



Fotogrametría aérea por drone en yacimientos con grandes estructuras. Propuesta metodológica y aplicación práctica en los castillos medievales del Campo de Montiel

Aerial Photogrammetry by drone in archaeological sites with large structures. Methodological approach and practical application in the medieval castles of Campo de Montiel

Juan Ángel Ruiz Sabina (Hermes Gestión Cultural. Ciudad Real, España)

David Gallego Valle (Conjunto Arqueológico Castillo de La Estrella, Montiel -Ciudad Real- España)

Cristina Peña Ruiz (Conjunto Arqueológico Castillo de La Estrella. Montiel -Ciudad Real- España)

Jesús Manuel Molero García (Universidad de Castilla-La Mancha. Ciudad Real. España)

Antonio Gómez Laguna (Global Arqueología. Toledo, España)

Resumen

El objeto principal de este artículo es exponer el valor combinado de dos técnicas ya maduras y accesibles tanto a grupos de investigación como a profesionales para el estudio de patrimonio arqueológico: la fotogrametría y la fotografía aérea por drone. En nuestro caso las hemos aplicado a yacimientos con grandes estructuras emergentes como son los castillos medievales del Campo de Montiel (Ciudad Real). A partir de nuestra experiencia, se ha desarrollado una metodología aplicable a trabajos de prospección arqueológica de superficie, excavación y lectura de paramentos, identificando tanto las limitaciones como las ventajas o virtudes del método. Los resultados obtenidos son altamente positivos, generando imágenes de alta calidad que ofrecen nuevas posibilidades para la investigación y la presentación de resultados, lográndose además un considerable ahorro de tiempo y dinero con respecto a los métodos de documentación gráfica tradicionales.

Palabras Clave: FOTOGRAMETRÍA AÉREA, DRONE, ARQUEOLOGÍA MEDIEVAL, CASTILLOS, CAMPO DE MONTIEL.

Abstract:

By writing this article we aim to illustrate the interesting combination of two existing techniques, accessible both for research groups and for professionals who want to study archaeological heritage: photogrammetry and aerial photography using a drone. We have applied these techniques to archaeological sites with standing structures, such as medieval castles in “Campo de Montiel” (Ciudad Real). Based on our expertise and experience, we have developed methodology for surface archaeological research, excavation and wall stratigraphy, thus identifying positive and negative aspects of this methodology. The results obtained are truly positive, as we generated high-quality images offering news opportunities to investigate and show results, saving a considerable amount of time and money compared to traditional methods for graphical documentation.

Key words: PHOTOGRAMMETRY, DRONE, MEDIEVAL ARCHAEOLOGY, CASTLE, CAMPO DE MONTIEL.

1. INTRODUCCIÓN

En la última década hemos asistido a una revolución en las técnicas de registro arqueológico y topográfico con la llegada de estaciones totales robotizadas, GPS diferenciales, escáneres láser y otros medios de registro y visualización de imágenes digitales. Además, se ha liberalizado el acceso a vuelos LIDAR y ortofotos, haciendo mucho más precisa y rápida la localización de cualquier objeto en el terreno. Por su parte, la evolución de la fotografía en la era digital ha tenido un crecimiento exponencial, aumentando la resolución y las posibilidades de tratamiento de las imágenes. En este contexto de cambio tecnológico, la fotogrametría aúna ambas ramas ofreciendo posibilidades increíbles para la documentación patrimonial, tanto en el registro arqueológico como en la puesta en valor del mismo.

La fotogrametría puede definirse como una técnica que une las matemáticas, la fotografía y la óptica para determinar las propiedades geométricas de los objetos, a través del solapamiento de imágenes basadas en principios trigonométricos. Esta disciplina, surgida en 1840, ha evolucionado con el tiempo adaptándose a las nuevas tecnologías y su uso se ha extendido a diferentes ramas del saber, entre las que destacan la geografía y la topografía.

Dependiendo de la distancia de enfoque podemos distinguir tres tipos de fotogrametrías: la satélite, la aérea y la terrestre. La primera se aplica principalmente en cartografía y las dos restantes se usan con frecuencia en arquitectura, ingeniería y por extensión, arqueología.

Según el medio empleado se puede hablar en primer lugar de *fotogrametría analógica*, basada en un restituidor de tipo óptico mecánico en donde la orientación interior y exterior para la obtención del modelo estereoscópico es totalmente manual. Existe también la *fotogrametría analítica*, en donde las mediciones y la toma de datos son también manuales, pero incorporan medios informáticos para el cálculo de la orientación del modelo. Y en tercer y

último lugar la *fotogrametría digital*, que tiene la ventaja de simplificar la maquinaria, aumentando las posibilidades de obtención de imágenes con formatos más versátiles que pueden ser tratados posteriormente con medios informáticos (Luis, 2013: 22-23).

En la actualidad hay diversos programas que se encargan del procesado de los datos de manera automática y sin necesidad de contar con máquinas específicas. Basta con una cámara de fotos digital y un ordenador personal con el software adecuado. Gracias a estos programas podemos aplicar el uso de la fotogrametría al patrimonio cultural, con aplicaciones gratuitas como es el caso de Visual SfM, 123D Catch, ARC3D, etc. o con software de pago, como PhotoModeler, PhotoScan o Mensi, entre otros. En nuestro caso hemos optado por un software libre, Visual SfM, con un programa gratuito para la obtención de las ortoimágenes: CPMVS. No obstante, en esta presentación compararemos brevemente los resultados obtenidos con respecto al software de pago.

La aplicación de estos softwares específicos han dado excelentes resultados tanto en arqueología espacial como en excavación (Reu *et alii*, 2013 y 2014; Clercq *et alii*, 2013; Dellepiane *et alii*, 2013; Doneus *et alii*, 2011; McCarthy, 2014). Las grandes virtudes de esta tecnología son la gran precisión de los datos obtenidos, el bajo coste y las posibilidades de gestión digital de los resultados, abarcando desde la integración a un GIS hasta la generación de archivos básicos para la reconstrucción completa del yacimiento (Bezzi, 2013).

Visual SfM *Structure-from-motion* (Pereira, 2012) es un software que se fundamenta en los mismos principios básicos que la fotogrametría estereoscópica aplicada a la correlación de series de imágenes, pero se diferencia de ésta en que la geometría de la escena, la posición y la orientación de la cámara no es necesaria conocerla de antemano, ya que es calculada automáticamente por un software informático. Gracias a complejos algoritmos aplicados a las secuencias de imágenes, el software de ajuste detecta puntos con características homólogas en

los solapes de las imágenes. A partir de ellos y por medio de triangulaciones, es capaz de generar una nube de puntos tridimensionales y sitúa espacialmente el lugar desde donde se han tomado las imágenes. Además, este software es capaz de corregir los errores por la lente de la cámara y por la refracción óptica del ambiente. Las últimas versiones del programa permiten la georreferenciación a partir de puntos conocidos, aunque también puede georreferenciarse posteriormente con otros programas específicos, como SfMgeoref (James y Robson, 2012).

