma de vida de nuestros antepasados, sus costumbres funerarias, sus prácticas económicas e, incluso aquellos mecanismos sociales por los que se regían. Es una importante fuente de información y forma parte de la memoria histórica que cada comunidad tiene y que, por lo tanto, se tiene que estudiar, proteger y sobre todo transmitir a generaciones venideras.

La protección del patrimonio arqueológico es imprescindible y no debe basarse solamente en la aplicación de técnicas arqueológicas. Exige un fundamento más amplio de competencias y conocimientos científicos. La protección del patrimonio arqueológico debe basarse en una colaboración objetiva entre especialistas de diversas y múltiples disciplinas y la colaboración de las administraciones, arqueólogos, empresas privadas y del público en general.

El término patrimonio es una expresión latina *patrimonium* que indica “los bienes que el hijo tiene heredados de su padre y que nosotros transmitiremos también a nuestros descendientes, para asegurar la continuidad del linaje”.

Con el devenir del tiempo, el concepto se amplía a bienes ideológicos y conceptuales como el patrimonio histórico o cultural. La misma UNESCO ha declarado patrimonio a determinados bienes culturales de calidad especial y que la humanidad debe proteger y transmitir a la posteridad. El patrimonio ha adquirido por tanto un gran valor social con múltiples derivaciones culturales, económicas, turísticas, etc., que puede ser puesto al servicio de la sociedad para incrementar la educación de la misma.

El patrimonio arqueológico constituye una parte singular del patrimonio cultural. Está integrado por bienes muebles e inmuebles, que constituyen un valor histórico. Este patrimonio conecta los seres humanos del pasado con los del futuro. Para los arqueólogos, antropólogos, historiadores y otros científicos es insustituible como objeto de estudio. Para ellos y para el resto de los humanos el patrimonio arqueológico es motivo de inspiración, educación y emociones.

Vivimos en un mundo en el que las humanidades pierden peso en los programas educativos y en la propia sociedad, quizás porque nuestro mundo haya llegado a ser tecnológico. Como bien dice Humberto Ecco “las computadoras están difundiendo



**Fig. 3** Excavación sistemática arqueológica. Sevilla. 2010.

una nueva forma de instrucción, pero son incapaces de satisfacer aquellas necesidades intelectuales que estimulan”.

De entre todas las aplicaciones de las nuevas tecnologías en el campo de las humanidades y de la cultura en general, es la arqueología donde se están consiguiendo excelentes ejemplos de reconstrucción histórica virtual, en el ejercicio profesional y en la conservación y difusión del patrimonio arqueológico.

El concepto “Virtual Archeology” (Arqueología Virtual), fue propuesto por primera vez por Paul Reilly en 1990, describiéndolo como “el conjunto de técnicas informáticas que permiten la visualización 3D de la representación virtual y realista de los objetos y edificios antiguos, cuyos restos han desaparecido o están en un estado de preservación tan deficiente que hacen imposible su observación o muy difícil su interpretación”. La arqueología virtual, de hecho, puede presentar de manera inmediata contextos complejos relativos al pasado o remitir lecturas de situaciones históricas, arquitectónicas, territoriales o sociales, demostrando ser una válida contribución en la transposición de informaciones, proponiéndose por lo tanto como potente instrumento de transmisión cultural.

En los últimos años el impacto de las nuevas tecnologías ha sido muy fuerte en la forma de representar el patrimonio

arqueológico. Se ha pasado del conocimiento cerrado, exclusivo, erudito y casi endogámico de la manera de representar y gestionar la divulgación del patrimonio arqueológico, a una forma completamente distinta. Se abre una nueva posibilidad de registro, conservación y divulgación, en donde el lenguaje universal de la imagen es la llave para una divulgación general del patrimonio.

El fundamento de la arqueología virtual está basado en la consecución de la hipótesis virtual arqueológica, que constituye, a nuestro parecer, el punto más importante y trascendente de la metodología o proceso virtual. De ella va a depender el éxito o fracaso del desarrollo intelectual de la misma y un error no podrá ser subsanado por ningún virtuosismo técnico de visualización, animación o posproducción.

