



FIG. 124. Ortofoto del alzado sur de Piazza Peruzzi de la zona de la ciudad de Florencia que conserva el trazado del antiguo anfiteatro romano.

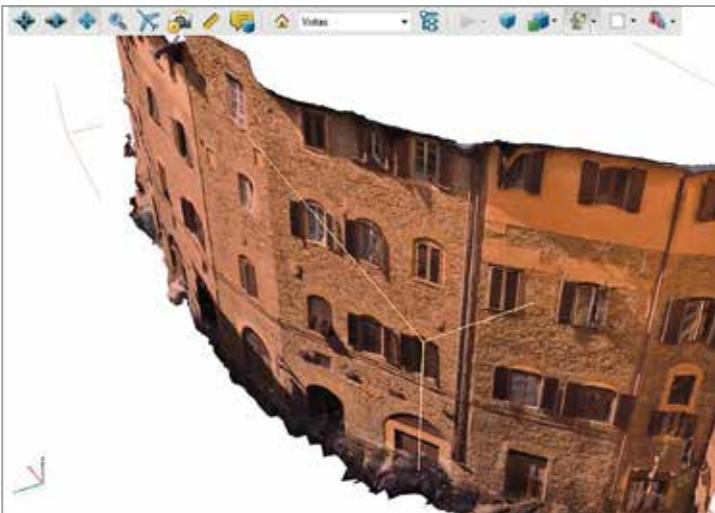


FIG. 125. Modelo 3D del alzado del anfiteatro en formato PDF3D aplicando diferentes filtros de visualización.

De esta manera podemos resumir los resultados en:

- Generación en ambos casos de una nube de puntos densa x, y, z con los 3 parámetros adicionales RGB mediante combinación de TLS y de técnicas fotogramétricas de correlación de imágenes.
- Triangulación para la generación de la malla y texturización únicamente en el caso del alzado del anfiteatro para la obtención de un ortoalzado. En el teatro debido a su complejidad y a su objetivo arqueológico se ha omitido este paso puesto que para la generación de secciones y ortofotos es suficiente con la propia resolución de la nube de puntos. Con una resolución media de uno a dos milímetros entre puntos.
- En el teatro se han generado diversas secciones horizontales sobre la nube de puntos a diferentes alturas con el fin de interpretar los arcos radiales que todavía se conservan en la planta (*vid.* FIG. 122).
- Respecto a los resultados métricos con posibilidades de difusión, se han aportando diferentes soluciones que permiten trabajar con la información sin necesidad de unos conocimientos técnicos en visualización tridimensional. De

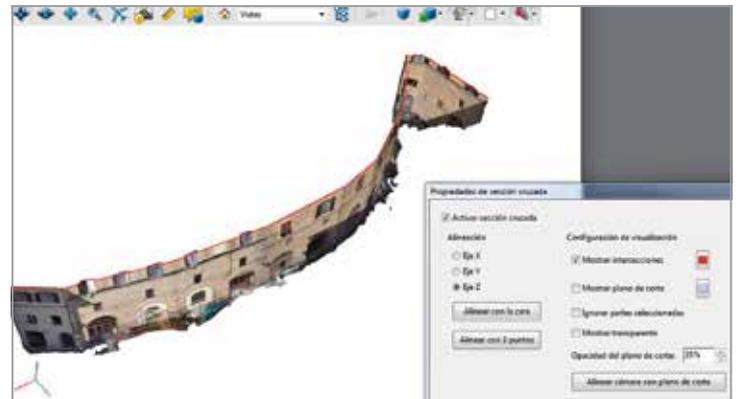


FIG. 126. Ejemplo de una sección horizontal con desplazamiento en tiempo real del anfiteatro en el formato PDF3D con las diferentes herramientas de la versión Adobe Pro Extend.

esta manera, todos los escaneados realizados en el teatro se han aglutinado en un servidor 3D para web, pudiendo gestionarse directamente sobre Internet Explorer. En cambio, la solución en el anfiteatro generó un fichero PDF3D que, debido a su poco peso, permite trabajar con bastante versatilidad.

3.4. Monumentos arquitectónicos

3.4.1. Patrimonio hidráulico romano en el valle medio del Ebro

JORGE ANGÁS / PAULA URIBE

3.4.1.1. Introducción

El proyecto que exponemos a continuación constituyó nuestra primera experimentación en la generación de un repositorio *online* de modelos tridimensionales, que fuesen accesibles con un objetivo eminentemente científico, pero que contribuyesen a la vez a generar una información igualmente divulgativa. Asimismo, congela un momento tecnológico del año 2010, como respuesta a una problemática que se venía sucediendo años atrás, respecto a la falta de funcionalidad de la información tridimensional. Actualmente,

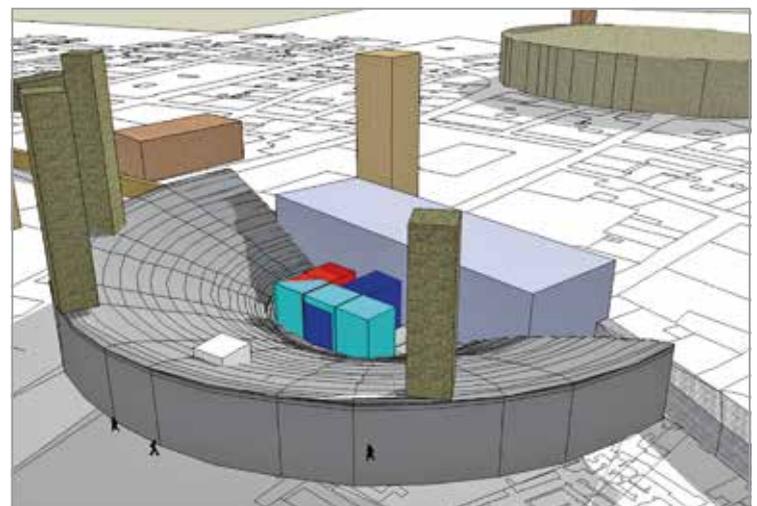
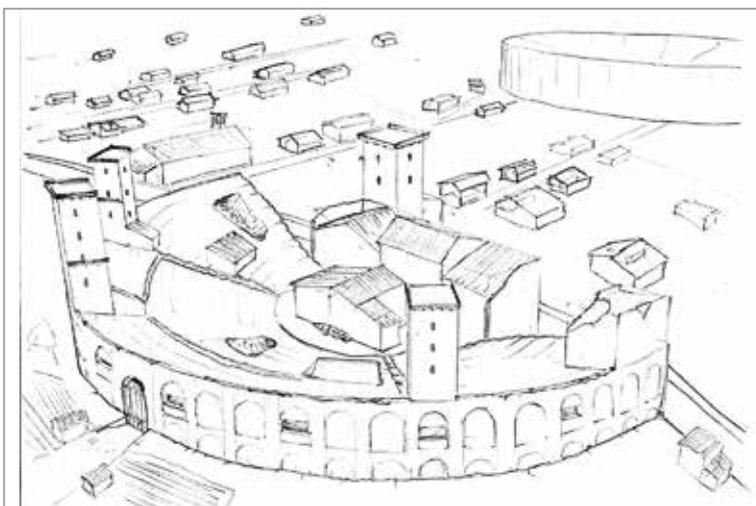


FIG. 127. Dibujo didáctico realizado sobre la reconstrucción de los datos obtenidos que muestra una hipótesis del área del teatro y fondo del anfiteatro en la segunda mitad del siglo XII de la ciudad de Florencia. Dib. Mirko Picchioni

al margen de su programación en Flash, con los problemas de indexado que representa este tipo de información en los buscadores y la necesidad de un *plugin*, este proyecto sigue estando plenamente vigente como fuente documental del patrimonio hidráulico romano. Además, debido a su practicidad y resultados, ha constituido la base de más de una decena de proyectos patrimoniales sucesivos sobre la misma base técnico-científica.

