



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Facultad de Humanidades y Ciencias de la Educación

Trabajo Fin de Grado

Levantamiento fotogramétrico de Torre Benzalá a partir de RPAS/Dron

Alumno/a: Lerma-Cobo, Fernando
Tutor/a: D. Antonio Romero Manchado.
Dña. María Isabel Ramos Galán.
Dpto.: Ingeniería Cartográfica,
Geodésica y Fotogrametría

Enero, 2021

Índice

Tabla de Ilustraciones.....	2
Resumen	4
Abstract	4
Capítulo I. Introducción	5
1.1. Justificación y Objetivos	5
1.2. Metodología y estructura	6
Capítulo II. Nuevas Tecnologías y Arqueología.....	8
2.1. Aplicación de la tecnología a la conservación del patrimonio cultural	8
2.2. Fotogrametría como disciplina para la documentación y difusión del patrimonio arqueológico	9
2.3. Vehículos aéreos no tripulados (RPAS/dron) como herramienta arqueológica	11
Capítulo III. Contextos de Torre Benzalá	13
3.1. Contexto geoarqueológico de Torre Benzalá	13
3.2. Contexto histórico – arqueológico de Torre Benzalá	14
3.2.1. Introducción	14
3.2.2. Antecedentes históricos. Periodo Íbero-Romano.....	14
3.2.3. Época Islámica. Contexto entre los siglos VIII y X.....	17
3.2.3. Época Islámica. Contexto entre los siglos XI y XIII	17
3.2.4. La conquista cristiana durante 1212 - 1246	18
Capítulo IV. Proyecto fotogramétrico de Torre Benzalá	22
4.1. Introducción.....	22
4.2. Elaboración proyecto fotogrametrico de Torre Benzalá.....	22
4.2.1. Planificación previa en campo y gabinete	22
4.2.2. Toma de información en salida de campo	24
4.2.3. Trabajo en gabinete.....	26
Capítulo V. Conclusiones.....	36
Bibliografía.....	37
Anexos.....	41
Anexo I. Ilustraciones.....	41
Anexo II. Estudio Fotogramétrico SfM previo.....	49
Anexo III. Georreferenciación.....	55
Anexo IV. Resultados.....	58

Tabla de Ilustraciones

Ilustración 1 Interfaz de trabajo software.....	27
Ilustración 2 Interfaces de importación de imágenes.	28
Ilustración 3 Interfaces para la eliminación de cámara o fotografías.....	29
Ilustración 4 Interfaces para la calibración de cámaras.....	29
Ilustración 5 Sistema de coordenadas que utilizamos (ETRS89/LCC Europe (EPSG:3034)..	30
Ilustración 6 Abrir archivo de coordenadas de los puntos de control	30
Ilustración 7 Importación de coordenadas de los puntos de control.	31
Ilustración 8 Interfaz una vez importado referencias de los puntos de control.....	31
Ilustración 9 Interfaces de orientación de imágenes y resultado final.	32
Ilustración 10 Filtrado de puntos por marcadores.	32
Ilustración 11 Interfaz una vez creada la nube de puntos dispersa.	33
Ilustración 12 Limpieza de puntos incoherentes en el modelo 3D.	34
Ilustración 13 Creación de nube densa.....	34
Ilustración 14 Interfaz de nube densa.....	35
Ilustración 15 Medición estereoscopia y Structure from Motion (SfM).....	41
Ilustración 16 Zona geográfica de la campiña sur de Jaén.....	41
Ilustración 17 Términos municipales de la campiña sur de Jaén.	41
Ilustración 18 Exvoto Íbero 200 a. C. de Torre Benzalá.....	42
Ilustración 19 Inscripción honorífica romana.	42
Ilustración 20 Portada de Catálogo de Martín Jimena Jurado.....	43
Ilustración 21 Texto de manuscrito de Obispos y Annales Eclesiásticos de Jimena Jurado. ..	43
Ilustración 22 Basa encontrada en 1965 Torre Benzalá.	44
Ilustración 23 Mapa de las principales localidades en la campiña en los siglos IX-X.	44
Ilustración 24 Primera fase fronteriza en el alto Guadalquivir (1212-1224).	45
Ilustración 25 Sector fronterizo del arroyo Salado (1225-1242).....	45
Ilustración 26 Manuscrito 1180, fol. 142.	46
Ilustración 27 Progresión captura fotográfica	47
Ilustración 28 Características del sensor de cámara en dron DJI Mavic FC220.....	47
Ilustración 29 Disposición de cámaras según elemento a documentar.	47
Ilustración 30 Mapa del sistema geodésico de referencia de Torre Benzalá.....	48
Ilustración 31 Lecturas de georreferenciación realizadas.	55

Ilustración 32 Puntos de Control Georreferenciación calculados.	56
Ilustración 33 Tipología de dianas para puntos de control.....	57
Ilustración 34 Paramento A. Ortoimagen escalada.	58
Ilustración 35 Paramento B. Ortoimagen escalada.	59
Ilustración 36 Paramento C. Ortoimagen escalada.	60
Ilustración 37 Paramento D. Ortoimagen escalada.	61
Ilustración 38 Paramento E. Ortoimagen escalada vista superior.	62
Ilustración 39 Modelo Digital de Elevaciones (MDE). Alzado A de Torre Benzalá.....	63
Ilustración 40 Modelo Digital de Elevaciones (MDE). Alzado B de Torre Benzalá.....	63
Ilustración 41 Modelo Digital de Elevaciones (MDE). Alzado C de Torre Benzalá.....	64
Ilustración 42 Modelo Digital de Elevaciones (MDE). Alzado D de Torre Benzalá.....	64
Ilustración 43 Modelo Digital de Elevaciones (MDE). Vista Superior de Torre Benzalá.....	65

Resumen

En este Trabajo Fin de Grado se ha obtenido el modelo tridimensional (3D) de Torre Benzalá, utilizando tecnología geomática como es la fotogrametría aérea, permitiendo así adquirir documentación gráfica de detalle para el registro, estudio y difusión de nuestro Patrimonio Cultural. Se ha apostado como herramienta de trabajo para la obtención de las imágenes fotográficas la utilización de RPAS (*Remotely Piloted Aircraft System*), comúnmente llamados drones, que ha permitido la optimización de tiempo y calidad de captura fotográfica. A continuación, a partir de la metodología *Structure from Motion* (SfM) se han obtenido las ortofotografías, modelos digitales de elevación (MDE) y el modelo 3D de los precarios parámetros de la Torre. Previamente se ha realizado una contextualización geoarqueológica e histórica del espacio en donde se enclava Torre Benzalá.

Palabras Clave: Patrimonio, Arqueología, Fotogrametría, SfM, RPAS.

Abstract

In this Final Degree Project, the three-dimensional (3D) model of Torre Benzalá has been obtained, using geomatic technology as aerial photogrammetry allowing to acquire detailed graphic documentation for registration, study and dissemination of our Cultural Heritage. The use of RPAS (*Remotely Piloted Aircraft System*), commonly called drones, has been used as a work tool for obtaining photographic images, which has allowed the optimization of time and quality of photographic capture. Then, from the *Structure from Motion* (SfM) methodology, the orthophotographs, digital elevation models (DEM) and the 3D model of the precarious parameters of the Tower were obtained. Previously, a geo-archaeological and historical contextualization of the space where Torre Benzalá is located has been carried out

Key Words: Heritage, Archeology, Photogrammetry, SfM, RPAS

Capítulo I. Introducción

1.1. Justificación y Objetivos

Tenemos la responsabilidad de que la sociedad pueda conocer su legado patrimonial como seña de identidad. Una correcta documentación de nuestro patrimonio es necesaria para realizar posteriores estudios arqueológicos e históricos, así como, acciones que potencien y favorezca la restauración y conservación del mismo. Las futuras generaciones no perdonarían que esta herencia única e irremplazable sufriera cualquier pérdida.

Hoy en día es patente que nuestro patrimonio cultural sufre graves consecuencias debido a su deterioro. Aunque existen partidas presupuestarias de ámbito nacional, autonómico y local para su conservación, puesta en valor y difusión, cabe decir que los yacimientos y restos arqueológicos de cualquier época pasada, en muchos casos, quedan olvidados a su suerte.

El caso de Torre Benzalá, no es ajeno a esta problemática y al paso del tiempo. Dicha torre está situada sobre la cima del cerro Ben-Zala, a 544 metros sobre el nivel del mar. Queda situado al norte del Cortijo del Marqués. Este promontorio se encuentra rodeado de olivares, en el paraje de Aldea Las Casas. Actualmente sólo subsiste un torreón de planta trapezoidal, de mampostería. En dicho montículo podría albergar los restos de una mota y vestigios de obras de fortificación de tierra, de la cual tenemos limitada información histórica sobre su construcción. Así mismo, cercano a su emplazamiento se encontraría un asentamiento íbero romano.

Torre Benzalá se encuentra en un estado de conservación precario, pues tiene indicios de ruina y posible derrumbe debido a los efectos climatológicos y la acción antrópica que ha ido haciendo mella en su maltrecha estructura. De ahí que se encuentre catalogada dentro de la denominada lista roja del patrimonio,¹ iniciativa promovida por la Asociación *Hispania Nostra* que alerta sobre aquellos enclaves del patrimonio cultural español que se encuentran en una situación de riesgo de desaparición o destrucción. Se pretende concienciar a la sociedad de la precaria situación y de la necesidad de su conservación.

Por todo ello, se realizará un análisis basado en una búsqueda bibliográfica y posterior síntesis sobre el contexto geoarqueológico e histórico de Torre Benzalá. Por otro lado, y como objetivo subsidiario se esgrime argumentos sobre la necesidad de la utilización de las nuevas tecnologías y en concreto de la técnica fotogramétrica y los sistemas de información geográfica (SIG) como una metodología apropiada para el estudio de nuestro rico patrimonio cultural y

¹ Véase [Lista Roja del Patrimonio](https://listarojapatrimonio.org/) <https://listarojapatrimonio.org/>

arqueológico. Además, se da argumentaciones a favor de la viabilidad y utilización de RPAS/drones en los proyectos arqueológicos.

El presente trabajo fin de grado tiene como objetivo principal el levantamiento fotogramétrico tridimensional (3D) de este elemento del patrimonio cultural de la provincia de Jaén, de forma que se pueda conocer en posteriores análisis, sus volúmenes, sistemas y material constructivo, así como el estado de conservación actual.

1.2. Metodología y estructura

Para la realización de este trabajo se ha utilizado una metodología consistente en una primera etapa de búsqueda bibliográfica, registrando publicaciones y artículos científicos, para poder posteriormente realizar un análisis crítico de la misma, pudiéndose obtener diversas perspectivas y definiendo en una tercera fase aquellos autores de referencia y conceptos claves, consiguiéndose realizar en un cuarto momento, una síntesis analítica que se muestra en el trabajo.

En segundo lugar, se procedió a la toma de datos por medio de trabajo de campo con la obtención de tomas fotográficas según los criterios obtenidos en la planificación previamente realizada, siguiendo la metodología *Structure from Motion* (SFM), consistente en la utilización de la fotogrametría digital automatizada, obteniendo diversas imágenes fotográficas para la creación del modelo. De este proceso y por medio de algoritmos que hallan los puntos homólogos (o puntos claves) entre las diversas fotografías se conformará una nube de puntos, siguiendo el principio de triangulación automática, de forma que se cree un modelo tridimensional (Almagro, 2004).

Para poder realizar todo este procedimiento automático se ha utilizado el *software Agisoft PhotoScan*, *software* de código cerrado, que procesa imágenes digitales mediante la combinación de técnicas de fotogrametría digital y visión por ordenador generando una reconstrucción 3D. Este programa proporciona un conjunto de herramientas para la creación de contenidos tridimensionales en general, para su posterior reproducción, modelado, digitalización de objetos o escenarios.

El presente trabajo se ha conformado en varios capítulos orientados a una documentación y análisis de diversos aspectos tanto geoarqueológicos, históricos y fotogramétricos de Torre Benzalá.

En el capítulo segundo se da razones de por qué las nuevas tecnologías y la arqueología deben darse la mano. Hoy en día, debido a la especialización de la ciencia es necesario más que nunca que los equipos multidisciplinares aborden distintos puntos de vista de un determinado

elemento arqueológico o histórico y así recabar la mayor información posible y, poder realizar una interpretación histórica lo más ajustada a la realidad pasada. Por este motivo, también se aborda en este capítulo, la viabilidad de utilizar RPAS/drones, convirtiéndose en una herramienta, en muchos casos beneficiosa para las intervenciones arqueológicas. Estos resultan ser un instrumento válido para reducir costes económicos y temporales en excavaciones y proyectos de prospección arqueológica, de forma que, determinados trabajos como toma de medidas, dibujo, referenciación, o capturas para posteriores lecturas paramentales empleadas en la disciplina de la Arqueología de la Arquitectura, etc., se han convertido en un instrumental imprescindible.