Como su propio nombre indica, la hipótesis virtual arqueológica es una hipótesis de naturaleza digital y desarrollo virtual. Su definición podría responder “al conjunto de afirmaciones de carácter hipotético y consensuado, que en su combinación definen y determinan la propuesta virtual, total, parcial o fragmental de un bien del patrimonio arqueológico, en un espacio y tiempo determinado”.

La creación de una hipótesis arqueológica, en general, no nos asegura ninguna veracidad “a priori”. Solamente conociendo la metodología de desarrollo de la misma (equipo, do-



Fig. 4 Reconstrucción virtual de la ciudad romana de Itálica. Consejería de Cultura. Junta de Andalucía. ANTINOO. Sevilla 2010.

cumentación, etc.), podremos darle mayor o menor grado de credibilidad a la propuesta, pero no nos llevemos a engaño, siempre conlleva un porcentaje determinado de riesgo; difícilmente podemos manejarnos en el campo de las “certezas al 100%” en bienes cuyas lecturas completas han sido perdidas o desvirtuadas para siempre.

Básicamente la hipótesis virtual arqueológica consigue definir una imagen virtual de un bien arqueológico a partir de cómo creamos que fue y no de cómo se encuentra en la realidad. Como antes adelantamos, la hipótesis virtual ofrece a los arqueólogos la posibilidad de llevar a la realidad sus hipótesis reconstructivas, definir espacios, solucionar volúmenes y en síntesis plantear la mejor resolución al problema espacial de un bien inmueble de carácter arqueológico. Su uso subraya el carácter potencial de los resultados de la investigación en la visualización en 3D aplicada al patrimonio arqueológico.

El proceso de creación de una hipótesis virtual arqueológica persigue dar respuesta a las siguientes cuestiones:

¿Cuál es el elemento que vamos a representar?, ¿en que momento de su historia lo vamos a representar?, ¿quiénes lo vamos a desarrollar?, ¿cómo lo vamos a conocer?, ¿cómo era el objeto?, ¿qué aspecto tenía?, ¿cuál era su estructura?, ¿cuáles eran sus materiales?, ¿cómo estaba decorado?, ¿cuál era su función?, etc...

Vamos a intentar sintetizar el proceso de consecución de una hipótesis virtual concreta sobre un bien de carácter arqueológico:

- DEFINICIÓN DE ESPACIO. Selección del bien o parte del bien que vamos a estudiar profundamente y determinación de aspecto u objetivos a desarrollar en el proceso.
- DEFINICIÓN DE TIEMPO. Concreción del momento histórico a reconstruir dentro de la amplia horquilla temporal de un bien patrimonial. La definición del parámetro de tiempo, intentaremos adoptarla y concretarla vinculándola a los objetivos antes definidos, y a acontecimientos históricos singulares que representaron importantes transformaciones en la estructura del bien arqueológico.
- CREACIÓN DE UN EQUIPO MULTIDISCIPLINAR. Creación de un equipo de investigación multidisciplinar compuesto por una serie de profesionales especializados en distintos temas, que por complementariedad desarrollan una propuesta de realidad posible en el tiempo y en el espacio del bien reconstruido. La dirección debe ser asumida por una calificación profesional nueva, Restaurador Virtual, perfil compuesto de carácter mixto de conservador y Restaurador de Bienes Culturales con amplios conocimientos

de diseño asistido por ordenador CAD y programas de infografía virtual. El equipo de investigación se completa con los siguientes perfiles profesionales: arqueólogos/as, arquitectos/as, historiadores/as, licenciados/as en arte, restauradores/as, topógrafos/as, infógrafos/as, técnicos/as en comunicación audiovisual, geólogos/as, ecólogos/as, técnicos/as informáticos/as, etc.

- **DESARROLLO INVESTIGACIÓN.** Proceso de investigación integral del monumento arqueológico, desde todos los puntos de vista necesarios para conocer la realidad física, e histórica del mismo. El acercamiento multidisciplinario de los distintos especialistas nos determinarían los siguientes valores documentales.
- **HIPÓTESIS VIRTUAL.** Conclusión del proceso desarrollado en este punto, con la consecución de la hipótesis virtual arqueológica consensuada del monumento estudiado en un momento preciso de su historia material. En este momento de la investigación, podemos determinar claramente la estructura, morfología, aspecto interior y exterior, materiales utilizados en su construcción y programas decorativos que presentaba el bien patrimonial arqueológico objeto de estudio, con un nivel de certeza medio/alto.

