

**La aplicación de técnicas
fotogramétricas para la
documentación del patrimonio:
el caso de la Noria de Autrán
(Puerto Real, Cádiz)**

Photogrammetric techniques
applied to cultural heritage
recording: the case of Aufran's
Waterwheel (Puerto Real, Cádiz)

José Antonio Calvillo Ardila
José Antonio Calvillo Risco
Lázaro G. Lagóstena Barrios

RESUMEN

Los avances de la revolución digital que afecta a las llamadas Tecnologías de la Información y la Comunicación están provocando una profunda renovación en los métodos de documentación y registro del Patrimonio Histórico. En esta contribución nos centramos en las posibilidades de la aplicación de la fotogrametría aérea y terrestre de precisión para la documentación de

un bien del Patrimonio arquitectónico de Puerto Real, como es la Noria de Autrán, y de su entorno topográfico.

PALABRAS CLAVE

Fotogrametría, Patrimonio Arquitectónico, Noria de Autrán.

ABSTRACT

The advances of the digital revolution affecting the so-called Information and Communication Technologies are causing a deep renewal in the methods of documentation and registration of the Historical Heritage. In this contribution, we focus on the possibilities of applying precision aerial and terrestrial photogrammetry for the documentation of an element of the architectural heritage of Puerto Real, such as the Autrán's waterwheel and its topographical context.

KEY WORDS

Photogrammetric, Architectural Heritage, Aufran's waterwheel.

INTRODUCCIÓN

El efecto de la revolución tecnológica en la que nos encontramos inmersos afecta plenamente a lo que denominamos Humanidades Digitales, incluso ampliando y trascendiendo la conceptualización inicial de las mismas, que se centraba originariamente en la imbricación entre las disciplinas humanísticas y las informáticas-computacionales, con especial atención a las aplicaciones literarias. Un buen número de técnicas e instrumentos basados en tecnologías avanzadas, nuevas o mejoradas, se hallan hoy día al alcance de los investigadores. En este sentido destacan aquello que pueden ser empleados para una precisa documentación fotogramétrica de los bienes propios del patrimonio cultural e histórico, tales como escáneres terrestres o los drones, que

han venido a sumarse a las cámaras fotográficas digitales, empleadas hasta las fechas como herramienta preferente.

El impacto de esta renovación metodológica e instrumental alcanza tanto a la propia investigación en los campos del Patrimonio, en sentido amplio, la Historia, y la Arqueología, como a la estricta documentación de las fuentes materiales de estas disciplinas, sean éstas muebles o inmuebles¹.

En esta contribución abordamos las posibilidades de la fotogrametría aplicada a la documentación de bienes patrimoniales, teniendo en consideración tres perspectivas complementarias que hasta hace poco tiempo no estaban a nuestro alcance: el empleo de la fotografía digital, el uso de la fotogrametría aérea, y la aplicación de los escáneres láser.

La fotogrametría como técnica documental está siendo ampliamente aplicada al campo del Patrimonio Histórico, no sólo como contribución destacada a la construcción de los *corpora* informativos propios del siglo XXI, también como eficaz instrumento en la prevención de la pérdida definitiva de elementos patrimoniales como consecuencia de eventos catastróficos o conflictos bélicos².

Para ejemplificar el estado del arte, y nuestra experimentación en la aplicación de esta fotogrametría de precisión, hemos elegido un singular bien del Patrimonio Histórico y Etnográfico de Época Contemporánea de la localidad de Puerto Real: la noria de Austrán y su entorno topográfico.

¹ Véase al respecto los llamados “Principios de Sevilla”, reconocidos internacionalmente, dedicados a la Arqueología Virtual. <https://icomos.es/wp-content/uploads/2020/06/Seville-Principles-IN-ES-FR.pdf>. Consultado el 20/01/2021.

² Como, por ejemplo, en el caso del proyecto Italo-Iraquí, liderado por Massimo Vidale, desarrollado en la ciudad de Hatra tras la expulsión del DAEHS-ISIS. Cfr. https://www.ismeo.eu/portfolio_page/hatra/. Consultado el 26/01/2021.

CONTEXTUALIZACIÓN

Avances técnicos en la documentación del Patrimonio.

Son muchos, y desde muy diversos enfoques, los avances técnicos e instrumentales que se están produciendo e incorporando paulatinamente a la labor cotidiana de investigadores y gestores del Patrimonio Histórico-Arqueológico. Los progresos en diferentes campos específicos van confluyendo de manera sinérgica hacia la constitución de una nueva metodología. En este proceso ha sido importante el desarrollo de la metodología de los Sistemas de Información Geográfica (GIS), especialmente gracias al impulso y a las posibilidades de acceso a un software libre que se ha equiparado con las prestaciones de los costosos programas comerciales. Pero más allá de las potencialidades del GIS para catalogar, clasificar, analizar y explotar los datos que el usuario, en función de sus intereses, decida sistematizar, las principales aportaciones que esta metodología incorpora, en relación con el argumento de este epígrafe, son: la georreferenciación espacial con precisión de la información patrimonial que nos interesa; la estandarización de los formatos de representación de esa información (topografías primitivas, ráster, vectoriales, 3D, nubes de puntos); y la constitución de un repositorio virtual de trabajo, capaz de integrar los productos obtenidos por la mayor parte de los nuevos instrumentos destinados a documentar, como en este caso, los bienes patrimoniales.

En el caso del estudio del Patrimonio Histórico-Arqueológico se ha producido una gran optimización de instrumentos de investigación y documentación no invasiva, especialmente con los equipos propios de las exploraciones geofísicas. De manera resumida, se han desarrollado equipos en configuración de arrays, es decir basados en canales matriciales, con gran capacidad de exploración superficial, capaces de ofrecer visiones del subsuelo y sus elementos tridimensionales con calidad, definición y precisión. Tal es el caso de los equipos georradar³ y magnetómetros multicanales⁴, los equipos

³ GOODMAN, Dean, PIRO, Salvatore, *GPR remote sensing in archaeology*, 2013.

⁴ ASPINALL, Arnold, GAFFNEY, Chris, SCHIMDT, Armin, *Magnetometry for Archaeologists*, Altamira Press, 2009.

de mapeos de suelos, o los tomógrafos y sismógrafos digitales, por citar los más usuales. Todos ellos ofrecen productos apropiados para su incorporación y tratamiento en los programas GIS.