En el tercer capítulo del trabajo, se realiza una descripción geoarqueológica del emplazamiento de Torre Benzalá, así como del registro material arqueológico del periodo íbero romano que señala la importancia del territorio donde se sitúa. Por otro lado, se realiza una contextualización histórica de los acontecimientos ocurridos en el periodo de conquistas y frontera entre árabes y castellanos, fundamentalmente durante los siglos XII y XIII, que da razón de ser a la construcción de la fortificación de Torre Benzalá.

Por último, y no por ello menos importante, en el cuarto capítulo se documenta el proceso de trabajo, con sus diversas fases, así como los resultados obtenidos, de la obtención del modelo tridimensional (3D) de Torre Benzalá.

Capítulo II. Nuevas Tecnologías y Arqueología

2.1. Aplicación de la tecnología a la conservación del patrimonio cultural

Hoy día la sociedad está inmersa en un proceso de digitalización y uso de las nuevas tecnologías en los distintos ámbitos sociales, educativos y de investigación. La disciplina arqueológica no se ha quedado al margen de lo que se ha denominado la revolución digital. En la actualidad podría plantearse la dicotomía entre rapidez y reflexión en el yacimiento arqueológico. Esta surgiría debido a que, hasta la fecha, el acercamiento y estudio arqueológico en campo, se ha realizado de una forma más bien manual, con tomas de medidas y referencias, con dibujos de estructuras y piezas arqueológicas, que permitirían la asimilación mental por parte del arqueólogo, permitiendo un análisis en mayor profundidad. Por el otro lado, los defensores de la "rapidez" plantean que por medio de levantamientos fotogramétricos se agilizarían los procesos de trabajo en las excavaciones (Fernández, 2016).

En el fondo de este debate subyace la idea general de que la utilización o el exceso de tecnología tiende a eliminar el análisis crítico y el pensamiento constructivo. Por el contrario, los defensores de la tecnología argumentan que un buen uso de la misma, resulta ser una herramienta educativa y profesional que fomenta la formación del conocimiento individualizado. Cabría decir al respecto que, el punto medio de ambas posiciones sería la situación ideal. Parece lógico que el arqueólogo deba formarse primero en el dibujo arqueológico, conocer el proceso de documentación, registro, etc. para posteriormente aplicar los métodos digitales a éstas mismas técnicas arqueológicas.

Por lo tanto, las distintas metodologías digitales como ortofotos, planimetrías y modelos digitales en terreno nos ayudan a realizar una copia casi perfecta del objeto real en un determinado momento. Esta información suele estar dirigida a aquellas personas que puedan interpretarla gracias a unos conocimientos técnicos. En otras muchas ocasiones el trabajo estará destinado al público en general, mostrándose los resultados en 2D (impresos o en monitores con imágenes estáticas), siendo éste un lenguaje que aboga el uso de las nuevas tecnologías que se fundamentan en las 3D.

Para la divulgación y difusión del patrimonio es interesante la percepción a través de la visualización tridimensional, de forma que el aumento del interés general por el patrimonio cultural, desarrolle el incremento del uso de nuevas aplicaciones tecnológicas aplicadas. Hoy día se puede apreciar un aumento de la demanda social en el uso de las nuevas tecnologías por su capacidad de inmediatez en el conocimiento e información sobre nuestro patrimonio arqueológico (Fernández, 2016).

2.2. Fotogrametría como disciplina para la documentación y difusión del patrimonio arqueológico

En la última década la fotogrametría aérea y de corto alcance automatizada se ha desarrollado enormemente en el modelado topográfico tridimensional. El desarrollo de la triangulación electrónica y los algoritmos de extracción del objeto basados en imágenes, han optimizado radicalmente la calidad de los datos obtenidos de los pares estereoscópicos superpuestos. Por otro lado, la reducción del coste y la mejora de la calidad de las cámaras réflex compactas y los métodos de calibración de éstas, han democratizado el acceso al modelado fotogramétrico y han fomentado una amplia gama de usos en la ciencia arqueológica (Westoby *et al*, 2012).

La ciencia arqueológica ha sido una de las disciplinas que ha aplicado la técnica fotogramétrica para el estudio y la conservación del patrimonio, de forma que, en la mayoría de las excavaciones y proyectos de investigación se ha convertido en una herramienta válida para el dibujo y la documentación de los trabajos científicos. Para ello, es necesario garantizar la fidelidad, rigurosidad y sistematización con el fin de dar credibilidad y proyección a la técnica utilizada. De ahí la importancia de combinar el binomio fotogrametría y patrimonio (Carta de Londres, 2006), conjugándose la técnica con el criterio, sin que prevalezca una sobre la otra. Para ello, es conveniente partir de los principios éticos propuestos por la Carta de Londres que ya en su preámbulo señala:

"...resulta necesario elaborar un conjunto de principios que aseguren que la visualización del patrimonio cultural se lleva a cabo como un trabajo intelectual y técnicamente riguroso, así como metodológicamente mucho más sólido..." (Carta de Londres, 2006).

La Carta de Londres busca por tanto, establecer una serie de principios para la utilización de métodos y resultados de visualización, basados en la computación en la investigación y difusión del patrimonio cultural y arqueológico, con el fin de establecer un rigor intelectual y técnico en las visualizaciones digitales del mismo, asegurar que los procesos y resultados de visualización digital puedan ser entendidos y evaluados por los usuarios, permitiendo que la visualización digital rigurosa favorezca el estudio, interpretación y gestión de los bienes culturales, permitiendo que se apliquen estrategias de acceso y sostenibilidad de forma que otros especialistas puedan elaborar criterios y directrices mucho más detalladas (Bendicho, 2011).

Desde hace tiempo la fotogrametría se ha convertido en uno de los métodos de trabajo de la arqueología, pues se trata de una disciplina que nos permite digitalizar estructuras u

objetos de una forma automatizada con un coste económico razonable en comparación con otros sistemas de digitalización. Es por ello, por lo que, desde hace unos años, se ha aplicado esta técnica a la documentación, conservación y difusión del patrimonio arqueológico y cultural.

Desde el punto de vista etimológico proviene de la suma de las palabras griegas *φωτος* (photos, ‘luz’), *γραμμα* (gramma, ‘escrito’) y *μετρον* (metron, ‘medir’). Vendría a decir que se trataría de una medición dibujada por medio de la luz (Giné, 2018).

Más concretamente podemos señalar que la fotogrametría resulta ser la técnica adecuada para poder medir la superficie de la tierra, medir objetos o edificios, a partir de imágenes perspectivas obtenidas por procedimientos fotográficos (Almagro, 2004).

Siguiendo la definición de la *American Society of Photogrammetry and Remote Sensing* (ASPRS)² la fotogrametría es la ciencia, arte y tecnología que trata de obtener información fiable acerca de objetos físicos y de su entorno mediante procesos de registro, medida e interpretación de imágenes fotográficas y datos obtenidos a partir de energía electromagnética radiante o de fenómenos magnéticos. Esta definición no hace mención al patrimonio, pero si podemos concluir que la fotogrametría pretende habilitar unas imágenes en el espectro visible para el análisis fiel de los objetos o paisajes que representan. En definitiva, lo que le interesa al patrimonio arqueológico y cultural es la utilización de esta técnica como sistema para generar modelos tridimensionales a partir de fotografías (Ilust. 15 - Anexo I). Se trata por tanto de la generación de modelos en tres dimensiones (3D) a partir de imágenes de dos dimensiones (2D), de forma que se obtengan características geométricas de los objetos que representan, mediante el uso de relaciones matemáticas establecidas. La obtención de estas imágenes se consigue por medio de la fotografía y por tanto sin un contacto físico con el objeto, algo que en ocasiones es vital para la conservación del patrimonio cultural.

En definitiva, la técnica fotogramétrica obtendrá un modelo tridimensional a partir de la toma de fotografías desde distintos puntos de vista. Esta información será trabajada por un *software* específico que a través del solapamiento en las diversas imágenes detectará puntos comunes u homólogos que conllevará que el sistema encuentre sus posiciones relativas, situándolos en un sistema de coordenadas de tres ejes (Moya y Muñoz, 2017).

Por lo tanto, si trabajamos con una imagen podremos analizar la información geométrica (información bidimensional) del objeto fotografiado. Pero si utilizamos dos o más fotos, en la zona común a éstas (zona de solape), podremos tener visión estereoscópica, es decir una visión tridimensional (Almagro, 2004).

² Véase: <https://www.asprs.org/>

2.3. Vehículos aéreos no tripulados (RPAS/dron) como herramienta arqueológica

Dentro de los sistemas de medición fotogramétrica nos encontramos con la tipología aérea, y dentro de ésta, cabe la utilización de diversas herramientas como el caso de los RPAS o comúnmente llamados drones, que se suelen emplear en lugares de difícil acceso como las zonas de altura y cubiertas de las estructuras construidas. La toma de imágenes desde el aire, permite un enfoque en un plano paralelo al horizontal y a su vez elevado.

RPAS (*Remotely Piloted Aircraft System*), VANT (Vehículo Aéreo no tripulado) o UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*) son las siglas con las que normalmente denominamos a los drones (Fernández, 2018).

Un RPAS es una aeronave no tripulada, es decir, se pilota de manera remota. Pese a ser una aeronave no tripulada debe de estar controlada en todo momento por una estación en tierra y manejada por una persona autorizada para ello. Existen diferentes RPAS según su diseño, motores, distintos sistemas de control o sus sistemas de seguridad, etc.

Los comúnmente llamados drones, suelen ser de tipo multirrotor, es decir, utilizan el mismo principio de alas giratorias para obtener la sustentación que los RPAS de tipo helicópteros, pero usan varios rotores para generar dicha sustentación lo que le proporcionan una mayor estabilidad. Tiene la ventaja de poder permanecer estático en el aire y de desplazarse en cualquier dirección, además sus costes de mantenimiento son mucho más económicos. Su principal inconveniente es su poca autonomía.

Desde la aparición de la fotografía, se tuvo la necesidad de la utilización de la perspectiva aérea, de ahí que se realizara el primer vuelo fotográfico sobre un globo aerostático en 1858, por el francés *Gaspar-Félix Tournachon*, donde se fotografió la *Avenue du Bois de Boulogne* en París. Posteriormente serían diversos intentos y sistemas utilizados para realizar tomas del paisaje desde el cielo. Será a partir de la I y II Guerra Mundial, cuando la fotografía aérea se desarrollará de forma más determinante, debido a su utilización militar. En el ámbito arqueológico ya en 1899 el arqueólogo *Giacomo Boni*, gracias al globo aerostático, pudo realizar fotografías aéreas para mejorar la planimetría del foro romano, existente hasta esa fecha (Ceraudo, 2013: 11-12).

El uso de RPAS (*Remotely Piloted Aircraft System*) se ha extendido durante los últimos años. Este tipo de aeronaves no tripuladas como se ha señalado se desarrollaron fundamentalmente en el ámbito militar y se ha ido extendiendo al uso profesional y científico. Era cuestión de tiempo que la Arqueología y profesionales relacionados con el patrimonio cultural vieran la utilidad del manejo de drones en sus disciplinas.

Una de las ventajas de la utilización de los RPAS, es que nos permiten elevar el punto de vista de la fotografía, a un bajo coste, pues no es necesario la contratación de otros medios como avionetas o helicópteros, además los resultados obtenidos suelen ser más óptimos a otros sistemas como la utilización de pértigas, andamios, escaleras, etc.

Los sensores fotográficos instalados en los drones están permitiendo la detección de yacimientos arqueológicos y cuando se instalan sensores capaces de captar los espectros de luz invisible como el infrarrojo o el ultravioleta, se facilita la detección de estructuras subterráneas pertenecientes a los asentamientos de épocas pasadas (Fernández, 2018).

Al igual que en el caso de la toma fotográfica terrestre, hay que tener en cuenta una pequeña planificación previa a la realización de los vuelos. Debemos realizar una revisión de las condiciones meteorológicas para el día del vuelo, donde se incluye comprobar si vamos a tener condiciones meteorológicas visuales optimas, cuál será la presión atmosférica, si el viento estará dentro de límites establecidos o que temperatura exterior existirá, pudiendo estos indicadores afectar a la *performance* de la aeronave. Se ha de tener en cuenta que la climatología más adecuada para la toma fotográfica sería la de un día nublado, puesto que la iluminación es uniforme sobre el elemento fotografiado, no proyectándose ningún tipo de sombra de forma que las imágenes obtenidas tendrán unas características ideales para su posterior procesado (Vidal, 2020).

Capítulo III. Contextos de Torre Benzalá

3.1. Contexto geoarqueológico de Torre Benzalá

La Geoarqueología es la disciplina que aplica los conceptos y métodos de las ciencias de la tierra, intentando dar solución a ciertos problemas que suelen darse en la investigación arqueológica. Por lo tanto, es importante que se realice un análisis geoarqueológico del espacio que ocupa Torre Benzalá para dar respuesta a la importancia geoestratégica del posicionamiento de esta fortificación medieval.

