



DOCUMENTACIÓN 3D PARA LA CONSERVACIÓN DEL PATRIMONIO HISTÓRICO: EL CASTILLO DE PRIEGO DE CÓRDOBA

3D DOCUMENTATION FOR THE CONSERVATION OF HISTORICAL HERITAGE: THE CASTLE OF PRIEGO DE CÓRDOBA (SPAIN)

Diego Francisco García-Molina^{a,*} , Ramón González-Merino^b , Jesús Rodero-Pérez^b ,
Bartolomé Carrasco-Hurtado^a 

^aDepartamento de Ingeniería Gráfica, Diseño y Proyectos, Universidad de Jaén, Escuela Politécnica Superior de Linares, Avenida de la Universidad s/n, 23700 Linares, Jaén, España. dfgarcia@ujaen.es; bhurtado@ujaen.es

^bCetemet (Centro Tecnológico Metalmeccánico y del Transporte). Circunvalación Ronda Sur Apdo. 97, 23700 Linares, Jaén, España. <https://www.cetemet.es/>

Lo más destacado:

- La combinación de técnicas para la documentación 3D de diversas estructuras arqueológicas en función de su morfología.
- La inspección previa y la planificación como punto fuerte de la metodología propuesta influye notablemente tanto en la toma de datos como en la obtención de los resultados.
- Perfecta relación entre las características de la técnica y el procedimiento que contextualice la escala, situación y resolución final del elemento patrimonial objeto de estudio.

Abstract:

One of the main objectives of heritage management policies is to promote measures aimed at the maintenance, restoration and enhancement of cultural and archaeological assets. To guarantee this, the responsible institutions must promote actions for the dissemination and transference of cultural heritage, as well as promoting actions with the greatest possible rigour, developing scientific and technical studies that support and improve intervention methods. Recent technological advances in fields such as photogrammetry, digital terrestrial scanning and 3D modelling have made a significant contribution to the digital preservation and dissemination of architectural heritage.

European administrations, in their desire of regional development, as well as the central or local governments have notably boosted the recovery of their rich and diverse heritage. A particular case is Priego de Cordoba's Castle, a stronghold which was one of the most important monumental icons of the Andalusian period.

Currently, this site is the main target of many architectural interventions and a model due to the implementation of last generation techniques in digital preservation. The local archaeological department promotes a large number of interventions and archaeological excavations. This has made a priority to get a qualitative geometrical 3D documentation, and therefore a constantly updated the point cloud (xyzRGB).

This paper is focussed on presenting the results of the digital preservation process through 2D planimetry obtained from photogrammetric technics, 3D models, and geospatial data. These techniques are a previous step to large architectural intervention planned in Priego de Cordoba's Castle, in particular, the identified structures as Wall 1 and Tower 1.

Two out of the three studied structures can be found in Wall 1. They correspond to a cobblestone pavement located in the rampart of the Wall 1, which is a post-medieval period; a double-stepped semi-underground path, excavated in the infill of the wall. The third structure studied in this paper consists of a well, which drills vertically the infill of the wall of the Tower 1. This feature is interpreted in the last research as a vertical well to place the weights of the clock sited in this tower until the 19th century.

This work combines two techniques of geometric documentation to obtain a more complete point cloud. The terrestrial laser scanning, and the photogrammetry due to the higher colour performance, along with the completion of the point cloud obtained with the laser scanner. Along with this study, we will analyse the features which will better define the best technique to fit the documentation of the different structures. Their geometric characteristics, the incidence of sunlight or the accessibility will condition the use and choice of the technique.

We have stated that there is software nowadays which makes it easier to access and consult the information through new computing hardware. Besides, we have highlighted the importance of knowledge and synergy from the different stakeholders

*Corresponding author: Diego Francisco García-Molina, dfgarcia@ujaen.es



implied (city council, technological centre and private companies). The final goal consists of making the society aware of the capital importance of digital preservation as well as dissemination of science.

Keywords: cultural heritage; architectural restoration; digital conservation; terrestrial laser scanner (TLS); photogrammetry

Resumen:

Uno de los principales objetivos de las políticas de gestión del patrimonio es promover las medidas encaminadas a la conservación, restauración y puesta en valor de los bienes culturales y arqueológicos. Para garantizarlo, las instituciones responsables deben promover acciones de difusión y transferencia del patrimonio cultural, así como fomentar actuaciones con el mayor rigor posible, desarrollando estudios científicos y técnicos que favorezcan y perfeccionen los métodos de intervención. Los recientes avances tecnológicos en campos como la fotogrametría, el escaneado láser terrestre y el modelado tridimensional (3D) han permitido una contribución significativa a la preservación digital y difusión del patrimonio arquitectónico. Uno de los iconos monumentales más importantes como fortaleza defensiva heredera del periodo andalusí es, sin duda, el Castillo de Priego de Córdoba. Actualmente, este enclave es foco de numerosas intervenciones arquitectónicas y referente por la aplicación de técnicas de última generación para la preservación digital. Este artículo tiene como objetivo presentar los resultados del proceso de preservación digital mediante la utilización de planimetría 2D, modelos 3D y datos geoespaciales, como paso previo al inicio de la extensa intervención arquitectónica prevista sobre el Castillo de Priego de Córdoba, concretamente las estructuras identificadas como lienzo 1 y torre 1. Este proyecto pone en valor los conocimientos y sinergias de distintos entes intervinientes y agentes del conocimiento (Ayuntamiento, Centro Tecnológico y empresa privada) con el objetivo final de concienciar a la sociedad de la importancia de la conservación digital.

Palabras clave: patrimonio cultural; restauración arquitectónica; conservación digital; escáner láser terrestre (TLS); fotogrametría

1. Introducción

En los últimos años, la globalización y el turismo han contribuido al crecimiento económico y desarrollo de los países (Aguilar, Merino, & Migens, 2003), excepto en periodos de pandemia. Las políticas turísticas desarrolladas han sido clave para ello, convirtiendo al sector turístico en motor de crecimiento económico. Este hecho genera un notable aumento de la demanda de información en el ámbito del patrimonio.

Los avances en el ámbito de la conservación, difusión y puesta en valor del patrimonio han supuesto una revolución en el sector. La sociedad demanda nuevas formas de interacción, percepción y visión que atraigan más y mejoren la forma de contar su historia. Se apuesta por las nuevas formas de representación 3D para lograr la conservación digital y la puesta en valor del patrimonio.

La falta de normalización en la documentación geométrica de un elemento patrimonial dificulta notablemente la estandarización de los resultados, hay tantos tipos de representación exigida como profesionales la utilizan (Valle Melón, 2006). Este hecho, junto a la variedad tecnológica existente, la necesidad de interoperabilidad entre los diversos agentes, así como las nuevas empresas creadas al uso, demandan el desarrollo de centros tecnológicos que ayuden a implementar nuevas técnicas y procesos para la difusión de nuestro patrimonio. Estas instituciones deben orientar y canalizar información y esfuerzos en el campo de la investigación, contribuyendo al proceso de renovación tecnológica (Giner & Santa María, 2000).

Apostar por la tecnología cobra un papel protagonista que ha permitido que, en el caso de uno de los pueblos más monumentales de la provincia de Córdoba,

Priego de Córdoba, Cetemet, en calidad de centro tecnológico y Digitalizados3D, empresa cordobesa que desde el 2010 viene realizando trabajos en el ámbito de la conservación patrimonial, hayan colaborado en pro de la preservación digital de su patrimonio. El caso que nos ocupa se engloba dentro de una actuación para la documentación geométrica que comenzó en el año 2013, gracias a la gran apuesta que hizo la administración local de este municipio para conservar su patrimonio arquitectónico¹.

Se pretende aplicar técnicas de documentación geométrica y conseguir complementarlas para garantizar una preservación digital antes de intervenir arquitectónicamente sobre la zona superior tanto de la Torre 1 como del Lienzo 1 (Fig. 2).

2. Antecedentes históricos del monumento objeto de estudio

El Castillo de Priego² se localiza dentro del casco urbano de la ciudad, incluido en los límites del Conjunto Histórico del barrio de la Villa (Fig. 1). Su disposición topográfica, hace de la fortificación un edificio conexionado a la población, integrado en ella, como digna heredera de sus orígenes como alcazaba islámica de la Madina del Priego Andalusí (Carmona, 2008; Carmona, Luna, & Moreno, 2002).

Desde la donación de la fortificación en 1996 a la ciudad, por la familia Rubio Sánchez, han sido numerosas las intervenciones arqueológicas realizadas destinadas a conocer en profundidad el monumento y su evolución (Carmona, Moreno & Luna, 1998; Carmona et al., 2002; Carmona & Carrillo, 2016; Carmona, 2018). Todas estas actuaciones han permitido aportar un importante volumen de información de carácter científico,

¹ Levantamiento de alta definición realizado en la Fuente de la Salud, así como en el Tajo y Murallas del Adarve en Priego de Córdoba.

² El castillo de Priego está declarado Bien de Interés Cultural en su tipología legal de Monumento [Códigos 14/055/005 y R-1-51-0001134]. La fortificación se ubica dentro de la Zona A de

Protección del Patrimonio Arqueológico Urbano, según consta tanto en el Plan Especial de Protección, Reforma Interior y Catálogo del Centro Histórico, aprobado en Pleno Municipal del 4 de mayo de 2001, como en la Carta Arqueológica de Riesgo [C.A.R.] del municipio.



Figura 1: Perspectiva del Castillo de Priego dentro de su casco urbano. Foto aérea 2002.

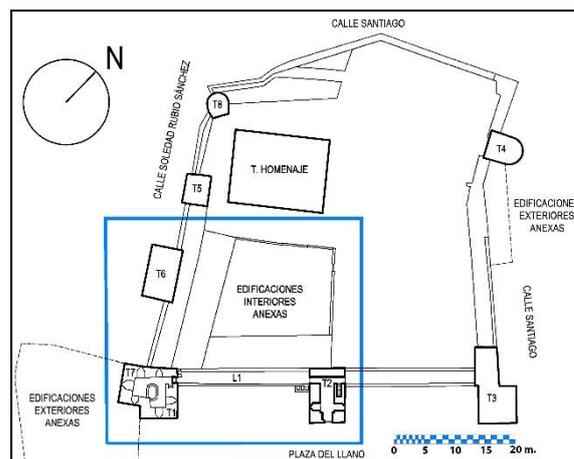
fundamental para diseñar y ejecutar correctamente las fases arquitectónicas de conservación y restauración (Fig. 2a).