El objetivo del proyecto «Documentación geométrica, valoración y difusión del patrimonio hidráulico romano en el valle medio del Ebro»⁵² ha consistido en obtener un registro geométrico de un con-

52 Este proyecto ha sido posible gracias a la financiación de la Subdirección General de Protección del Patrimonio Histórico, Dirección General de Bellas Artes y Bienes Culturales del otrora Ministerio de Cultura junto con el asesoramiento



FIG. 128. Yacimientos arqueológicos y ámbito geográfico según la tipología arquitectónica. Desarrollo web del proyecto con los diferentes modelos tridimensionales de cada uno de los conjuntos hidráulicos documentados.

junto representativo de la arquitectura hidráulica romana del valle medio del Ebro. Esta información ha sido procesada con el fin de introducir los datos adquiridos en una plataforma web de libre acceso.

La metodología utilizada en cada uno de los yacimientos –representativos de la captación, distribución y evacuación del agua en el mundo romano– se ha realizado con la combinación de diferentes tipos de escáner 3D y técnicas topográficas clásicas. En este sentido, se han integrado tanto escáneres de largo alcance como de objeto cercano para aquellos elementos que necesitaban un mayor detalle. Asimismo, el entorno ha sido documentado, durante una segunda fase, mediante RPAS o drones, obteniendo el modelo tridimensional del entorno inmediato mediante técnicas de fotogrametría aérea de baja altura.

Los resultados han aportado una documentación topográfica exhaustiva de las principales estructuras hidráulicas romanas del valle medio del Ebro, lo que garantiza, además de su documentación y difusión, su conservación y prevención estructural.

La principal contribución de este proyecto ha sido ofrecer un equilibrio final de los resultados –con un nexo didáctico– entre la investigación para los responsables científicos y su difusión para cualquier interesado en la ingeniería hidráulica romana. Las técnicas de documentación geométrica del patrimonio cultural evolucionan rápidamente en la sociedad de la información actual, no permitiendo –en la mayoría de los casos– una reflexión clara sobre cómo y con qué finalidad administrar o gestionar la cantidad de información adquirida. De este modo, asistimos a un diálogo diacrónico e infrutilizado entre tecnología y metodología con el fin de aprovechar o gestionar toda la información disponible (Angás, 2011). Por ello, en la mayoría de los casos el verdadero avance no se encuentra en la propia técnica utilizada, sino en la combinación de ambos objetivos con el fin de obtener una optimización de los resultados entre el proceso de investigación y su difusión social.

científico del Grupo URBS de la Universidad de Zaragoza. Además en él han colaborado los responsables administrativos y científicos de cada uno de los monumentos expuestos, junto con las diferentes administraciones e instituciones: Gobierno de Navarra, Gobierno de La Rioja, Gobierno de Aragón, Ayuntamiento de Zaragoza, Museo de Teruel y Fundación Uncastillo.

La selección de las estructuras hidráulicas romanas más representativas, se ha centrado en los hallazgos arqueológicos del valle medio del Ebro, concretamente en monumentos ubicados en La Rioja, Navarra y Aragón. En consecuencia, el proyecto pretende documentar, estudiar y difundir con un nexo didáctico construcciones fundamentales para entender el ciclo del agua en la época romana: acueductos, presas, cloacas, depósitos y cisternas romanas.

La primera fase del proyecto se llevó a cabo desde finales del 2010 hasta febrero de 2012. Posteriormente, a partir de marzo de 2012 se incorporó una nueva fase de investigación, dedicada a la documentación mediante fotogrametría aérea de baja altura con un dron.

Las técnicas aplicadas en la documentación de cada uno de los conjuntos arquitectónicos seleccionados, ha sido la utilización de la tecnología escáner 3D para el registro terrestre y drones para la documentación mediante técnicas de correlación automática de imágenes (SfM) para la obtención de nubes de puntos densas. Se trata de una tecnología cuya aplicación en combinación con otras técnicas y procesos aporta una vasta información tanto a los investigadores como al público en general (García-Gómez, 2011: 25-44). Sin embargo, al mismo tiempo, se trata de uno de los procesos más complicados de gestionar por la propia heterogeneidad patrimonial. Su diversa morfología hace que el postproceso de la información registrada tenga que adaptarse a cada caso concreto. La propia documentación topográfica mediante diferentes tipologías de escáner 3D (tiempo de vuelo, diferencia de fase y luz blanca estructurada) y fotogrametría de cada uno de los yacimientos añade, además, un componente métrico muy útil para los responsables científicos de los yacimientos, a la vez que suple grandes carencias en los lugares donde todavía no existía una topografía suficientemente detallada de la arquitectura hidráulica. Además, en algunos de los yacimientos expuestos, como en la presa romana de Muel, los trabajos de documentación se han intercalado con diferentes fases de consolidación y limpieza, hecho que ha permitido un aprovechamiento excepcional de las condiciones físicas del yacimiento.

De este modo, como resumen del planteamiento general expuesto del proyecto que presentamos, hemos combinado el trinomio anteriormente citado de documentación, valorización y difusión, intentando aportar en cada una de las etapas, todas aquellas demandas o carencias que existían. Así mismo, hemos enfocado el proceso hacia un único fin: la armonía entre los datos científicos aportados y su propia divulgación, siempre con un marcado componente didáctico como nexo entre la investigación y la difusión de los resultados obtenidos.

3.4.1.2. Contexto cultural y antecedentes historiográficos

La temática que vertebra el proyecto se centra en el proceso denominado «ciclo del agua» –captación, distribución y evacuación– dentro de la arquitectura romana. De este modo, hemos seleccionado cada uno de los yacimientos siguiendo dos criterios fundamentales: los modelos arquitectónicos y el estado de conservación. Todo ello, con el fin de poder transmitir a la sociedad, con mayor claridad, cómo los romanos aprovecharon sus recursos hídricos. El ámbito geográfico abarca un grupo de ciudades o municipios que en época romana –a partir de Augusto– conformaron el *Conventus Caesaraugustanus*. Este hecho ha proporcionado al proyecto un carácter interterritorial entre La Rioja, Navarra, Zaragoza y Teruel. Los monumentos documentados se estructuran en tres ejes principales según el ciclo del agua:

A. Sistemas de abastecimiento del agua

El abastecimiento de las ciudades romanas estuvo influido, tal y como sucede en la actualidad, por la situación de las ciudades respecto a los cursos de agua. A este factor se sumaron la incidencia del clima en general y las variantes locales. Estos condicionantes po-