Torre Benzalá se sitúa en la Campiña Sur de Jaén (Ilust. 16 – Anexo 1), más concretamente en la depresión del río Guadalquivir, también se le ha denominado “Campiña Occidental de la provincia de Jaén”. El sector geográfico analizado, presenta varias características geológicas con diversas altitudes conforme descendemos desde el Prebético hasta el caudal hidrográfico. Se produce en la zona unos cambios morfogeológicos donde se pasa de zonas de calizas a zonas donde predominan las areniscas, los limos y los materiales de depósito.

Cabe decir que las diversas lomas de la zona no presentan la roma uniformidad del bajo Guadalquivir. La litología del lugar se constituye básicamente de un material margocalizo que lo diferencia de las zonas adyacentes.

La Campiña Sur de Jaén donde se sitúa Torre Benzalá oscila entre la altitud de 200 y los 600 metros, donde predomina pendientes alomadas y/o moderadamente onduladas, conformando una geomorfología de sucesiones de lomas, vallonadas y colinas pertenecientes a varias localidades (Ilust. 17 – Anexo 1).

La geología de esta zona está formada por Margas, calizas y silexitas del Mioceno inferior y medio, arcillas abigarradas y yesos del Triásico, además, de depósitos margocalizos del Mioceno Superior. Los suelos son de gran importancia, de tipo bujeo (cambisoles vérticos), desarrollados sobre materiales ricos en acillas expansibles. También suelen aparecer los suelos propios de las margocalizas miocénicas como las albarizas y los vertisoles calcáreos.

Debido a las pendientes existentes en las zonas alomadas se da un acusado riesgo de erosión, siendo por tanto suelos frágiles sometidos a un estrés hídrico en periodo estival. Se considera por tanto el piso bioclimático como Mesomediterráneo (Guzmán, 2004:491).

Sin lugar a dudas el espacio donde se sitúa Torre Benzalá adquiere una importancia estratégica desde punto de vista del control del territorio, pues su enclave se sitúa a 544 metros de altitud, siendo uno de los puntos más elevados de la campiña sur de Jaén, permitiendo comunicación visual con otras fortificaciones enclavadas en lomas de similares características.

Por otro lado, la tipología de suelo permite que con mezcla de humos sea bueno para el cultivo de gramíneas como el trigo, bien preciado y muy necesario para el sostenimiento de cualquier asentamiento humano en la antigüedad. Es un tipo de suelo que tiene gran poder de retención de agua y nutrientes pero una baja porosidad, lo que supone una dificultad para su labranza.

3.2. Contexto histórico – arqueológico de Torre Benzalá

3.2.1. Introducción

El reino de Jaén fue paso obligado entre las tierras castellanas, levantinas y andaluzas, por ello, tuvo una gran importancia geoestratégica en diversos momentos de la historia de península ibérica.

La región jienense debido a tres elementos geográficos naturales como son: Sierra Morena, el Valle del Guadalquivir y el Sistema Subbético, facilitaron o dificultaron tanto al reino castellano como al reino de Granada (anteriormente Almorávides y Almohades), la construcción de fortificaciones, castillos y torreones de vigilancia para dominar el espacio y poder controlar y defender el territorio conquistado (Ramírez-Sánchez, 2016).

Al noroeste de Torredonjimeno, circulando por la vía de comunicación de Martos a Porcuna y siguiendo por un camino trazado en parte por el camino real llamado Camino Viejo de Torre Alcázar, nos encontramos con el cerro Benzalá o también denominado Ven-Zala.

De la fortificación medieval no es posible ver en la actualidad más que un fragmento de lienzo a modo de torreón realizado en mampostería y junto a él un promontorio de escombros de la propia construcción (Salvatierra, 1995:183).

3.2.2. Antecedentes históricos. Periodo Íbero-Romano

El enclave de Torre Benzalá siempre ha tenido una importancia desde el punto de vista territorial. Debido a su posición se ejerce un control visual del espacio de gran parte de la campiña sur de Jaén.

Aunque la Torre Benzalá, se sitúa en un contexto histórico determinado, cabe remarcar que en su enclave y debido a su posición de control visual del espacio y fácil defensa, existió un asentamiento de tipología *oppidum* donde posteriormente se llegó a asentar población romana llamada Bastora. De este asentamiento ibero existe diverso registro arqueológico como son los diversos exvotos de caliza datados en el año 200 a. C hallados en la zona y que nos señala la presencia de un posible santuario íbero, no estando este estudiado arqueológicamente (Ilust. 18 – Anexo 1).

La tipología de construcción de las zonas de hábitat del asentamiento íbero a partir del siglo VIII a. C., viene determinado por la concentración aldeana, con la fortificación de sus perímetros, replanteando interiormente las viejas cabañas de material perecedero en casas rectangulares con compartimentación interior y zócalos de piedra, esto debido a la aparición de cierta aristocracia tartésica en relación directa con el auge de las colonias fenicias. La población íbera fundamenta su economía en el campo, especialmente en la producción del cereal y con una ganadería mixta de ovejas, cabras y vacas.

Desde el punto de vista económico y cultural se empieza a trabajar el hierro que se desarrollará como material de trabajo agrícola. Por otro lado, se pasa de la producción de la cerámica a mano por la de torno de alfarero. De esta forma, en época íbera, en la campiña de Jaén se asumen los cambios que años antes se habían desarrollado en el Bajo Guadalquivir o en la costa mediterránea (Salvatierra, 1995:16).

En época ya romana, la ciudad de Bastora se ha identificado con Torre Benzalá encontrándose al este de Obulco, donde existen vestigios arqueológicos de esta época. En este enclave, del que desconocemos su situación jurídica anterior, se documenta la presencia del ordo *Batorensis*, del duovirato y del pontificado en la figura de *P. Fabius P. f. Gal. Iulianus, Ilvir bis, pontifex*. La madre de este magistrado, *Iunia M. f. Severa*, pagó la inscripción y sufragó los honores decretados por el ordo a su hijo, un pedestal datado en el periodo augusteo y vinculado a este enclave de *status privilegiado*³ (Ilust. 19 – Anexo 1) (Rodríguez, 2017).

Martín Jimena Jurado fue quien vio por primera vez esta inscripción y que por escrito comunico a Rus Puerta, analista del territorio antiguo de Jaén (Mozas, 2018), el 14 de junio de 1641, creyendo ver ambos en aquel despoblado el “*Ordo Batorensis*” o la ciudad de Batora. De hecho, Jimena Jurado en su Catálogo de los Obispos de las Iglesias Catedrales de la diócesis de Jaén y Annales eclesiásticos de este obispado (1654) (Ilust. 20 y 21 – Anexo 1) refiere a Benzalá como *Batorensis Ordo*. De la fuente escrita se deduce que en esa época aún existía y seguía en pie gran parte de la fortificación de Torre Benzalá. El texto se expresa como sigue:

“Benzalá, llamado en tiempo de los Romanos BASTORA, y Ordo Batorensis, como consta de una antigua Inscripción, que en él está en un mármol blanco, fue aldea de Martos, y estuvo poblada en el Año de 1347, como consta de Escritura que he visto en el Archivo de la Villa de Arjona. No ha quedado en su

³ CIL II 1677 (=CILA 6, 70=CIL II2 /5, 60): P(ublio) Fabio P(ubli) f(ilio) / Gal(eria) Iuliano / Ilvir(o) bis pont(ifici) / ordo Bator(ensi)s / decrevit / Iun(ia) M(arci) f(ilia) Severa / mater / honore usa / impens(am) remissit(!)) y CILA 6, 71: ordo Batorensis.

sitio Iglesia, sino solo algunos Cortijos, y la mayor parte de los muros de su Castillo en lo alto de un collado, en cuya falda Meridional se ven las ruinas, y se conoce, que fue gran población en tiempos de Romanos, por medio de las cuales pasa el camino Real que va de Porcuna a Jaén. Está a legua y media de la Higuera a la parte Oriental, una de Villar Don Pardo a la parte Meridional, y poco más de una legua de Martos a la parte Septentrional, sobre la vuelta del Occidente”.

Por otro lado, Veganzones (1969:12-38) nos habla de la importancia que tuvo el asentamiento de Torre Benzalá fundamentándose en la basa encontrada en 1965 y dedicada a Marco Aurelio, aparecida en el cortijo llamado Benzalá Alta, al pie del montículo del antiguo castillo y que se encuentra en la actualidad en el Museo Provincial de Jaén. Señala que tal inscripción, datada en el año 166 d. C. es la única que nos pudiera dar el verdadero nombre de este antiguo poblado. En ella se puede leer el siguiente texto (Ilust. 22 – Anexo 1):

IMP(eratori) CAESARI / M(arco) · AVRELIO · [A]NTO[N]INO
AVG(usto) [P(ontifici)] M(aximo) / ARMENIACO P[A]RTHICO · MAXIMO /
MEDICO · TRIBVNICIAE · POT(estatis) · XX · IMP(eratori) · V / CO(n)S(uli)
· III · P(atri) P(atriae) · DIVI · ANTONINI · FIL(io) [DIVI] / HADRIANI ·
NEPOTI · DIVI · TRAIANI · P[ARTH(ici)] / PRO[NEPO]TI · DIVI ·
NER[VAE] A[BNE]P[OTI] / CONSER[V]ATORI GENERIS HV[MANI] / OB
HONOREM PONTIFICA[TVS] / M(arci) · SERGII MATERNI MARITI /
ANNIA · Q(uinti) · FIL(ia) · SEVERA / EPVLO DIVISO EDITIS
CIRCE(n)SIBVS / PO[SV]IT / ET D(edicavit) (Ania Severa hija de Quinto,
habiendo dado un banquete y juegos en el circo por el honor del pontificado de su
marido Marco Sergio Materno, puso y dedicó (este monumento) al emperador
César Marco Aurelio Antonino Augusto, pontífice máximo, Armeníaco, Pártico
máximo, Médico, en su XX tribunicia potestad, emperador por 5ª vez, cónsul por
3ª vez, padre de la patria, hijo del divino Antonino, nieto del divino Adriano,
biznieto del divino Trajano Pártico, tataranieto del divino Nerva, protector del
género humano.) (CERES).

Otros vestigios arqueológicos y no por ello menos importantes, son algunas esculturas, entre ellas, una Herma, representación del dios Pan, procedentes de Torre Benzalá (Mozas, 2018).

3.2.3. Época Islámica. Contexto entre los siglos VIII y X

Durante el periodo Omeya se produjo un modelo de ocupación del territorio de la campiña de Jaén (*Yayyan*) de una forma desestructurada y aunque existen interpretaciones diversas, si se puede considerar que en muchas ocasiones se instalan los asentamientos eligiendo lugares altos y fácilmente defendibles, coincidiendo con centro-administrativos íbero-romanos previos, dotados de elementos de fortificación. No obstante, durante este periodo, el estado Omeya planifica el control del territorio y la apropiación de la producción campesina. En un primer momento, la ausencia de un estado centralizado en el origen, permitiría que los distintos asentamientos de la campiña de Jaén se organizarán, defendieran y explotarán el territorio que controlaban (Castillo y Alcázar, 2006).

Ya en época de *Abd al-Rahman I* y fundamentalmente con *Abd al-Rahman II* se da un proceso de islamización que se plasma en el territorio con el impulso de la urbanización, donde es posible el desarrollo y recaudación fiscal por parte del estado. De esta forma, se produce la fundación de ciudades (Ilust. 23 – Anexo 1) como es el caso de Úbeda. Esto no quiere decir que el territorio rural se urbanizara pues la mayoría de la población seguía residiendo junto a los campos de cultivo (Castillo y Alcázar, 2006).

La oposición al gobierno Omeya debido al aumento de la fiscalidad, conllevará diversas rebeliones que pondrá en peligro al mismo Estado, hasta que finalmente *Abd al-Rahman III* consigue que triunfe el proceso de islamización sometiendo política y militarmente a los rebeldes. De esta forma, se irá produciendo una consolidación del poblamiento en centros urbanos con cierto tamaño que irán aumentando, en detrimento de los enclaves rurales, de ahí que también se abandonen gran parte de los asentamientos defensivos en altura, aunque algunos se convierten en fortines para control territorial del mismo Estado. Esto produce que centros poblacionales como Jaén, Martos, Porcuna, Baeza, etc., antiguas ciudades iberorromanas casi despobladas en época visigoda, se empiecen a convertir en centros urbanos de consideración (Castillo y Alcázar, 2006).

3.2.3. Época Islámica. Contexto entre los siglos XI y XIII

Cuando el califato Omeya se derrumba y se desarrolla la *Fitna* (guerra civil) entre todos los sectores que conformaban el estado andalusí, el territorio de *Yayyan* (Jaén) se repartió entre las taifas de Toledo, Granada, Sevilla y Almería, diluyéndose finalmente el control político-administrativo del Califato (Salvatierra, 1996).