Además, una reciente reconstrucción virtual realizada por el Dr. Diego F. García³, en la que ha contado con el asesoramiento del Museo Histórico Municipal (Servicio Municipal Arqueología), ha mostrado de manera más explícita el potencial turístico de esta estructura defensiva. Este hecho ha propiciado que desde el año 2017 haya habido una importante operación, en relación a este icono monumental, que ha consistido en la Rehabilitación y puesta en valor del Castillo de Priego de Córdoba. En su inicio se ha comenzado con la puesta en valor de la parte frontal del Castillo, la más llamativa para el público en general (Figs. 2a, 2b y 2c).

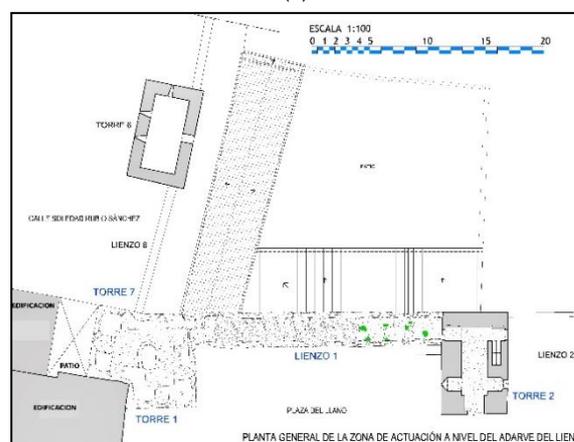
Cabe destacar la aportación documental que ha proporcionado a este trabajo de investigación el proyecto de Restauración de la Torre 1, Lienzo 1 y Torre 2 del Castillo de Priego de Córdoba cuyo arquitecto ha sido Alfonso C. Ochoa Maza. Su planimetría, ha servido como punto de partida de los citados trabajos de documentación geométrica practicado sobre tres elementos identificados dentro del Castillo. Respecto a su ubicación, las estructuras analizadas se encuentran en el nivel de adarve del Lienzo 1 y Torre 1 (Fig. 2c). En la citada excavación arqueológica (Moreno, Carmona, & Luna, 2003), quedan identificadas las tres estructuras objeto de nuestro estudio y nosotros respetaremos su nomenclatura.

En primer lugar, el estudio se centrará en el *paso semisubterráneo* con doble escalonado, excavado en el migajón del Lienzo 1. Se habilitó probablemente en un momento postmedieval (o muy a finales del siglo XV). El hueco de las escaleras tiene una longitud de 5.12 m y un ancho variable entre 0.92 y 1.18 m. Los escalones medidos presentan un ancho de 95 cm, con una huella y tabica variables.

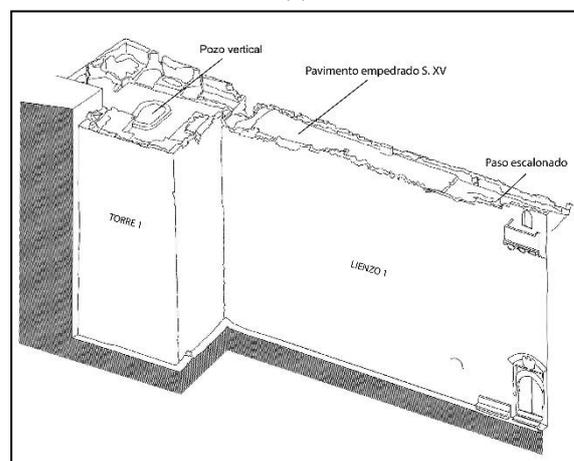
El segundo elemento que constituye este estudio es un *pavimento empedrado* situado en el adarve del Lienzo 1, correspondiente a una fase postmedieval, y que estaba proyectado levantarlos para permitir ajustar las cotas y corrientes del nuevo pavimento. Este se dispondría sobre los pavimentos medievales conservados. El pavimento posee una ligera pendiente para la evacuación de las aguas pluviales del adarve a través de un can o gárgola.



(a)



(b)



(c)

Figura 2: Planos de la Torre 1, Lienzo 1 y Torre 2: (a) Planta; (b) Detalle; (c) Perspectiva desde la Plaza del Llano.

El tercer y último elemento que se afronta es este estudio consiste en un pozo, que perfora verticalmente el migajón de la Torre 1, y que las últimas investigaciones permiten interpretar como *pozo vertical* para la disposición de las pesas del reloj que se ubicó en esta torre y que estuvo en uso hasta el siglo XIX. Durante la ejecución del proyecto

³ Puesta en valor mediante la reconstrucción virtual del recinto amurallado que configuró Medina Baguh o lo que fue lo mismo Priego de Córdoba en el siglo XV.

de restauración este elemento ha quedado amortizado, y por tanto no visible, por un nuevo pavimento.

3. Estado de la cuestión: el láser escáner terrestre (TLS) y la fotogrametría digital

En las intervenciones sobre Patrimonio Histórico una labor esencial consiste en dar cuenta del estado real de los bienes inmuebles. Para este cometido, es necesario documentar de forma fidedigna su geometría, así como su relación con el entorno.

En el campo de la arqueología, las publicaciones relacionadas con la documentación 3D han estado principalmente enfocadas a la reconstrucción 3D mediante el empleo de un software determinado, sin analizar la planificación ni los requisitos previos para alcanzar la precisión requerida (Davis, Belton, Helmholtz, Bourke, & McDonald, 2017). Son escasos los estudios que parten de una planificación cuidadosa que consideren todos los factores implicados en una toma de datos generalizada. Al contrario, la gran mayoría de los trabajos parten de analizar los resultados obtenidos con el empleo de una u otra tecnología sin analizar el correcto empleo de la misma (Lachat, Landes, & Grussenmeyer, 2019).

Durante esta última década, el escáner láser terrestre (*Terrestrial Laser Scanning*, TLS) ha sido la principal herramienta para la obtención de datos 3D de objetos patrimoniales complejos (Alshawabkeh, El-Khalili, Almasri, Bala'awi, & Al-Massarweh, 2020). Presenta la ventaja de la medición masiva de datos en un corto periodo de tiempo. En relación a la fotogrametría destaca una captura de información mucho más localizada y concentrada con altos valores RGB y con la posibilidad de realizarse desde diferentes perspectivas (Giuliano, 2014; Manferdini & Galassi, 2013).

En este aspecto, son numerosos los autores que han comenzado a incluir en sus estudios la combinación de ambas técnicas para reforzar la documentación 3D de los enclaves arqueológicos (Al-Kheder, Al-Shawabkeh, & Haala, 2009; Alshawabkeh *et al.*, 2020; Balletti, Guerra, Scocca, & Gottardi, 2015; Kjellman, 2012).

Aunque en el mercado existen distintos tipos de sensores LIDAR (de mano, tipo GeoSLAM, o embarcado, en UAV o en vehículo), en nuestro caso y debido a la poca operatividad del entorno, se escoge un escáner estático TLS.

Nuestro TLS posee alta precisión respecto a la obtenida por un dron. Además, la productividad frente al escáner de mano también es mejor, ya que este en el postproceso requiere de técnicas tipo SLAM para la unión de los puntos que posteriormente debe ser procesada.

También sobre trípode hemos aplicado la fotogrametría terrestre. Al igual que en otras ocasiones, estudiamos la posibilidad de utilizar otras técnicas fotogramétricas de rango cercano como por ejemplo la pértiga para la zona del pozo vertical. Pero en su contra, en otros trabajos realizados en exteriores del propio castillo se habían presentado inconvenientes tanto en la visualización de la pantalla por la acción de la luz del sol como por errores de conexión entre la cámara y el dispositivo móvil, necesario para poder ver en tiempo real la imagen. Además, se añadía otro inconveniente, había que alcanzar los 5 m de profundidad, la falta de estabilidad originaría altos tiempos de exposición por falta de luz y

consecuentemente podría provocar errores de trepidación. Cabe destacar en relación al citado aspecto que en las dos estructuras restantes (paso semisubterráneo y pavimento empedrado) situadas en el exterior, con buena luz y en distancias más cortas, hemos utilizado el disparador inalámbrico para cámara Canon EOS D-500 y un monopie trípode Neewer de Aluminio para evitar la trepidación.

Este artículo muestra la importancia de combinar técnicas para asegurar la correcta documentación de las tres estructuras citadas en el Castillo de Priego.

El modelado 3D por medio de la integración del TLS y fotogrametría se muestra como una tecnología de documentación digital para el análisis espacial extremadamente útil (Jo & Kim, 2017). Sin embargo, la documentación digital 3D del patrimonio histórico no debería quedarse en simplemente una recolección, sino que convendría incluir, como propone (Fryer, Mitchell, & Chandler, 2007): (1) el registro y procesado de datos multifuente, multiresolución y multicontenido; (2) la gestión y conservación de los datos obtenidos, (3) la visualización y presentación de los resultados para distribuir la información, y (4) la realización de inventarios que permitan compartir los datos y resultados en el ámbito de la investigación, la educación, la conservación o el turismo.

4. Materiales y métodos

Las técnicas y procesos utilizados para obtener modelos 3D han evolucionado rápidamente en los últimos años. Sin embargo, no se ha avanzado igual en la definición de procesos estandarizados que aseguren la homogeneidad y la interoperabilidad de los resultados (Molero Alonso, 2017).

Con este estudio se pretende aportar un protocolo que innove en el proceso e incluya aspectos que mejoren los pasos para garantizar un buen trabajo para la documentación geométrica de cualquier elemento patrimonial. El equilibrio entre la finalidad, las necesidades y las técnicas a utilizar es el único criterio válido para garantizar la viabilidad y la adecuación de nuestro proyecto. A continuación, se procederá a explicar en qué ha consistido el proceso (Tabla 1).