Muy versátil, pues pueden emplearse para el estudio del territorio y el paisaje, pero también para la documentación de bienes patrimoniales inmuebles, independientemente de su categoría, son los RPAS (*Remotely Piloted Aircraft System*), o drones. Su potencial reside, por una parte, en el gran abaratamiento de costos que ha conocido su adquisición, y, en segundo lugar, por la cantidad de sensores diversos que pueden incorporar y con los cuales se obtiene información de relevancia para las Humanidades, entre otras muchas disciplinas⁵. Entre estos sensores disponemos de los equipos fotográficos, que, en combinación con la información que proporcionan los instrumentos de navegación aérea, permiten obtener ortomosaicos, Modelos Digitales de Elevaciones (MDT, MDS), topografías de precisión, y, como veremos más adelante, fotogrametrías aéreas, sean estas cenitales o verticales. Todos estos productos ofrecidos en los formatos antes mencionados y preparados para su incorporación en los repositorios GIS.

Otro instrumento de precisión óptica que ha conocido un gran desarrollo es el escáner laser terrestre. Desde modelos más básicos, como el empleado en este trabajo, que luego se describirá, hasta los potentes LiDAR terrestres, con capacidad para escanear con alta resolución grandes superficies de terreno, alcanzando hasta los 2.500 metros a la redonda, estos instrumentos permiten escanear tridimensionalmente cualquier tipo de objeto, terreno o edificio⁶, en este último caso, tanto por el exterior como del interior. Los formatos proporcionados son esencialmente nubes de puntos de alta densidad, a las cuales se les puede añadir información adicional obtenidos por sensores específicos, como fotografías o lecturas térmicas, por ejemplo.

⁵ ANGÁS PAJAS, Jorge, URIBE AGUDO, Paula, “RPAS o drones aplicados al patrimonio cultural: de la documentación geométrica a las imágenes multiespectrales”, *La Ciencia y el arte VI: Ciencias experimentales y conservación del patrimonio*, 2017, 68-81.

⁶ Un ejemplo de gran interés, aplicado al conjunto de la Alhambra, en MONTUFO, Antonio Manuel, LÓPEZ SÁNCHEZ, José Manuel, FERRARIO, Stefano, GÓMEZ CÁPITA, Isidoro, GARCÍA GARZÓN, Isabel, “Integración de sensores aéreos y terrestres para la producción de cartografía multiescala 3D en la Alhambra y su territorio”, *VAR* 3.7, 2012, 50-54.

Pues bien, como resultado de estos avances y de la confluencia sobre objetivos de registro y formatos y lenguajes comunes que se ha conseguido, con la aplicación de estos instrumentos podemos documentar todo tipo de elementos propios y relativos al Patrimonio Histórico-Arqueológico, creando productos virtuales, digitales, tridimensionales, georreferenciados y de alta calidad y precisión. La disposición de estos nuevos productos supone un salto cualitativo en la documentación patrimonial y una amplia ventana de posibilidades de uso en la cadena de valor del patrimonio, desde la investigación a la alta divulgación.

La fotogrametría como método de documentación

Para valorar el alcance de este trabajo, resulta interesante efectuar un acercamiento al panorama actual y analizar las técnicas fotogramétricas empleadas para la medición de estructuras u objetos de grandes dimensiones con un elevado nivel de precisión.

La metrología es la ciencia que estudia las medidas y sus aplicaciones. Para ello, necesita obtener y expresar numéricamente el valor de cualquier magnitud física empleando los instrumentos adecuados para alcanzar la exactitud necesaria en cada caso. Entre las principales aplicaciones de la metrología se encuentra el ámbito científico. La metrología dimensional es un aspecto fundamental, las dimensiones y geometría de un objeto o estructura son características elementales. Para el desarrollo de este trabajo sobre metrología 3D a gran escala, la exactitud y precisión de las mediciones realizadas por medio de diferentes técnicas serán un aspecto esencial en el contexto patrimonial.

Para la medición a gran escala, principalmente se aplican cuatro métodos⁷: a) medición manual convencional con medidor de distancia láser; b) máquina de medición por coordenadas, máquina de medición tridimensional o CMM (Coordinate-measuring machine), dispositivo de medición directa que permite obtener las características geométricas de un objeto utilizando un dispositivo físico o puntero; c) con escaneo láser LiDAR (*Light Detection and Ranging* o

⁷ KOELMAN, Herbert J., *Application of a photogrammetry-based system to measure and re-engineer ship hulls and ship parts: An industrial practices-based report*. CAD Computer Aided Design, 2010.

Laser Imaging Detection and Ranging), que a partir de un procedimiento de triangulación determinan la posición de un objeto, utilizando un patrón láser sobre el objeto que se pretende digitalizar; d) y mediante fotogrametría, cuyo objeto es estudiar y definir con precisión la forma, dimensiones y posición en el espacio de un objeto cualquiera utilizando esencialmente medidas hechas sobre una o varias fotografías de ese objeto⁸.

Al abordar la modelización fotogramétrica de un bien de carácter arquitectónico, el primer problema se relaciona con la morfología de las estructuras a documentar, que puede estar compuesta por regiones planas, cóncavas y convexas, y que puede presentar transiciones graduales o bruscas entre esas regiones. El caso de la Noria de Autrán, a pesar de no ser un elemento de grandes dimensiones, presenta una geometría relativamente compleja, por la presencia de contrafuertes dispuestos en torno a una estructura circular, y por reunir una combinación de estructuras aéreas y subterráneas. Además, el edificio se adapta a la topografía e inclinación del terreno natural, generando áreas niveladas y desniveladas en el conjunto arquitectónico. Cuando confluyen estas circunstancias se requieren capacidades de modelado particulares⁹. A menudo, la compleja geometría de las construcciones históricas hace necesario el uso de tecnologías de precisión para la obtención de los datos edilicios¹⁰.

La fotogrametría es una técnica por la cual se obtienen y determinan las propiedades geométricas de los objetos a partir de imágenes fotográficas, es decir, es la capacidad de hacer mediciones sobre fotografías. Para que esto sea posible es necesario un solapamiento de varias fotografías, pues una sola nos proporcionaría información sólo en dos dimensiones. La franja de solapamiento entre dos o más fotografías nos permite tener una visión estereoscópica y hacer mediciones tridimensionales. Por otra parte, alcanzar una precisión milimétrica considerando el tamaño del objetivo a modelizar no es trivial. La

⁸ CLAVO, Luis Domingo. *Apuntes de fotogrametría*. S.l.: E.U.I.T. Topografía. Madrid, 1982.

⁹ KOELMAN, Herbert J., *Application of a photogrammetry-based ...*

¹⁰ NIETO-JULIÁN, Juan Enrique., ANTÓN, Daniel. y MOYANO, Juan José, *Implementation and Management of Structural Deformations into Historic Building Information Models*. *International Journal of Architectural Heritage* [en línea], vol. 0, no. 0, pp. 1-14, 2019. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/15583058.2019.1610523>. Consultado el 24/01/2021.

calidad del modelo tridimensional que se obtiene mediante fotogrametría de rango cercano y multimagen está afectada por el software fotogramétrico, la cámara y sus parámetros de configuración. También se ve afectada por las condiciones lumínicas, la textura, la complejidad del objeto de estudio, la nitidez de las fotografías, la ubicación, orientación de cada fotografía y la identificación de los puntos homólogos durante la fase de procesado¹¹.