Para la generación de las ortofotos hemos empleado el software de reconstrucción CPMVS, de uso gratuito para proyectos de investigación. El único problema de la obtención de imágenes con este software es que no se basa en un sistema basado en ventanas visuales, sino que hay que usar la línea de comandos para que el programa genere la ortofoto y el modelo digital del terreno, lo cual puede resultar farragoso.

En cuanto a los drones propiamente dichos, hay que tener en cuenta la rápida evolución tecnológica de los últimos años. De los modelos controlados por radiofrecuencia con motores de gasolina de difícil control, caros y sujetos a grandes vibraciones, hemos pasado en la actualidad a aparatos eléctricos dotados de estabilizadores, brújula digital, GPS, control remoto por ordenador y planificación de rutas. Dentro de la gama que podemos encontrar en el mercado existen modelos profesionales como el DJI S800 o los de tipo lúdico, como el A.R. Drone o el Dji Phantom. La potencia y autonomía de vuelo son importantes, pero más aún la capacidad de soportar peso, existiendo modelos dotados de estabilizadores mecánicos que permiten el transporte de cámaras réflex digitales.

En definitiva, si sumamos los beneficios de la moderna fotogrametría digital y los trasladamos a una plataforma aérea, los resultados de cara a la documentación de los conjuntos arqueológicos pueden llegar a ser espectaculares. Así lo han puesto de manifiesto recientes investigaciones en arqueología territorial (Poirier *et alii*, 2014), estructuras de poblamiento y

arqueología urbana (Sainz *et alii*, 2012), entre otros. Por nuestra parte, hemos aplicado dichos principios al estudio y documentación de los castillos medievales del Campo de Montiel (Ciudad Real), un territorio con una densidad de enclaves fortificados poco común, fruto de su secular situación fronteriza (Molero y Gallego, 2013; Gallego, 2014) (Fig. 1).

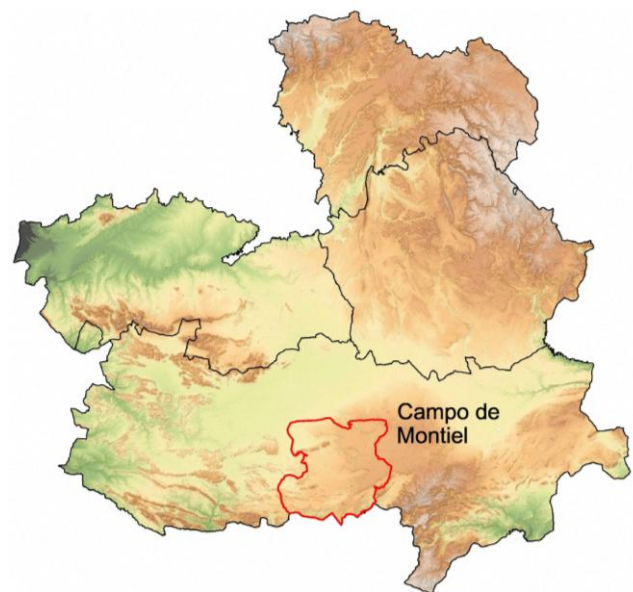


Figura 1. Localización del Campo de Montiel en Castilla-La Mancha

2. PROPUESTA METODOLÓGICA

El plan de trabajo lo podemos dividir en tres fases: planificación inicial; preparación y ejecución del vuelo; y procesamiento y análisis final de resultados.

PLANIFICACIÓN INICIAL

Como cualquier otro estudio de carácter patrimonial, es necesario recoger previamente toda la información disponible del yacimiento: documentación histórica, carta arqueológica, análisis cartográfico, bibliografía, toponimia, etc. Asimismo, debemos fijar de antemano los puntos de referencia para la triangulación del proyecto. En nuestro caso nos hemos basado en los vértices geodésicos situados en las inmediaciones del yacimiento, los puntos o referencias visuales del terreno con coordenadas conocidas y los mapas y croquis del lugar.



Figura 2: Planificación de vuelo del drone con el ordenador portátil

PREPARACIÓN Y EJECUCIÓN DEL VUELO

Antes de realizar el vuelo con el drone es necesario realizar una serie de preparativos para que el trabajo de campo sea eficaz. Para ello limpiaremos la zona a documentar para que no aparezca basura ni objetos extraños en la ortofoto. Los elementos imposibles de retirar podrán ser eliminados *a posteriori* con un programa de edición y retoque fotográfico. Seguidamente procederemos a marcar el terreno con dianas creadas por nosotros mismos, aunque en muchas ocasiones pueden ser sustituidas por dianas naturales, es decir, zonas claramente identificables en la fotografía aérea. El número de dianas es variable, según la precisión que queramos obtener (3-5 puntos suelen ser suficientes).

Otra tarea necesaria consiste en inspeccionar el yacimiento a documentar reflejando las peculiaridades del terreno (zonas tapadas por la vegetación, afloramientos pétreos, socavones

naturales, etc.) En el caso de los castillos medievales, al contar con estructuras emergentes de considerable potencia, se hace también necesario realizar una somera lectura de paramentos, documentado en un croquis las zonas más complejas de interpretar.

En nuestro estudio hemos realizado el vuelo con una cámara Canon PowerShot S110 de 12 mpx, con un rango focal f2-5.9, una velocidad máxima de obturación de 1/2000 y una distancia focal de 24 mm. Hemos instalado un programa adicional (CHDK) para actualizar el firmware de cara a la generación de fotografías a intervalos. Adicionalmente hemos realizado pruebas comparativas con una cámara GoPro Hero3+, con una apertura del diafragma de f2.8 fija y equipada con una óptica potente con un gran angular. Las imágenes fueron realizadas tanto en JPG como en RAW para exprimir más los datos fotográficos.

Previo a la programación del vuelo, se hace necesario realizar unas sencillas pruebas con la



Figura 3: Drone empleado en el estudio sobrevolando el castillo de Montiel

cámara fotográfica para configurarla de la mejor manera posible en función de las características y luminosidad del entorno. De esta forma evitaremos la trepidación y las imágenes poco nítidas que pueden invalidar el resultado final del proyecto.

Con la cámara montada en el quadcopter y con el módulo de conexión remota vía radiofrecuencia *Data link*, planificamos la ruta en el ordenador con el programa incluido en este módulo, el cual se basa en las imágenes de Google Earth (Fig 2).

La altura del vuelo depende de la envergadura y naturaleza de los restos que queremos documentar. En yacimientos con grandes estructuras, caso que nos ocupa, la altura idónea para tomar imágenes es de 30 a 35 metros, mientras que los restos de excavación deben documentarse a una altura menor, entre 10 y 15 metros. La distancia se mide con respecto al punto de estacionamiento del aparato, normalmente en la cota más alta del yacimiento. No debe utilizarse la altura que señala el programa ya que está basada en el Google Earth y suele tener errores.

A partir de nuestra experiencia, la velocidad óptima para realizar el vuelo es de 1.5 m/s. De esta forma evitaremos la trepidación. Por lo que respecta a la cámara, la configuramos para que realice las fotografías de manera continua a gran

velocidad, cada 2 o 3 segundos con la Canon y cada segundo con la GoPro 3+. Con ello conseguimos que las imágenes obtenidas se solapen al menos en un 60%. Al generar más información de la estrictamente necesaria, si alguna fotografía saliera defectuosa podría ser eliminada con total tranquilidad, sin afectar al conjunto del proyecto. En todo caso, después de cada vuelo es conveniente repasar las imágenes obtenidas para comprobar que se han realizado correctamente.