Para afrontar nuestro trabajo de documentación geométrica se han analizado numerosos ejemplos donde la técnica y la metodología se aproximan a nuestro caso. Entre ellos, destaca el procedimiento seguido por los miembros del equipo del Laboratorio de Arqueología y Arquitectura de la Ciudad (LAAC) y el trabajo citado a continuación (Almagro, Navarro, & Orihuela, 2008).

La metodología propuesta destaca por un profundo estudio histórico de los elementos que intervienen, y de los flujos de trabajo específicos, tanto teóricos (de la arqueología, arquitectura e ingeniería virtual) como prácticos (del uso de varias técnicas de documentación geométrica). La particularidad del caso destaca por la peculiaridad de los trabajos, ya que por sus características morfológicas y de difícil acceso requieren de la aplicación de técnicas de documentación que garanticen de forma práctica la conservación digital. Para ello, se ha propuesto utilizar el TLS y de forma puntual la fotogrametría. Para finalizar el proceso, una vez obtenidos los resultados, se generará un conjunto de material gráfico, que será almacenado para la consulta técnica. En relación a los materiales utilizados los

Tabla 1: Metodología. Fuente: Elaboración propia.

1. Planificación	2. Toma de datos	3. Postproceso	4. Resultados
Solicitud de información documental y geométrica. Estado actual (punto de partida).	Reconocimiento in situ del lugar de trabajo.	Volcado de datos del equipo de campo al equipo de postproceso. 1ª copia de seguridad. Tratamiento de la nube de puntos.	Presentación de modelos 3D. Sectorizado en partes.
Inspección previa, determinar sistema de coordenadas (CRS).	Montaje de equipos en campo. Comienzo con la toma de datos.	Registro de las distintas tomas de datos. Unificado en una única nube de puntos georreferenciada.	Almacenaje de datos. Modos de presentación que garanticen la interoperabilidad.
Estudio y propuesta de actuación. Informe previo y elección de técnica a emplear y equipos.	Verificar las diferentes tomas realizadas. Anotaciones en cuaderno de campo.	Eliminación de puntos erróneos e información duplicada de la malla.	Difusión de los resultados, planimetría, publicaciones, informes, etc.
	Cumplimiento de tiempos.	Optimizado y simplificado de la nube de puntos.	

estructuraremos en base a las técnicas utilizadas. El Faro Focus S120 proporciona la nube de puntos de referencia para contextualizar el trabajo de documentación en coordenadas relativas y permite a partir de ahí planificar por sectores el trabajo.

De manera complementaria al TLS se aplicará la fotogrametría. Esto permite zonificar y optimizar los primeros resultados de forma localizada de la nube de puntos de referencia. Con la fotogrametría se completaría nuestra nube de puntos, incrementamos su resolución obteniendo así una nueva nube de puntos más densa y consecuentemente con menor separación entre puntos. A este hecho lo denominamos combinación de técnicas y generará dos nubes de puntos georreferenciadas bajo el mismo sistema de coordenadas relativas. Nuestro CRS está referido a un datum local, concretamente al 1^{er} posicionamiento del TLS y coordenadas (0,0,0).

En relación a los equipos fotogramétricos hemos utilizado una cámara Canon EOS D-500:

- Resolución 15,1 MP (4752 x 3168 píxeles).
- Objetivo Canon 18-55 mm f3.5-5.6.

5. Proceso concreto de trabajo

En este punto, se abordará el proceso de trabajo necesario para conseguir una nube de puntos lo más completa posible sobre los tres elementos patrimoniales sobre los que se realiza este estudio (Figs. 3 y 4). Tanto en el caso del pozo vertical (Fig. 3) como en el pavimento empedrado (Fig. 4a), se hará antes de su desamortización, de ahí radica la importancia de este trabajo en el ámbito de la preservación digital.

5.1. Fase previa: recopilación de información, visita previa y planificación

El proceso continúa con la inspección ocular *in situ* y el estudio de factores ambientales influyentes. De los tres elementos para documentar geoméricamente, cabe destacar el pozo vertical. Sus características morfológicas, lo hacen muy poco practicable. Tras realizar un exhaustivo estudio previo, se ha optado por minimizar los riesgos de accidentes, aplicando una técnica rápida y que aporte muchísima información geométrica. Esto confirma que el TLS se ajusta perfectamente a las necesidades del proyecto.



Figura 3: Pozo vertical localizado en la Torre 1.

Además, la visita previa permitió solventar el itinerario de posicionamientos del TLS (Tabla 2), así como determinar la forma de proceder para documentar las estructuras más complejas y concretar el momento óptimo para su escaneado, ya que la luz solar jugará un papel importante para la captura de los datos de color (RGB) y no así para el resto de parámetros que constituyen la nube de puntos resultante (x,y,z,i) (Riveiro, Armesto, Higinio, & Arias, 2011). Esta técnica proporciona una amplia nube de puntos 3D en un corto periodo de tiempo y es fácilmente complementada con la fotogrametría.

5.2. Fase intermedia: toma de datos en campo

Concretando, para la toma de datos generalizada se ha empleado TLS. Para las zonas puntuales de dimensiones intermedias y localizadas superficialmente se ha empleado la fotogrametría. En la toma de datos se emplearon aparatos de medición clásica, para verificar *in situ*, entre ellos un distanciómetro (Leica). Con esta herramienta, se comprueban las dimensiones generales de la zona, así como de todas las estructuras del estudio.

El primer paso de la toma de datos abarca la zona de acción generalizada, además del pozo vertical. En total, 92 m² correspondientes a la zona superior de



(a)



(b)

Figura 4: Estructuras localizadas en la zona superior del Lienzo 1: a) Pavimento empedrado; b) Paso semisubterráneo.

coronación tanto de las Torres 1 y 7, así como del Lienzo 1. La técnica a emplear es el TLS, su nube de puntos quedará configurada dependiendo del número de posicionamientos, de la configuración de la resolución y del rango de captura con el que se programe cada escaneado. Existen referencias de otros trabajos que relacionan la configuración del TLS con la escala de trabajo (Historic England, 2017).

La configuración del equipo de trabajo dependerá de la escala a la que queramos representar toda la zona de acción. La longitud máxima de esta zona arroja un dato medido en campo de aprox. 30 m. Representar a escala la zona documentada en un formato A3 o A2 como máximo, implicaría aplicar una escala 1:100 o 1:50, respectivamente. Como la nube de puntos obtenida con el escáner la utilizaremos sólo como referencia, podemos determinar que la escala de representación será 1:50. Por lo tanto, la resolución a la que programaremos nuestro TLS no será en ningún caso superior a 5 mm. Con el objeto de obtener una nube de puntos lo más homogénea y con la mayor cobertura posible, se han programado 13 posicionamientos y 18 escaneados, de los cuales uno ha resultado nulo.

Cabe destacar que en algunos posicionamientos se han practicado dos escaneados (bóveda completa y amplitud seleccionada). El tiempo empleado en la toma de datos de campo ha sido de 5 h diurnas (Tabla 2). Este hecho ha provocado que la luz solar afectara negativamente al color ya que ha sido inevitable, evitar los contrastes y las aberraciones cromáticas.

En relación al pozo vertical documentado, que perfora verticalmente el migajón de la Torre 1 (Fig. 3), se debe tener presente que la boca de acceso tiene unas dimensiones de 1.26 x 2 m. Para georreferenciar correctamente los distintos escaneados de esta estructura han sido necesarios seis posicionamientos: cuatro alrededor de la boca de entrada y dos en el interior. La dificultad de la toma de datos en su interior y la necesidad de permanecer el operario en su interior para manejar el TLS, supuso la captura de puntos no pertenecientes al objeto de estudio al obstaculizar él la toma de datos. Esta información será eliminada en el postproceso y se denomina habitualmente ruido⁴.

Una vez realizada la toma de datos con TLS solo faltaría incrementar la densidad y, por tanto, la resolución de las nubes de puntos mediante técnicas de fotogrametría. Esto se realizó en dos de los tres elementos objeto de estudio. Concretamente, en el pavimento empedrado (Fig. 4a) y en el paso semisubterráneo (Fig. 4b). Estas estructuras, tanto por sus características geométricas, como por su accesibilidad, han sido las únicas en las que se ha podido aplicar la fotogrametría.

Por lo tanto, el segundo paso consiste en emplear técnicas fotogramétricas. Esta técnica se aplicará de forma puntual sobre las citadas estructuras y mejorará notablemente la densidad de la nube de puntos, así como el color de las estructuras registradas. Por sus dimensiones, diremos que estas se corresponden con elementos patrimoniales de media escala.

La fotogrametría a partir de múltiples imágenes es, sin lugar a dudas, una solución geométrica versátil, potente y robusta. Se basa en el ajuste en bloque de múltiples

⁴ Datos capturados no relacionados con el objeto de estudio, que se superpone a la señal original durante el proceso de toma de

datos con el láser escáner terrestre y que puede generar confusión.

imágenes y puede adaptarse a cualquier tipo de cámara (métrica, semimétrica y convencional), indistintamente del formato. Además, la calibración de la cámara puede realizarse simultáneamente al proceso de orientación externa de las imágenes (Lerma, 2002).

Para llegar a la elección de la fotogrametría terrestre, se ha realizado un reconocimiento de las distintas superficies o lienzos susceptibles de aplicar esta técnica. Se ha comprobado que el uso de esta técnica se ajusta a las características de la zona a fotografiar.

Los métodos fotogramétricos proporcionarán una nube de puntos con alta resolución de imagen, ideal para la consecución de ortofotos. También cabe destacar que generará una nube de puntos de una zona específica que se integra a la perfección con la obtenida con el TLS. La asignación al mismo sistema de coordenadas se realiza mediante la identificación de puntos comunes e introduciendo las mismas coordenadas que proporcione la nube de puntos de referencia del TLS.

Tabla 2: Escaneados y número de posicionamientos en la toma de datos en campo con el TLS.