Debido a la reciente evolución de la fotografía digital, la fotogrametría se convierte en una valiosa alternativa para la medición de grandes construcciones, alcanzando la misma precisión y reduciendo significativamente el tiempo de medición de las estaciones totales y medidores láser que se utilizaban anteriormente¹². La fotogrametría permite determinar el tamaño y la forma de un objeto a partir de imágenes fotográficas. Para ello, a través de algoritmos matemáticos obtiene la posición exacta de cada cámara en el instante de cada captura y también relaciona los puntos homólogos en cada foto. En concreto, la fotogrametría de rango cercano CRP (*close range photogrammetry*) es la técnica más usada en procesos de Ingeniería Inversa. Para facilitar el análisis de los resultados y mejorar la precisión, es habitual la colocación de marcas codificadas (dianas) y también reglas para determinar su escala. Para la elaboración de nuestro modelo tridimensional no se utilizaron marcas codificadas, lo que redujo considerablemente el tiempo de trabajo de campo.

Aunque el escaneo láser es una tecnología más moderna que la fotogrametría, ambas son comparables en sus principios. Para la realización de este trabajo, se emplearon ambas técnicas para obtener los beneficios de cada una. Las dos son aplicables a grandes estructuras y permiten alcanzar medidas con una precisión milimétrica, e incluso inferiores. Además, permiten trabajar manteniendo una distancia significativa entre el objetivo y el dispositivo de medición lo que agilizaron la creación del modelo. Ambas técnicas se catalogan por ello entre las No Invasivas. La combinación de fotogrametría y

¹¹ MARTÍNEZ, Santiago, *Evaluación en campo de una nueva técnica fotogramétrica de rango cercano y bajo coste basada en la correlación automática de imágenes*. S.l.: s.n., 2014.

¹² CUYPERS, Wim, VAN GESTEL, Nick, VOET, André, KRUTH, Jean-Pierre, MINGNEAU, Jeroen y BLEYS, Philip, *Optical measurement techniques for mobile and large-scale dimensional metrology*. *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 47, no. 3-4, 2009, pp. 292-300.

escaneo láser es adecuada para modelar estructuras en condiciones desfavorables con precisión inferior al centímetro. Mientras que el escaneo láser proporciona información precisa de los bordes, la fotogrametría completa los datos espaciales entre estos bordes¹³.

Las nubes de puntos generadas por el escáner láser y CRP son muy densas lo que permite un mejor modelaje tridimensional de la realidad, pero por el contrario requieren mayor tiempo computacional y requisitos de almacenamiento, así como mayores dificultades en el manejo de los modelos. El método CRP genera datos RGB, mientras que el escáner láser produce solo valores de intensidad. Los datos RGB proporcionan imágenes más reales. Los modelos 3D pueden mejorarse combinando fotogrametría terrestre y aérea, lo que hace posible capturar elementos primarios y secundarios (por ejemplo, vegetación, senderos, etc.) que pueden resultar interesantes para la investigación¹⁴.

El escáner láser y la fotogrametría adquieren los datos con línea de visión directa sobre el objeto, debido a las dimensiones de las estructuras a modelizar, únicamente desde el suelo resulta más complejo realizarlo. Para obtener una reconstrucción completa del objeto será necesario el uso del RPAS¹⁵. Para la realización de este trabajo se empleó tanto fotogrametría terrestre como aérea con dos cámaras diferentes. Para la fotogrametría terrestre, las imágenes se tomaron con una cámara profesional de alta resolución con lente fija. En cambio, para la fotogrametría aérea se utilizó la cámara que incluye el propio drone de menores prestaciones. Dentro del proceso fotogramétrico, las prestaciones y componentes de la cámara fotográfica son elementos que afectan de forma considerable a la calidad de medida ya que son el punto de entrada de datos. Por último, teniendo en cuenta que los componentes ópticos de una cámara son imperfectos, la proyección entre la imagen y el objeto real no es lineal y repercuten negativamente en la conversión de 2D a 3D y viceversa. Debido a ello, se hace necesario la calibración de ambas cámaras.

¹³ BURDZIAKOWSKI, Pawel y TYSIAC, Pawel, *Combined close range photogrammetry and terrestrial laser scanning for ship hull modelling*. Geosciences (Switzerland), 2019.

¹⁴ BURDZIAKOWSKI, Pawel, TYSIAC, Pawel, *Combined close range ...*

¹⁵ LUHMANN, Thomas, ROBSON, Stuart, KYLE, Stephen y BOEHM, Jan, *Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging*. S.l.: s.n.,2013

Los objetivos del trabajo

En esta aportación exponemos los resultados de la experimentación realizada en la aplicación fotogramétrica de los tres instrumentos sobre la noria de Autrán, distintos pero complementarios como ya se ha indicado: cámara fotográfica digital, escáner laser terrestre y RPAS.

Cada uno de estos instrumentos son capaces de obtener, de manera independiente, un producto fotogramétrico del edificio histórico. Sin embargo, para que el producto final proporcione una información patrimonial de utilidad, que pueda ser destinada a usos profesionales, debe ofrecer la mayor precisión y calidad de imagen, así como una correcta georreferenciación espacial y una integración topográfica del objeto modelado y sus partes. El objetivo principal, por tanto, es comparar el empleo de estos instrumentos y demostrar la mejora en los resultados y sus parámetros mediante el uso combinado de los mismos.

El interés de las técnicas fotogramétricas y la creciente accesibilidad de los recursos necesarios para su realización están contribuyendo a su rápida implantación, así, por ejemplo, disponemos ya de algún modelo tridimensional de la propia Noria de Autrán realizados por personas interesadas en la materia¹⁶. En nuestro caso, como objetivo específico planteamos la documentación fotogramétrica de la Noria de Autrán y su entorno inmediato con la mayor calidad posible, para poner sus resultados en el futuro a disposición del público interesado, para la visualización y consulta de los productos generados, en un espacio web destinado para tal fin.

Finalmente se expondrán algunas de las utilidades y aplicaciones prácticas que ofrece este tipo de documentos digitales, ejemplificados sobre la cadena del valor del patrimonio.

¹⁶ <https://sketchfab.com/3d-models/noria-de-autran-212ae09d482d48128d956add79e875d3>. Consultado el 26/01/2021.