Hemos utilizado un drone de bajo coste para realizar nuestros vuelos: el Phantom 2 (Fig. 3). Se trata de un aparato de sencillo manejo, versátil y robusto, con muy buenas prestaciones en relación calidad/precio. La cámara Canon la hemos podido acoplar sin necesidad de suspensión mecánica, mientras que para la cámara GoPro 3+ hemos necesitado un gimbal.

PROCESAMIENTO DE DATOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Después del trabajo de campo, seleccionamos las imágenes obtenidas para conseguir una superposición del 60%, descartando las fotos no válidas (movidas, saturadas, oscuras, fuera de rango, etc.). Las fotografías seleccionadas deben ser procesadas con una computadora potente. En nuestro caso hemos usado una estación de trabajo con un procesador I7 (3820) con 32GB de RAM y con dos tarjetas gráficas GeForce

GTX 660 con el SLI habilitado. Con frecuencia el ordenador necesita varias horas o incluso días para procesar las imágenes, de forma que no puede interrumpirse la corriente eléctrica y conviene añadir refrigeración adicional para evitar el sobrecalentamiento del aparato.

El software elegido para procesar las imágenes es el Visual SfM que se encarga de emparejarlas y generar la nube de puntos. La georreferenciación se puede hacer con ese mismo programa o con SfMgeoref. A partir de los datos obtenidos se generan las imágenes necesarias con el programa de CMPMVS en la línea de comandos de Windows.

Por último, obtenemos la imagen de la ortofoto con un programa de edición fotográfica para recortarla al tamaño requerido y solucionar posibles errores en la fusión de las imágenes. La imagen final es proporcional al objeto fotografiado, con lo que sólo nos queda escalarla y acoplarla en un programa de dibujo en formato cad. En nuestro caso hemos elegido software libre, DraftSight o un programa de diseño similar (Inkscape).

3. APLICACIÓN PRÁCTICA: CASTILLOS DE ALHAMBRA, ROCHAFRIDA, EZNAVEXOR Y MONTIEL

ALHAMBRA

El castillo de Alhambra se localiza sobre un cerro testigo inmediato a la localidad del mismo nombre, en el sureste de la provincia de Ciudad Real. Aunque debió existir una fortaleza de origen islámico en el actual solar de la población, el castillo que hoy contemplamos es de filiación cristiana. Sabemos que Alhambra fue reconquistada por Alfonso VIII en 1213, pasando un año después a la Orden Militar de Santiago quien constituyó en el lugar una encomienda (1241) cabeza de un amplio distrito (Ayala, 1996: 82; Matellanes, 1999: 127). Por estas fechas debió erigirse la fortaleza, un castillo de reducidas dimensiones y planta poligonal de unos 700 m² de superficie. Carece de torres, pero las cortinas presentan un relativo buen estado de conservación. A media ladera se

documenta un primer recinto defensivo, a modo de antemural, muy perdido. También se aprecian restos del primitivo camino de acceso a la fortaleza. Hasta la fecha no se ha realizado ningún sondeo o excavación en el castillo, aunque existen estudios basados en la lectura de los restos en superficie (Ruibal, 1985; Molero y Gallego, 2013).

El estudio fotogramétrico del castillo de Alhambra, como los otros dos que aquí presentamos, se enmarca en un proyecto de investigación más amplio desarrollado en el marco institucional de la UCLM. A partir de su desarrollo pretendemos caracterizar las fortificaciones medievales del Campo de Montiel utilizando el método arqueológico (prospección, excavación, lectura de paramentos, etc.) y el trabajo de archivo, estudiando la documentación conservada que alude a la fortaleza en cuestión.

Después del vaciado de la bibliografía y tras reunir la información cartográfica y documental, procedimos a planificar y realizar el vuelo. El objetivo del mismo fue la realización de una ortofoto de buena calidad para dibujar la planta del castillo, ya que hasta el momento sólo contábamos con un croquis aproximado del mismo. Para ello se realizó un vuelo a una altura de 30 metros, planificando un barrido con 16 waypoints, delimitando una superficie de 7200 m². El vuelo duró 17' a una velocidad de 1 m/s. La cámara utilizada fue la Canon Powershot S110, configurada para realizar un disparo cada 3 segundos con parámetros automáticos y una ISO de 100. En total se tomaron 171 imágenes.

Los resultados fueron aceptables para los propósitos planteados. El vuelo se realizó a primera hora del día, por lo que algunas imágenes salieron con trepidación, sobre todo en zonas de poca iluminación. Posteriormente, en el laboratorio, se eliminaron las imágenes que estaban oscuras, desenfocadas o con ángulos no correctos y se procesaron primero con Visual SfM y luego con el programa de reconstrucción CMPMVS. De estos procesos obtuvimos una imagen ortográfica en una resolución de 4096. Esta resolución puede ser modificada editando el archivo correspondiente, con unas condiciones óptimas para el dibujo sobre una

plataforma de cad que en nuestro caso fue DraftSight (Fig. 4).

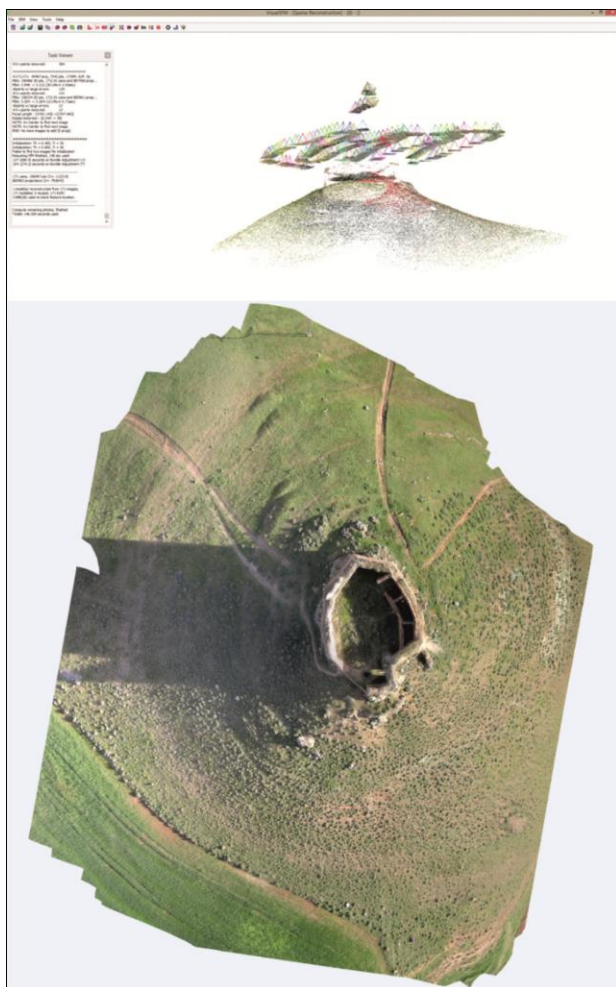


Figura 4: Castillo de Albambra (Ciudad Real). Modelo obtenido por Visual SfM y ortofoto generada por CPMVS

ROCHAFRIDA

La fortaleza de Rochafrida se localiza sobre un altozano en pleno paraje de las Lagunas de Ruidera, término municipal de Ossa de Montiel (Albacete). Se encuentra en los confines orientales del Campo de Montiel, en el límite con el señorío de Alcaraz, defendiendo la entrada a Las Lagunas por este sector. Es muy posible que lo que hoy conocemos como castillo de Rochafrida sea el llamado castillo de San Felices que se cita en los primeros documentos de la reconquista (s. XIII) (Madrid, 1988). La funcionalidad de la fortaleza está relacionada con la explotación económica de la zona adyacente y el control de un territorio disputado

durante largo tiempo entre los señoríos colindantes (Pretel, 2000).