Determinada la hipótesis virtual arqueológica, el proceso metodológico virtual continúa con el proceso informático de digitalización de todos los datos facilitados por la investigación y su posterior tratamiento y postproducción digital.

El desarrollo de la arqueología virtual en la sociedad es positivo porque:

- **INTERESA A UN GRAN NÚMERO DE PERSONAS.** La restauración virtual es una disciplina que atrae e interesa a un gran número de público, con un aspecto muy amplio. En primer lugar, a arqueólogos, arquitectos, historiadores, restauradores y muchas otras naturalezas profesionales, como importante herramienta de trabajo en la investigación, conservación y difusión del patrimonio arqueológico. Por otro lado, al gran público, que pueda transportarse a un universo virtual, un túnel del tiempo desde el cual accede a la reconstrucción integral de un mundo desconocido.
- **CARÁCTER INOCUO.** La arqueología no perjudica a nadie al realizar una reconstrucción virtual de un edificio o yacimiento (considerando las restricciones de la legislación internacional vigente en la materia), no daña al patrimonio, ni contamina su valoración y exposición.

- **POR SUS CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS.** Es un método limpio que a través de la digitalización de datos consigue la fidelidad con el original, la conservación en el tiempo de dicha documentación, capacidad de manipulación, intervención, cambios, e impresión del proyecto.
- **VENTAJAS ECONÓMICAS.** Hoy ya no es necesario contar con tantos dibujantes en el desarrollo de un proyecto, ya que con una buena organización y planificación se liberan muchas disciplinas históricas del dibujo. Así mismo abarata tremendamente el uso de maquetas arquitectónicas, de trabajo costoso y nula capacidad de manipulación y sustitución.
- **RAPIDEZ DE INFORMACIÓN.** La aplicación de la arqueología virtual en internet asegura la difusión inmediata e internacional de los datos arqueológicos.
- **CAPACIDAD PEDAGÓGICA.** La aplicación de la realidad virtual en el patrimonio arqueológico consigue un formato de difusión de resultados de investigación de una tremenda capacidad pedagógica y educativa, al estar basada en su propia capacidad visual y en su alto poder descriptivo. La arqueología virtual se constituye como un poderosísimo aliado en el futuro de la formación y educación.

Sin embargo, y a pesar de todas estas ventajas descritas, es necesario adoptar una posición crítica ante estas tecnologías, no perdiendo de vista su carácter de medio que apoya al desarrollo del conjunto de disciplinas que estudian el patrimonio arqueológico.

- Muchas de las reconstrucciones virtuales que vemos en la actualidad tienen un mínimo rigor científico, cuando éste existe.
- Algunas reconstrucciones virtuales prestan más atención a un acabado realístico del entorno, nubes, hierba, pájaros que vuelan de un modo natural, que a un objetivo científico. Recrean un ambiente, una edificaciones más o menos documentado (algunas sin documentación). Con datos mínimos se extrapolan resultados para terminaciones más vistosas.

La carta para la gestión y protección del patrimonio arqueológico de 1990 consideraba como integrantes del proceso de gestión del patrimonio las labores de inventario, prospección, excavación, documentación, investigación, mantenimiento, conservación, preservación, restitución, información,

Este nuevo planteamiento internacional contempla como fundamental conseguir un equilibrio sostenido entre investigación (contenido), conservación (sostenibilidad) y difusión