El patrimonio histórico-arqueológico de El Almendral: el alfar romano y el caserío de Autrán.

El caso de estudio seleccionado se ubica en la finca El Almendral, parcela de forma pentagonal localizada al Noreste de la población de Puerto Real. Dentro de la finca, los vestigios analizados se sitúan en su ángulo Sureste. Se trata de un espacio donde se superponen dos asentamientos históricos de relevancia: un alfar romano productor de ánforas; y una explotación agraria de época contemporánea que comprendía en su momento, al menos, una cortijada y una noria de dimensiones poco usuales. Además, a unos 90 metros al Este de la Noria se ubican unos hornos de producción latericia, datados en los años centrales del siglo XVIII¹⁷, que se relacionaban con otra construcción rústica que aún se conservaba parcialmente en la década de los 80 del siglo pasado, y cuya planta rectangular se aprecia con claridad en ortofotografías como las del Vuelo Interministerial 1973-1986 o las del Vuelo Americano Serie B -1956-1957¹⁸.

La localización de un yacimiento romano relacionado con la producción anfórica fue dado a conocer por uno de nosotros¹⁹, definiendo unos vestigios arqueológicos detectados superficialmente que podían datarse entre mediados del siglo I a.C. y principios del I d.C. Posteriormente, entre los años 2010-2011, parte el yacimiento fue excavado con motivo de la ejecución de un taller de empleo promovido por el ayuntamiento de la localidad, documentándose diversos ambientes productivos y habitacionales del asenta-

¹⁷ VÁZQUEZ RODRÍGUEZ, Agustín, “Los hornos-ladrilleras del yacimiento de El Almendral”, *Matagorda* 1, 2015, pp. 139-154. VÁZQUEZ RODRÍGUEZ, Agustín, *Taller de empleo: auxiliar de arqueología y auxiliar de restauración. “El Almendral” Puerto Real (Cádiz). Memoria final relativa al proyecto de actividad arqueológica puntual de control arqueológico de apoyo al proyecto de restauración y conservación en el yacimiento “El Almendral” Puerto Real (Cádiz)*. Nuestro agradecimiento al autor por facilitarnos el documento para su consulta.

¹⁸ Véase el comparador cartográfico del IGN: <http://www.ign.es/web/mapasantiguos/index.html>

¹⁹ LAGÓSTENA, Lázaro, *Alfarería romana en la Bahía de Cádiz*, Cádiz 1996, pp. 103-104.

miento artesanal romano, y ampliando su rango cronológico, que alcanzaría al menos el siglo II d.C.²⁰

Respecto al caserío de Autrán, se trata de una explotación agraria implantada a mediados del siglo XVIII por Cipriano Autrán que constaba al menos de una cortijada, un ingenio aceitero y la noria objeto de este estudio. Este enclave, por su buena posición estratégica, jugó un papel militar en el contexto de las guerras napoleónicas, como punto de control del territorio por parte del ejército francés. Como consecuencia, y para evitar ulteriores ocupaciones militares por parte del enemigo, el cortijo fue objeto de demolición hacia finales de 1812 y principios de 1813²¹. De estas tareas de derribo se libró afortunadamente la noria, sobre la que se ejecutó un proyecto de conservación y restauración en el contexto de un segundo taller de empleo de promoción municipal, entre 2013 y 2014²².

La noria de Autrán constituye un excelente ejemplo de noria de sangre, con pocos paralelos en nuestro territorio, al menos en el mismo estado de conservación que este bien del patrimonio etnográfico portorrealense presenta. El pozo de la noria se nutre de una importante capa freática que alimenta otros puntos de agua que se explotaron en épocas recientes, algunos muy cercanos, localizados entre las laderas sureste del municipio y la línea costera, desde la propia población hasta las cercanías del Barrio de Jarana²³. De hecho, el paralelo más cercano de la Noria de Autrán se localiza en la finca Huerta del Olivar, frente al Hospital Universitario de Puerto Real, aunque en este caso presenta un deficiente estado de conservación.

Pues bien, una de las singularidades del caso de estudio es que la noria y, posiblemente, una parte importante de la cortijada de Autrán se implantaron sobre el anterior asentamiento romano. Esta implantación afectó al yacimiento anterior en dos sentidos, por una parte, añadiendo un nivel de ocupación superior constituido por el cortijo, cuya afección exacta sobre el yacimiento romano no ha sido aún suficientemente evaluada; y, por otra parte, en el caso de la noria, además de superponerse sobre los vestigios

²⁰ VÁZQUEZ RODRÍGUEZ, Agustín, *Taller de empleo...*

²¹ VÁZQUEZ RODRÍGUEZ, Agustín, “Los hornos-ladrilleras...”.

²² <http://restauracionyarqueologiaelalmendral.blogspot.com/> Consultado el 24/01/2021.

²³ BARROS CANEDA, José Ramón, “El abastecimiento de aguas al Arsenal de la Carraca”, *Archivo Hispalense* 241, 1996, pp. 219-231.

romanos, la creación del pozo, necesariamente, destruyó niveles de ocupación de la alfarería antigua. La modelización tanto de la noria como del terreno ocupado por el cortijo nos permitiría ubicar con precisión tanto el volumen de los niveles superpuestos como del vaciado negativo provocado por la excavación del pozo, y en definitiva comprender mejor la evolución y el estado de conservación de cada fase del conjunto patrimonial.

El caso de Estudio. Desarrollo de los trabajos.

Técnicas, recursos, configuración empleada.

Fotogrametría aérea.

Para su realización se ha empleado un sistema RPAS constituido por un dron (*DJI Mavic Pro* capaz de realizar fotos a 12.35M de resolución y con una autonomía de vuelo de 27 minutos), su respectivo mando de control, conectado a una tableta digital (*Apple Ipad*) con un programa específico para gobernarlo de forma automática. Todo ello permite realizar rutas de vuelo sin piloto con un trazado definido previamente para optimizar las capturas²⁴. El proyecto fotogramétrico aéreo fue precedido de una planificación del vuelo para fijar la altura, la escala y los recubrimientos longitudinales y transversales entre capturas fotográficas, y una inspección del terreno para determinar la cota máxima de los obstáculos más cercanos, como torres de electricidad.