Las poblaciones residentes en zonas rurales debido a la inseguridad producida por las diversas razias de los diferentes contendientes, produjo el abandono de muchas alquerías de

forma que la población se trasladó a los centros urbanos fortificados que se habían consolidado en el periodo califal. No obstante, este traslado de población no supuso el total abandono de la zona rural, muchos asentamientos que tenían caracteres eminentemente defensivos (*husum*), situados en zonas elevadas con gran visibilidad y fácilmente defendibles, permanecieron ocupados, sin embargo, sí desaparecieron aquellos asentamientos que tenían funciones principalmente agrícolas (*qurà*), quedándose despoblados aquellos lugares más lejanos a los centros urbanos. Por lo tanto, en la Campiña de *Yayyan* (Jaén) se establecería una red de asentamientos fortificados de carácter defensivo (Castillo y Alcázar, 2006).

Son, por lo tanto, los enfrentamientos entre adversarios, los que provocan que el Alto Guadalquivir se convierta en un territorio independiente en distintos periodos, como son los casos protagonizados por *Ibn Hamusk* (1233-1246), *al-Bayyasy* rey de Baeza (1224-1226) e *ibn al-Ahmar* (1233-1246) en Arjona. Por otro lado, se produce la toma de tierras y ciudades por parte de las tropas cristianas, como ocurrió con Alfonso VII, que se adueñó de Úbeda y Baeza entre 1147 y 1157. Alfonso VIII, tras la batalla de las Navas de Tolosa (1212), tomó Vilches y Baños, finalizándose el proceso de conquista de la región de *Yayyan* (Jaén) por el rey Fernando III (1222-1246) (Salvatierra, 1996).

3.2.4. La conquista cristiana durante 1212 - 1246

Andalucía y el reino de Jaén en concreto, era un enclave fundamental para la conquista y control del Alto Guadalquivir, así como, de los núcleos urbanos que se habían conformado en el periodo previo. Así lo entendía Fernando III y sus predecesores, de forma que, Alfonso VII, tras conseguir la conquista de varios territorios en el norte del territorio de *Yayyan* (Jaén), se vio obligado a retirarse de los mismos, a no ser capaz de conseguir su control y mantener una ocupación en el territorio de forma permanente, debido a la constante presión de los Almohades (González, 1946:521-524).

En el caso del rey Alfonso VIII, desarrolló campañas militares sobre el Alto Guadalquivir (Ilust. 24 – Anexo 1), realizando conquistas para tener acceso a los valles y poder consolidar las plazas de algunas fortalezas, que pudieran apoyar como base, a futuras expediciones (Castillo y Alcázar, 2006), de forma que, tras la victoria en las Navas de Tolosa, se inició la conquista y repoblación de los territorios situados entre los castillos de Navas, El Ferral, Vilches y Baños. Por el contrario, perdió las plazas de los núcleos urbanos y límites de Úbeda y Baeza, que tras un reducido dominio castellano fue recuperado por los musulmanes. Las distintas derrotas sufridas por los Almohades, supuso una apuesta más defensiva por parte

de estos, que tendieron a mantener controlados los territorios que aún poseían (Vara, 1999:345-347).

Una vez consolidado el territorio de Sierra Morena, el ejército cristiano, dispuso del espacio base para poder realizar expediciones de conquista hacia el Alto y Bajo Guadalquivir entre los años 1212-1224. Fernando III, aprovechando los diversos conflictos internos en *al-Ándalus* llegó al control definitivo gracias a las diversas campañas desarrolladas entre 1224 y 1246 (González, 1946:539-605).

El avance definitivo de los ejércitos cristianos se potenció en 1224 con la muerte sin descendencia del califa *al-Mustansir*, lo que provocó las disputas de los gobernadores de los diferentes distritos andalusíes, que rechazaron la proclamación como nuevo emir de *ʿAbd al-Wahid*. Estas disputas facilitaron que el gobernador de Jaén *al-Bayyasi* asumiera el control de un gran territorio tanto en Jaén como en Córdoba (Aguirre y Jiménez, 1979:226-227). No obstante, y debida a su limitada fuerza militar, *al-Bayyasi* pidió apoyo al rey Fernando III. En cierta medida, esto permitió que el ejército cristiano realizara incursiones de conquista en territorios que no pertenecían al gobernador de Baeza, pudiendo asumir distintos territorios cercanos a los ríos Guadalquivir y Guadalimar. Tras el vasallaje de *al-Bayyasi* a Fernando III, este recibió Andújar, Martos, Baños, Capilla, Salvatierra y el Alcázar de Baeza en 1226, a cambio el gobernador musulmán, pudo con sus tropas, atacar el reino de Sevilla (Eslava, 1984:5-11).

Ya en 1225, en el territorio andalusí se dan grandes crisis internas intensificadas por las victorias de las tropas cristianas sobre los Almohades, lo que a la postre suponía el incremento abusivo de tributos por parte de estos, que causó un aumento del descontento entre la población musulmana, así como una continua lucha entre varios jefes andalusíes. Entre ellos, destaca *Ibn Hud* (1228) que consiguió grandes victorias aunando gran parte del territorio de *al-Ándalus* (Aguirre y Jiménez, 1979: 238-240). No obstante, y debido a posteriores derrotas y pérdidas como Sabiote y Jódar en 1230, además de Quesada en 1231, surgieron algunas oposiciones como fue el caso de *Ibn al-Ahmar* que se sublevó en Arjona en 1232. Esto permitió a Fernando III ocupar la ciudad de Úbeda (1235), Iznatoraf y Santiesteban del Puerto (1235) (Castillo y Alcázar, 2006).

Los sucesivos acuerdos de *Ibn al-Ahmar* con Fernando III, para enfrentarse a *Ibn Hud*, permitió al musulmán acrecentar sus posesiones en 1236, logrando en 1238 controlar la ciudad de Granada, a la que convirtió en la capital de su reino. Terminados los pactos intentó recuperar los territorios conquistados por los cristianos, pero ante varios fracasos como en Martos, los castellanos terminaron por conquistar Porcuna en 1241 y Arjona en 1244, finalizando con la

toma de la ciudad de Jaén, por Fernando III en 1246 (Eslava, 1999:122-125), sin no antes conquistar las plazas de Mengíbar, Pegalajar, la Guardia, Carchel y otros castillos de Sierra Mágina.

Al final, *Ibn al-Ahmar* fue obligado a entregar la ciudad de Jaén en 1246, a la vez que se declaraba vasallo de Fernando III. A cambio, se le reconocía su soberanía en el territorio al Sur de las Cordilleras Béticas (Castillo y Alcázar, 2006).

Con posterioridad durante los siglos XIV y XV, al borde de la caída del reino de Granada, tanto Ordenes Militares como la nueva nobleza de servicio, reacondicionan muchos de las fortificaciones pasando a ser en algunos casos sus residencias rurales o centros de poder político o económico, lo que supone construcciones de esbeltas torres del Homenaje y nuevas dependencias para diversos usos. Posteriormente con la caída del reino Nazarí de Granada, esta actividad de construcción y consolidación se paraliza tanto en tierras de realengo como señoriales, de esta forma los Reyes Católicos pretenden frenar los diversos conflictos surgidos entre nobles (Castillo y Castillo, 2002).

Es fácilmente entendible que, debido a las fluctuaciones propias de una conquista territorial, el reino de Jaén se convirtió en un espacio de frontera donde cristianos y musulmanes luchaban por el control del espacio, sus explotaciones agrícolas y sus pobladores, lo que supuso que ambos bandos emprendieran una exhaustiva fortificación de sus líneas construyendo nuevas fortalezas o reforzando la existentes (Castillo y Castillo, 2003:183-188).

Es fundamentalmente durante el periodo 1242-1246 y una vez finalizadas las treguas entre Fernando III y *Ibn al-Ahmar* e *Ibn Hud*, cuando solamente queda la conquista de la zona de campiña, en manos musulmanas, más concretamente las plazas urbanas de Arjona y Jaén, cuando los musulmanes construyen diversas fortificaciones en las áreas de influencia de los principales núcleos de población (Ilust. 25 – Anexo 1), de forma que se construyen los castillos de El Berrueco, Torredelcampo, Fuentetetar, El Término, Torre Benzalá, etc. (Castillo y Alcázar, 2006).

Con la conquista de muchas de estas fortificaciones, estas pasaron a manos de encomiendas como la de Calatrava o la de Santiago que reaprovecharon algunas de las construcciones preexistentes.

En diversas investigaciones arqueológicas realizadas en fortificaciones se ha constatado que, durante el siglo XIX y debido a su anterior abandono, muchos de los castillos, torres, etc., se integraron en cortijadas o sus materiales fueron reutilizados en la construcción de los mismos.

Ya Jimena Jurado (1639), documenta y describe por medio de texto y dibujo la situación en ese momento de la fortificación de Torre Benzalá (Ilust. 26 – Anexo 1).

“Este lugar está hoy despoblado, que ni aún iglesia ha quedado en él, sino solamente algunos cortijos, está en el término de Martos, entre esta villa y la de Arjona, distante de cada una de ellas dos leguas y media. La población era en un cerro alto el castillo, y en la falda meridional por donde pasa el camino real que va de Porcuna a Jaén, estaban las casas y calles de aquel pueblo, que hoy se ven grandes ruinas de todo. Y es del tiempo antiguo de los Romanos por los rastros de edificios suyos que allí se encuentran y pedazos de estatuas, y inscripciones, una de las cuales tiene el nombre antiguo que era ORDO BATORES. Despoblase este lugar haría 200 años como consta por escrituras antiguas. El castillo tiene sitio muy resistente y fuerte por naturaleza en un cerro que seroñea toda la campiña”

De estas palabras podemos entender que, en esa época, el lugar ya se encontraba despoblado, aunque seguía en pie gran parte de la fortificación, que como puede observarse en el dibujo tendría planta triangular con recinto amurallado almenado y torres en las esquinas, una circular que cobija la entrada y otra cuadrada (la que aún se conserva). En todas ellas se observan huecos y saeteras, algo que no es lógico en el torreón compacto que estudiamos. También se puede observar una torre del homenaje circular en su interior, que normalmente era utilizada como residencia de la guarnición (Cerezo y Eslava, 1989).

Por último, y a modo de cierre del capítulo, cabe señalar que desde el 22 de abril de 1949 (BOE-A-1949-4615), se protegió de forma general lo que quedaba de la fortificación de Torre Benzalá. Posteriormente en 1972 (BOE-A-1972-927), se declaró de utilidad pública las obras y servicios necesarios para la revalorización del yacimiento arqueológico de Torre Benzalá (Jaén) y del entorno y ambiente propios del mismo. Finalmente, en 1985 con la ley de Patrimonio Histórico Español (BOE-A-1985-12534), se declaró al lugar arqueológico y conjunto arquitectónico como Bien de Interés Cultural (BIC), gozando desde ese momento del mayor grado de protección que permite la legislación española en la actualidad.

Capítulo IV. Proyecto fotogramétrico de Torre Benzalá

4.1. Introducción

Hoy en día se puede pensar que cualquier persona con una buena cámara fotográfica y con un *software* especializado puede realizar una reconstrucción fotogramétrica. En cierta manera, esto es cierto, pero también cabe señalar que la rigurosidad del modelo depende de la calidad de las imágenes fotográficas obtenidas, así como de la metodología de trabajo utilizada. Por este motivo, es necesario que se trabaje con fidelidad, sistematización y rigurosidad para poder dar fiabilidad a la técnica y metodología empleada (Giné, 2018).

En la actualidad, existen diversos *softwares* de fotogrametría en el mercado. Algunos de ellos son bajo licencia y otros se tratan de programas abiertos o libres para su utilización por la sociedad o la comunidad académica. Esta diversidad de posibilidades obliga a un constante reciclaje por parte del investigador y plantea la problemática de la obsolescencia de la información generada en los modelos 3D y su posterior almacenamiento en algún tipo de soporte que lo haga perdurable en el futuro para su estudio.

La realización de tomas fotográficas desde un RPAS, tiene la ventaja de reducir en gran medida la perspectiva, aunque permanezca la deformación debido a la lente, no obstante ubicar cada elemento en su contexto próximo y a través de puntos de referencia se podría proceder a una rectificación de la deformación óptica hasta la creación de una ortoimagen, es decir una imagen sin perspectiva y con todos los elementos a la misma escala (Fernández, 2018).

4.2. Elaboración proyecto fotogramétrico de Torre Benzalá

Para realizar el proyecto fotogramétrico es necesario realizar una planificación del mismo, que se debería dividir en tres etapas diferenciadas y que a continuación se describen.

4.2.1. Planificación previa en campo y gabinete

El primer paso consiste en el estudio y preparación del espacio de trabajo, puesto que no es lo mismo realizar un proyecto fotogramétrico de una pieza de museo que, como en nuestro caso, el de una torre perteneciente a una fortificación medieval. Para ello, se ha de visitar *in situ* previamente el emplazamiento de bien arqueológico, para poder valorar la accesibilidad al mismo, el nivel de protección que pueda poseer el yacimiento, autorizaciones administrativas para poder realizar las tomas de datos, así como prever cuantas dificultades pueda surgir el día de la salida de campo para la obtención de información.