Desde el punto de vista material, nos encontramos ante una fortaleza muy similar a la anterior: tiene planta poligonal, adaptándose a la orografía del terreno y su aparejo es típicamente cristiano. Sólo presenta una pequeña torre semicircular de flanqueo en el lado sur y otra mucho más potente en el extremo norte, de planta poligonal, que hace las veces de torre del homenaje. Los estudios arqueológicos de este castillo se limitan a trabajos de prospección (Simón, 2011: 217-221) y un sondeo que está sin publicar.

La planificación del vuelo sobre este castillo se hizo sobre una superficie de 4800 m² a una altura de 25 metros y una velocidad de 1 m/s. El drone tardó 15 minutos en realizar el vuelo con 8 barridos en 16 waypons. Al igual que en el caso de Alhambra se usó la cámara Canon con valores automáticos. Se obtuvieron 137 imágenes, la mayoría de buena calidad. Prácticamente no hubo trepidación, exceptuando las fotos que se realizaron cuando el drone realizaba movimientos bruscos, como el cambio de dirección. Las imágenes se procesaron con Visual SfM y el programa de reconstrucción CPMVS, para dibujar la planta del castillo posteriormente con DraftSight.

EZNAVEXOR

El castillo de Eznavexor se encuentra al sur del Campo de Montiel, entre los términos municipales de Villamanrique y Torre de Juan Abad, ambos de la provincia de Ciudad Real. Los restos de esta construcción se sitúan sobre una cresta rocosa, antesala de Sierra Morena, desde la que se domina el valle del Guadalén. Se trata de una fortificación de indudable origen islámico (Hisn Aben Xor), como demuestran la variedad y calidad de materiales arqueológicos de época califal y norteafricana que se documentan por toda la superficie (Molero y Gallego, 2013: 128). La primera presencia cristiana en el lugar data de 1213, pasando poco después a manos de la Orden de Santiago. No obstante, la construcción del cercano castillo de Montizón (c. 1242) supuso el declive de nuestra

fortaleza (Rivera, 1985: 348). Desde el punto de vista material el castillo tiene planta rectangular, ocupando una superficie de unos 3000 m², predomina la obra en tapial y conserva varias torres de flanqueo en avanzado estado de ruina. Hay estudios previos basados en prospección, pero hasta la fecha no se han aplicado técnicas y metodologías modernas al mismo.

A diferencia de los dos casos anteriores, el estudio planteado en Eznavexor fue más completo, ya que se realizó también una prospección intensiva y un minucioso estudio de paramentos identificando las obras andalusíes y las posteriores reformas cristianas. Por último se han hecho análisis de morteros y estudios cerámicos en el laboratorio.

En cuanto a los trabajos fotogramétricos, partíamos del croquis elaborado en su día por Amador Ruibal (1984) que debía ser contrastado con la metodología actual. Se planificaron dos vuelos con las dos cámaras, configurándose ambos con las mismas características: una altura de 35 metros barriendo una superficie de 9900 m², velocidad de 2 m/s con un tiempo de vuelo de 13 minutos. Se hicieron 8 barridos en 16 waypons. La velocidad de obturación de las imágenes fue de 1/640. El primero de los vuelos se realizó con la cámara canon, seleccionándose 132 imágenes de gran calidad, salvo alguna pequeña perturbación en las zonas de giro. En el segundo de los vuelos se utilizó la cámara GoPro 3+. En este caso los resultados fueron aún más positivos ya que ninguna imagen tenía error de trepidación gracias a la suspensión mecánica incorporada. Finalmente se seleccionaron 132 imágenes de las 506 conseguidas.

Con los datos obtenidos se realizó una ortofoto del castillo y un modelo digital del terreno. Para el procesamiento de las imágenes usamos Visual SfM, como en los casos anteriores, pero georreferenciamos la nube de puntos con un comando *Ground Control Points* sobre las mismas imágenes del procesado. El modelo fue ejecutado con CMPMVS para obtener tanto la ortofoto georreferenciada como el DEM. Como en los casos anteriores usamos la ortofoto para poder realizar la planta del castillo, pero también

como plano guía para la organización de la prospección intensiva. Finalmente el DEM fue importado con un GIS, en nuestro caso Qgis, para la obtención de las curvas de nivel del yacimiento. (Fig. 5)

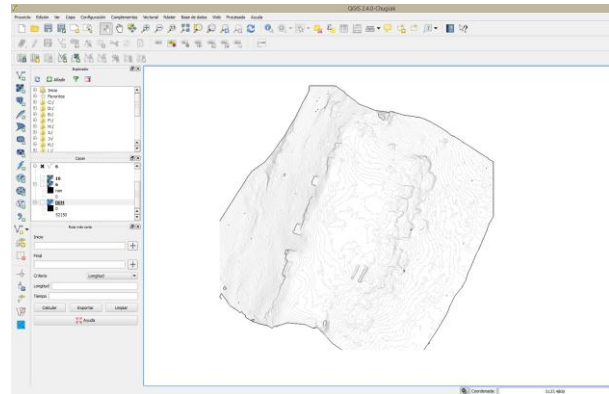


Figura 5: Castillo de Eznavexore. Obtención de las curvas de nivel en Qgis a partir del DEM obtenido por CMPMVS.

MONTIEL

El castillo de Montiel o de La Estrella se localiza sobre un cerro testigo de 940 m. de altitud desde el que se domina la vecina localidad de Montiel y los valles del Jabalón y Segurilla. Se trata de una fortaleza muy compleja que cuenta con restos del hisn islámico primitivo, sobre el que la Orden de Santiago construiría un nuevo castillo a partir del año 1227, fecha de su reconquista definitiva (Molero y Gallego, 2013: 130). Poco después se crea la encomienda de Montiel y la villa es dotada de fuero y ferias anuales, convirtiéndose en cabeza de una amplísima comarca (Madrid, 2004).

Desde el año 2012 venimos desarrollando excavaciones arqueológicas sistemáticas en este lugar, documentándose tanto niveles de la Edad del Bronce como islámicos y cristianos, destacando la época bajomedieval (ss. XIV-XV). En estas campañas hemos sacado a la luz nuevas estructuras del triple recinto defensivo del castillo (Gallego y Lillo, 2012), así como los restos de una monumental iglesia cristiana (ss. XIII-XV) dedicada a la Virgen de La Estrella y una extensa necrópolis aneja. También se han exhumado estructuras de habitación y parte del primitivo camino de acceso a la fortaleza en la ladera sur del cerro.