Se establecieron dos tipos de vuelos. Unos orientados a obtener un modelo topográfico de la zona, para lo cual se analizó y determinó el trazado del dron, con un ángulo de cámara cenital y el modo y punto de enfoque. La duración total estos vuelos fue de 50 minutos y se tomaron un total de 360 fotografías, a 40 metros de altitud. Se colocaron dianas dentro del área de estudio y se recogieron su posición con el GPS centimétrico para georreferenciar los productos topográficos obtenidos. Otros nueve vuelos se des-

²⁴ El vuelo fotogramétrico se realiza con equipo registrado, piloto titulado y bajo el marco y autorizaciones de la operadora de drones UCA. <https://dron.uca.es/>

tinaron a obtener un modelo tridimensional de la Noria, planificados con diferentes trayectorias (lineales y circulares). Para cada una de ellas se determinó el ángulo de la cámara para realizar las capturas y el modo y punto de enfoque. La duración total de los vuelos fue de 40 minutos y se tomaron 307 fotografías a 33 metros de altura.



Figura 1. Trabajo de campo. Toma de datos con GPS de precisión.

Tras la programación, se realizaron los vuelos de forma automática. Los ajustes de exposición de cada captura fueron calculados automáticamente por el propio dron (ISO-100, Distancia focal 4.73, F/2.2). Todas las foto-

grafías se capturaron con una resolución de 4000x3000 píxeles. Haciendo uso de los programas específicos en un equipo informático en nuestro laboratorio, se determinaron las posiciones de cada captura fotográfica, su orientación y la nube de puntos. Por último, se generaron los productos obtenidos: Modelos Digitales de Elevaciones, Ortofotografías, Curvas de Nivel y Modelo 3D de la Noria y de sus inmediaciones.

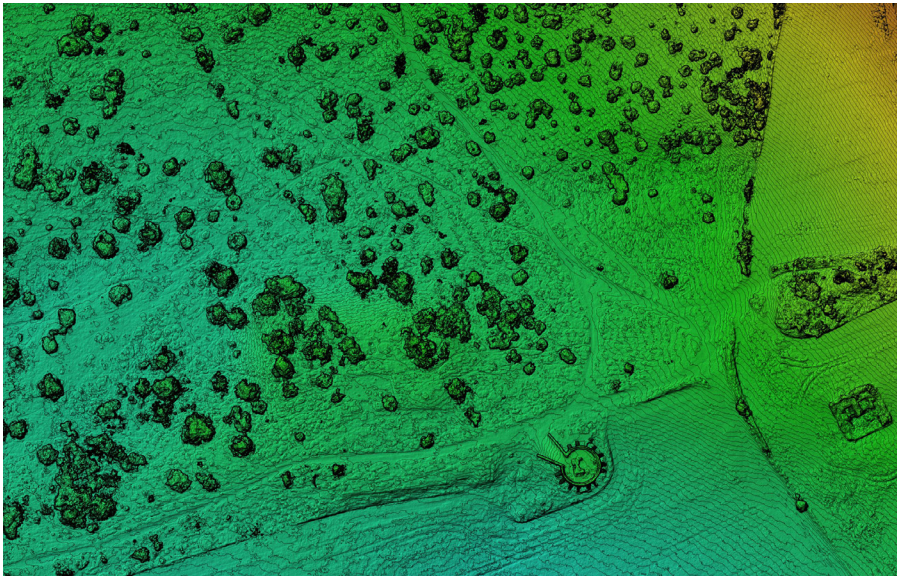


Figura 2. Modelo Digital de Superficie del entorno y topografía con curvas de nivel cada 20 cms.

Desde la perspectiva de la metodología de la fotogrametría aérea, describiremos ahora los instrumentos usados, el procesado de los datos y los programas empleados. Para los trabajo de campo los instrumentos utilizados en esta fase del proyecto fueron: boceto o croquis diseñado en laboratorio para planificar el área de interés y determinar los puntos de control; dianas para establecer los puntos de control sobre el terreno; GPS topográfico *Leica Viva GNSS GS 15* con procesamiento de datos RTK con precisión centimétrica para georreferenciar con precisión las dianas; trípode y tableta digital conectada al mando remoto del drone para monitorizar los vuelos programados; drone que permitió realizar los vuelos programados y realizar las cap-

turas fotográficas de cada vuelo; PC y software específicos, en nuestro caso, Agisoft Metashape, para procesar todas las fotografías realizadas y generar los productos.

Para la generación de todos los productos se utilizó el programa *Agisoft Metashape 1.7*. Inicialmente, a través de este programa, se alinearon las imágenes capturadas en campo. A continuación, se buscaron los puntos espaciales coincidentes por el solapamiento entre imágenes. Seguidamente y a partir de los datos anteriores, se creó la nube de puntos. La nube de puntos es la primera de las opciones disponibles para representar un objeto en tres dimensiones. Se genera un sistema de coordenadas tridimensional en el que se coloca un punto en el espacio, definido por sus coordenadas X, Y y Z. Repitiendo esta operación un número importante de veces (proceso de densificación) se consigue un conjunto de puntos que definen la superficie del objeto a estudiar. Al ser una representación espacial, esta técnica permite ya el cálculo de volúmenes en dichos objetos. A partir de la nube de puntos, se creó la malla para posteriormente generar el sólido final texturizado. Además, se compuso el modelo de teselas (red de triángulos interpolados) que permite reducir espacio y mejora el rendimiento del proceso. Por último, se generaron otros productos como modelos digitales, curvas de nivel y ortomosaicos.



Figura 3. Modelización de la Noria con fotogrametría aérea y empleo de RPAS

A partir de la fotogrametría aérea, se obtuvieron, además del Modelo 3D de la Noria, una ortofotografía georreferenciada del entorno, los datos necesarios para generar una topografía de precisión, con isolíneas de nivel de hasta 1 cm de diferencia de rango, un Modelo Digital de Superficie de la Noria. A continuación, se muestran algunos parámetros del procesamiento, primeramente, los datos de los vuelos destinados al modelo de la Noria.

Tabla 1. Vuelo Modelo Noria	
Nube de Puntos	
<i>Número de puntos</i>	4,693.559
<i>RMS error de reproyección</i>	0,26987 (0,893818 pix)
<i>Error de reproyección máximo</i>	0,805889 (25,3235 pix)
<i>Tamaño promedio de puntos característicos</i>	3,11864 pix
Modelo Digital de Elevaciones	
<i>Resolución</i>	2,45 cm/pix
<i>Densidad de puntos</i>	0,166 puntos/cm ²

Seguidamente, se muestran los datos de los vuelos orientados a generar el modelo de la Noria y su topografía.