Scan	Ángulo V.	Ángulo H.	Calidad Res.	Tiempo (h)	N.º Puntos
1	90/60	0/360	(1/4)3x	5:31	27937907
2	16/60	31/125	(1/2)4x	15:50	18899575
3	90/60	0/360	(1/4)3x	5:31	19226467
4	13/60	238/314	(1/2)4x	12:54	15349261
5	null	null	null	null	null
6	90/60	0/360	(1/4)3x	5:31	24162438
7	90/60	0/360	(1/4)3x	5:31	23031127
8	90/60	0/360	(1/4)3x	5:31	17814915
9	jul-60	5/133	(1/2)3x	10:22	21044895
10	90/60	0/360	(1/4)3x	5:31	16798178
11	90/60	0/360	(1/4)3x	5:31	17652228
12	-6/-62,5	159/360	(1/2)3x	15:37	32287319
13	90/60	0/360	(1/4)3x	5:31	18734008
14	90/60	0/360	(1/4)3x	5:31	19150350
15	90/60	0/360	(1/4)3x	5:31	18874161
16	90/60	0/360	(1/4)3x	5:31	18576762
17	90/60	0/360	(1/4)3x	5:31	23789901
18	90/60	0/360	(1/4)3x	5:31	20036515

Los criterios utilizados para la configuración de los trabajos fotogramétricos se basan en las Recomendaciones técnicas para la documentación geométrica de entidades patrimoniales aportadas por el Instituto Andaluz de Patrimonio Histórico, perteneciente a la Consejería de Cultura de la Junta de Andalucía⁵.

En base a las citadas recomendaciones, hemos extraído la escala de trabajo (Tabla 3) donde se relaciona esta con el tamaño del píxel en el terreno o GSD⁶ (*Ground Sampling Distance*). En nuestro caso buscamos la representación a escala 1:5.

⁵Recomendaciones técnicas para la documentación geométrica de entidades patrimoniales aportadas por el Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico, Consejería de Cultura (Versión 1.0 23/11/2011) <https://www.iaph.es/export/sites/default/galerias/>

Tabla 3: GSD en función de la escala. Fuente: Instituto Andaluz de Patrimonio Histórico

Escala de Trabajo	GSD máximo (mm)
1:5	0,25
1:10	0,5
1:20	1
1:50	2
1:100	4

Para la toma de datos de campo se ha configurado la cámara réflex a la máxima resolución: 15 MP (4752 x 3168 píxeles). Se ha propuesto aplicar una escala de trabajo de 1:5, lo que implica que la superficie que encuadre nuestro objetivo no superará los 1188 x 633.6 mm. Hemos tenido en cuenta el solape que será del 60% aproximadamente entre tomas. Este hecho proporcionará un número considerable de tomas: 126 en el caso de la escalera y 179 en el pavimento

La toma de datos ha consistido en dos pasos, el primero parte de una configuración de cámara automática con una distancia principal de 35 mm, realizando los disparos a 1.5 m del objeto, se obtendrán un ajuste automático de velocidad y apertura. Para las mismas condiciones lumínicas y la misma distancia constante ponemos la cámara en modo manual y la distancia principal fija. Como nuestra cámara tiene zoom nos aseguramos antes de bloquear la lente en una configuración única para toda la serie de fotos: usamos cinta adhesiva sobre el cañón de la lente para evitar que se mueva.

Se generó una superficie de captura de imagen que abarca aproximadamente 1000 x 600 mm. Con estos parámetros de configuración (ISO 100, apertura F8, velocidad 1/80 s) y realizando los disparos necesarios para cubrir toda la superficie, con un solape entre 60-70%, se cumpliría el requisito, y se estaría en condiciones de poder representar el objeto a escala 1:5.

La correcta aplicación de estos aspectos será determinante para la obtención de una segunda nube de puntos lo suficientemente densa que garantice un modelo 3D de alta resolución.

Para ello, y con el fin de evitar deformaciones se planteó obtener la representación de resultados a través de ortoimágenes. A continuación, se muestran las dimensiones de las estructuras de estudio, medidas estas con cinta métrica y aplicando distintas escalas de representación (Tabla 4).

Tabla 4: Dimensiones (en mm) de las estructuras según la escala de representación.

Estructura	Dimensiones reales	Escala 1:5 (A0)	Escala 1:10 (A2)	Escala 1:40 (A4)
Escalera D.	5500x2000	1100x400	550x200	150x50
Pavimento	6000x2000	1200x400	600x200	150x50

Cabe destacar que en este trabajo se propuso la representación de las citadas estructuras máximo en

[patrimonio-cultural/documentos/gestion-informacion/recomendaciones_tecnicas_documentacion_geométrica.pdf](https://www.patrimonio-cultural/documentos/gestion-informacion/recomendaciones_tecnicas_documentacion_geométrica.pdf)

⁶ En una foto digital del suelo desde el aire o el espacio es la distancia entre los centros de píxeles medidos en el suelo.

escala 1:5 (Tabla 4). La escala que aplicaremos para su representación en formato papel y digital será 1:40.

Por último, en relación a la integración de las dos nubes de puntos generadas, ambas son complementarias entre sí, aunque posean distintos niveles de detalle.

En condiciones normales para escalar cualquier pieza se utiliza la metodología de la topografía clásica y esta necesita de dianas de referencia sobre las que determinar las coordenadas geométricas. En nuestro caso identificaremos esos puntos de referencia sobre el modelo obtenido previamente en la nube de puntos del TLS. El propósito será obtener un único modelo 3D.

5.3. Fase final: trabajo de gabinete

Como se ha visto anteriormente el proceso correspondiente a la toma de datos es relativamente rápido y sencillo comparado con lo laborioso que puede ser el postproceso o trabajo de gabinete (Mañana-Borrazás, Rodríguez Paz, & Blanco-Rotea, 2008).

En condiciones normales, esta parte del trabajo requiere el uso de diferentes tipos de software, combinando varios programas informáticos, para poder obtener los resultados finales (Marambio & García-Almirall, 2006). Los procedimientos para transformar los datos obtenidos, generalmente en forma de nube de puntos pueden volverse extremadamente largos. Por este motivo, se ha propuesto una única forma de presentación de resultados, ofreciendo así, una nube de puntos versátil que permita mostrar el modelo según las necesidades requeridas por el usuario final.

En este caso, se ha representado de forma esquemática, a través una serie de ortofotos a diferentes escalas

gráficas. Estas tienen como ventaja la rápida consulta, ya que se presentan con un formato ideal como información para futuras actuaciones.

En esta etapa la información recogida en campo se ha procesado en oficina mediante el software Scene 3D (Fig. 5), diseñado específicamente para el TLS de Faro®. Scene procesa y administra datos de escaneado de forma sencilla y eficiente (Faro, 2011).

El primer paso consiste en determinar un único sistema de coordenadas. Para ello determinamos como punto de referencia local, el posicionamiento del primer escaneado. Se tuvo en cuenta la altura del equipo, concretamente al centro del espejo y se restó a la cota z durante el postproceso de la nube de puntos.

Posteriormente se filtrará y unirán mediante el registro de datos para obtener una única nube de puntos que configurarán los resultados en bruto. La información representada en 3D está constituida por un total de 144.7 millones de puntos.

Posteriormente, se procesa la información geométrica (García Molina & Montes Tubío, 2012) realizando el limpiado y filtrado de la información no deseada para su optimización.

A partir de aquí obtenemos una segunda nube de puntos 3D resultante optimizada reducida constituida por 94.4 millones de puntos (Fig. 6). Por último, con el objeto de hacerla más manejable y facilitar su comprensión, se muestra la información geométrica a través de Autodesk ReCap v. 6.0. Se obtiene con una versión Trial y se utiliza como visor de la nube de puntos resultante. Cabe notar que posibilita desplazarnos por los distintos posicionamientos, así como realizar cualquier medición entre los puntos capturados (Fig. 7).

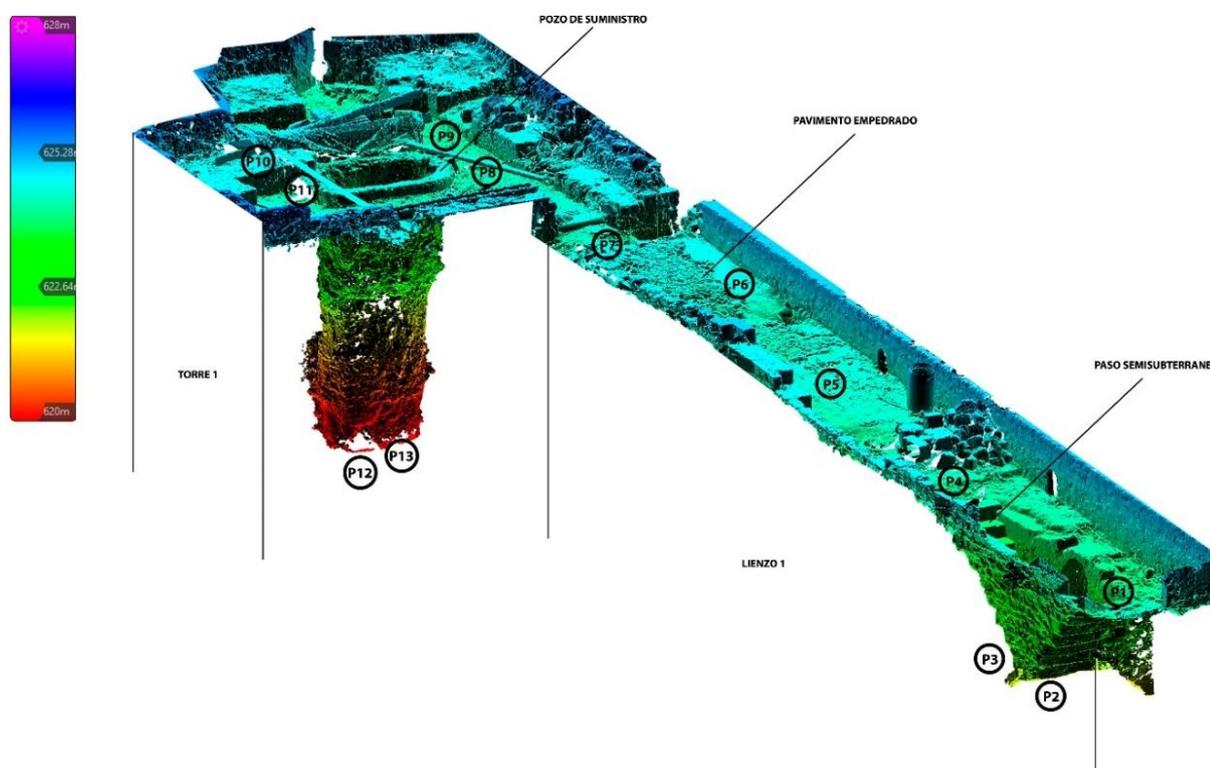


Figura 5: Nube de puntos desde el software ReCap, así como sus posicionamientos distribuidos a lo largo de la zona objeto de nuestro estudio: la zona superior del Lienzo 1 y la Torre 1 del Castillo de Priego de Córdoba.