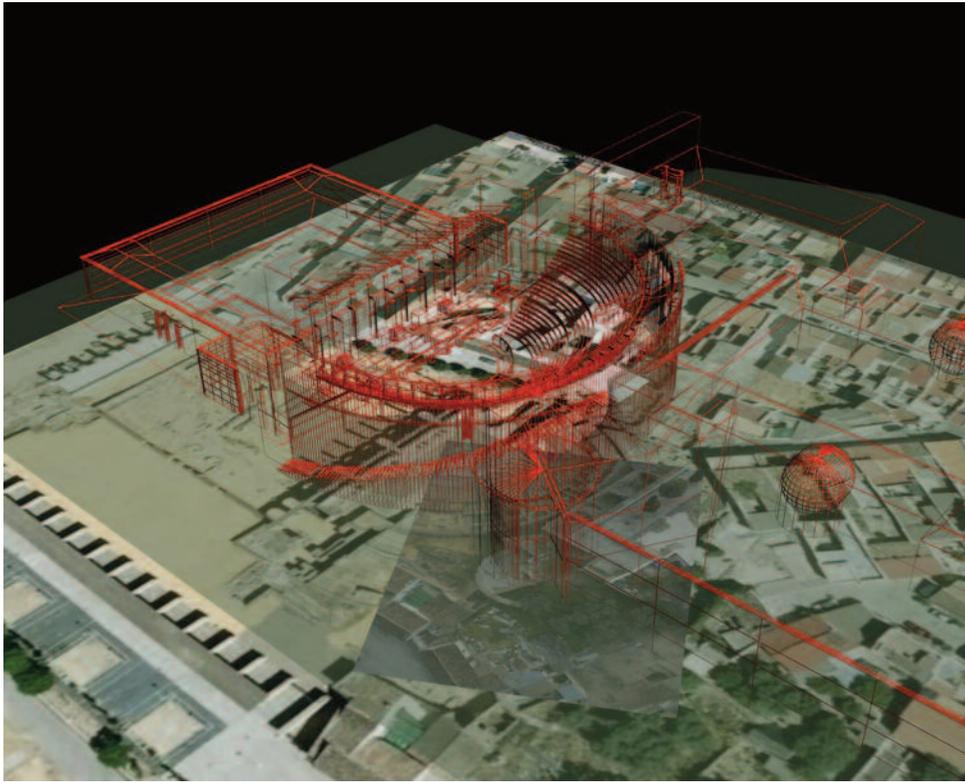


Fig. 5 Estudio de cotas y pendientes de la zona alta del teatro de Itálica. Consejería de Cultura. Junta de Andalucía. ANTINOO. Sevilla 2010.

(fin social). La realidad virtual es una poderosa aliada en estos fines, investigación, conservación y difusión del patrimonio arqueológico.

- ARQUEOLOGÍA VIRTUAL E INVESTIGACIÓN. La menos reconocida de las disciplinas de investigación de la arqueología virtual se organiza en torno al concepto de hipótesis virtual arqueológica (objetivo de este trabajo que analizaremos más tarde), tanto en su naturaleza de laboratorio como sobre el terreno a tiempo real. Investigación en cuanto que permite a través de métodos puramente arqueológicos y la aplicación de nuevas tecnologías ampliar el conocimiento de ese bien arqueológico.

El proceso de documentación es fundamental para poder desarrollar el proceso de investigación científica, así como para la preservación de los bienes documentados. La documentación virtual arqueológica permite reflejar el estado de un monumento o bien en el momento de ser documentado, así como establecer hipótesis sobre su funcionalidad, función, y generar propuestas de intervención física sobre el propio bien, de una manera totalmente reversible y no agresiva para la propia materialidad física del mismo.

Pero la propia documentación generada por estos procesos de hipótesis, anastilosis, reconstrucción y recreación virtual son un patrimonio en si mismo, sujeto a la fragilidad y debilidad demostrada hasta el momento por los soportes digitales, dada su escasa pervivencia y durabilidad. Es pues, extremadamente necesario asegurar la supervivencia y permanencia de toda la documentación digital generada en dichos procesos, garantizando así unos estándares de calidad documental.

- ARQUEOLOGÍA VIRTUAL Y CONSERVACIÓN. La arqueología virtual es fundamental en el proceso de conservación de patrimonio arqueológico debido a su precisión documental, basada en un proceso de digitalización de la forma. La amenaza de deterioro, desaparición o traslado gravita sobre los bienes y sólo la documentación digital nos asegura la total conservación para las generaciones venideras.