Tabla 2. Vuelo Noria y Topografía	
Nube de Puntos	
<i>Número de puntos</i>	49.016.384
<i>RMS error de reproyección</i>	0,680215 (6,60399 pix)
<i>Error de reproyección máximo</i>	581,552 (4995,87 pix)
<i>Tamaño promedio de puntos característicos</i>	14,5082 pix
Modelo Digital de Elevaciones	
<i>Resolución</i>	4,18 cm/pix
<i>Densidad de puntos</i>	571 puntos/ m ²

Fotogrametría obtenida con Escáner Láser

En nuestro caso, esta técnica se ha basado en el empleo de un equipo compacto y estático, colocado sobre un trípode y que fuimos estacionando en posiciones, previamente planificadas en laboratorio, dispuestas alrededor de la Noria. Se obtiene una nube de puntos con un procedimiento similar al explicado anteriormente. Al ser una representación espacial, esta técnica permite ya el cálculo de volúmenes y medidas en dichos objetos, además de posibilitar la obtención de secciones y vistas y cortes axonométricos del edificio en cuestión.

Para el trabajo de campo, los procesos e instrumentos utilizados en esta fase del proyecto fueron: boceto o croquis, como en el caso anterior; escáner láser Leica BLK 360; tableta digital; PC y software específico.

El escáner láser empleado usa un telémetro láser de 360° e imágenes panorámicas de alta definición para crear nubes de puntos 3D con precisión milimétrica. Incluye una Tecnología LiDAR capaz de capturar 360.000 puntos por segundo. Consta de tres cámaras HDR esféricas y panorámicas con una cámara de obtención de imágenes térmicas.

En el procedimiento de adquisición de datos se hicieron un total de 39 estacionamientos, 31 en el perímetro exterior de la Noria, 6 en la parte superior y 2 en la parte interior del pozo. Se crearon 145 enlaces entre estacionamientos. Al igual que con la fotogrametría terrestre realizada con equipo fotográfico, fue necesario realizar el mayor número de estacionamientos en el contorno exterior de la estructura para poder capturar todas las aristas y vértices que definen cada uno de los contrafuertes, dada la complejidad geométrica del edificio. También, hubo que evaluar la mejor ubicación para el estacionamiento inicial y la dirección del recorrido del resto de estacionamientos. Con el objetivo de conseguir una nube de puntos homogénea, hubo que definir la distancia entre estacionamientos y también la distancia hasta la pieza arquitectónica. En ocasiones, estas distancias fueron modificados algunos centímetros para optimizar la visión desde el estacionamiento.

Una vez realizados todos los estacionamientos, los datos capturados en el propio escáner son transferidos al ordenador para su tratamiento a través del programa *BLK Data Manager*. A continuación, es necesario el alineamiento de las 39 nubes de puntos que han sido obtenidas mediante los esta-

cionamientos. Para la realización de este paso, se empleó el programa *Leica Cyclone FIELD 360*, primero de manera automatizada, después ajustando manualmente los enlaces necesarios entre los datos de cada estacionamiento. Como último paso, y una vez generada una única nube de puntos, para el análisis de los datos y estudio de su planimetría se utilizó el programa *Leica Cyclone REGISTER 3DR*



Figura 4. Modelización de la Noria con Escáner Láser Terrestre

A continuación, y a partir de los datos anteriores, se generó la malla para posteriormente crear el sólido final texturizado. Como resultado del empleo del escáner láser se ha obtenido una representación tridimensional de la noria completa, incluida su parte interior con una precisión de 12 mm.

Fotogrametría Terrestre obtenida con Equipo Fotográfico

Esta técnica se ha basado en el empleo de un equipo fotográfico profesional colocado sobre un monopie que fuimos estacionando en posiciones previamente planificadas en laboratorio para cubrir toda la superficie exterior y superior de la Noria.

Los instrumentos utilizados en esta fase del proyecto fueron: boceto o croquis previo; cinta métrica y medidor láser para conocer en todo momento

la distancia de la cámara a la estructura de la Noria; escalera para optimizar la captura de la parte exterior de la estructura y conseguir el máximo grado de ortogonalidad de la cámara con respecto a la superficie a fotografiar; equipo fotográfico Nikon D800 con lente fija de 50mm, equipo fotográfico profesional formato FULL FRAME con sensor de 36,3 megapíxeles, sistema AF de 51 puntos de enfoque; PC con 32 Gb de memoria RAM, procesador AMD Ryzen 7 1700 Eight-Core Processor y Tarjeta Gráfica Geforce GTX 1050 Ti; software específico *RealityCapture* 1.1 para procesado de todos los escaneos realizados y generación de los respectivos productos.

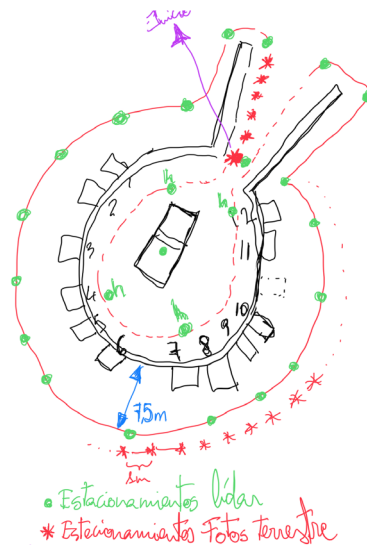


Figura 5. Croquis a mano alzada de planificación previa de estacionamientos fotogramétricos terrestres.

En el procedimiento de adquisición de datos se practicaron inicialmente varios test, se realizaron 285 fotos sobre una parte concreta de la Noria desde diferentes distancias: 3 m, 5 m., 7,5 m y 10 m para determinar la mejor posición para realizar este tipo de trabajo. También se realizaron pruebas con un trípode sobre el terreno y con monopie sobre una escalera de 1.70 m. de altura. Además, se hicieron pruebas a diferentes horas del día para valorar el efecto de las sombras sobre la toma de datos.

Entendiendo la nitidez como uno de los aspectos más importantes dentro de la fotogrametría de precisión, optimizar este factor pasa por gestionar un gran número de parámetros relacionados con el equipo fotográfico, pero sin despreciar otro tipo de factores como son la iluminación ambiental y la forma del objeto a modelizar. Para controlar la nitidez, resulta fundamental gestionar la profundidad de campo ya que determina en una fotografía el espacio de visión nítido. El ajuste de la apertura de diafragma está relacionado con la profundidad de campo. Cuanto menor sea la apertura del diafragma mayor será la profundidad de campo y el espacio de visión nítido. En nuestro caso, F13 será nuestro valor óptimo para el equipo fotográfico que hemos usado.

Otro factor relevante es la sensibilidad ISO, cuanto menor sea este valor menos ruido tendrán las capturas. En nuestro caso lo fijamos al valor mínimo de nuestro equipo que es 100. El enfoque y la velocidad de obturación, los fijó el equipo fotográfico de forma automática, lo que nos agilizó el trabajo de campo. Todas las capturas se realizaron a la máxima resolución ofrecida por el equipo fotográfico (7360x4912) y sin compresión. Finalmente, se realizaron 870 fotos a 7,5 metros de distancia de la construcción y utilizando el monopie sobre la escalera. Sólo con un trípode o monopie las fotos hubieran salido con un efecto de contrapicado que afectaría de forma negativa a la calidad del modelo 3D generado. El empleo de la escalera permitió reducir este efecto y alcanzar la perpendicularidad de la cámara con respecto a la superficie de la construcción.