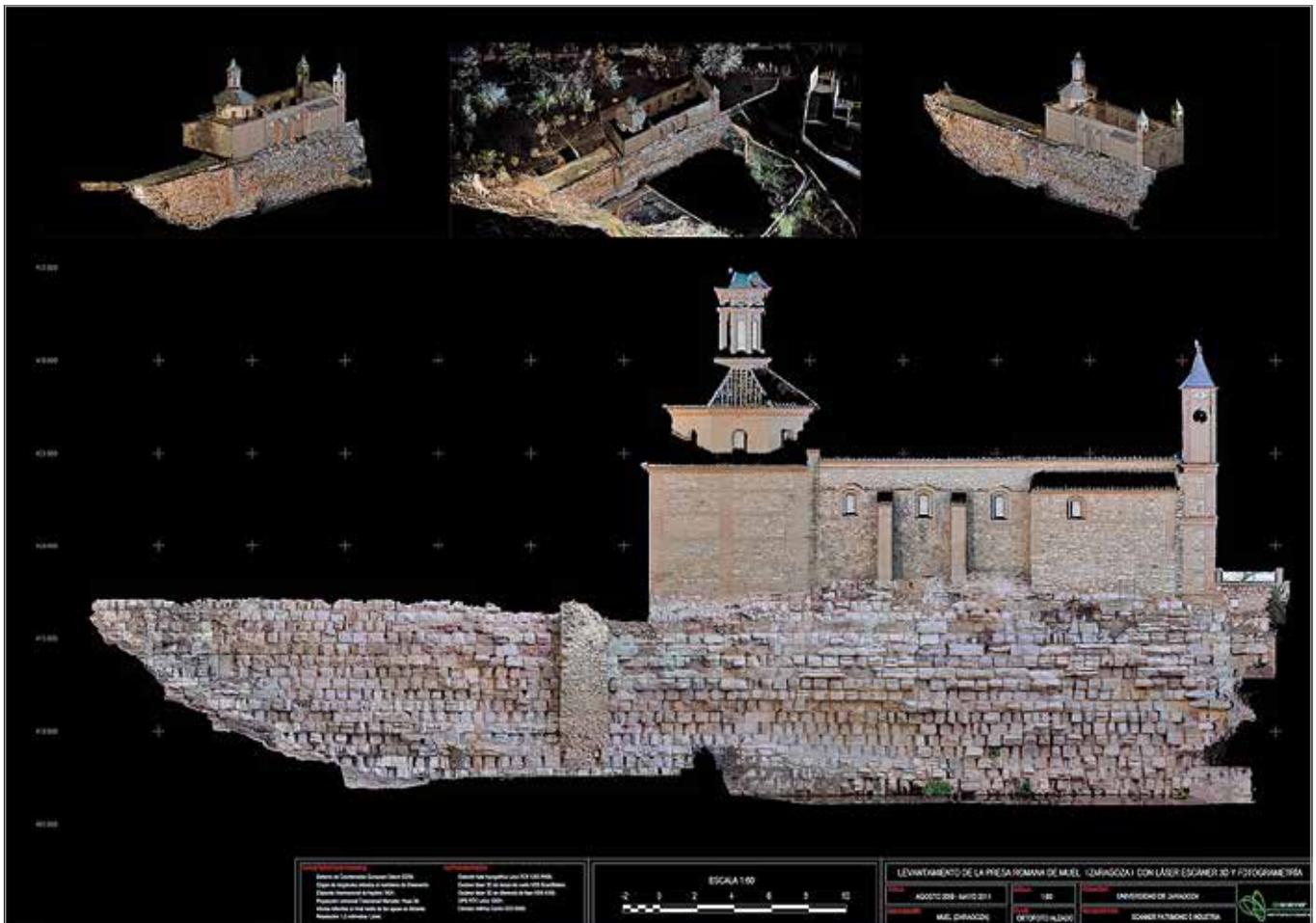
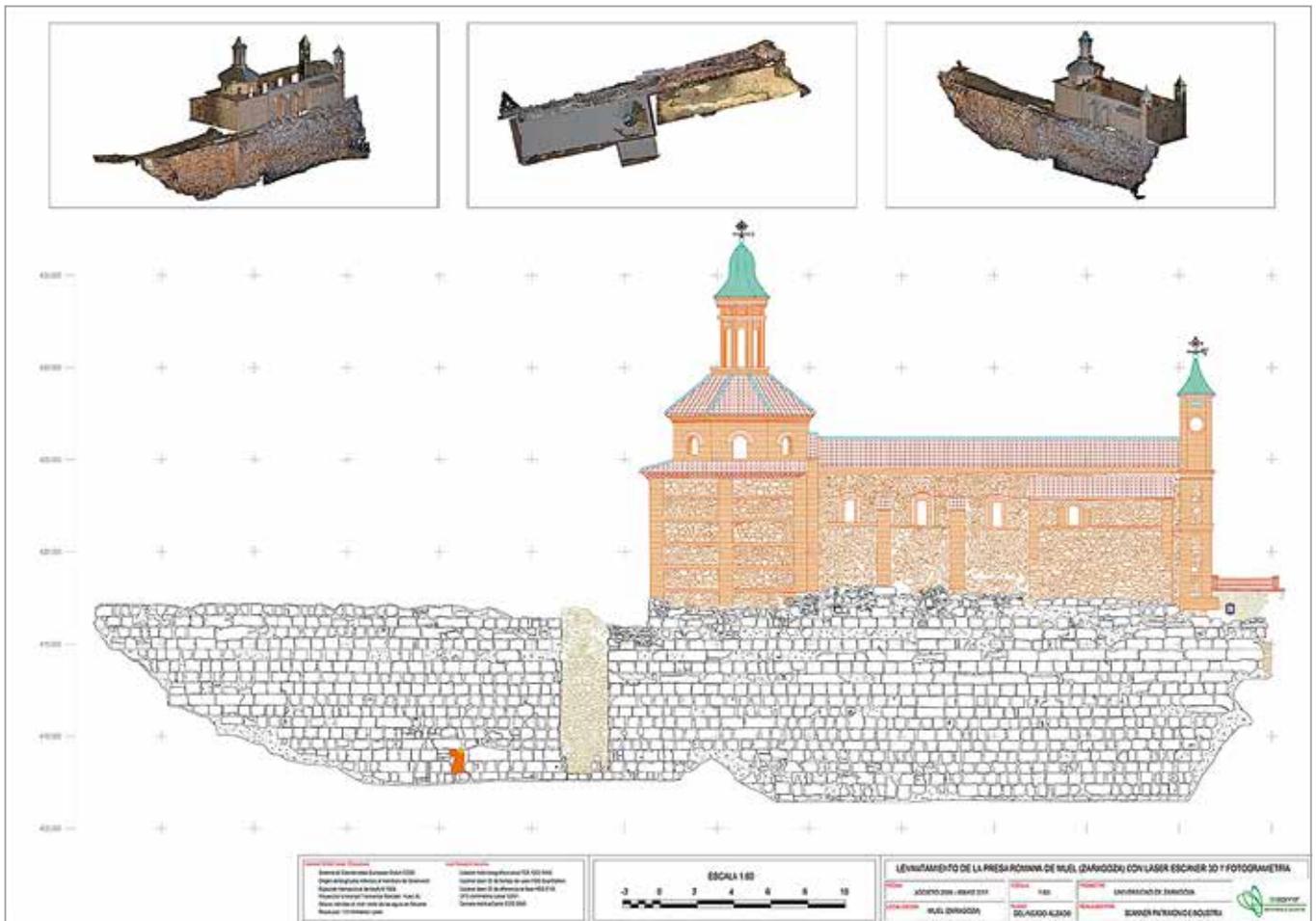


FIG. 129. Delineación del alzado de la presa romana de Muel sobre la ortofoto con la localización de las diferentes inscripciones documentadas.

nen de manifiesto la adaptación de la sociedad a los medios disponibles y el desarrollo que alcanzaron las construcciones hidráulicas en el valle medio del Ebro.