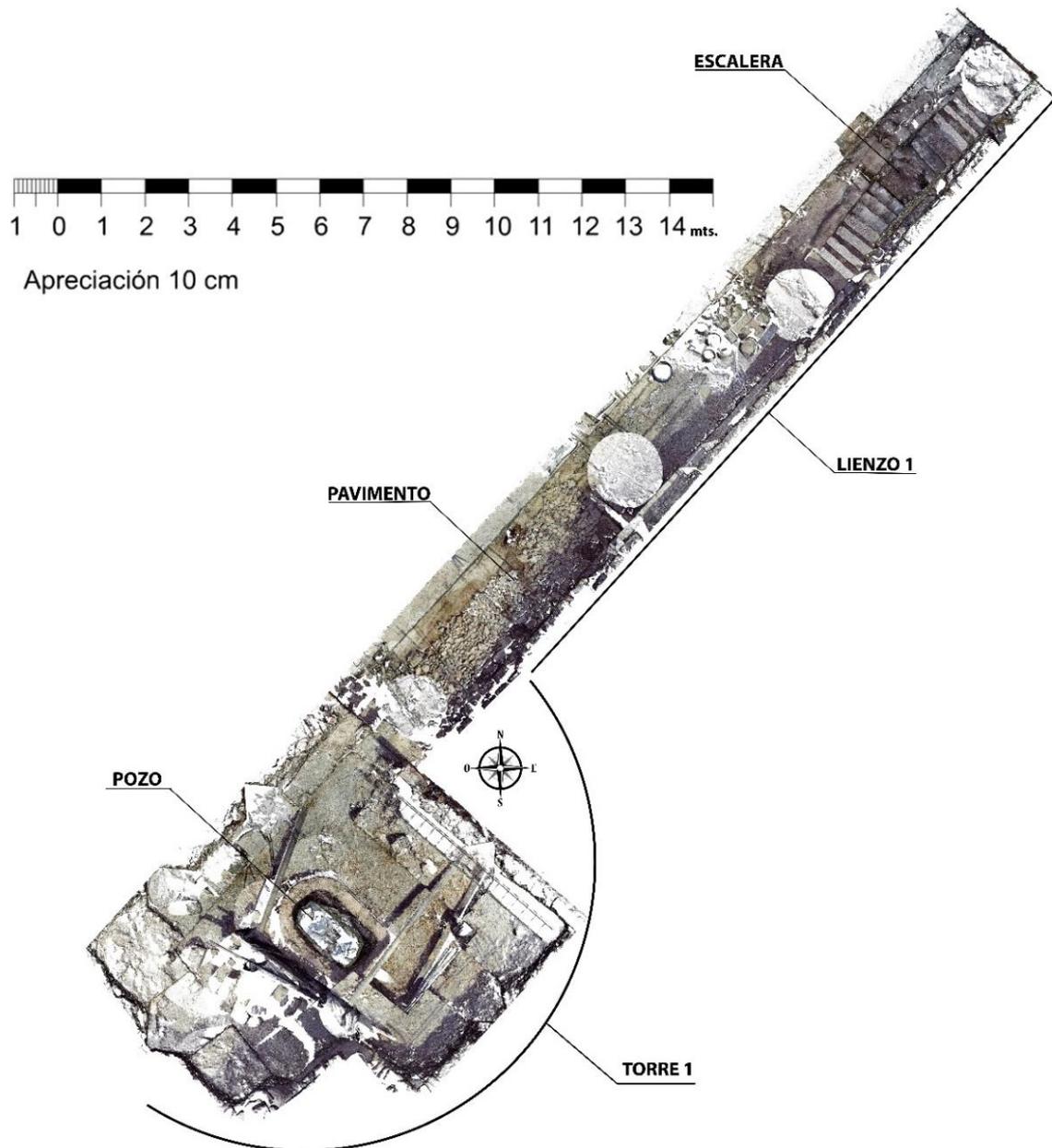


Figura 6: Planta resultante en forma de nube de puntos (xyzRGB) obtenida con el TLS de la zona objeto de estudio Torre 1 y Lienzo 1.

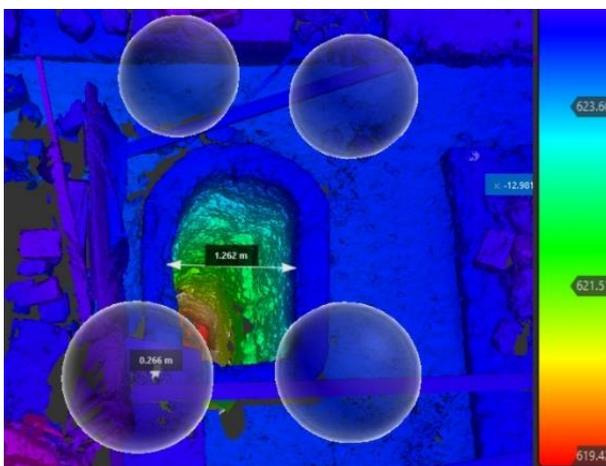
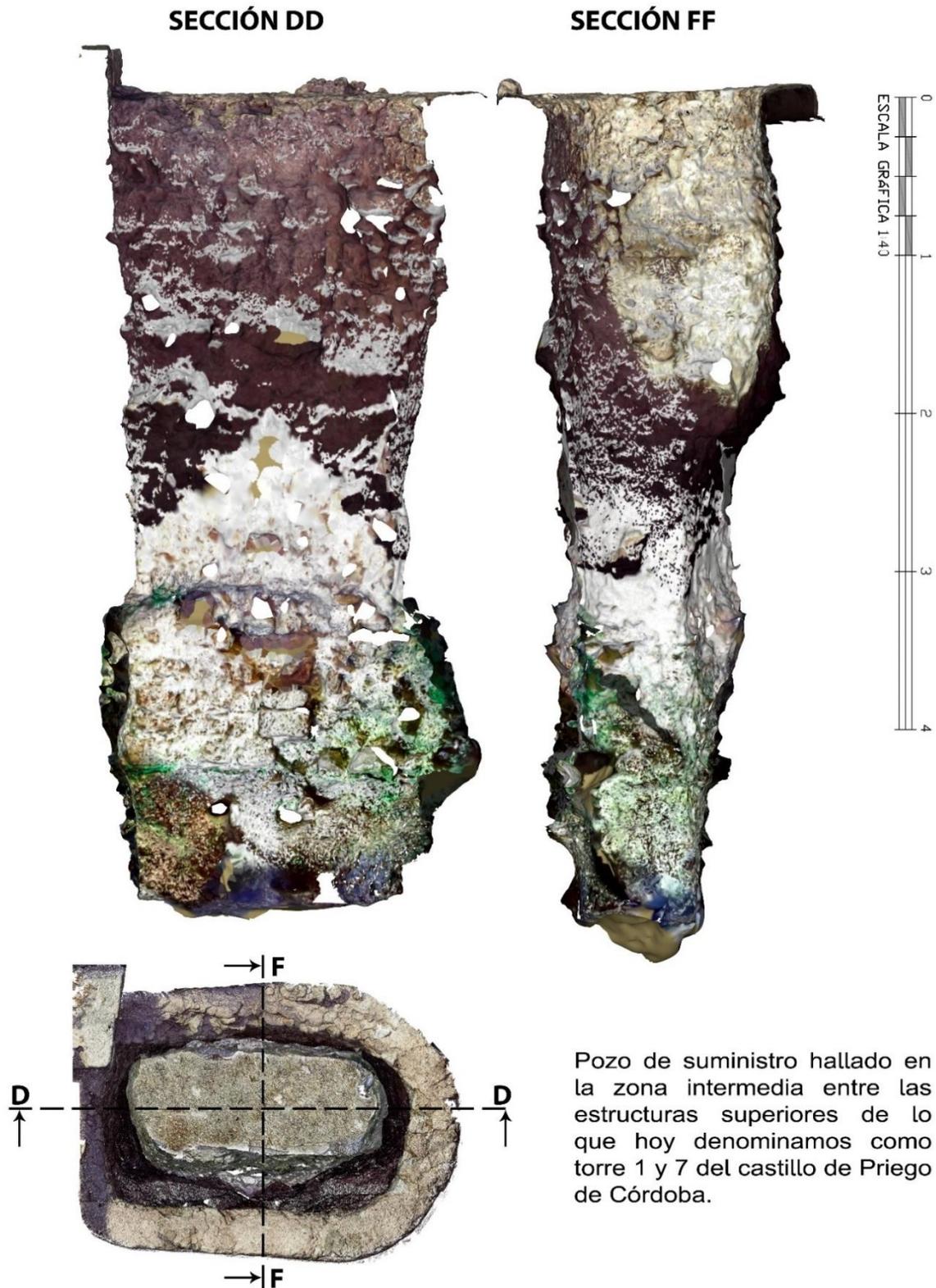


Figura 7: Vista aérea de la nube de puntos desde el software ReCap, pozo vertical de suministro ubicado en la Torre 1.

En la Fig. 5 destaca el modo de representación de la nube de puntos resultante “color referenciado con la cota de elevación”. Para analizar sus resultados se adquirió una licencia temporal de Technodigit 3DReshaper 2019 (Hexagon). Este software se empleó además para tratar la información capturada en forma de nube de puntos y convertirla en un modelo 3D poligonal. De esta forma, se obtuvieron las diferentes ortoimágenes, como subproducto la planimetría 2D tradicional a escala del elemento objeto de estudio (Fig. 8).

El proceso ha consistido en extraer la nube de puntos pertenecientes al pozo vertical, con el propósito de generar un modelo simplificado pero referenciado en el mismo sistema de coordenadas.