Otro elemento a tener en cuenta sería las horas de exposición solar que asume en nuestro caso la torre y que puede dificultar las tomas fotográficas a causa de las sombras y luces que recibe. Además, hay que analizar la existencia de algún tipo de dificultad añadida, como cercanía de arbolado o cableado aéreo de alta tensión que dificulte el vuelo del dron.

En el caso de Torre Benzalá el acceso se realiza desde la carretera A-321, término municipal de Torredonjimeno, de donde surge carril acondicionado para circulación agrícola de explotación de olivar en buenas condiciones de tránsito. La torre se encuentra encima de una colina, destinada al cultivo de olivar de secano.

Según la información recabada de la ficha nº 01230870014 del Patrimonio Inmueble de Andalucía:

“Se trata de los restos de un castillo medieval que se localiza en la cima del cerro Ben-Zala, a 544 metros sobre el nivel del mar. Queda situado al norte del Cortijo del Marqués, a 430 metros. Este promontorio se encuentra rodeado de olivares, en el paraje de Aldea Las Casas, a unos 10 km de la localidad de Torredonjimeno por la carretera a Santiago de Calatrava. Se trata de un castillo rural fechado en la época inmediatamente posterior a la conquista castellana y al Pacto de Jaén. Existe constancia documental de que aún estaba poblado en 1347. El lugar es también un antiguo poblado íbero. De este castillo se conservan los restos de la cimentación de una torre de grandes dimensiones, que pudo ser la del homenaje, así como un montículo que podría albergar restos y otros vestigios. Se conservan algunos paramentos de argamasa, pero el conjunto está muy deteriorado”.

Una vez recogidos todos estos datos, además de un estudio de la contextualización histórica de la Torre, que nos ayudarán a planificar los vuelos del dron, debemos calcular los parámetros necesarios según la metodología denominada SfM (*Structure from Motion*) para realizar las tomas fotográficas de la Torre Benzalá (Ilust. 27 – Anexo 1) y siguiendo las recomendaciones de Vidal (2011:20).

“Las bases del SfM son similares a las de la fotogrametría estereoscópica, es decir, permite realizar modelos tridimensionales empleando grupos de imágenes no estructuradas, lo que implica la necesidad de un solape entre ellas. Este solape es necesario para identificar los distintos puntos homólogos, o puntos clave, en cada imagen. El proceso se inicia con una estimación de las distintas posiciones de la cámara, y las coordenadas del objeto se van refinando iterativamente, empleando para ello ecuaciones no lineales resueltas por mínimos

cuadrados. Para este desarrollo es necesario que los objetos en las imágenes tengan una amplia gama de características, es decir, que dispongan de una rica textura”

Por lo tanto, usando la metodología SfM, podremos generar una nube de puntos de forma que, siguiendo el principio de triangulación automática, se podrá construir modelos tridimensionales.

Según Vidal (2011), *“para entablar un sistema óptimo de posición para la toma se emplea una relación de “b/h”, donde “b” es la distancia entre los pares de imágenes (horizontales o verticales) y “h” la altura del objeto. También es importante analizar la toma de los pares de imágenes, a fin de obtener un solape entre fotografías de alrededor de un 60% en visión estereoscópica”*.

Cabe señalar al respecto que, la obtención de un mayor número de puntos será dependiente en gran medida de la textura y por supuesto de la resolución de la imagen. No obstante, hay que considerar que se aumentarán los tiempos de procesado con un mayor número de puntos obtenidos.

4.2.2. Toma de información en salida de campo

En este caso, y debido al volumen y altura de la Torre Benzalá, se determinó que la herramienta más económica, con menor coste temporal y mejor resultado para la realización de las tomas fotográficas sería la utilización de RPAS o dron, siguiendo la metodología *Structure from Motion* (SfM). Esta técnica se inspira en la fotogrametría partiendo del mundo de la visión artificial, permitiendo modelos 3D a partir de grupos de imágenes no estructuradas, ni cámaras calibradas e incluso utilización de cámaras diferentes (Pereira, 2012).

En este caso, no se ha tenido disyuntiva en la elección del tipo de cámara puesto que se estaba determinado por la instalada en el dron DJI Mavic FC220 UAV (Ilust. 28 – Anexo 1), que posee un objetivo luminoso, con amplia apertura de diafragma y posibilidad de distancia focal fija. Además, la cantidad de megapíxeles de la cámara era congruente con el equipo informático y *software* en el que íbamos a procesar las imágenes y con las necesidades de precisión de nuestro proyecto. Más importante si cabe es el tamaño del pixel, que depende del sensor de la cámara. Un buen sensor captará píxeles mayores y, por tanto, píxeles que muestren más detalles en las zonas de la foto de iluminación difícil (Ballester, 2016).

El siguiente paso dado fue la obtención de las fotografías. Esta fase es determinante para poder obtener un resultado fotogramétrico óptimo y que marcará la calidad del modelo fotogramétrico obtenido. Algunas de las recomendaciones para las tomas fotográfica que hay

que tener en cuenta en cualquier proyecto fotogramétrico sería la utilización de una distancia focal fija como los 35 o 50 mm, de forma que, si utilizamos un zoom, debemos mantener la misma distancia focal en todas las imágenes. Por otro lado, debemos evitar las fotos con zonas desenfocadas, para evitar errores al modelarlas, esto lo conseguiremos utilizando una profundidad de campo cerrando el diafragma ($f/16 - f/22$) y por último para evitar que la imagen salga movida debemos utilizar una velocidad de disparo corta ($1/125$ o $1/60$) (Ballester, 2016).

En este proyecto se tuvo en cuenta la iluminación de la Torre que debía ser lo más difusa posible, siendo ideal y en la medida de lo posible la realización de las mismas en un día nublado, como fue en nuestro caso, lo que ayudará a que no existieran contraluces en las imágenes tomadas.

Antes de la realización del vuelo, tuvimos que realizar una planificación previa para cerciorarnos de que el mismo se realiza con seguridad.

Por supuesto, el operador han de tener toda la documentación en regla. Pero además habrá que preparar cada vuelo teniendo en cuenta las diferentes características que puedan afectar a su operación. Desde características propias de la aeronave, como que este dentro de sus límites de peso y de *performance*, hasta una revisión previa de las condiciones meteorológicas para el día del vuelo, donde se incluye el comprobar si vamos a tener condiciones meteorológicas visuales ideales, cuál será la presión atmosférica, si el viento estará dentro de límites establecidos o que temperatura exterior habrá y que pueda afectar a la *performance* de la aeronave.

Gracias a la planificación previa en campo, se tuvo en cuenta los posibles obstáculos que pudieron interferir en el vuelo y supusieran un riesgo para la operación del mismo. En nuestro caso, se tuvo la precaución debida por la cercanía de varios olivos al Torreón.

Siempre hay que pensar que cuanto más tiempo le dediquemos a la planificación de un vuelo, menores serán los riesgos que podemos encontrar y por lo tanto mayor será la seguridad que tenga la operación.

Según la planificación realizada en gabinete según metodología SfM (Anexo nº II) se calculó una serie de disparos paralelos con solapes laterales y superiores e inferiores a modo de mosaico de fotografías convergentes entre sí (Ilust. 29 – Anexo II), que en función de los datos del sensor de la cámara del RPAS/dron, como del detalle mínimo y óptimo de la torre que deseábamos fotografiar, así como de la escala del fotograma, nos indicaba una distancia de disparo a la torre, para las tomas generales de: 7,754 metros y para las tomas de detalle, una distancia de la torre de 1,551 metros.

A su vez la distancia entre disparos fotográficos de las tomas generales fue de 2,01 metros, lo que alcanzaría un recubrimiento longitudinal de 8,06 metros. En el caso de la distancia entre disparos fotográficos de las tomas de detalle se hicieron a 0,39 m, para alcanzar un recubrimiento transversal de 1,56 metros. El cálculo del recubrimiento longitudinal se hizo al 80% mientras que el recubrimiento transversal se calculó con un 40% de solape (Anexo II).

Las tomas fotográficas se pueden programar siguiendo un plan de vuelo determinado, pero en Torre Benzalá esta opción no era viable debido a la existencia de diversos olivos que dificultaba su programación, por lo que se adoptó la decisión de realizar vuelos manuales ascendentes en cada uno de los lados y esquinas de la torre, con tomas fotográficas horizontales con solapamiento según los cálculos realizados previamente.

Para poder realizar un modelo escalado y georreferenciar Torre Benzalá se realizó una serie de mediciones de puntos de control (Ilust. 31 y 32 - Anexo nº. III) con la utilización de dianas (Ilust. 33 - Anexo nº. III) que previamente señalizamos en la Torre. Además, y aprovechando la cercanía del punto geodésico de Torre Benzalá, se realizaron las mediciones para poder escalar el modelo además de obtener un producto cartográfico georreferenciado en el sistema UTM (ETRS89), que es el sistema de referencia oficial empleado en toda la cartografía nacional (Ilust. 30 – Anexo 1).

4.2.3. Trabajo en gabinete

El trabajo en gabinete hace referencia fundamentalmente al procesado de la información recabada en la salida de campo. Esta consta de las tomas fotográficas y de las coordenadas de los puntos de control que fueron georreferenciados.

Para poder realizar todo este procedimiento automático se ha utilizado el *software Agisoft PhotoScan*, *software* de código cerrado, que procesa imágenes digitales mediante la combinación de técnicas de fotogrametría digital y visión por ordenador generando una reconstrucción 3D. Este programa proporciona un conjunto de herramientas para la creación de contenidos tridimensionales en general, para su posterior reproducción, modelado, digitalización de objetos o escenarios.

Existen en el mercado otros tipos de *software* de código abierto como es el caso de VisualSfM. Es importante que el programa que vayamos a emplear en el proyecto nos permita realizar una serie de tareas esenciales y resultados como son:

- Reconstrucción de la toma: permitiendo diversidad de orientaciones como interna, externa o relativa.

- Reconstrucción de la geometría del objeto: Densificación de nubes de puntos, creación de mallas o superficies poliédricas, o modelos tridimensionales.
- Creación de la textura fotográfica del modelo utilizando las propias imágenes.
- Extracción de productos derivados: ortoimágenes de plantas o alzados, modelo de elevación digital, exportación ortomosaica georeferenciada, etc.
- Medidas: distancias, áreas, volúmenes.

Sin ánimo de ser exhaustivos, mostramos a continuación de una forma visual el flujo de trabajo realizado con el programa *Agisoft PhotoScan* utilizando las imágenes de las tomas generales. No obstante, para obtener los resultados finales que presentamos en este trabajo final de grado, aplicamos al procesamiento tanto las tomas generales como las imágenes de detalle.

El primer paso es familiarizarse con la interfaz de trabajo del programa (Ilust. 1), donde se encuentran cuatro zonas bien diferenciadas.

1. Espacio de trabajo. Se muestra los distintos pasos y resultados del flujo de trabajo desarrollado.
2. Zona de visualización en perspectiva 3D, de la disposición de puntos, tomas fotográficas y resultados obtenidos.
3. Zona de visualización de imágenes: Lugar donde visualizamos las fotografías con las que se está trabajando en el proyecto.
4. Referencia: Campo reservado al trabajo con coordenadas de georreferenciación según el sistema utilizado.

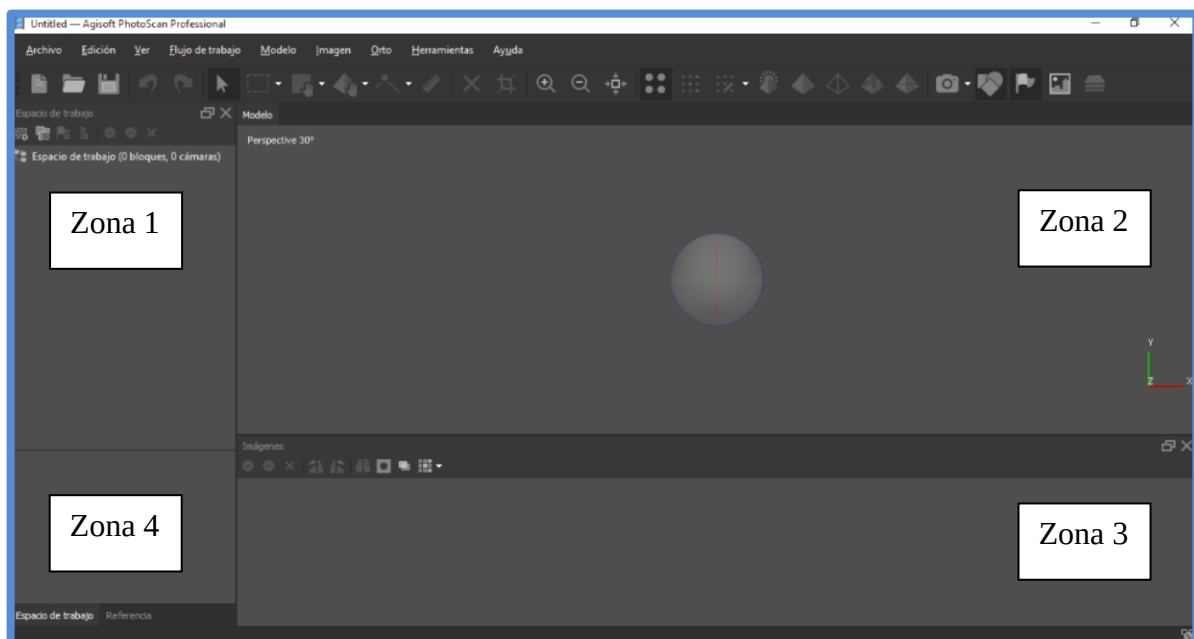


Ilustración 1 Interfaz de trabajo software. Fuente propia. Agisoft PhotoScan.