La experiencia adquirida con la práctica y los conocimientos previos de otras civilizaciones hicieron a los romanos solucionar este problema a través de dos estructuras hidráulicas bien conocidas en el valle medio del Ebro: las cisternas y las presas. De este modo, los yacimientos representados son los siguientes:

a) Las cisternas del municipio romano de *Bilbilis*. Calatayud, Zaragoza (Martín-Bueno, 1975)

Bilbilis presenta una amplia diversidad tipológica de cisternas, desde las más simples rectangulares con cubierta plana o abovedada hasta las complejas o compartimentadas mediante muros o simples columnas que ofrecen el aspecto de grandes salas subterráneas, presentando algunas varios pisos para facilitar la decantación del agua. Casi todas están realizadas en muros sólidos de hormigón revestidos interiormente en *opus signinum* fino, con boceles que cubrían los ángulos para evitar las fisuras.

La ermita de San Paterno es realmente una cisterna (clasificada, según M. Martín-Bueno, de tipo rectangular simple) que por su tamaño y buena conservación se utilizó desde antiguo como ermita bajo la advocación de este obispo bilbilitano. Realizada conforme a una bóveda de cañón y techo plano al exterior, su estructura se edificó mediante encofrado de madera del que se pueden observar sus huellas en el *opus caementicium*. Posteriormente, se recubrió el interior por una capa de *opus signinum* para impermeabilizarla.

b) La presa romana de Muel. Muel, Zaragoza (Uribe, 2010)

La presa romana de Muel se ubicaba, en origen, en el cauce del río La Huerva aprovechando un estrechamiento natural formado por dos farallones rocosos. Ambas formaciones, de materiales calizos, podían utilizarse con facilidad para apoyar los laterales de la presa, formando una sólida mole que aguantase la presión ejercida por el agua embalsada.

La construcción en 1770 de la ermita de Nuestra Señora de la Fuente sobre la misma presa nos indica su potencia, puesto que sirvió de cimientos a esta ermita que alberga las pechinas pintadas por Francisco de Goya.

El alzado, que dejaron al descubierto los sondeos arqueológicos realizados en el año 2009, está formado por una fábrica de *opus quadratum* de piezas de caliza blanca, tal y como ya se conocía –este en peor estado– en el paramento de aguas abajo. Este sistema constructivo se caracterizó en el mundo romano por utilizar sillares paralelepípedos de talla cuidada, colocados normalmente a seco (sin argamasa entre las juntas) en hiladas horizontales isódomas o pseudoisódomas.

El hallazgo, desde 2009, de una serie de marcas realizadas en los sillares de *opus quadratum* ha llevado a sus investigadores a relacionar estas inscripciones con la construcción de la presa y sus diferentes marcas de cantero (Navarro, 2014: 573-598).

B. Distribución del agua a las ciudades

Realizada a través de acueductos, se han documentado tres tipologías diferentes de acueductos: con *arquationes* (B.1), pilares con un canal de madera (B.2) y acueducto excavado en la roca (B.3).

a) Acueducto «Puente de los Moros». Lodosa-Alcanadre. Navarra y La Rioja (Mezquíriz, 1979)

El Acueducto de Lodosa-Alcanadre se ubica justo en el límite entre Navarra y La Rioja. Este acueducto, también denominado como

«Puente de los moros», sustentaba el canal a través de una serie de arcos siendo este el modelo arquitectónico más representativo del mundo romano.

Se conservan las ruinas de trece arcos o *arquationes*, de los 108 que debió constar el acueducto completo, aunque únicamente hoy en día se puedan contemplar cinco arcos completos.

Según los trabajos de M^aA. Mezquíriz, las dimensiones de los pilares debieron ser más gruesos que la mayoría de los acueductos conocidos. Su *specus* también es mayor de lo habitual, entre 1,8 y 2,5 m de anchura, pudiendo confirmarse la posibilidad de que el acueducto fuera utilizado también como puente para cruzar el río. El tipo de construcción se compone de un revestimiento externo de pequeñas piedras trabajadas, denominado sillarejo, que formaba la epidermis de una fábrica interna de *opus caementicium*.

b) Acueducto de Los Bañales. Uncastillo, Zaragoza (Beltrán, 1977)

En el caso de Los Bañales, así como en el de *Andelo(s)*, el ciclo del abastecimiento se encuentra casi completo, conservándose una presa, canalizaciones excavadas en la roca, el acueducto y las termas romanas. El acueducto se ubica unos 900 m al Este del asentamiento urbano, muy cerca del límite entre los términos municipales de Uncastillo y Biota (Zaragoza), en el paraje que en la zona se denomina, precisamente, «Los Pilarones». La forma arquitectónica se aleja en menor medida de la conocida solución de acueducto romano con arcos o *arquationes* pero su función fue la misma: abastecer de agua a la ciudad de Los Bañales.

El trazado del acueducto discurría sobre una cresta rocosa que aflora en el centro de la depresión. Los tres tramos rectos describen según L.M. Viartola (2011; 2013), un arco circular con el centro hacia el norte. En la actualidad se conservan 32 pilares de los 75 que se estima pudo tener y no existe ningún vestigio del canal que discurrió sobre ellos (*vid. infra* apdo. 3.6.3).

c) Acueducto de Albarracín-Gea-Cella. Teruel (Almagro, 2002) (Ezquerro, 2008)

El acueducto tiene su origen en el río Guadalaviar, en las inmediaciones de Albarracín (Teruel), y su final en Cella (Teruel) con un recorrido aproximado de 25 km. que discurre por la margen izquierda del río Guadalaviar.

Aunque el acueducto de Gea-Albarracín-Cella conserva de manera excepcional algunos tramos de gran interés arqueológico (la Galería de los espejos, cerca del Castillo de Santa Croche, el Azud de Gea, la Cañada de Monterde, La Hoya, La Tejería y la zona próxima a Cella) elegimos para este proyecto los restos procedentes del Barranco de los Burros cercano a la localidad de Gea de Albarracín.

Destacamos de este modelo y de Los Bañales que la construcción de ambos combinaba dos técnicas diferentes para conseguir transportar el agua. Por un lado, se utilizaron galerías subterráneas o superficiales excavadas en la roca caliza. Por otro lado, se utilizaron canales ubicados sobre una *substructio*, es decir, un muro de mampostería, adaptándose siempre a la topografía y a las peculiaridades geológicas del terreno.

C. La distribución dentro de las ciudades

a) El complejo hidráulico de *Andelo(s)*. Navarra (Mezquíriz, 1988)

Una vez que las aguas habían llegado al punto alto de la ciudad debían iniciar un nuevo recorrido que iba desde el depósito hasta el consumidor, pasando por una red de distribución que a menudo era muy compleja. Conocemos las técnicas relacionadas con estas