La digitalización tridimensional mediante el uso de escáneres láser de última generación y fotogrametría permite generar modelos informáticos tridimensionales hiperprecisos de todo tipo de estructuras y objetos patrimoniales; o, lo que es lo mismo, permite

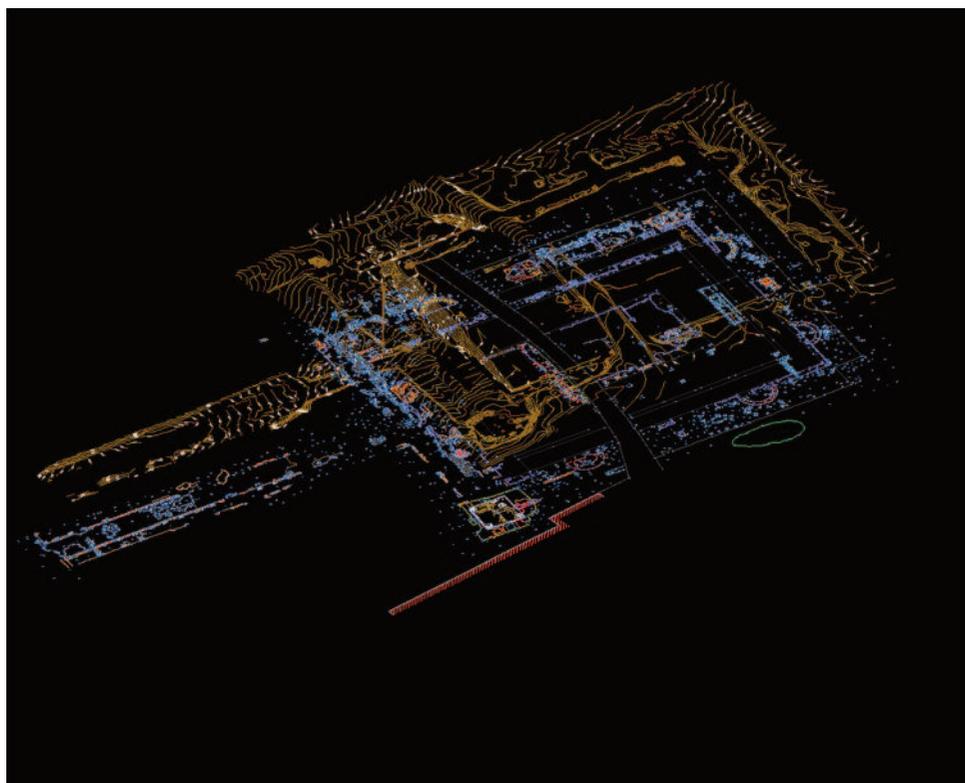


Fig. 6 Levantamiento taquimétrico del Traianeum de Itálica. Consejería de Cultura. Junta de Andalucía. ANTINOO. Sevilla 2010.

documentar el patrimonio cultural con un nivel de precisión inmejorable ante la amenaza de su deterioro o destrucción. En este punto es importante remarcar que el patrimonio cultural material tiende a degradarse de manera permanente. Y si bien es cierto que las modernas técnicas de conservación permiten retrasar este proceso también es necesario decir que esto no siempre es posible por diversos motivos.

El patrimonio cultural que se encuentra más expuesto a los procesos de degradación y cambio es aquel conservado “in situ”, al aire libre. Básicamente este patrimonio está compuesto por estructuras arquitectónicas y arqueológicas que no pueden ser trasladadas a almacenes u otros lugares que garanticen su mejor conservación. Estas estructuras sufren constantes agresiones climatológicas (lluvia, hielo, sol, viento, etc.) e incluso antrópicas (actos de vandalismo, expolio, visita de miles de turistas, etc.), lo que las convierte en objeto de constantes intervenciones de conservación y restauración, que poco a poco pueden ir alterando la imagen original de los bienes.

Por otro lado en determinadas situaciones y contextos estas estructuras, junto con el patrimonio cultural

mueble, quedan sometidas a los avatares de cataclismos inesperados, como los terremotos o las inundaciones, cuyas consecuencias pueden llegar a ser devastadoras. Lo ocurrido en la ciudad de Bam (Irán) en 2003 o en L’Aquila (Italia) en 2009 demuestra que la documentación del patrimonio cultural con un nivel de precisión suficiente como para volver a ser reconstruirlo de nuevo, así como para poder estudiarlo en detalle en el futuro a pesar de su desaparición física, es algo indispensable.