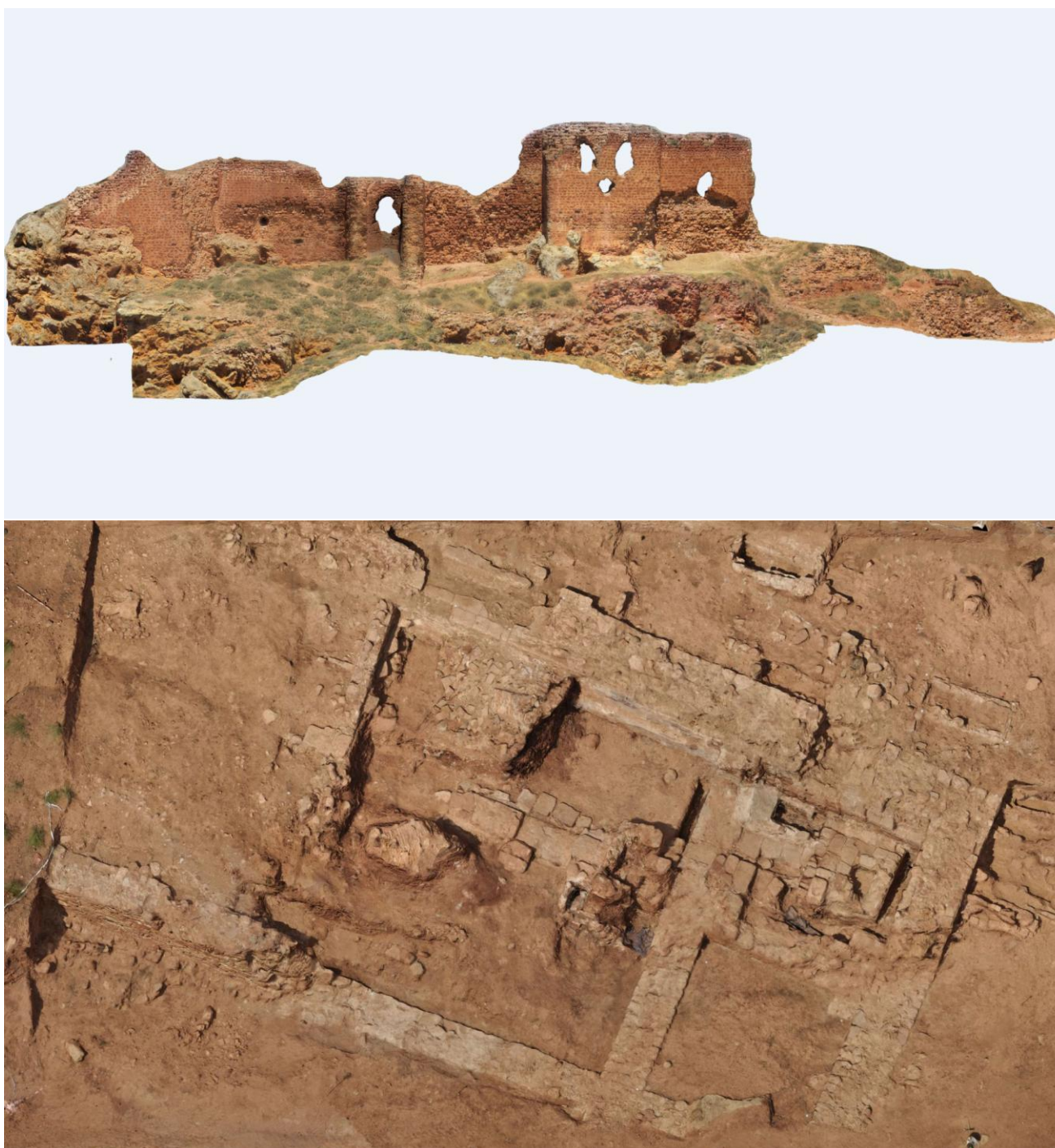


Figura 6: Alzado del lienzo sur del Castillo de Montiel generado por fotogrametría y planta de la excavación de la iglesia de la Virgen de La Estrella en la ladera sur del conjunto arqueológico

Desde el punto de vista de la documentación gráfica, contábamos con los dibujos de Amador Ruibal (1984) y la planta que nosotros mismos habíamos realizado con medios topográficos terrestres (Gallego y Lillo, 2012). Al tratarse del centro de nuestras investigaciones arqueológicas,

los trabajos con el dron en el castillo de La Estrella han sido mucho más completos y continuados que en los casos anteriores. Hemos realizado la planta del castillo, el levantamiento de los alzados de la zona sur de la fortaleza y la planimetría de los distintos sectores arqueológicos excavados.

La documentación de la planta del castillo fue realizada por drone cubriendo una superficie de 11000 m², realizando 8 barridos con 16 waypoints, en los que se tomaron 277 fotografías con la cámara canon. Se seleccionaron sólo 146 imágenes para procesarlas, debido a que el día del trabajo de campo teníamos vientos con una velocidad de 15 a 20 km/h y varias de las imágenes salieron con trepidación. Al igual que en los casos anteriores usamos el programa Visual SfM, georrefrenciándolo para luego procesarlo con el CMPMVS. Los resultados de las imágenes tomadas fueron óptimos para el objetivo planteado que era el dibujo de la planta del castillo y la generación del modelo digital del terreno.

El segundo de los vuelos se programó para el levantamiento del alzado sur del castillo. Se hizo de forma manual debido a la complejidad de la toma de imágenes con el helicóptero por el fuerte viento y la cercanía de los muros. Se programó la cámara canon para que realizara fotografías continuas barriendo todas las torres y lienzos. En total se tomaron 338 fotografías de las que se seleccionaron 80. El proceso de adquisición imágenes para la generación de las ortofotos fue realizado con los dos softwares, SfM y PhotoScan de AgiSoft con el fin de comparar resultados. En el primer caso, al tratarse de software libre, la tarea fue más laboriosa. La nube de puntos obtenida con SfM fue tratada con MeshLab para generar tanto la geometría como su textura. Posteriormente se exportó a Blender en donde pudimos obtener una imagen ortogonal del paramento a la resolución que más nos interesara. Seguidamente realizamos la obtención de la ortofoto con el software de pago en donde el proceso fue más rápido y directo, solo usando un programa, y con resultados igual de positivos. (Fig. 6)

El tercero de los trabajos ejecutados con el drone fue la documentación del final de la fase de excavaciones realizadas en la campaña de 2014. Para ello usamos el helicóptero de manera manual debido a la dificultad de programar un vuelo para zonas de poca superficie. Utilizamos la cámara GoPro 3+ debido a las rachas de

viento que nos obligaron a utilizar el estabilizador. Se tomaron 658 fotografías en varias pasadas a distintas alturas, dentro de los rangos habituales. La información fue procesada con Visual SfM y CMPMVS, con la que obtuvimos la ortofoto para dibujar la planta vectorizada con DraftSight e Inkscape.