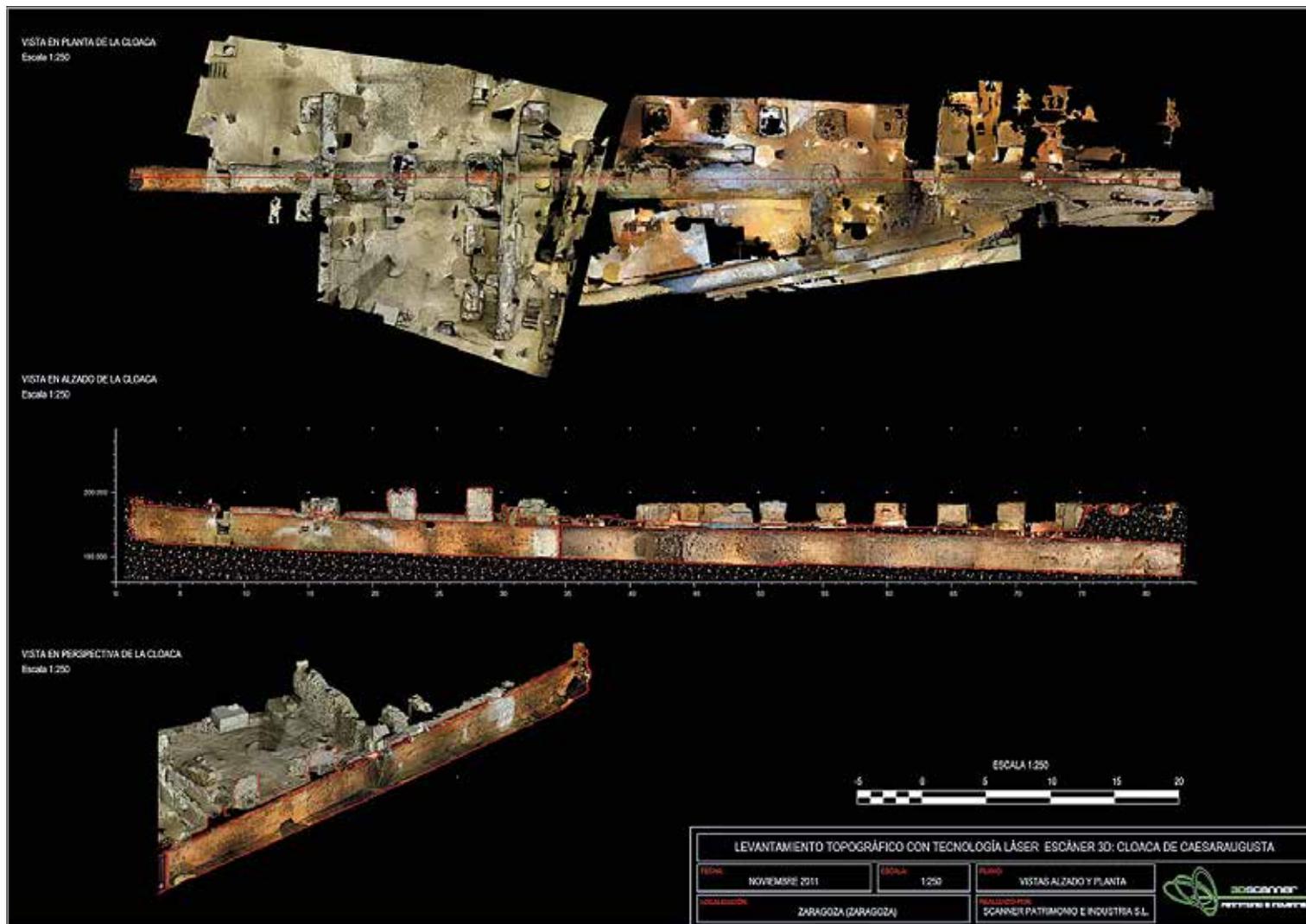


FIG. 130. Modelo 3D integrado de la cloaca del foro de la colonia romana de *Caesar Augusta*. Ortofoto y sección longitudinal del modelo 3D referido al actual sistema de coordenadas de la red topográfica municipal de Zaragoza.

redes, así como la política de su gestión gracias al tratado sobre los acueductos de Roma, *De aquis urbis Romae* escrito por Frontino *curator aquarum* o encargado de las aguas bajo Nerva en el año 97 d.C.

El sistema de abastecimiento de agua a la antigua ciudad de *Andelo(s)* es uno de los más notables de Hispania. Este conserva gran parte de las estructuras hidráulicas que intervinieron en él: la presa de captación de aguas, el depósito regulador, restos del acueducto y uno de los *castella aquae* de la ciudad. Estos restos son conocidos gracias a los trabajos realizados por M^aA. Mezquíriz desde 1980. Sus publicaciones sobre este tema han puesto de relevancia que estos hallazgos constituyen, por el momento, la obra hidráulica romana más original y completa encontrada en el valle medio del Ebro.

El depósito regulador de *Andelo(s)* ocupaba un amplio espacio excavado en el terreno de 85 x 37 m como ejes máximos. En el lado oeste se documentó la altura original de los muros que asciende a 3,5 m. La conservación de la altura y la anchura original hace que M^aA. Mezquíriz estime una capacidad de 7350 m³.

El *castellum aquae* hacía las veces de depósito de agua intramuros y era el punto donde finalizaba la conducción y comenzaba la red de distribución urbana. Este recinto servía para dividir y repartir el caudal entre los usos públicos y las concesiones privadas. La tipología más habitual de estas estructuras se componía de una o varias cámaras rectangulares cubiertas por bóveda de medio cañón. A veces se podía acompañar de una gran fuente monumental dedicada a las ninfas y denominada ninfeo.

El *castellum aquae* de *Andelo(s)* conserva un pódium rectangular de grandes sillares rematado por otros moldurados. El interior estuvo compuesto por un relleno de piedra picada y sobre ella una fuerte argamasa formada por tres capas. Sobre el podio se levantaría la cámara superior o depósito que estaría cubierto por bóveda de cañón o arista.

D. Evacuación de las aguas residuales

El proceso final del ciclo del agua se resolvía deshaciéndose de las aguas usadas o aguas fecales. Al igual que las aguas limpias discurrían por el *specus* o canal del acueducto, las aguas sucias eran arrastradas por las cloacas al mar o, en el caso del valle medio del Ebro, al río.

a) Cloacas de Caesaraugusta. Zaragoza (Aguarod, 2010)

De todas las cloacas halladas en *Caesaraugusta* destaca por su tamaño (2,82 m de alto por 2,20 m de ancho) el gran colector que hoy en día se puede visitar en el Museo del Foro de *Caesaraugusta*. Realizada con un encofrado de *opus caementicium* –todavía se pueden observar las tongadas del mismo–, fue rematada por una bóveda de medio cañón. La cloaca surcaba la plaza de la Seo de norte a sur, discurriendo perpendicular al Ebro, destino final de sus aguas.

La construcción de este gran colector tenía como misión evacuar las aguas de lluvia provenientes de los pórticos del foro y las aguas

usadas de las grandes instalaciones públicas: las termas, que se localizan en la actual calle San Juan y San Pedro, y el teatro de la ciudad. Al igual que sucedía en Roma, donde la red de alcantarillado desaguaba en el Tíber, las cloacas caesaragustanas evacuaron sus aguas al río Ebro o a La Huerva.

3.4.1.3. Metodología desarrollada

Las diferentes etapas de actuación establecidas en el proyecto han quedado divididas en cuatro fases iniciales, desde diciembre de 2010 hasta febrero de 2012, en las que se ha realizado: el estudio previo de cada monumento, el registro topográfico terrestre, la gestión de la información recogida y la adaptación de los resultados a una plataforma web. Posteriormente, a partir de marzo de 2012 se incorporó una quinta fase junto con el Departamento de Ingeniería Diseño y Fabricación de la Universidad de Zaragoza, dedicada a la documentación mediante fotogrametría aérea de baja altura con un dron. Esta última etapa se ha realizado gracias a una ayuda de investigación de la Fundación de la Agencia Aragonesa para la Investigación y Desarrollo (ARAID).

El objetivo fue la documentación del paisaje inmediato de cada conjunto arqueológico desde una perspectiva aérea, que defina su funcionalidad con el resto del yacimiento, localización de las principales estructuras, extensión y posible análisis de estructuras soterradas.