- ARQUEOLOGÍA VIRTUAL Y LA PRESENTACIÓN Y DIFUSIÓN. Es la vertiente más conocida y reconocida de la arqueología virtual. Son muchos los yacimientos, museos y parques arqueológicos de todo el mundo que utilizan estas tecnologías en reconstrucciones virtuales de distinta índole. Estas reconstrucciones se basan en formatos inanimados de textos o imágenes, audiovisuales con animaciones virtuales en pantallas TFT o grandes pantallas de proyección, en todos los sistemas de realidad virtual. Los gráficos han demostrado ser una magnífica herramienta de difusión cultural gracias a las evidentes ventajas que presentan: favorecen una mayor democratización de la cultura ya que permiten llegar a todo



Fig. 7 Reconstrucción virtual anfiteatro de Itálica. Consejería de Cultura. Junta de Andalucía. ANTINOO. Sevilla. 2010.

tipo de públicos de una manera fácil y accesible, ofrece una gran flexibilidad técnica, permiten personalizar los contenidos, se muestran respetuosos con los bienes culturales originales, mejoran la comprensión del patrimonio cultural por parte de los visitantes, resulta muy espectacular, permiten transmitir mas información en menos tiempo.

## Fundamentos de la disciplina

Desde finales del siglo XX hasta hoy, las nuevas tecnologías en general y los métodos de visualización computarizada en particular, se están empleando en un variadísimo número de contextos ligados con la investigación, preservación y divulgación del patrimonio cultural. Esta tendencia está relacionada con el crecimiento constante tanto del turismo cultural como de la inversión pública destinada a mejorar los procesos de gestión integral del patrimonio histórico. En este contexto The London Charter; la Carta de Londres para la visualización computerizada del patrimonio cultural aspira a establecer una serie de principios y recomendaciones generales que sirvan para aumentar el rigor científico con el que las nuevas tecnologías se están aplicando por todo el mundo en el campo del



Fig. 8 Logotipo The London Charter. The London Charter. Reino Unido.

patrimonio cultural. Esta aspiración está sustentada en una firme convicción de que la visualización computarizada aplicada al campo del patrimonio cultural no es simplemente una herramienta más o una técnica auxiliar, sino que verdaderamente constituye, o puede llegar a constituir, una disciplina propia capaz de desarrollar un método y unas técnicas específicas encaminadas a satisfacer un objeto de estudio concreto.

La Carta de Londres se organiza en torno a seis grandes principios (8 en la versión 1.1) que actúan a modo de ejes vertebradores de recomendaciones algo más concretas. Cada principio queda definido en una primera parte que sirve para describir de manera general el sentido y orientación del mismo. Por debajo de esta definición aparecen subapartados en los que se proponen recomendaciones en relación con el principio del que emanan. Estas recomendaciones, a pesar de ser más concretas que la definición del principio, siguen teniendo un carácter claramente general para permitir su aplicación en contextos que pueden ser notablemente diferentes. Así por ejemplo; tanto los principios como las recomendaciones emanadas de La Carta de Londres pueden ser aplicados en campos tan amplios y diferentes como los de patrimonio monumental, etnográfico, documental, artístico, oral o arqueológico, por citar tan solo algunos ejemplos.

Actualmente los métodos de visualización computarizada se están empleando en un variadísimo número de contextos ligados con la investigación, preservación y divulgación del patrimonio cultural. Por ello resulta necesario elaborar un conjunto de principios que aseguren que la visualización del patrimonio cultural se lleva a cabo como un trabajo intelectual y técnicamente riguroso así como metodológicamente mucho más sólido. Al mismo tiempo, tales principios deben reflejar las propiedades características tanto de las tecnologías de visualización computarizada como de sus métodos de trabajo. En este sentido, La Carta de Londres persigue fomentar, y construir, un consenso entorno a estas cuestiones, que sin lugar a dudas demandan de un amplio reconocimiento y cumplimiento dentro de la comunidad científica internacional. Es por ello que La Carta de Londres presenta como su principal objetivo mejorar el rigor con el que los métodos de visualización computarizada y sus resultados se usan y evalúan en el ámbito del patrimonio cultural.