4. RESULTADOS OBTENIDOS Y CONCLUSIONES

A partir de nuestra experiencia podemos concluir que la utilización del drone en los trabajos fotogramétricos en arqueológica ofrece resultados óptimos en un tiempo record, por lo que es altamente recomendable. En primer lugar hay que tener en cuenta la precisión de los resultados, centimétrica en vuelos generales para general plantas o MDT, y milimétrica en alzados y planimetrías de excavación.

Comparado este sistema con los tradicionales dibujos de campo en prospección, ofrece un abanico de posibilidades infinitamente superior, en menos tiempo y con mayor calidad y precisión. Por otro lado si queremos realizar este trabajo con medios topográficos como una estación total o un gps diferencial, la generación de las bases necesarias, así como la toma de datos y su posterior procesamiento es mucho más laborioso, tanto en el trabajo de campo como en el de gabinete. En la propuesta que aquí presentamos el tiempo empleado en la preparación y desarrollo del vuelo no suele abarcar más de 1 hora. Si queremos referenciarlo con precisión, habría que añadir una hora más para la creación de la topografía básica. En todo caso, hemos de tener en cuenta que la toma de target o puntos de referencia en las estructuras es menos laborioso que si quisiéramos realizar una topografía total de la planta con medios terrestres.

Por otro lado queremos destacar que el método desarrollado ofrece grandes posibilidades para el registro y la investigación arqueológica. Con los datos obtenidos podemos dibujar tanto las estructuras como las unidades estratigráficas en el proceso de excavación. Además, como hemos podido comprobar en el caso del castillo de La

Estrella, su aplicación para realizar alzados ofrece nuevas posibilidades para los trabajos de arqueología de la arquitectura, al tomar imágenes con gran detalle en zonas difícilmente accesibles. Debido a las características del castillo de la Estrella, con una fuerte pendiente en la ladera sur, un dibujo o toma fotográfica a pie de los muros resultaba muy compleja de realizar y los resultados obtenidos claramente insuficientes. Gracias a estas técnicas no solo se puede obtener una documentación fotográfica excelente de estos paramentos, sino que con la ortofoto podemos generar una documentación correcta para cualquier trabajo científico.

Como hemos visto en el ejemplo de Eznavexor, el análisis del entorno con el MDT generado a partir del drone nos permite definir con mayor precisión las zonas de prospección intensiva, sirve para delimitar las zonas de acumulación de derrumbes, muy útil en el caso de los tapiales, y permite vislumbrar acumulaciones artificiales que pueden encerrar estructuras soterradas. De esta forma se pueden planificar con mayor precisión futuras campañas de excavación. Además podemos generar imágenes del yacimiento con mapas de alturas e integrarlas con las curvas de nivel, lo cual nos aporta una información adicional para la lectura del registro arqueológico. Finalmente la visualización del modelo del castillo en 3D aporta una visión de conjunto que aporta un extra para las

presentaciones de resultados.

Por otro lado la documentación realizada a baja altura de los restos excavados en el castillo de La Estrella han resultado altamente satisfactorios. Con ello se han podido obtener varias plantas precisas para acometer el registro de las distintas fases de la excavación arqueológica. Conviene insistir en la economía de medios y en el ahorro de tiempo. Sólo con el vuelo generado en parte de una mañana obtuvimos la documentación necesaria para generar un dibujo arqueológico digital de alta calidad. Con las técnicas de dibujo de campo tradicional hubiéramos tardado varios días en realizar el trabajo y seguramente la precisión sería menor.

La utilización del drone en arqueología no sólo es útil para generar imágenes de calidad para el dibujo y la documentación gráfica de los trabajos, sino que añade la posibilidad de poder completarla con la realización de fotografías oblicuas, totalmente imposibles con las tecnologías tradicionales, las cuales añaden una información adicional de gran valor (Fig 7).

Estas imágenes ofrecen informaciones suplementarias sobre la naturaleza y estado de conservación de las cabeceras de los muros, de muy difícil acceso en circunstancias normales. Por último esta documentación nos permite hacer fotografías desde el objeto patrimonial al entorno próximo para hacer un estudio visual



Figura 7: Fotografía oblicua y cenital de la zona de excavación en el Sector I del Castillo de la Estrella (Montiel)

del paisaje con el que está relacionado el yacimiento.

En cuanto al software, aparataje y parámetros utilizados varias son las consideraciones a realizar. Como es sabido, en la fotografía arqueológica tradicional el tiempo del alba o del ocaso, libre de sombras, es el momento óptimo para tomar las imágenes. En nuestro caso ocurre justamente lo contrario. El mejor momento para realizar la fotografías aéreas es al medio día, en el cénit solar, pues hay mucha más luz y menos zonas ocultas bajo las sombras. Se trata de un aspecto no baladí ya que el uso del dron supone la realización de fotografías a alta velocidad de obturación para evitar la trepidación, la cual se obtiene con una alta iluminación.

En estas condiciones la configuración de la cámara es esencial. En el caso de la canon buscamos que la imagen saliera lo más nítida posible, con el menor ruido y con la mayor profundidad de campo. Para ello ajustamos una ISO baja (100) y con el balance de blancos correcto a la escena a tomar. Gracias a que la cámara Canon es manual, optamos por una velocidad rápida de obturación. En nuestro caso recomendamos fijarla en torno a 1/530 a 1/650,

y con una apertura de diafragma lo más pequeña posible, entorno a un f8 o f11, ya que debemos ampliar lo máximo posible la profundidad de campo (Cueli López, 2011).

Por otro lado, nuestra experiencia con la cámara GoPro 3+ no ha sido del todo satisfactoria. Evidentemente posee indudables cualidades: disparador automático seleccionable al intervalo de tiempo que queramos, una capacidad de disparo a altas velocidades para la obtención de imágenes con poca luz y sobre todo el estabilizador de la cámara, muy útil con condiciones meteorológicas adversas. No obstante, la distorsión de la lente empleada de ojo de pez hace que los modelos creados puedan contener errores geométricos graves. Hay que usarla por tanto con suma precaución, siendo útil cuando los vuelos son a gran altura (+ 40 metros) y sobre espacios con una tendencia plana.