Los datos (xyzRGBi) que arroja esta pequeña porción geométrica son 13.6 millones de puntos, un volumen de información excesivo para que el modelo 3D sea operativo. Para ello, se necesita simplificar mediante un filtrado de puntos esa cantidad excesiva de información.



Pozo de suministro hallado en la zona intermedia entre las estructuras superiores de lo que hoy denominamos como torre 1 y 7 del castillo de Priego de Córdoba.

Figura 8: Ortofotos del pozo vertical de suministro (Torre 1 del Castillo de Priego de Córdoba).

Para ello, el software emplea algoritmos que proporcionaron una nueva nube de puntos con separación constante de 1 cm. Este proceso de filtrado ha permitido optimizar, diezmando la nube de puntos reduciéndola a 2.1 millones.

Si bien la resolución se reduce considerablemente, era la única opción viable para trabajar con suficiente

fluidez. Los archivos generados se han guardado en formato .PTS para los resultados en forma de nube de puntos y como .PLY para la superficie mallada.

En relación al postproceso relativo a la fotogrametría cabe destacar el sistema de revelado digital, el tipo de archivo RAW generado de la cámara Canon .CR2. Este archivo al procesarlo en gabinete nos abre directamente

el plugin Camera Raw 9.6 de Adobe Photoshop CC 2017. En un primer paso ajustamos el control de iluminaciones, sombras, claridad, contraste y temperatura de color. Posteriormente controlaríamos el enfoque aportando más nitidez y eliminando a su vez más ruido. Esta configuración es exportable y utilizada para todas las fotos de la misma secuencia.

Para el procesado de las citadas imágenes, el software utilizado ha sido el Agisoft Metashape v. 1.4.5. Este programa permite calibrar la cámara utilizada de forma semiautomática a partir de la información EXIF de cada una de las imágenes realizada en la toma de datos (Gil-Melitón & Lerma, 2019). La opción <Export – Generate Report> permite obtener un informe con los resultados de calibración. En la Tabla 5 aparecen los parámetros alcanzados tras la calibración de la cámara realizada para el paso semisubterráneo; la Tabla 6 muestra el error originado al escalar la citada estructura con la nube de puntos de referencia obtenida con el TLS.

En el paso semisubterráneo se tomaron 126 imágenes en campo, se empleó la misma resolución que en la toma de datos anterior, y una longitud focal de 35 mm. Se considera únicamente una distancia principal ($f_x = f_y$), las coordenadas del punto principal (c_x, c_y), y tres parámetros de distorsión radial (k_1, k_2 y k_3).

Para el proceso de transformación y escalado se han introducido las nuevas coordenadas. Una vez comprobado que la dimensión de la nube de puntos del TLS satura por exceso el software Metashape reducimos los puntos de control a cuatro en cada estructura (Tablas 6 y 8). Estos han de ser comunes (TLS y fotogrametría) para así registrar los resultados respecto a una única nube de puntos. El error de desviación obtenido en Metashape para esos cuatro puntos es asumible, dada la escala de trabajo.

Tabla 5: Valores de calibración durante el proyecto fotogramétrico del paso semisubterráneo.

	Value	Error	Cx	Cy	K1	K2	K3	P1	P2
F	7491.31	0.36	(-) 0.04	(-) 0.14	(-) 0.02	(+) 0.08	(-) 0.06	(-) 0.04	(-) 0.11
Cx	31.20	0.67	1	0.06	(-) 0.04	(+) 0.05	(-) 0.06	(+) 0.97	(+) 0.07
Cy	122.46	0.58		1	(-) 0.03	(+) 0.04	(-) 0.05	(+) 0.05	(+) 0.95
K1	(-)0.035	0.0003			1	(-) 0.97	(+) 0.92	(+) 0.05	(-) 0.02
K2	0.1749	0.0048				1	(-) 0.98	(-) 0.05	(+) 0.04
K3	(-)0.013	0.023					1	(-) 0.05	(-) 0.04
P1	0.00037	2.3e-05						1	(+) 0.07
P2	0.00484	1.9e-05							1

Tabla 6: Error generado al escalar el modelo fotogramétrico del paso semisubterráneo.

Punto	X error (mm)	Y error (mm)	Z error (mm)	Total (mm)	Image (pix)
1	0.95	0.7262	0.41	1.27	0.003 (7)
2	-3.93	-3.98	1.33	5.75	0,003 (9)
3	1.37	1.23	2.19	2.86	0,004 (17)
4	1.61	2.02	-3.93	4.7	0,003 (5)
Total	2.28	2.34	2.35	4.03	0,003

Tabla 7: Valores de calibración durante el proyecto fotogramétrico pavimento empedrado.

	Value	Error	Cx	Cy	K1	K2	K3	P1	P2
F	7449.76	0.19	(+) 0.03	(-) 0.38	(-) 0.01	(+) 0.04	(-) 0.02	(+) 0.04	(-) 0.25
Cx	24.1082	0.34	1	(-) 0.02	(-) 0.01	(+) 0.02	(-) 0.03	(+) 0.97	(-) 0.06
Cy	131.053	0.33		1	(-) 0.08	(+) 0.07	(-) 0.09	(-) 0.02	(+) 0.95
K1	(-) 0.042	0.0001			1	(-) 0.97	(+) 0.92	(-) 0.01	(-) 0.06
K2	0.23636	0.0024				1	(-) 0.98	(+) 0.02	(+) 0.05
K3	(-) 0.275	0.011					1	(-) 0.02	(-) 0.07
P1	7.20e-06	1.2e-05						1	(-) 0.05
P2	0.00506	1.1e-05							1

Tabla 8: Error generado al escalar el modelo fotogramétrico del pavimento empedrado.

Punto	X error (mm)	Y error (mm)	Z error (mm)	Total (mm)	Image (pix)
1	-5.19	-2.64	-1.74	6.08	0.003(10)
2	-4.88	5.57	1.82	7.62	0.003(6)
3	-0.94	0.59	1.93	2.22	0.003(11)
4	11.02	-3.5	-2.01	11.73	0.003(20)
Total	6.58	3.55	1.88	7.71	0.003

Los resultados obtenidos configuran una nube de puntos de 69.2 millones de puntos (densidad de 343 puntos/cm²), que se procesan con calidad de mallado media. A continuación, se muestran ortofotografías obtenidas como subproducto del modelo poligonal (Fig. 10). Estas se presentan tanto en formato papel como en soporte digital en formato .TIF.

En el caso del pavimento empedrado o primer suelo de ocupación del adarve correspondiente al siglo XV (Tablas 7 y 8) se tomaron 179 imágenes en campo. Los parámetros adicionales empleados fueron los mismos que en paso subterráneo.

En el caso del pavimento empedrado, se ha representado la ortofoto obtenida del modelo digital de elevaciones (Fig. 11), ya que era muy importante identificar la pendiente del pavimento. Se observa la degradación de color hacia la zona de evacuación de aguas.

Los resultados obtenidos, configuran una nube de puntos de 23.4 millones de puntos con una densidad media de 91.3 puntos/cm²; mallado a media calidad con 4.6 millones de polígonos y 2.3 millones de vértices.

En ambas estructuras y tras el proceso de transformación y escalado mediante la aplicación de puntos comunes (TLS-Fotogrametría) desde el propio Metashape se obtuvieron las diferentes ortoimágenes. Estas se presentan tanto en formato papel como en soporte digital en formato .TIF los cuales se podrán visualizar en cualquier visor fotográfico (Figs. 9 y 10).

Tras el citado proceso, se comprueba cómo ambas técnicas se complementan bajo el mismo sistema de referencia; identificado como datum local ofreciendo un modelo 3D unificado y que engloba a ambas técnicas.

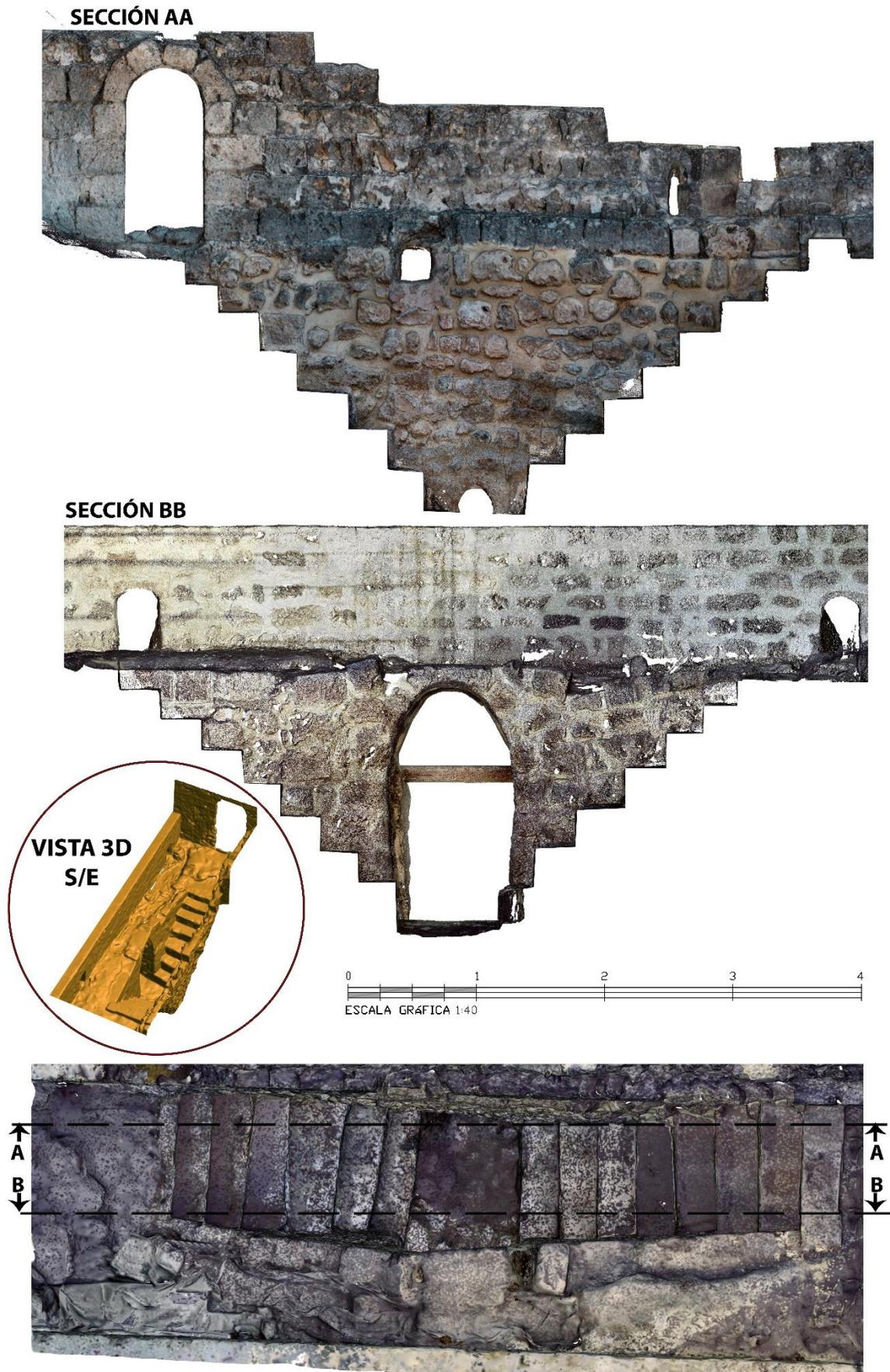


Figura 9: Ortófotos del paso semisubterráneo (Lienzo 1 del Castillo de Priego de Córdoba).