A continuación se describen de un modo sucinto los puntos fundamentales desarrollados en cada etapa de este proyecto:

A. FASE I. Estudio previo y recopilación de la información existente

Para cada uno de los conjuntos arqueológicos seleccionados se realizó una fase de documentación que determinase las partes fundamentales, extensión de cada una de las estructuras y elementos de interés, para la temática del proyecto, bien por su singularidad arqueológica o bien por un marcado deterioro estructural. Esta fase se realizó junto con el asesoramiento científico del grupo de investigación de excelencia URBS de la Universidad de Zaragoza.

Esta planificación previa fue determinante para la definición de cada conjunto. Un ejemplo significativo de esta programación lo observamos en la Cloaca de *Caesaraugusta*, puesto que el desarrollo de la misma transcurría por debajo de diferentes inmuebles –sitos entre la plaza del Pilar y la calle Don Jaime en Zaragoza– en los cuales el acceso no era único y había que establecer un estudio previo de accesos –para la realización de la topografía– y diferenciación estructural de cada una de las partes arquitectónicas. En este sentido, la documentación histórica y planificación resultó imprescindible antes del propio registro geométrico.

B. FASE II. Documentación geométrica

La aplicación de la técnica escáner 3D en la fase de documentación de campo se planteó únicamente como nexo que conjugó e integró otras técnicas de documentación como la fotogrametría y la topografía, para la generación de modelos tridimensionales de cada estructura arquitectónica.

Para la elección de la técnica utilizada, existen unos factores heterogéneos dependiendo de las características particulares de cada monumento documentado. En este sentido, resulta necesario precisar las diferentes tipologías instrumentales empleadas:

- Escáner láser (TLS). Se utilizaron equipos de tiempo de vuelo (*Leica Scanstation*) y equipos de diferencia de fase (*Leica*

HDS 6100) dependiendo del yacimiento, distancia al objeto y entorno inmediato.

- Escáner de luz blanca estructurada (*Artec MHT*) para representar los detalles más significativos en cada monumento, como el caso de las inscripciones epigráficas de la presa de Muel.
- Sistemas GNSS (para georreferenciar la localización) apoyado en las redes permanentes GNSS de Geodesia Activa de Aragón, La Rioja y Navarra.

Por último, se realizó el encaje final de los diferentes estacionamientos del láser escáner a través de dianas (*Black&White*) previamente adquiridas con una estación total (*Leica TCRP 1201*). La creación independiente de un sistema de coordenadas propio para cada conjunto permitió controlar la precisión final del registro de cada modelo, constituyendo ahora este sistema una fuente documental que garantiza la monitorización y/o ampliación del conjunto en futuras campañas.

Aunque la aplicación del escáner 3D permite generar una textura original de cada estructura arquitectónica, se optimizó cada valor cromático RGB de cada punto adquirido, agregando una capa de texturas al modelo tridimensional. Estas texturas se obtuvieron a partir de la toma de imágenes con una cámara calibrada (*Canon EOS 600 D*) con diferentes focales fijas de 24 mm y 50 mm. La técnica utilizada para la adquisición de la textura en cada monumento fue diferente, dependiendo de su propia morfología, utilizando elementos auxiliares como pértigas en el acueducto de Los Bañales (Uncastillo, Zaragoza). Respecto al ajuste radiométrico de las imágenes, se utilizó una carta de calibración de 24 colores estandarizada (*X-Rite Color Checker*). La utilización de este patrón permite adaptar el ajuste radiométrico y conseguir la máxima homogeneidad para cada uno de los paramentos y modelos tridimensionales obtenidos. Del mismo modo, se realizaron todas las fotografías en formato RAW, donde quedan registrados todos los valores en un «negativo digital» sin modificaciones y sin ningún tipo de compresión de la imagen. Además queda almacenado de un modo independiente los ajustes de luminosidad y temperatura de la luz.

C. FASE III. Postproceso de la información

Las nubes de puntos adquiridas por los diferentes escáneres de tiempo de vuelo y diferencia de fase fueron registrados conjuntamente apoyados en las dianas (B&W) tomadas con la estación total. El registro y ajuste de los diferentes escaneados se realizó a través de los diferentes módulos del programa *Cyclone v. 7.3.3* con un error medio de alineación entre las nubes de puntos de 3 milímetros. La utilización de cada una de las redes GNSS de cada comunidad autónoma (ARAGEA, RGAN, Red de La Rioja) ha permitido su correcta georreferenciación.

El proceso de adquisición de las texturas fotográficas para la nube de puntos fue realizado de modo dual e independiente con diferentes objetivos finales:

- La adquisición fotográfica para mapeado del modelo triangulado. Este fue realizado con una cámara calibrada en formato RAW, utilizando una carta de color calibrada con el fin de realizar un ajuste radiométrico.
- Para la adquisición del color en cada escaneado, puesto que el modelo de diferencia de fase *Leica HDS 6100* no posee ninguna cámara y la cámara integrada en el modelo de escáner de tiempo de vuelo (*Leica Scanstation*) es de muy baja resolución, se utilizaron diferentes rótulas con una cámara *Canon EOS 550 D* y un objetivo *fisheye* de 8 milímetros. Cada una de las rótulas y barras son de diferente métrica en función de cada modelo de escáner, con el fin de ajustar el eje de muñon-



FIG. 131. Ejemplo de las diferentes técnicas (topografía, escáner 3D y fotogrametría) empleadas en la documentación gráfica y geométrica de cada estructura hidráulica.

nes del escáner con el centro del sensor CCD de la cámara. El resultado final de este ajuste fue utilizado únicamente para la creación de un servidor web que integraba todos los escaneados y que se ejecutaba a través de Internet Explorer mediante el *plugin Leica Truview*. Su fácil accesibilidad le permite realizar cualquier medición y localización de coordenadas a través de un navegador. El trabajo con este tipo de «servidor web integrado» permite autogestionar y vincular cualquier otro tipo de ficheros (imágenes, base de datos, referencias bibliográficas) en cada uno de los escaneados, como servidor local o directamente en la propia web. Por último, respecto a la incorporación y gestión de metadatos, este tipo de archivos almacena una plantilla en formato XML editable con cualquier otro programa (CatMDEdit, XMLNotepad), con los principales datos del proceso de captura de la información.

La triangulación y ajuste cromático del modelo para la generación de los modelos tridimensionales se realizó con el *software 3DReshaper* y *Blender*, utilizándose este último para la reconstrucción de algunos elementos del paisaje, tales como la vegetación, la iluminación y los modelos digitales del terreno (*vid.* FIG. 135).

D. FASE IV. Valorización y difusión de los datos obtenidos en un entorno web

Esta fase constituye la materialización de uno de los objetivos primordiales del proyecto: obtener un equilibrio entre la información científica y su propia difusión a través de un entorno web. La adaptación de los resultados a este tipo de entorno se ha concebido co-

mo la continuación del mismo proceso metodológico. Para ello, los resultados han sido adaptados a formatos compatibles con la mayoría de *software* a nivel de usuario, siendo necesario en muchas ocasiones efectuar una compresión y reducción de la calidad gráfica de los mismos en beneficio de una difusión social en un entorno web. La transformación de los ficheros a formatos compatibles han quedado divididas principalmente en:

FORMATOS MÉTRICOS Y GRÁFICOS

- Reproducción de una selección de escaneados mediante formatos html.
- Conjunto de planos de cada conjunto: plantas, alzados y secciones.