Es precisamente un acentuado desarrollismo de la disciplina, sin control, en los primeros años del nuevo siglo, lo que hace que importantes instituciones académicas mundiales, junto a refutados investigadores internacionales opten por intentar consensuar, entre todos, un texto legal que apoyado en las “Cartas de Restauo Internacionales”, resuman los principios de la arqueología virtual 3D en el patrimonio cultural.

La Carta de Londres (<http://www.londoncharter.org>) constituye hasta la fecha el documento internacional que más ha avanzado en la dirección de normalizar la disciplina. Su reciente actualización (versión 2.1) revela la necesidad imperante de encontrar un documento cuyas recomendaciones sirvan como base para diseñar nuevos proyectos cada vez con mayor rigor dentro del ámbito del patrimonio cultural, pero también para plantear nuevas recomendaciones y guías adaptadas a las necesidades específicas de cada rama del saber y comunidad de expertos. Es por ello, que entre los objetivos que se marca La Carta de Londres se encuentra “Ofrecer unos sólidos fundamentos sobre los que la comunidad de especialistas pueda elaborar criterios y directrices mucho más detalladas”. Y es que no debemos olvidar la incommensurable amplitud que presenta el concepto de patrimonio cultural. No es que se desee la especificación, es que es necesaria la especificación.

La Carta de Londres es plenamente consciente de la amplitud conceptual que posee el patrimonio cultural, y por consiguiente de las necesidades específicas que pueden requerir cada una de las partes que lo componen. Es por ello que en su preámbulo, La Carta de Londres ya reconoce estas necesidades: “en la medida en que las pretensiones que motivan el uso de los métodos de visualización varían ampliamente de unos campos a otros”, Principio 1: Implementación, “se deben elaborar directrices específicas que resulten apropiadas para cada disciplina y para cada comunidad de expertos”. Por su parte el Principio 1.1 recomienda: “Cada comunidad de expertos, ya sea académica, educativa, de conservación o comercial, debe desarrollar las directrices de implementación de la Carta de Londres de manera coherente con sus propias pretensiones, objetivos y métodos”. Parece pues evidente, que dada la importancia que el patrimonio arqueológico tiene dentro del patrimonio cultural, y reconocida por muchos la existencia de una comunidad de expertos propia que trabaja de manera habitual entorno al concepto de arqueología virtual, se deba plantear la redacción de guías, documentos y recomendaciones que aun siguiendo las directrices generales que marca La Carta de Londres tomen en consideración el carácter específico que posee la arqueología virtual.

Por otro lado, la celebración del I Congreso Internacional de Arqueología e Informática Gráfica, Patrimonio e Innovación 2009 ARQUEOLOGICA 2.0, ha marcado un punto de inflexión, colocando a Sevilla y su área metropolitana en el centro del debate mundial de la disciplina y puso de manifiesto, especialmente a través de su sesión plenaria tanto el inmenso potencial que poseen las nuevas tecnologías aplicadas al ámbito de la arqueología como la necesidad, admitida por la comunidad científica, de generar un documento internacional que recoja directrices y recomendaciones específicamente orientadas a lo que algunos denominan arqueología virtual.



Fig. 9 Logotipo La Carta de Sevilla. Sociedad Española de Arqueología Virtual. SEAV. España.



Fig. 10 Logotipo Sociedad Española de Arqueología Virtual. SEAV. España.

Por todo ello, existió un contexto internacional favorable a la elaboración de una nueva Carta denominada de Sevilla, que englobada dentro de La Carta de Londres defina objetivos y principios para la mejora de la visualización computarizada en el campo del patrimonio arqueológico.

### Arqueología virtual en España

La celebración en España en el 2010 de dos Congresos Internacionales sobre arqueología virtual, como el Congreso

Internacional de Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology (CAA) y de la II edición de ARQUEOLÓGICA 2.0, puede parecer un hecho casual o aislado, fruto del azar. Nada más lejos de la realidad. España es una potencia mundial en arqueología virtual y se ha colocado en menos de una década como uno de los referentes internacionales en este campo, que apenas si tiene 20 años de vida.