El primer paso a realizar es la importación de las imágenes con las que vamos a trabajar el modelo fotogramétrico (Ilust. 2).

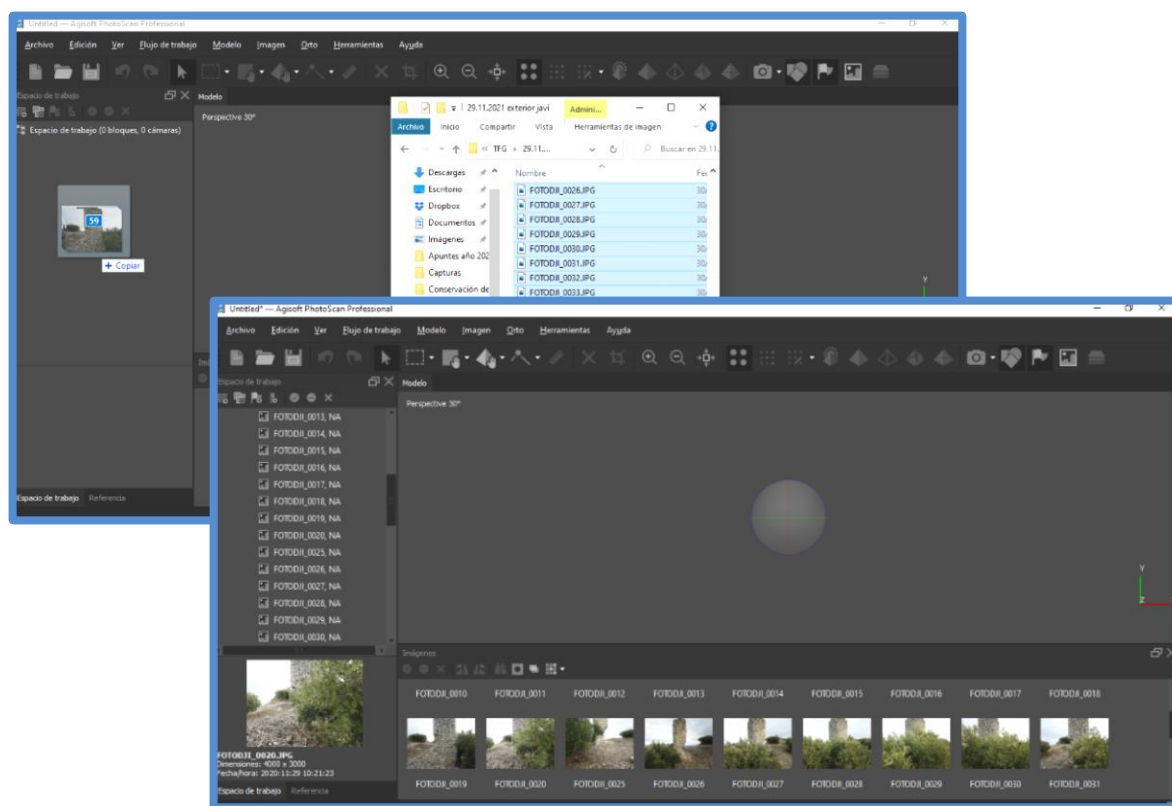


Ilustración 2 Interfaces de importación de imágenes. Fuente propia. Agisoft PhotoScan.

En un paso posterior se realiza la orientación de las cámaras (si es necesario, se eliminan cámaras, previamente) (Ilust. 3). El sistema nos informa de los parámetros de la cámara utilizada en el dron. En nuestro caso el tamaño del pixel es de 1,5 x 1,5 mm y se ha utilizado una distancia focal de 4.73 mm. Este paso lo realiza el *software* según los parámetros que indiquemos, de forma que se obtienen la orientación de las fotografías tomadas según unas coordenadas x, y, z en un espacio tridimensional que observamos en la pantalla (Ilust. 4). Por otro lado, el programa identificará los puntos homólogos en una nube de puntos dispersa que mostrará un primer retazo del modelo. Suele ser conveniente la eliminación de algunos puntos que pueda crear distorsiones en el mismo. Además, se deberá señalar la tipología de georreferenciación de los puntos de apoyo utilizada (Ilust. 5).

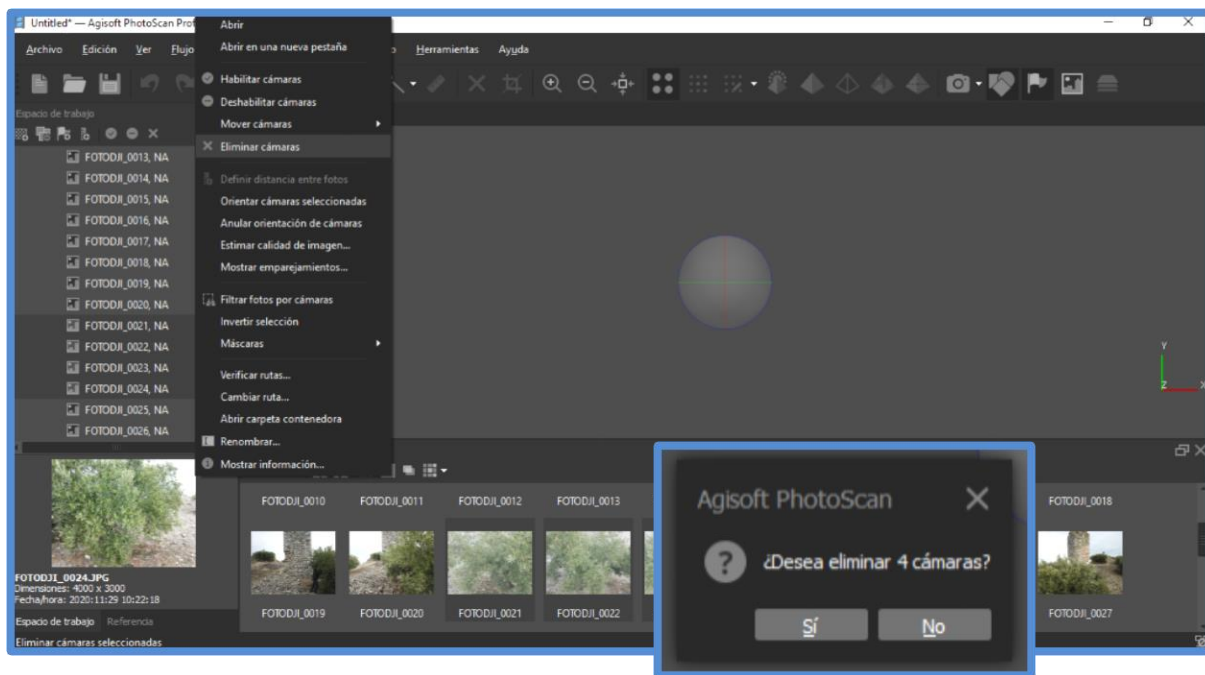


Ilustración 3 Interfaces para la eliminación de cámara o fotografías. Fuente propia. Agisoft PhotoScan.

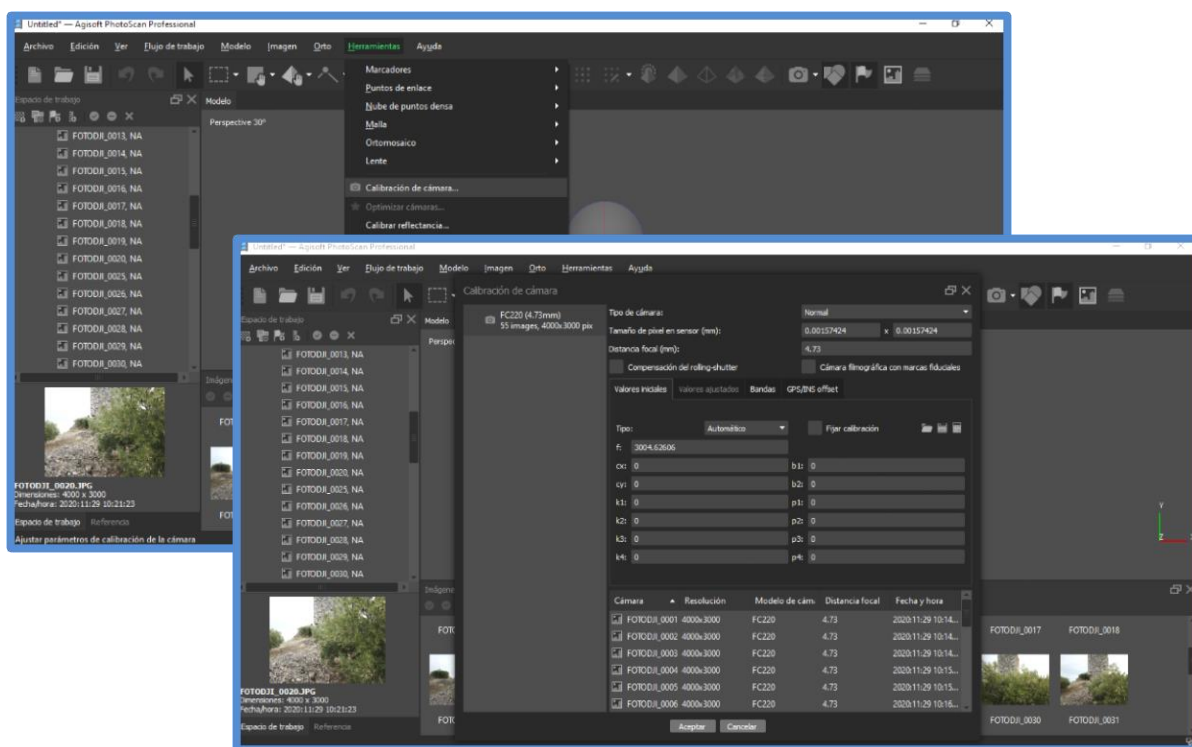


Ilustración 4 Interfaces para la calibración de cámaras. Fuente propia. Agisoft PhotoScan.

En la pantalla de referencias tenemos que señalar la tipología de georreferenciación o sistema de coordenadas que utilizamos (ETRS89/LCC Europe (EPSG:3034) (Ilust. 5), puesto que Agisoft *PhotoScan* utiliza por defecto la referencia GPS del dron.

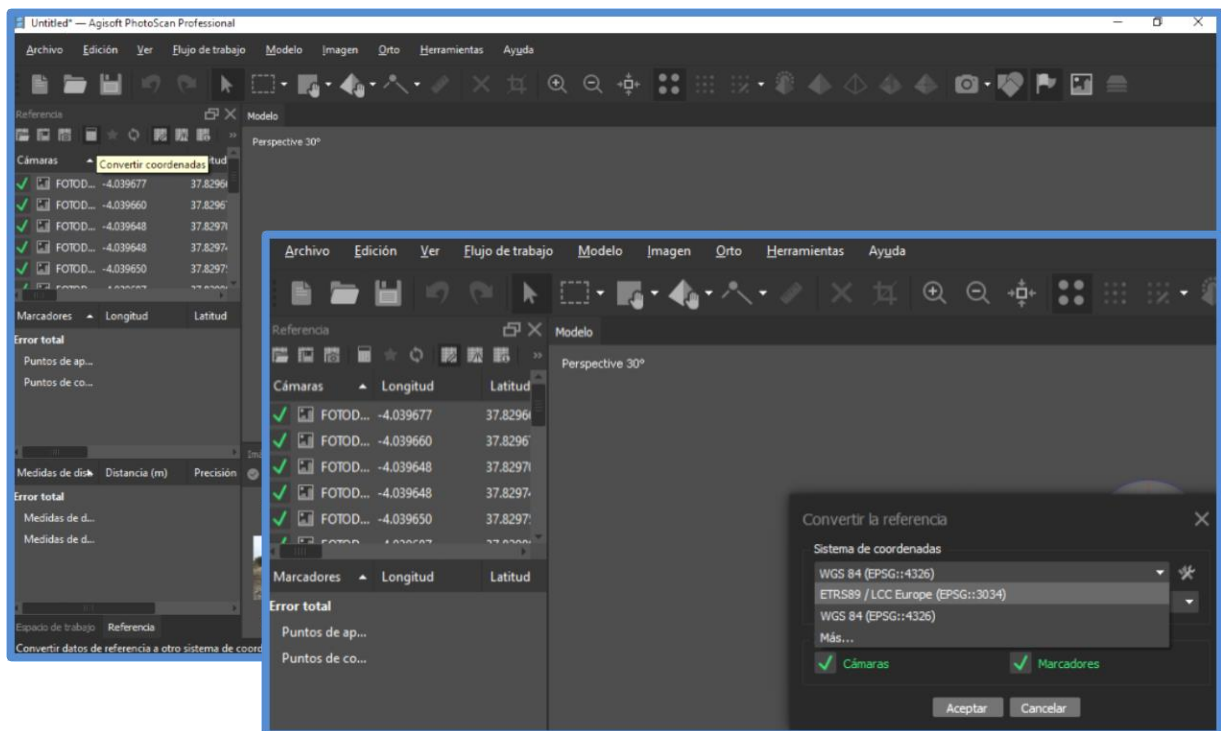


Ilustración 5 Sistema de coordenadas que utilizamos (ETRS89/LCC Europe (EPSG:3034)).
Fuente propia. Agisoft PhotoScan

Posteriormente pasamos a trabajar con los puntos de control que marcamos en la Torre. Para ello cliqueamos en la pestaña de referencias y abrimos el archivo de texto donde tenemos expresados las distintas coordenadas halladas en la salida de campo, según la forma de georreferenciación que habíamos indicado con anterioridad (Ilust. 6, 7 y 8).