FÓRMATOS GRÁFICOS. DERIVADOS DE APLICACIONES MÉTRICAS

- Videos con itinerarios planificados sobre el modelo 3D con enlaces a una selección de imágenes esféricas captadas por el escáner.
- Imágenes esféricas aéreas, extraídas de la planificación del vuelo realizado por el dron.

INFORMACIÓN DIDÁCTICA

- Capítulo dedicado a la metodología empleada en cada fase, introducción histórica, glosario de términos arquitectónicos e históricos, videos explicativos de los responsables científicos de los yacimientos, cuaderno del profesor con actividades para alumnos de secundaria, bibliografía y diferentes enlaces web.



FIG. 132. Imagen del entorno web público con diferente información histórica, gráfica y métrica sobre el modelo 3D de cada yacimiento. Ejemplo: Cisterna de Bilbilis (Calatayud, Zaragoza).

E. FASE V. Inicio de la documentación de los entornos inmediatos de cada uno de los yacimientos con fotogrametría aérea de baja altura mediante RPAS o drones

Con la utilización de esta tecnología, en la documentación de estos conjuntos arqueológicos, se ha pretendido la restitución mediante sistemas de fotogrametría de baja altura que permitiese la digitalización de la zona donde se contextualiza cada entidad patrimonial. Los drones operan de manera autónoma mediante una planificación de vuelo. Este sistema es capaz de seguir, una vez efectuado el despegue, una trayectoria de vuelo programada en cada yacimiento a partir de unas coordenadas registradas. La alta capacidad de carga de aproximadamente dos kilogramos, permitió incorporar cámaras DSLR de alta resolución que hizo que los modelos obtenidos tuviesen una resolución entre 2 y 3 centímetros por píxel. Las mismas bases topográficas utilizadas en la fase de registro terrestre con escáner láser sirvieron, igualmente, de apoyo del vuelo para su inclusión en el mismo sistema de coordenadas UTM ETRS89. El registro en un sistema de coordenadas absoluto le confiere una singularidad preventiva en un futuro, permitiendo un control estructural y geomorfológico, además de una posible ampliación del área de excavación dentro del mismo sistema de coordenadas.

Este factor, sumado a su gran versatilidad y bajo coste, si lo comparamos con otros tipos de herramientas de documentación métrica, lo convierte en una técnica muy útil en excavaciones arqueológicas ya que proporciona una rápida documentación en cada fase del registro.



FIG. 133. Vuelo programado de un dron del tipo multirrotor en el depósito del yacimiento arqueológico de Andelo(s) (Mendigorría, Navarra).

La combinación de drones con técnicas de fotogrametría de baja altura proporciona varias ventajas como complemento a los sistemas de registro topográfico clásico (estación total y GNSS) y tecnología láser escáner 3D terrestre utilizados. Esto permitió una rápida documentación gráfica a través de las diversas tomas fotográficas, y de igual modo se extrajo información métrica combinada con puntos topográficos localizados sobre el terreno, los cuales resultan básicos para la alineación de las imágenes, la construcción del modelo tridimensional, texturización y su inclusión a un sistema de coordenadas absoluto (UTM ETRS89).

F. FASE VI. Adaptación de los resultados obtenidos a un entorno web

El carácter gráfico que proporcionaron las diferentes técnicas utilizadas se incorporó a la página web del proyecto, dentro del epígrafe «Visualización aérea». Los resultados consistieron en la generación de fotografías esféricas aéreas –aprovechando la planificación aérea en el registro fotogramétrico– que permitieron la visualización de cada conjunto arqueológico desde diferentes perspectivas inmersivas, terrestres y aéreas. En cada uno de los vuelos programados de los siete yacimientos, se planificaron varios puntos relevantes, donde el dron, del tipo multirrotor, se posicionó en una coordenada previamente seleccionada en planimetría y altimetría. Una vez posicionado en el punto, se programó para realizar sucesivas tomas fotográficas cada 30°, gracias al servo donde se localiza la cámara fotográfica. La aportación de estas imágenes esféricas al conjunto del proyecto, proporcionan un documento, únicamente gráfico, que confiere al conjunto de los datos una comprensión del paisaje desde un punto de vista aéreo. A partir de este entorno, cualquier usuario puede desplazarse sobre las imágenes, proporcionando una gran comprensión gráfica sobre los conjuntos patrimoniales: localización y vista del entorno, extensión del yacimiento, funcionalidad de las estructuras, etc⁵³. Además, la parte métrica generada para cada grupo de investigación, consistió en la generación de ortofotos de cada conjunto a diferentes resoluciones, y modelos tridimensionales convertidos en formato PDF3D y vml.

3.4.1.4. Resultados obtenidos: aplicación de estándares en el postproceso de la información

Para estandarizar o normalizar las dificultades de gestión y difusión que poseen los datos adquiridos por el conjunto de técnicas utilizadas, fue necesario apostar por la generación de aplicaciones gestionables con un *software* a nivel de usuario. Este hecho permitió una simplificación de datos tridimensionales, además de conseguir complementar el binomio científico y divulgativo, toda vez que asistimos a una búsqueda cuya finalidad sea integrar un método que gestione de manera sencilla el registro tridimensional del patrimonio cultural. Según Valle (2011: 162) la estandarización de la documentación geométrica del patrimonio cultural, debería contar, independientemente de la técnica, con tres premisas básicas relacionadas con la accesibilidad, la comprensibilidad y una marcada utilidad geométrica. Estas tres directrices son además, perfectamente relacionables con los tres valores que integran y describen el concepto de estandarización o normalización (unificación, simplificación y especificación). La combinación de todos ellos ha sido la base teórica del desarrollo del proyecto, que puede sintetizarse en:

53 Para una mayor información consúltese a modo de ejemplo las perspectivas aéreas inmersivas del yacimiento de *Bilbilis* sobre el teatro: http://www.3dscanner.es/Patrimonio_hidraulico_romano/_bilbilis360/bilbilis_360.html (último acceso: noviembre de 2015).
Y de la presa romana de Muel: http://www.3dscanner.es/Patrimonio_hidraulico_romano/_muel360/muel_muralla.html