Figura 6. Trabajo de campo. Registro fotográfico del borde de la estructura

Inicialmente, con el objetivo de conseguir una nube de puntos homogénea, hubo que definir la distancia entre capturas y también la distancia hasta la estructura. Estas distancias, son muy relevantes ya que reflejarán el solapamiento entre fotogramas y serán determinantes para los programas que realizarán la modelización 3D. En ocasiones, las distancias entre capturas fueron modificadas algunos centímetros para optimizar el encuadre de la zona a capturar. El encuadre también es otro factor valioso, ya que con él se consigue recoger y mantener únicamente el enfoque de la zona de interés, pero manteniendo a la vez, el grado de solape necesario con respecto al fotograma anterior.

Posteriormente, hubo que evaluar la mejor ubicación para comenzar el recorrido, la dirección del trazado a seguir y el sentido de este. Una vez fijado el estacionamiento inicial, se comenzó a recorrer todo el perímetro exterior de la Noria, realizando capturas a 7.5 metros de distancia de la estructura para captar la fachada externa. Siempre se buscó la ortogonalidad de la cámara con respecto a la superficie a fotografiar. Consecutivamente, se continuó por la parte interior de la estructura para recoger la cara interna, tratando de mantener siempre los mismos criterios indicados anteriormente, aunque la distancia al objeto hubo que reducirla considerablemente y adaptarnos al espacio interior que ofrece la construcción. Por último, se hizo otro trazado caminando sobre canto de la estructura para capturar el borde superior de la estructura. En esta ocasión, no se realizaron fotografías dentro del interior del pozo por

la escasa luminosidad de la zona, para ello hubiera sido necesario generar luz artificial por medio de dos focos alimentados por baterías y con gestión de intensidad y de temperatura de color. Como era previsible, el mayor número de capturas se realizó en el contorno exterior de la estructura con el objetivo de captar todas las aristas y vértices que definen cada uno de los contrafuertes.

El procesado de los datos en el laboratorio fue similar al realizado con los datos obtenidos por el escáner láser: los dos primeros pasos consistieron en alinear las imágenes capturadas en campo y, por otro lado, se buscaron los puntos espaciales coincidentes por el solapamiento entre imágenes. Como tercer paso se creó la Nube de puntos a partir de la gran densidad de puntos creada, durante el cuarto paso se creó una malla para posteriormente generar el sólido final texturizado. También, a partir de la nube de puntos, se creó el Modelo de teselas (red de triángulos interpolados) que permite reducir espacio y mejora el rendimiento del proceso.



Figura 7. Modelización de la Noria con fotogrametría terrestre con equipo fotográfico profesional.

A partir de esta fotogrametría terrestre se ha generado una representación tridimensional de la noria completa, sin incluir su parte interior. A continua-

ción, se muestran algunos parámetros del procesamiento, primeramente, los datos generados con el equipo fotográfico.

Tabla 3. Fotogrametría terrestre con equipo fotográfico	
<i>Número de triángulos</i>	875.5M (875.536.165)
<i>Número de vértices</i>	439.2M (439.214.678)
<i>Tamaño de tesela</i>	0.000662 unidades por tesela

Para terminar, se muestran los mismos parámetros, pero para los datos combinados generados por el escáner láser junto con el equipo fotográfico.

Tabla 4. Fotogrametría terrestre combinando equipo fotográfico y escáner láser	
<i>Número de triángulos</i>	1.1B (1.071.440.648)
<i>Número de vértices</i>	537.3M (537.313.108)
<i>Tamaño de tesela</i>	0.000662 unidades por tesela

CONCLUSIONES

La fotogrametría se está constituyendo como un eficaz método de documentación del patrimonio, y su implantación se produce a buen ritmo entre los expertos de las distintas disciplinas que se relacionan con estos bienes culturales²⁵. Esta práctica documental está permeando desde las grandes obras representativas del mejor patrimonio mundial hacia los distintos niveles del patrimonio local. En esta contribución presentamos distintas posibilidades de aplicación con diferentes instrumentos, con el objetivo de alcanzar una cada vez más precisa producción de modelos tridimensionales de nuestros bienes culturales, que tenga además uso en el marco de la cadena de valor del Patrimonio²⁶.

²⁵ Véase por ejemplo la web de UNESCO en Sketchfab: <https://sketchfab.com/tags/unesco-world-heritage-site-cultural-heritage>. O el ambicioso proyecto Global Digital Heritage: <https://globaldigitalheritage.org/>. Consultados el 27/01/2021.

²⁶ CRIADO BOADO, Felipe, “Hacia un modelo integrado de gestión de investigación y gestión del Patrimonio Histórico: La cadena interpretativa como propuesta”, *Boletín del*

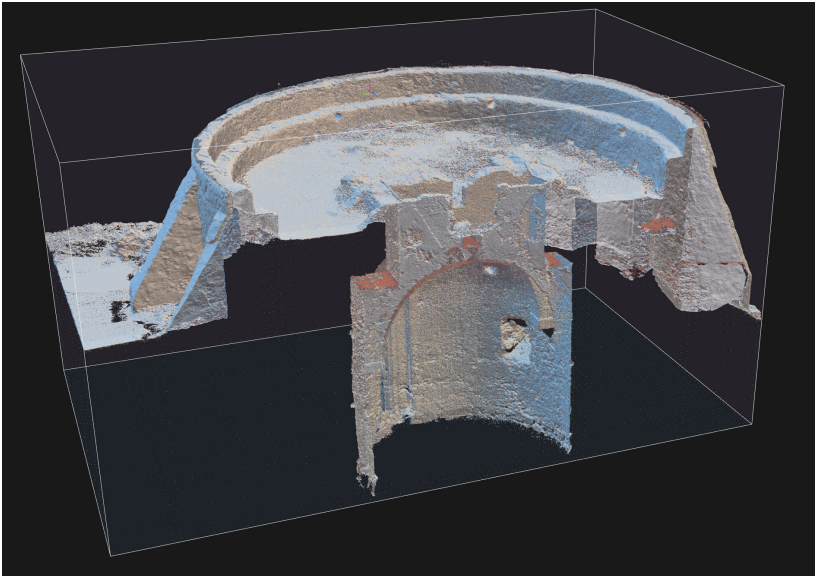
Como resultado se presentan distintos modelos tridimensionales de calidad de la Noria de Autrán y de la topografía de su entorno. Estos modelos tienen por sí mismo relevancia para la divulgación científica, y para su uso en la difusión del patrimonio local promoviendo su conocimiento y su valoración. Las aplicaciones de estas técnicas sin embargo van más allá de estos productos finales idóneos para los nuevos formatos de comunicación.