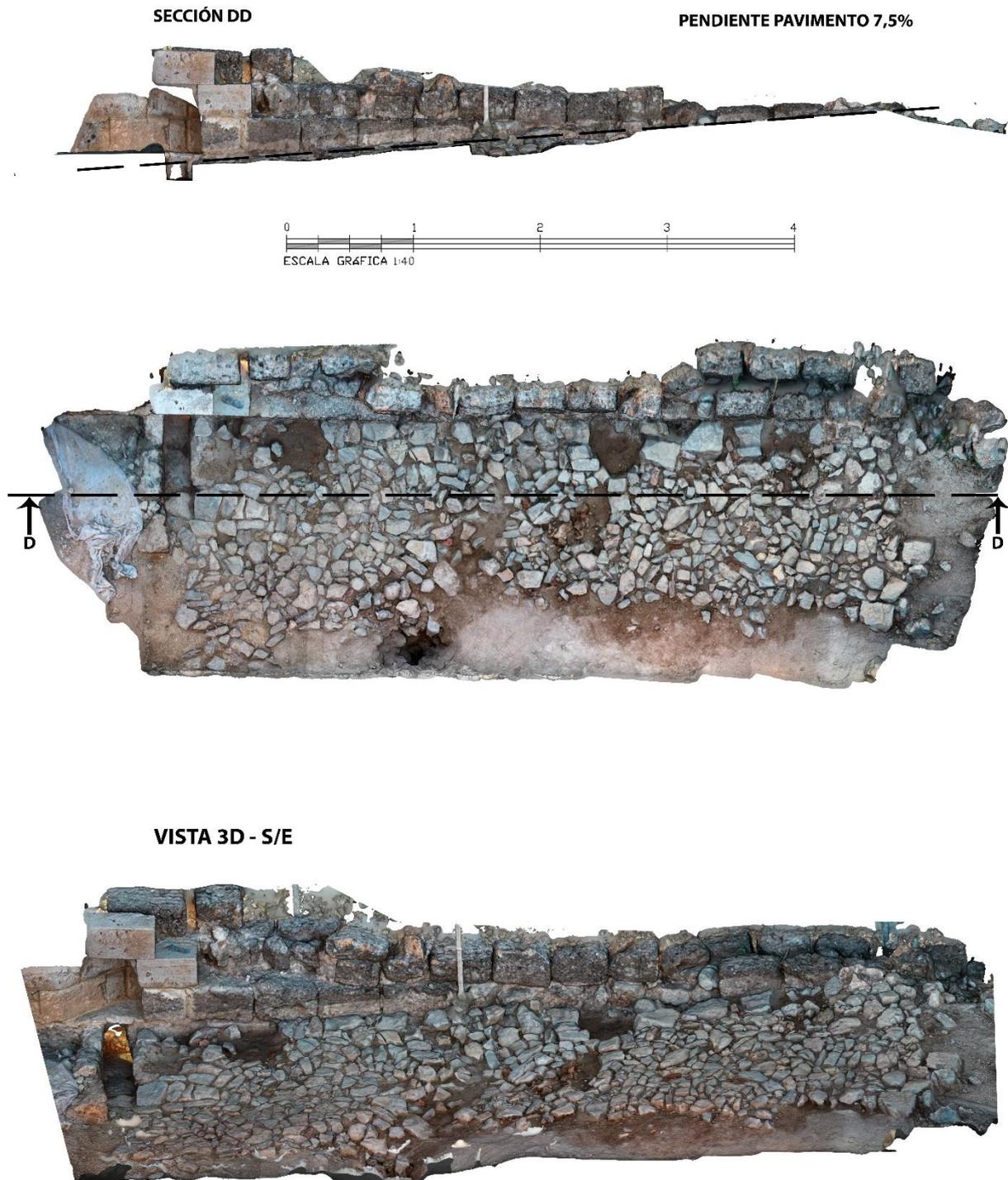


Figura 10: Ortofotos del pavimento empedrado (Lienzo 1 del Castillo de Priego de Córdoba).

6. Discusión y resultados

Una vez finalizado el proceso se explican las diferencias y los resultados inesperados que han condicionado nuestro trabajo, respecto a otros trabajos (Carmona, 2018) realizados al mismo promotor, pero en 2018.

La técnica planteada fue en un principio la fotogrametría en todas las estructuras a documentar. Era la opción más económica y fácil de abordar, no había necesidad de correlacionar los resultados de las tres estructuras, y en principio solo contábamos con que el tiempo era el único inconveniente.

Otro problema presentado, además del estrecho acceso al pozo vertical, fue la carencia de medios auxiliares necesarios para realizar las distintas tomas necesarias para que los resultados fotogramétricos cumplieren con los estándares exigidos. Hecho que sirvió para decantarnos por la aplicación del TLS en el interior de la citada estructura.

La fotogrametría aplicada sobre el pavimento empedrado no presentó grandes problemas al ser una superficie en planta, y en exteriores sólo la acción de la luz solar podría afectar los resultados con aberraciones cromáticas. Se corrigió fácilmente realizando las tomas a primera hora de la mañana.

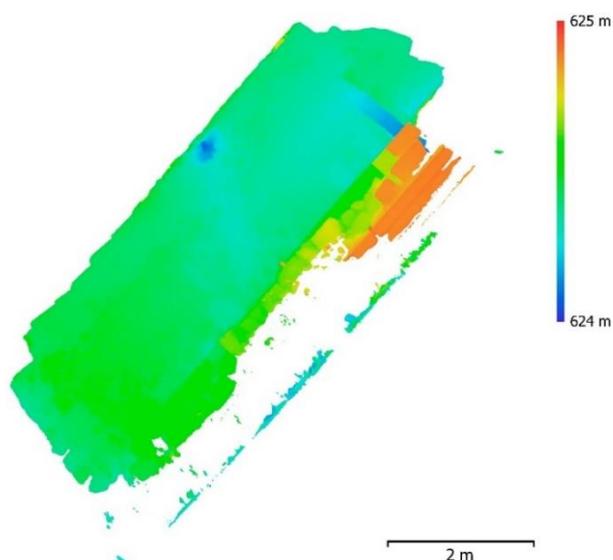


Figura 11: Planta del modelo digital de elevación del pavimento empedrado.

Por último, el paso semisubterráneo presentaba 1 m de separación entre sus lienzos, y tuvimos que configurar todo el proceso de toma de datos en base a esa reducida separación, originando mayor número de tomas.

Los resultados proporcionados por las dos técnicas en las tres estructuras objeto de estudio se complementan. Ambas generaron una información geométrica en formato .PLY compatibles con 3DReshaper utilizado para el unificado y procesado de las nubes de puntos.

Ha sido realmente fácil encontrar puntos comunes proporcionados por el TLS para escalar y unificar los resultados obtenidos a partir de la fotogrametría y además con un error asumible.

Tras el modelado 3D podemos decir que el resultado de la fusión de las dos técnicas presenta, por un lado, homogeneidad geométrica, y por otro, heterogeneidad visual. La fotogrametría proporciona una nube de puntos mucho más densa, debido al sensor de la cámara y al realizar el procesado a alta resolución, mientras que el TLS proporciona nubes de puntos menos densas, pero con un rango de distancia mayor. Para conseguir la homogeneidad geométrica hemos procurado que la distancia entre puntos después del limpiado y filtrado sea similar en ambos casos. Hecho que provoca un mallado homogéneo y consecuentemente un modelo 3D perfectamente integrado realizado mediante un proceso semiautomático con el software 3DReshaper. Finalmente, podemos afirmar que la combinación de técnicas (TLS-Fotogrametría) se complementan y mejoran notablemente los resultados.

Respecto a la entrega de los resultados en anteriores trabajos (Carmona, 2018), ha diferido la forma en la que se ha proporcionado la nube de puntos, el software Autodesk ReCap v. 6 ha permitido realizar de manera virtual una consulta de datos visual y geométrica. La mejora de los recursos informáticos junto con su agilidad pasa a ser un trámite rápido y preciso (Fig. 12).