En nuestro estudio hemos comparado la nube de puntos obtenida con la cámara Canon y con la GoPro 3+. Con el mismo número de fotografías tomadas, la calidad del modelo generado por la Canon duplica en número de puntos a la GoPro 3+ (14597836 en la Canon y 6994058 en la GoPro 3+). Bien es cierto que

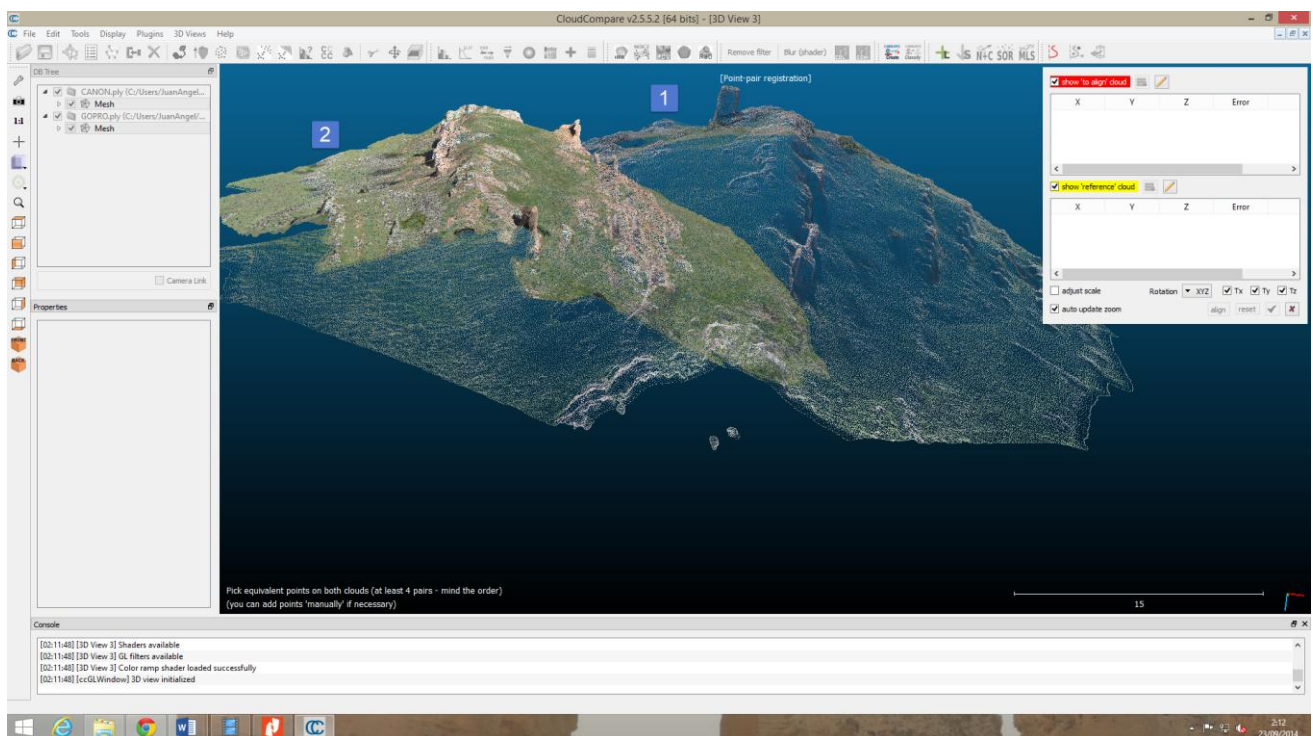


Figura 8: Comparación de la nube de puntos entre un modelo generado de una cámara GoPro3+ (1) y de una cámara compacta (2)

con ésta última abarcamos más cantidad de terreno. Además, comparando las mallas y las nubes de puntos con el programa CC Compare, podemos apreciar que la densidad del modelo es mucho menor y de peor calidad de definición de la estructura en la nube de puntos. No obstante, no hay casi errores de conjunto en la malla (Fig. 8).

Los resultados obtenidos por los softwares de fotogrametría tanto de pago como gratuitos son muy buenos en ambos casos. Hemos de destacar que el cerramiento en la malla obtenida y la resolución de varios parámetros en la composición de las imágenes, sobre todo en las zonas más complejas, el software de pago se ha comportado mejor, pero realizando un vuelo correcto con las imágenes necesarias prácticamente son iguales. Si es cierto que los programas gratuitos son más complejos de ejecutar, sobre todo en el proceso de la obtención de las ortofotos de los lienzos, y por tanto dan algo más de trabajo.

En definitiva, las principales ventajas de utilizar el dron y la fotogrametría en proyectos de investigación arqueológica es la calidad de la información obtenida en comparación con su bajo coste. La documentación es rápida y sencilla, sólo limitada por los elementos naturales del entorno, los tendidos de alta tensión, las edificaciones o las zonas protegidas de vuelos aéreos.

Uno de los aspectos que queremos resaltar de esta intervención es la posibilidad de uso de esta tecnología en todo tipo de trabajos arqueológicos: excavación, prospección arqueológica de superficie y lectura de paramentos, tanto en tareas de gestión (arqueología preventiva) como en investigación.

Aunque en nuestro caso lo hemos aplicado a yacimientos con grandes estructuras emergentes, caso de los castillos, es indudable que esta tecnología se puede aplicar a cualquier tipo de yacimientos, bien es cierto que habrá que acomodar los parámetros a las condiciones del entorno y a la naturaleza de los restos a documentar.

En el caso de las fortificaciones medievales, con lienzos de gran altura y estados de conservación deficientes, el uso de la fotogrametría combinada con el vuelo por dron resulta a todas luces fundamental para su correcto análisis. En efecto, el método usado en el registro arqueológico de los castillos medievales del Campo de Montiel nos está ofreciendo excelentes resultados y entendemos que la metodología desarrollada puede ser extrapolable a otros proyectos de similares características. En todo caso somos conscientes de que con otro instrumental y con diferente software se pueden conseguir resultados similares. La intención de este trabajo no es otra que dar a conocer nuestra propia experiencia, donde hemos intentado poner de manifiesto las ventajas e inconvenientes del método. Con ello conseguiremos facilitar el trabajo a los arqueólogos que decidan iniciarse en estas técnicas o contrastar los resultados obtenidos con los de otros colegas experimentados.

Finalmente nos gustaría hacer una última reflexión en el sentido de que esta tecnología, como tantas otras, no sustituye en absoluto al arqueólogo de campo que debe seguir interpretado *in situ* los hallazgos. Solamente facilita su trabajo y ofrece resultados mucho más precisos y rápidos y lo que es más importante, con un considerable ahorro económico.

BIBLIOGRAFÍA

AYALA MARTÍNEZ, C. de (1996): "Las Órdenes Militares y la ocupación del territorio manchego (siglos XII-XIII)", en *Alarcos 1195. Actas del congreso internacional conmemorativo del VIII centenario de la batalla de Alarcos*. Cuenca, pp. 49-104.

BEZZI, A. (2013): "Caldonazzo castle - from ruins to archaeological 3D reconstruction", en *ATOR (Arc-Team Open Research)*, 9 de diciembre de 2013 [on line] <http://arc-team-open-research.blogspot.com.es/2013/12/caldonazzo-castle-from-ruins-to.html> [Consulta: 12-09-2014].