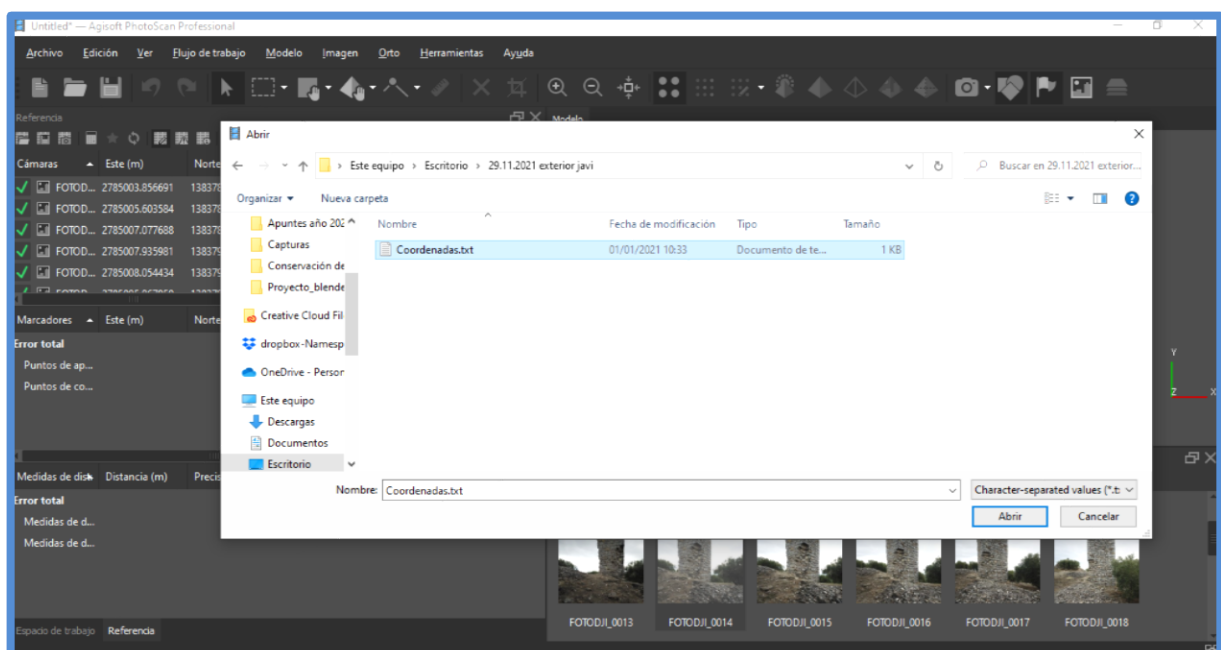


Ilustración 6 Abrir archivo de coordenadas de los puntos de control. Fuente propia. Agisoft PhotoScan

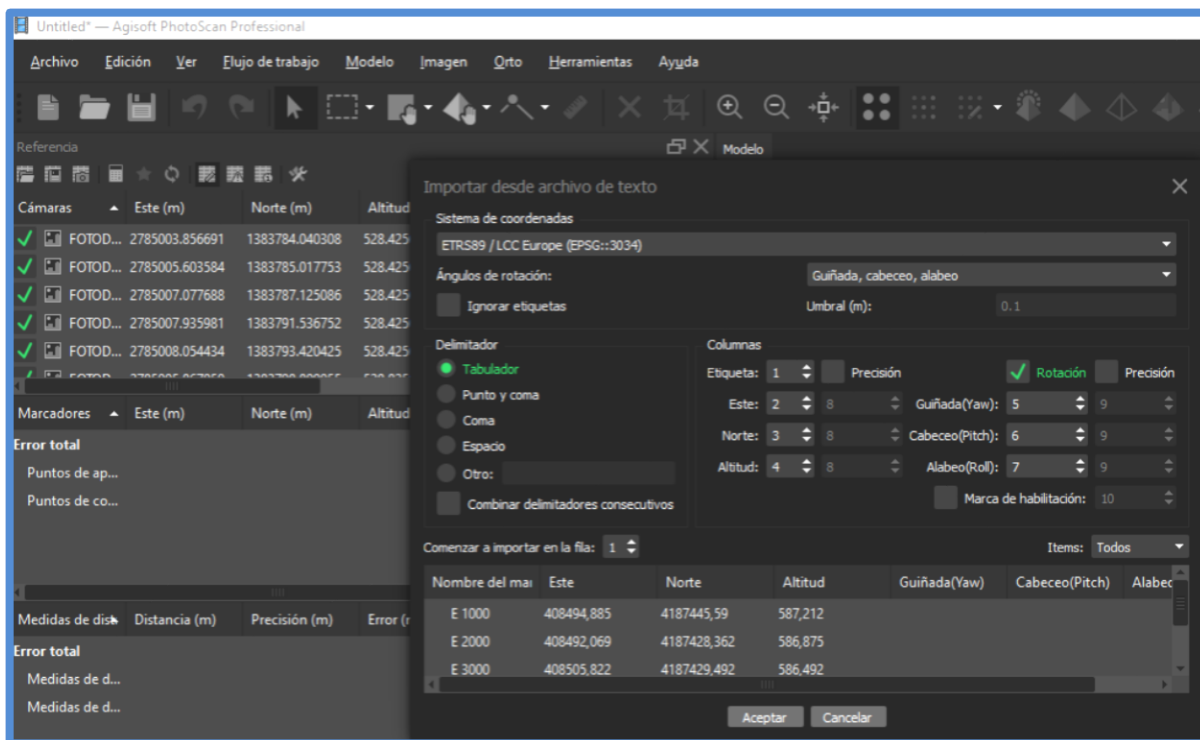


Ilustración 7 Importación de coordenadas de los puntos de control. Fuente propia. Agisoft PhotoScan

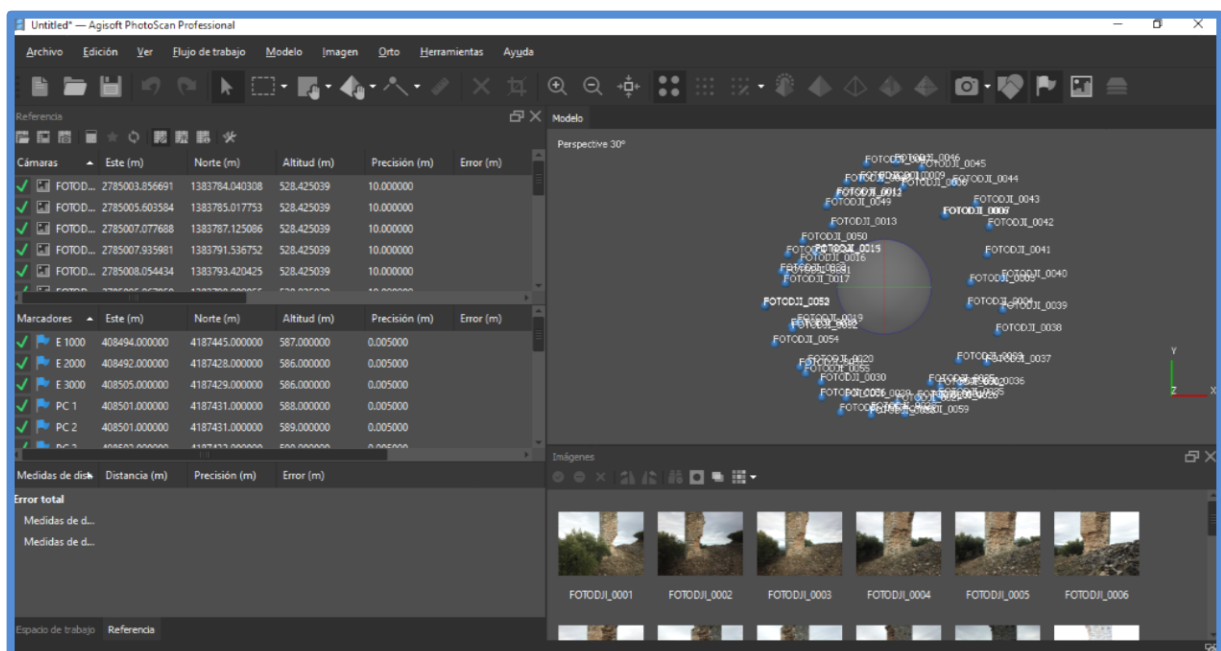


Ilustración 8 Interfaz una vez importado referencias de los puntos de control. Fuente propia. Agisoft PhotoScan

A continuación, orientamos las fotografías con precisión “alta” de forma que afine en un primer momento la detección de puntos, posteriormente realizará un emparejamiento de puntos; seleccionando emparejamientos, buscando puntos homólogos y estimando las posiciones de las cámaras. Finalmente nos aparece la siguiente interfaz con las imágenes orientadas en relación a la Torre (Ilust. 9).

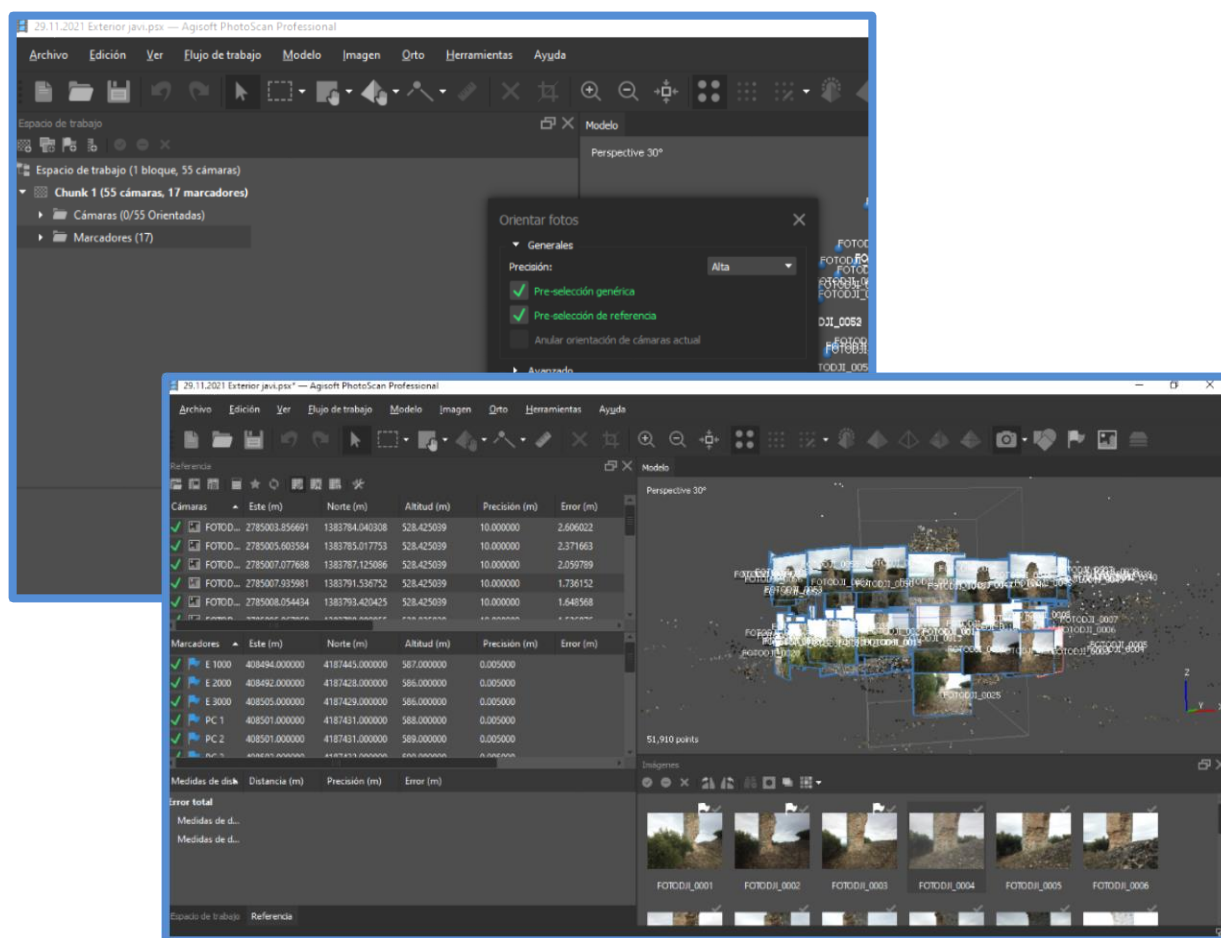


Ilustración 9 Interfaces de orientación de imágenes y resultado final. Fuente propia. Agisoft PhotoScan

El siguiente paso es la de identificar los marcadores con los puntos de control georreferenciados y colocados en la torre y que aparecen en las imágenes. Filtrando fotografías por marcadores será más asequible identificar los puntos en las mismas (Ilust. 10).