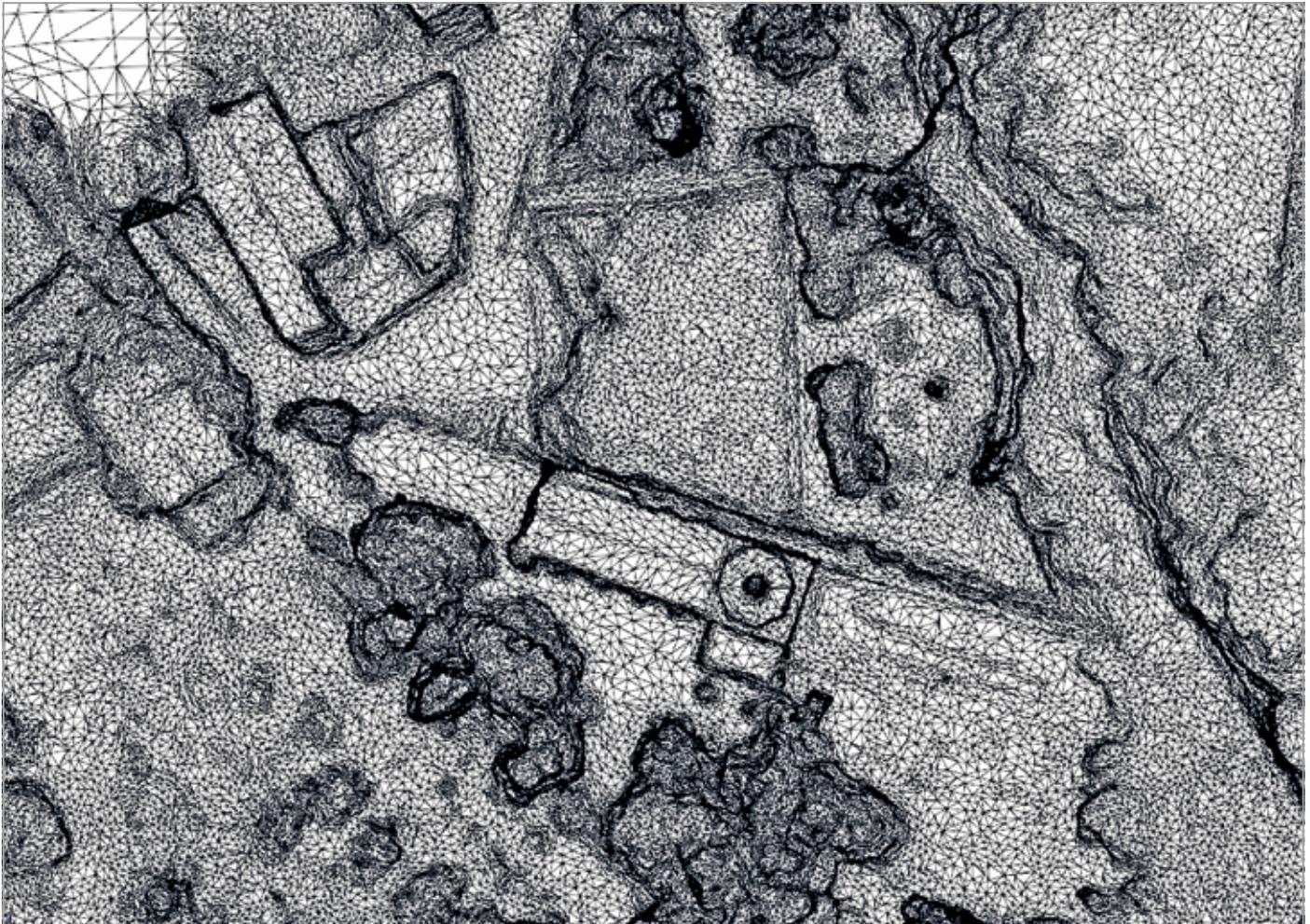


FIG. 134. Ejemplo de la malla de triángulos y su texturización del modelo 3D final de la presa romana de Muel y su entorno inmediato.

- a) Integración de bases de datos accesibles a una plataforma web actualizable e intercambiable con diferentes escalas de acceso y edición, integrando de igual modo el conjunto de metadatos mediante ficheros XML que describen la información principal.
- b) Democratización de los resultados mediante el empleo de formatos compatibles a nivel de usuario para poder trabajar y gestionar la información con aplicaciones de libre acceso que resulten útiles y comprensibles por cualquier usuario.
- c) Registro del protocolo de actuación a través de normas 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, ello cumpliendo el binomio científico-divulgativo, siempre partiendo del mismo archivo geométrico a través de un orden lógico de desarrollo.

En este sentido, para la difusión de este proyecto mediante una plataforma web, en base a la experiencia adquirida, se han establecido criterios metodológicos con procesos relacionados con otras disciplinas exógenas como la ingeniería e industria, en concreto, utilizando el mismo sistema de servidor web local que integre cada escaneado realizado y que normalmente se emplea para fines industriales. En este caso se ha utilizado el *plug-in Leica Truview*, aunque existen otros programas similares como *Scene 5.0* de Faro con la función *Scene Web-Share server* que mejora el intercambio de la información. Todo esto supone un nuevo lenguaje que nos permite registrar y publicar el estado original.

El soporte que se ha utilizado para su difusión ha sido una página web. Sin embargo, existen actualmente condicionantes que de algún modo limitan su plena visualización e interacción. Estos condicionantes son: (1) la propia limitación física del tamaño de cada archivo en el alojamiento web, para ello ha sido necesario comprimir la información prescindiendo de resolución gráfica; (2) el tipo de conexión y velocidad para la carga de cada fichero; y (3), la adopción de formatos que sean fácilmente reconocibles y gestionables por cualquier usuario. Sin embargo, queda todavía un largo camino por explorar, y con ello tan sólo hemos comprobado con este proyecto una aproximación a un nuevo modo de gestionar la información registrada. En este sentido, entendemos que una de las claves para el futuro será intercambiar metodologías de trabajo en la frontera de varias disciplinas para la divulgación del patrimonio cultural, sobre todo a nivel de gestión de la información.



FIG. 135. Malla 3D transformada en formato PDF3D de la Presa romana de Muel (Zaragoza).

3.4.1.5. Conclusiones

El carácter singular de este proyecto ha establecido un nuevo modo de combinación de las nuevas tecnologías de registro patrimonial, con acceso libre a la información, ofreciendo herramientas, sobre todo accesibles, con las que cada usuario, a diferentes niveles, pueda interactuar con esa información. Para ello, ha de asegurarse una disposición de la información registrada, siguiendo un único proceso que integre y relacione de un modo recíproco un registro científico y divulgativo, según esta cadena de procesos:

- a) Documentación de cada yacimiento en su estado actual. Obtención de modelos métricos tridimensionales de diferentes tipologías hidráulicas romanas para su documentación, conservación y protección patrimonial, prescindiendo, si es el caso, de otros elementos externos o arquitecturas modernas, tal y como ha sucedido con la cloaca de Caesaraugusta, con el fin de entender la relación existente entre la arquitectura romana y el medio natural.
- b) Creación de un protocolo en el registro de la información. Control de calidad y comprobación a través de procedimientos, asegurando la interoperabilidad y comunicación de la información a través de la unificación, especificación y simplificación. Con ello, se facilita la comprensión de la cadena de procesos que corroboran el resultado final, pudiendo analizar de manera individual cada uno de ellos.
- c) Proceso de «democratización» de resultados 3D que proporcionen una difusión y divulgación, utilizando formatos compatibles con *software* libre y fácil de gestionar.
- d) Metodología interdisciplinar en el proceso de estudio coordinada por cada disciplina. La finalidad fundamental es facilitar la gestión a través de entornos web fácilmente configurables con diferentes grados de acceso, con el objetivo de alcanzar una mayor divulgación del 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. De este modo, se ha logrado un desarrollo combinado, válido para una mayor valoración y divulgación de la información obtenida. Además de contribuir a la propia investigación transdisciplinar, resolviendo los diferentes vacíos metodológicos y de conceptualización tridimensional y aportando una perspectiva integradora que evita la segmentación de la cadena informativa.
- e) Integración de aplicaciones gráficas y métricas de cada uno de los yacimientos en una plataforma web libre a través de un nexo didáctico en la siguiente página web: http://www.3dscanner.es/Patrimonio_hidraulico_romano

3.5. Arqueología del paisaje: documentar lo que no se ve

JORGE ANGÁS / PAULA URIBE

3.5.1. Introducción: la teledetección

El objetivo principal de este apartado es analizar la teledetección como una nueva técnica arqueológica que permita resolver diferentes problemáticas que se plantean actualmente en el estudio del patrimonio arqueológico. Concretamente, analizaremos diferentes yacimientos arqueológicos de época romana del valle medio del Ebro.

Si observamos, sobre todo, la proliferación de investigaciones desde el año 2012, nos percatamos cómo el avance tecnológico en la