7. Conclusiones

Se han aplicado técnicas basadas en el empleo del TLS para constituir una nube de puntos de referencia y, de manera puntual y específica, se ha complementado con

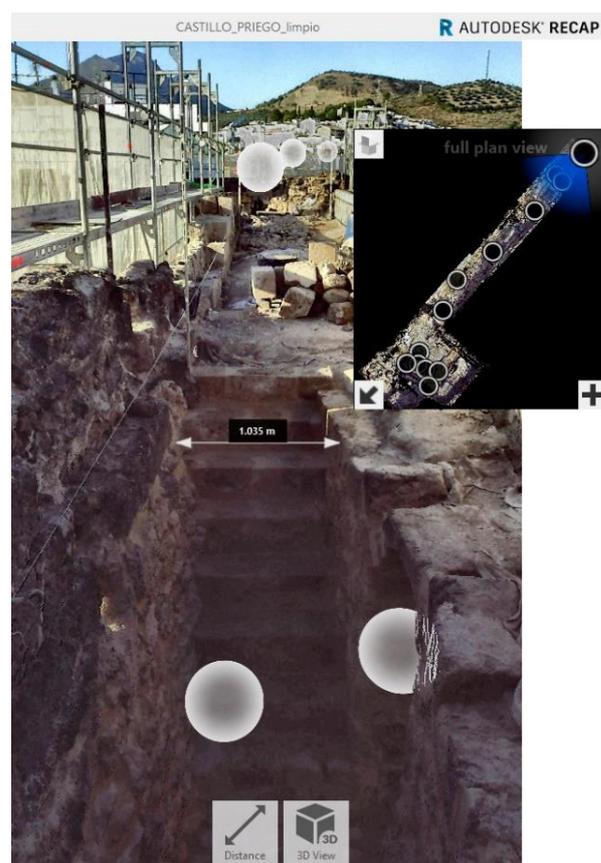


Figura 12: Medida virtual en Autodesk ReCap. Vista del paso semisubterráneo.

fotogrametría para mejorar la resolución gráfica en diversas estructuras del Castillo de Priego de Córdoba.

Para una correcta elección de la tecnología a aplicar debe existir una buena sintonía entre las características, ventajas e inconvenientes de las diferentes equipos y el procedimiento que determine la escala, situación y resolución final del elemento patrimonial objeto de estudio.

Además, se ha considerado prioritario dar un valor fundamental a la visita previa y planificación de los trabajos. Obtener cierta información antes de acometer los trabajos como la meteorología, accesibilidad, luces naturales y artificiales, etc. influyen en el proceso de toma de datos y, posteriormente, en los resultados. Este punto no depende, en cierta medida, del trabajo realizado, pero si nos afecta cualitativamente al mismo. Así, la falta de programación y la necesidad de improvisar por una deficiente programación del trabajo pueden afectar negativamente al mismo.

Se recomienda el uso de software que facilite la rápida consulta a usuarios poco familiarizados con la documentación y el procesado 3D. Para su desarrollo hemos apostado por establecer un vínculo directo con los diversos agentes intervinientes (arqueólogos, arquitectos, restauradores), para así conocer de primera mano las necesidades de sus demandantes. Se ha apostado por una herramienta que permita moverse por cualquier punto de la nube de puntos 3D, y que proporcione información geométrica de los distintos elementos objeto de nuestro estudio. Esto nos permitirá garantizar la preservación digital de elementos patrimoniales. Se tomó la determinación de emplear

visores gratuitos que faciliten el manejo y comprensión del modelo 3D resultante en forma de nube de puntos.

Agradecimientos

Al Excmo. Ayto. de Priego de Córdoba que, a través de su Museo Arqueológico Municipal y su Patronato Rubio Chavarri, ha fomentado la conservación digital apostando por las nuevas técnicas de documentación geométrica, facilitando la investigación en el ámbito de su Patrimonio

Arquitectónico. A D. Rafael Carmona Ávila, arqueólogo Municipal, por su confianza, apoyo y orientación en el campo arqueológico. A todo el personal de la empresa Construcciones Medina Bahiga, que se ha visto involucrado en el desarrollo de este trabajo, por su colaboración y toda la ayuda prestada. Para finalizar quisiera agradecer al Prof. José Luis Lerma, editor de la citada revista, su disposición a publicar nuestro trabajo. Así como por sus comentarios, los cuales fueron útiles para revisarlo y mejorarlo.

Referencias

- Aguilar, E., Merino, D., & Migens, M. (2003). Cultura, políticas de desarrollo y turismo rural en el ámbito de la globalización. *Horizontes antropológicos*, 9(20), 161–183. <https://doi.org/10.1590/S0104-71832003000200009>
- Al-Kheder, S., Al-Shawabkeh, Y., & Haala, N. (2009). Developing a documentation system for desert palaces in Jordan using 3D laser scanning and digital photogrammetry. *Journal of Archaeological Science*, 36(2), 537–546. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2008.10.009>
- Almagro, A., Navarro, J. & Orihuela, A. (2008). Metodología en la conservación del patrimonio arquitectónico medieval. In C. Saiz-Jiménez, & M. A. Rogerio-Candela (Eds.), *La Investigación sobre Patrimonio Cultural* (pp. 87–98). Sevilla.
- Alshawabkeh, Y., El-Khalili, M., Almasri, E., Bala'awi, F., & Al-Massarweh, A. (2020). Heritage documentation using laser scanner and photogrammetry. The case study of Qasr Al-Abidit, Jordan. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 16, e00133. <https://doi.org/10.1016/j.daach.2019.e00133>
- Balletti, C., Guerra, F., Scocca, V., & Gottardi, C. (2015). 3D integrated methodologies for the documentation and the virtual reconstruction of an archaeological site. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 40(5), 215. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-5-W4-215-2015>
- Carmona, R. (2008). La madina andalusí de B'aguh (Priego de Córdoba): Una aproximación arqueológica. *Xelb*, 9, 229-258.
- Carmona, R. (2018). Sobre arquitectura y armamento: el control arqueológico de las obras de consolidación de la Torre del Homenaje del castillo Priego de Córdoba (2016-2017). *Antiquitas* (30), 167-231.
- Carmona, R. & Carrillo, E. (2016). Arqueología entre los escombros: la limpieza del aljibe calatravo (siglos XIII-XIV) del castillo de Priego de Córdoba. *Antiquitas*, 28, 215–262.
- Carmona, R., Luna, D., & Moreno, A. (2002). Carta arqueológica municipal de Priego de Córdoba. Edición CD con cuadernillo, Sevilla.
- Carmona, R., Moreno, A., & Luna, D. (1998). Excavaciones arqueológicas en el castillo de Priego: informes de la Intervención Arqueológica de Urgencia de 1997. *Antiquitas*, 9, 101–128.
- Davis, A., Belton, D., Helmholz, P., Bourke, P., & McDonald, J. (2017). Pilbara rock art: laser scanning, photogrammetry and 3D photographic reconstruction as heritage management tools. *Heritage Science*, 5(1), 25. <https://doi.org/10.1186/s40494-017-0140-7>
- Faro Laser Scanner Focus3D Manual (2011). FARO Technologies Inc., Lake Mary, FL.
- Fryer, J., Mitchell, H., & Chandler, J. H. (2007). Applications of 3D measurement from images: Whittles Publishing.
- García Molina, D. F., & Montes Tubío, F. P. (2012). El Láser-Escáner 3D aplicado al patrimonio arquitectónico de Priego de Córdoba: la Torre del Homenaje. *Antiquitas*, (24), 277–302.
- Gil-Melitón, M., & Lerma, J. L. (2019). Patrimonio histórico militar: digitalización 3D de la espada nazarí atribuida a Ali Atar. *Virtual Archaeology Review*, 10(20), 52–69. <https://doi.org/10.4995/var.2019.10028>
- Giner, J. M., & Santa María, M. J. (2000). La política de centros tecnológicos y de servicios: la experiencia de las regiones valenciana y Emilia-Romagna. *Revista de Estudios Regionales*, (57), 131–150.
- Giuliano, M. (2014). Cultural Heritage: An example of graphical documentation with automated photogrammetric systems. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 40(5), 251. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-5-251-2014>
- Historic England (2017). Understanding the archaeology of landscapes. Swindon: *Historic England*.

- Jo, Y., & Kim, J. (2017). Three-Dimensional Digital Documentation of Heritage Sites Using Terrestrial Laser Scanning and Unmanned Aerial Vehicle Photogrammetry. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42(2/W5). <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W5-395-2017>
- Kjellman, E. (2012). *From 2D to 3D: a photogrammetric revolution in archaeology?* (Master's thesis, Universitetet i Tromsø).
- Lachat, E., Landes, T., & Grussenmeyer, P. (2019). Comparison of point cloud registration algorithms for better result assessment—Towards an open-source solution. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science*, XLII-2, 551–558. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-551-2018>
- Lerma, J. L. (2002). *Fotogrametría moderna: analítica y digital*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- Lerma, J. L., Cabrelles, M., Navarro, S., & Seguí, A. E. (2013). Modelado fotorrealístico 3D a partir de procesos fotogramétricos: láser escáner versus imagen digital. *Cuadernos de Arte Rupestre*, 6, 85–90.
- Manferdini, A., & Galassi, M. (2013). Assessments for 3D reconstructions of cultural heritage using digital technologies. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 5, W1. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-5-W1-167-2013>
- Mañana-Borrazás, P., Rodríguez Paz, A., & Blanco-Rotea, R. (2008). Una experiencia en la aplicación del láser escáner 3D a los procesos de documentación y análisis del patrimonio construido: su aplicación a Santa Eulalia de Bóveda (Lugo) y San Fiz de Solovio (Santiago de Compostela). *Arqueología de la Arquitectura*, 5, 15–32.
- Marambio, A. E., & García-Almirall, M. P. (2006). Escaner laser: modelo 3D y orto imágenes arquitectónicas de la iglesia de Santa María del Mar en Barcelona. *ACE: Arquitectura, Ciudad y Entorno*, 2.
- Molero Alonso, B. (2017). *Documentación geométrica y difusión digital de elementos arquitectónicos patrimoniales: Capiteles del Real Alcázar de Sevilla*. (Doctoral Thesis, Universidad de Sevilla, Spain).
- Moreno, A., Carmona, R., & Luna, D. (2003). Excavaciones arqueológicas en el castillo de Priego (Córdoba): informe de la Intervención Arqueológica Puntual de 2002-2003. *Antiquitas*, 15, 85–206.
- Riveiro, B., Armesto, J., Higinio, J., & Arias, P. (2011). *Manual práctico de modelado 3D mediante escáner láser terrestre*. Vigo: Universidad de Vigo.
- Valle Melón, J. M. (2006). Reflexiones sobre la documentación geométrica del patrimonio. *Papeles del Patal: Revista de Restauración Monumental* (3), 6.