- CLERCQ W. de; REU, J. de; SERGANT, J.; DECIBYNCK, J.; LALOO P. (2013): "Orthophoto mapping and digital Surface modeling for archaeological excavations", en *Digital Heritage International Congress* Vol. 1 pp. 205-208 [on line] <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?reload=true&arnumber=6743734> Consulta [13-9-2014].
- CUELI LÓPEZ, J. T. (2011): *Fotogrametría práctica, tutorial Photomodeler*. Ediciones Tantín. Torrelavega (Cantabria).
- DELLEPIANE, M.; DELL'UNTO N.; GALLIERI, M.; LINDGREN S.; SCOPIGNO, R. (2013): "Arqueological excavation monitoring using dense stereo matchin techniques", en *Journal of Cultural Heritage*, Vol. 14, Issue 3, pp. 201-213 [on line] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1296207412000258>. Consultado [13-9-2014].
- DONEUS, M.; VERHOEVEN G.; FERA M.; BRIESE CH.; KUCERA M.; NEUBAUERT W. (2011): "From deposit to point cloud – a study of low-cost computer vision approaches for the straightforward documentation of archaeological excavations" in *Geoinformatics CTU FCE*, 6. [on line] <http://pub-geo.tuwien.ac.at/showentry.php?ID=206899&lang=6&nohtml=1>. Consultado [12-9-2014].
- GALLEGO VALLE, D. y LILLO FERNÁNDEZ, E. (2012): "Estudio arqueológico del castillo de La Estrella (Montiel) a través de sus técnicas constructivas", en *Castillos de España*, nº 167-170, pp. 155-160.
- GALLEGO VALLE, D. (2014): "Un espacio fortificado: el Campo de Montiel en tiempo de Las Navas", en *La Península Ibérica en tiempos de Las Navas de Tolosa*, Monografías de la Sociedad Española de Estudios Medievales, 5. Madrid, pp. 155-168.
- JAMES, M. R. y ROBSON, S. (2012): "Straightforward reconstruction of 3D surfaces and topography with a camera: Accuracy and geoscience application", en *Journal of Geophysical Research. Earth Surface*, nº 117 [on line] <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2011JF002289/full>. Consulta [12-9-2014].
- LUIS RIVAS I. (2013): *Toma de datos fotogramétricos, reconstrucción virtual, realidad aumentada y difusión en la red de la iglesia de Nuestra Señora de la Asunción, Mombuey (Zamora)*. Trabajo Fin del Máster en geotecnologías cartográficas en ingeniería y arquitectura. Universidad de Salamanca-Universidad de Valladolid, [on line] <http://hdl.handle.net/10366/122177> [Consulta: 10-09-2014].
- MADRID Y MEDINA, A. (1989): "El Castillo de Rochafrida entre la literatura y la historia", en *Espacio, Tiempo y Forma. Serie III. Historia Medieval* nº 1, pp. 351-368.
- MADRID Y MEDINA, A. (2004): "Un señorío de la Orden de Santiago en la Edad Media: el Campo de Montiel", en *Cuadernos de Estudios Manchegos*, nº 28, pp. 145-176.
- MATELLANES MERCHÁN, J. V. (1999): *La Orden de Santiago y la organización social de la Transierra castellano-leonesa (ss. XII-XIV)*. Cuadernos de Historia Medieval, Monografías, 1 [on line] http://www.uam.es/departamentos/filoyletras/hmedieval/Cuader_ini.htm [Consulta: 20-11-2005].
- McCARTHY, J. (2014): "Multi-image photogrammetry as a practical tool for cultural heritage survey and community engagement", en *Journal of Archaeological Science*, nº 43, pp. 175-185.
- MOLERO GARCÍA, J. M. y GALLEGO VALLE, D. (2013): "El primer encastillamiento cristiano en el Campo de Montiel (1213 c.-1250)", en *Alcaraz del Islam al concejo cristiano*. Alcaraz, pp. 111-142.
- PEREIRA-UZAL, J. M. y ROBLEDANO ARILLO, J. (2013): "Uso de tecnologías 3D en la digitalización y difusión de documentos de alto valor patrimonial", en *El personal de la información (ejemplar dedicado a bibliotecas y documentación de museos)*, Vol. 22, nº 3, pp. 215-223.

- PEREIRA, J. (2012): “Introducción a la fotogrametría con VisualSFM”, en *Digital Heritage*, 8 de Octubre de 2012 [on line] <http://www.jpereira.net/software-revisiones-y-consejos/introduccion-a-la-fotogrametria-parte-1> [Consulta: 11-09-2014].
- POIRIER, N.; HAUTEFEUILLE, F.; CALASTRENC, C. (2014): “Utilisation des micro-drônes pour la prospection archéologique à basse altitude”, en *Colloque scientifique francophone. Drones et moyens légers aéroportés d'observation*. Montpellier, 24-26 Juin 2014 [on line]. <http://drone.teledetection.fr/restitue.php> [Consulta: 21-09-2014].
- PRETEL MARÍN, A. (2000): “Conflictos de interés en el repartimiento y la repoblación de una villa realenga (Alcaraz) durante el siglo XIII”, en *Historia, Instituciones, Documentos*, nº 27, pp. 235-274.
- REU J. de; PLETS, G.; VERHOEVEN G.; DE SMEDT P.; BATS M.; CHERRETTÉ B.; DE MAEYER W.; DECONNYNCK J.; HERREMANS D.; LALOO P.; VAN MEIRVERNNE M. (2013): “Towards a three-dimensional cost-effective registration of archaeological heritage”, en *Journal of Archaeological Science*, Vol. 40, pp. 1108-1121 [on line] <http://www.journals.elsevier.com/journal-of-archaeological-science/> Consulta [12-9-2014].
- REU J. de; SMEDT P. de; HERREMANS D.; LALOO, P.; CLERCQ W. de (2014): “On introducing an image-based 3D reconstruction method in archaeological excavation practice”, en *Journal of Archaeological Science*. Vol. 41. Enero 2014, pp. 251-262 [on line] <http://www.journals.elsevier.com/journal-of-archaeological-science/> [Consulta: 12-9-2014].
- RIVERA GARRETAS, M. (1985): *La Encomienda, el Priorato y la villa de Uclés en la Edad Media. Formación de un señorío de la Orden de Santiago (1174-1310)*. Madrid-Barcelona.
- RUIBAL RODRÍGUEZ, A. (1984): “Eznaxore o ¿Torres de Xoray?: vestigios islámicos en el primer enclave santiaguista de Ciudad Real”, en *Separata de la Revista Al-Qantara*, Vol. V, fasc. 1 y 2, pp. 429-450.
- RUIBAL RODRÍGUEZ, A. (1984): “El enclave de Montiel: vestigios de los antiguos castillos de La Estrella y San Polo y del lugar de Torres”, en *Anuario de Estudios Medievales*, nº 14, pp. 153-186.
- RUIBAL RODRÍGUEZ, A. (1985): “El Castillo de Alhambra” en *Cuadernos de Estudios Manchegos*, nº 16, pp. 153-160.
- SÁINZ, A.; SÁINZ, J.; JOVÉ, F.; MARTÍNEZ, J.; GARCÍA, L.; DEL RÍO, M. (2013): “Las villas medievales castellanas. Análisis de los núcleos de Peñaflor y Tordehumos, Valladolid”, en *Construcción con tierra. Pasado, presente y futuro. Congreso de Arquitectura de tierra en Cuenca de Campos 2012*. Universidad de Valladolid, pp. 61-72 [on line] <http://www5.uva.es/grupotierra/publicaciones/digital/libro2013/05tr-sainz.pdf>. Consultado [12-9-2014].
- SIMON GARCÍA, J. L. (2011): *Castillos y torres de Albacete*. Instituto de Estudios Albacetenses. Albacete.