Responsable de parte de tan buenos resultados lo tiene la Sociedad Española de Arqueología Virtual, S.E.A.V. que se constituyó por iniciativa de un grupo de investigadores de la arqueología de síntesis o virtual, preocupados por el desarro-



Fig. 11 Logotipo Foro Internacional de Arqueología Virtual. Sociedad Española de Arqueología Virtual. SEAV. España.

190

llo, la consolidación y la difusión de la disciplina y para activar el papel de ésta en la sociedad. La asociación, cuyo ámbito territorial es todo el territorio español, se integra por arqueólogos, informáticos, infógrafos, grupos de investigación de Universidades españolas y empresas e instituciones que velan por el patrimonio arqueológico.

Esta asociación tiene por objeto agrupar a todos los usuarios e interesados en la informática gráfica aplicada a la arqueología virtual, ya sean personas físicas o jurídicas, científicos, profesionales o voluntarios culturales que pretendan desarrollar su acción voluntaria a favor de dicha disciplina, con el fin de aunar y coordinar los esfuerzos tendentes a su investigación, desarrollo y difusión, y realizando cuantas acciones de carácter cultural, científico, educativo, recreativo, instructivo, reivindicativo, que sin fines lucrativos, persiga el desarrollo del patrimonio arqueológico virtual en España.

La Sociedad Española de Arqueología Virtual, aglutina a veintiún grupos de investigación de Universidades Españolas y a veinte empresas de arqueología virtual.

La aplicación a nivel mundial de la visualización 3D por ordenador en el campo del patrimonio arqueológico presenta a día de hoy un panorama disperso. Por ello, se hace ineludible plantear un debate teórico-práctico que permita establecer unos principios básicos que regulen las prácticas de esta pujante disciplina.

Con esta intención, la Sociedad Española de Arqueología Virtual SEAV, creó el Forum Internacional de Arqueología

Virtual, un foro de expertos transnacional, donde, en su seno, se fundamenten las bases teóricas de la arqueología virtual Internacional del futuro. Los siguientes objetivos de este Forum son:

- Liderar la redacción transnacional de la carta internacional de la arqueología virtual, denominada Carta de Sevilla.
- Ratificar internacionalmente la Carta de Sevilla en la Sesión Plenaria del III Congreso Internacional de Arqueología e Informática Gráfica, Patrimonio e Innovación ARQUEOLÓGICA 2.0 de Sevilla a celebrar en junio de 2011.
- Propiciar una colaboración abierta y sostenida entre la Carta de Sevilla y The London Charter.
- Coordinar acciones de apoyo y difusión de la arqueología virtual con los principales organismos internacionales.
- Fomentar el debate internacional sobre los fundamentos teóricos de la arqueología virtual.
- Generar una línea editorial específica de prestigio internacional.
- Velar por la difusión y el adecuado cumplimiento de los principios emanados de la Carta de Sevilla.
- Consolidar la arqueología virtual como un campo de investigación propio.

## Bibliografía

LÉVY, P. (1998): ¿Qué es virtual? Editorial Paídos. Barcelona.  
QUEAU, P. (1995): Lo Virtual. Virtudes y vértigos. Paidós. Madrid.

ALEGRE, E. (2004): Realidad Virtual y Reconstrucción 3D: ¿Arqueología o Ciencia Ficción?. Actas del 1er Encuentro Internacional de Realidad Virtual. Córdoba. 5/7 mayo de 2003. Facultad de Filosofía y Letras. Universidad de Córdoba.

ECCO, U (1992): Discurso Alejandrino. Revista El malpensante. Santafé de Bogotá. Publicada el 10 de enero de 1996. Consultada el 17 de agosto de 2008. <[http://www.elmalpensante.com/52\\_eco.ase](http://www.elmalpensante.com/52_eco.ase)>

FORTE, M. (1997): Virtual Archaeology: Great Discoveries Brought to Life Through Virtual Reality, Thames and Hudson, London.

LÓPEZ-MENCHERO, V. (2008): La Realidad Virtual como herramienta para la gestión integral del Patrimonio Arqueológico. Congreso de Aplicaciones de Realidad Virtual. CARVI. Vitoria-Gasteiz 2008.

REILLY, P. (1990): Towards a virtual archaeology. En Computer Applications in Archaeology, Editado por K. Lockyear and S. Rahtz. Oxford: British Archaeological reports.