Una de las principales aplicaciones reside en la precisa documentación del bien, con modelos 3D de gran precisión, que muestran al detalle la arquitectura de la noria. Además, estos modelos permiten tomar todo tipo de mediciones, lineales y volumétricas, sobre el objeto de estudio, y optimiza la conversión de los datos a planimetrías arquitectónicas tradicionales. Con secciones y cortes tomográficos en cualquier dirección, los modelos obtenidos diseccionan la edificación de la Noria de Autrán. Así, por ejemplo, podemos apreciar con claridad la adaptación del edificio a la topografía del terreno preexistente, o las cotas a las que se sitúa el pozo interior en relación con este nivel topográfico, o con otras partes de la obra hidráulica.

El análisis arquitectónico del edificio es mucho más accesible al disponer de estos modelos virtuales. Sabemos del uso de estas propiedades rústicas de Autrán con fines militares en el contexto de las Guerras Napoleónicas. Quizá la propia noria sufriera modificaciones estructurales con objeto de adaptarla a esos fines. Así, los contrafuertes característicos que presenta, que no son usuales en este tipo de edificios, pueden asociarse tanto con funcionalidades originales para contrarrestar las fuerzas provocadas por la pendiente de asiento de la noria, como con objeto de reforzar una plataforma susceptible de acoger elementos de artillería. De la misma manera el anillo circular superior de la noria puede ser original o añadido, en este último caso como parapeto, muy habitual en las obras militares de fortificación. La propia rampa de acceso a la noria carece de simetría en relación con el conjunto del edificio. El lateral suroeste de este acceso es en realidad una conducción de agua, que finaliza actualmente en un arco del que se conserva la mitad. Mientras el lateral noreste parece ser en planta el que rompe la simetría. Tampoco en este caso sabemos si el elemento es original o modificado por necesidades de

Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico 16, Sevilla 1996, pp. 73-78.

acceso con artillería a la plataforma superior. Para la resolución de este tipo de hipótesis constructivas, pues no se trata ahora más que de ejemplificar ese uso, supone un salto cualitativo la disposición de estos productos tridimensionales de precisión.



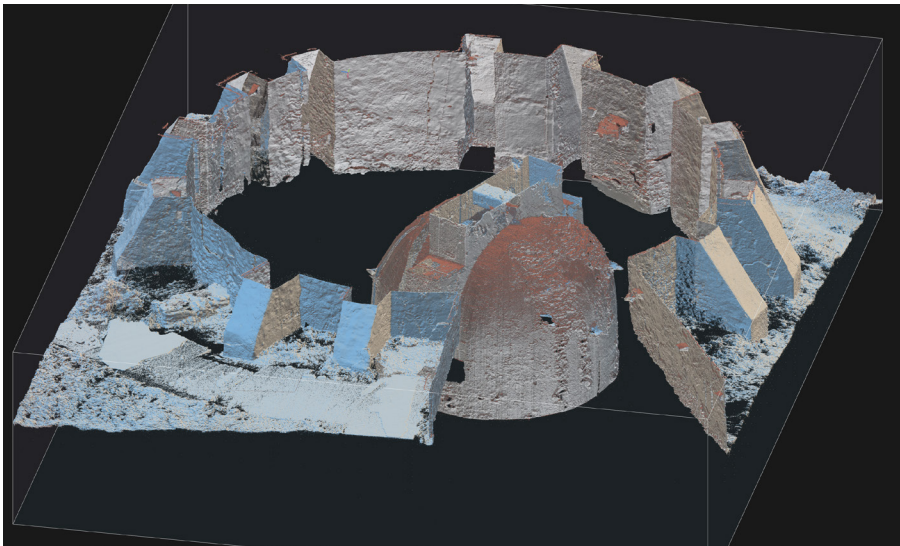


Figura 8. Diversas secciones de la noria realizadas sobre el modelo renderizado.

Ciertamente, en este caso, la noria ha sido sometida un proyecto de restauración y conservación²⁷. Pero otro de los usos relevantes que la fotogrametría de precisión permite es el de la diagnosis del estado de conservación, así como la identificación de patologías constructivas en los edificios históri-

²⁷ VÁZQUEZ RODRÍGUEZ, Agustín, *Taller de empleo...*

cos. También es de gran utilidad para registrar el estado de un bien antes de someterlo a procesos de restauración o rehabilitación. El ejemplo más claro en relación con el potencial para la diagnosis lo hallamos aquí en el pozo y en la bóveda del mismo, los elementos más inaccesibles de la noria. Nuestro escaneo del interior del pozo, aunque con fines experimentales, permite detectar y analizar potenciales problemas de la estructura, como desprendimientos de elementos, grietas, filtraciones, etc.

Ya hemos comentado anteriormente la problemática que afecta a asentamientos superpuestos de distintas etapas históricas, como es también aquí el caso. Los Modelos Digitales de Elevaciones, sean de superficies o del terreno, combinados con los tridimensionales de los elementos emergentes, obtenidos con las técnicas fotogramétricas, ayudan a analizar y comprender la secuencia habitacional de estos espacios. Por poner un ejemplo, podemos calcular el volumen del pozo de la noria, y conociendo la información estratigráfica del yacimiento romano, saber con mucha exactitud los metros cúbicos de tierra extraído en época contemporánea sobre la ocupación anterior, así como preguntarnos acerca de cual fue el destino de este material. En esta ocasión, quizá se empleó para rellenar el espacio entre el pozo y la estructura anular exterior de la noria. Este tipo de información interesa al arqueólogo que proyecte una actuación en lugares con este tipo de casuísticas. De la misma manera se podría proceder para evaluar la afección del cortijo de Autrán sobre el mismo yacimiento romano. A propósito, la fotogrametría aérea permite, no sólo apreciar la huella de las catas realizadas sobre el edificio contemporáneo en el marco de los talleres de empleo, también apreciar la morfología general de esta parte de la cortijada.

En suma, hemos destacado algunas de las aplicaciones más evidentes de la técnica, sin duda se podrían identificar muchas más. El empleo de la fotogrametría se implantará en la creación de los futuros *corpora* documentales del patrimonio histórico-cultural. El ejemplo de la Noria de Autrán no es más que uno de los numerosos casos de estudio en los que podemos actuar, siempre con el objetivo principal de obtener información sin alterar el registro material, sea del tipo que sea, uno de los principios de la Investigación no Invasiva.