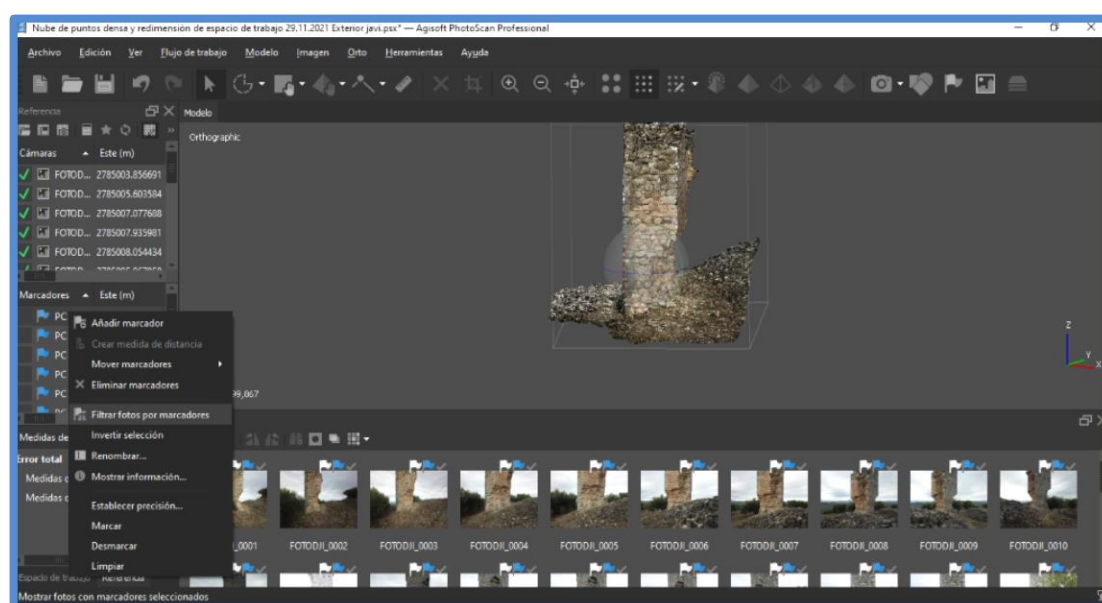


Ilustración 10 Filtrado de puntos por marcadores. Fuente propia. Agisoft PhotoScan

Posteriormente se recalculan las posiciones de las cámaras a partir de los puntos de control, escalando y orientando el modelo de la nube de puntos dispersa (Ilust. 11), y se genera la nube de puntos densa (generando mapas de profundidad) (Ilust. 13 y 14), y de la malla que en función del conjunto de fotografías y la capacidad de trabajo del ordenador utilizado, nos supondrá mayor o menor tiempo de procesamiento. Es recomendable señalar la característica de la nube de puntos densa que queremos obtener y una vez obtenida, realizar el limpiado de los puntos incoherentes que puedan aparecer (Ilust. 12), de forma que se pueda realizar la configuración de la malla, todo este proceso lo realizará automáticamente el *software* triangulando la nube de puntos. De esta forma tendremos al final un modelo tridimensional.

Para la creación de nubes de puntos tendremos en cuenta a Westoby para mejorar la calidad del modelo tridimensional con una óptima toma fotográfica con dron.

“El número de puntos obtenidos por la orientación de las imágenes depende de la textura y de la resolución de la imagen. A mejor resolución, mejores resultados se obtendrán, aunque también se incrementarán los tiempos de procesado de las imágenes. Por ello se puede escoger una resolución media en el exterior, debido al gran número de interferencias que existen en la ejecución de la nube de puntos, como por ejemplo la vegetación cercana o elementos a media-larga distancia.” (Westoby et al, 2012, p. 302)

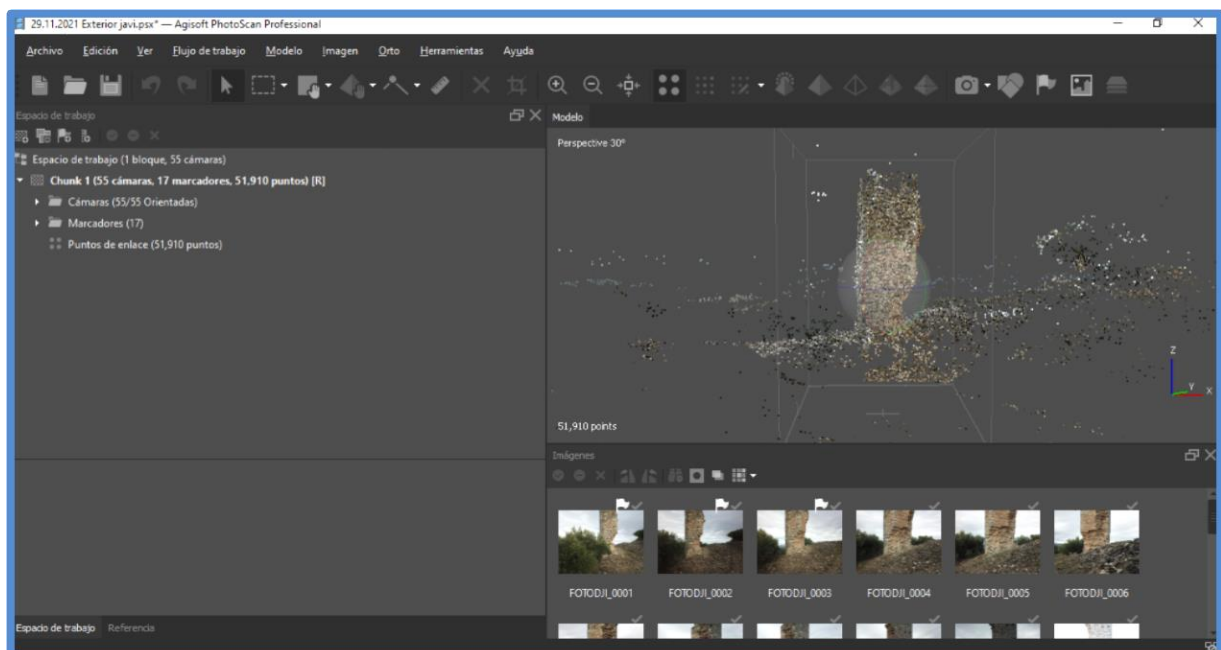


Ilustración 11 Interfaz una vez creada la nube de puntos dispersa. Fuente propia. Agisoft PhotoScan

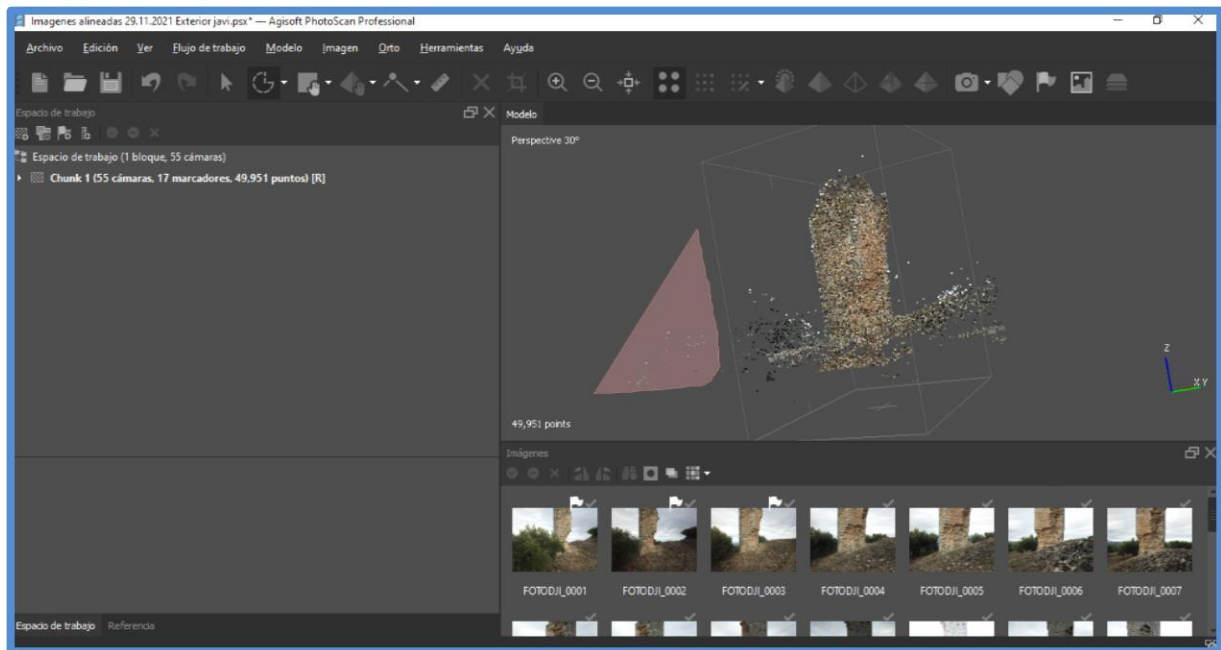


Ilustración 12 Limpieza de puntos incoherentes en el modelo 3D. Fuente propia. Agisoft PhotoScan

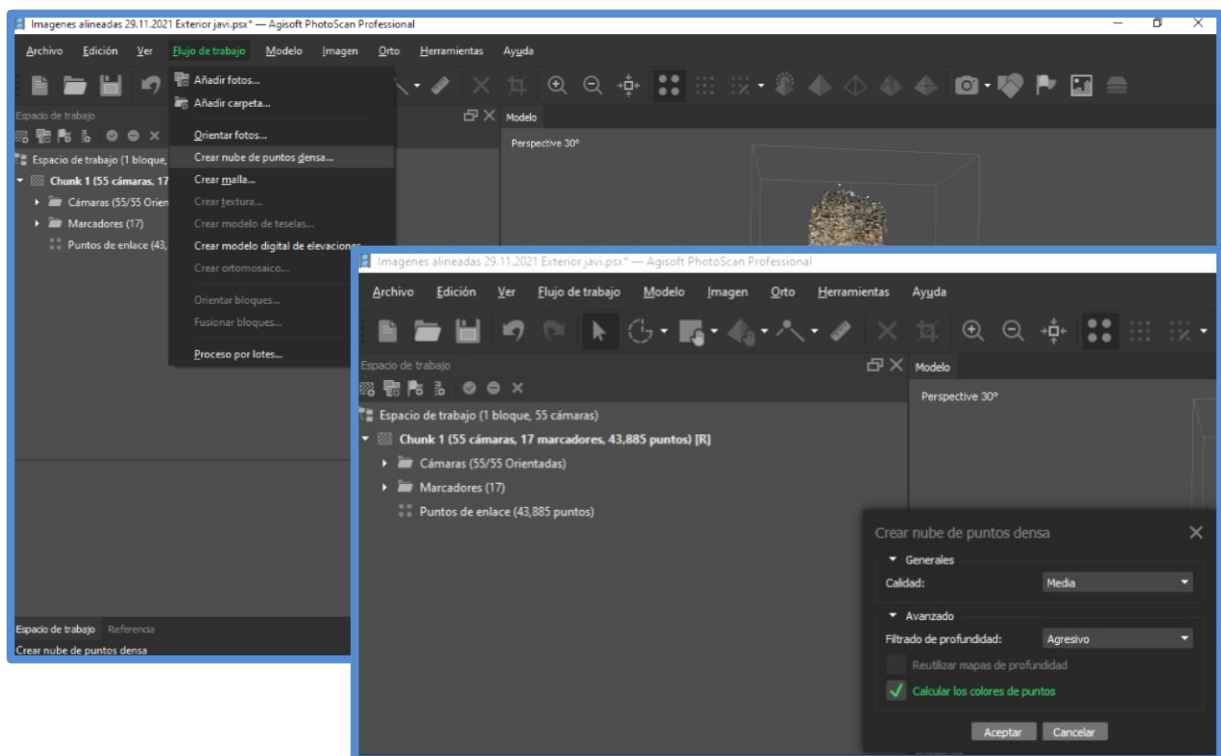


Ilustración 13 Creación de nube densa. Fuente propia. Agisoft PhotoScan

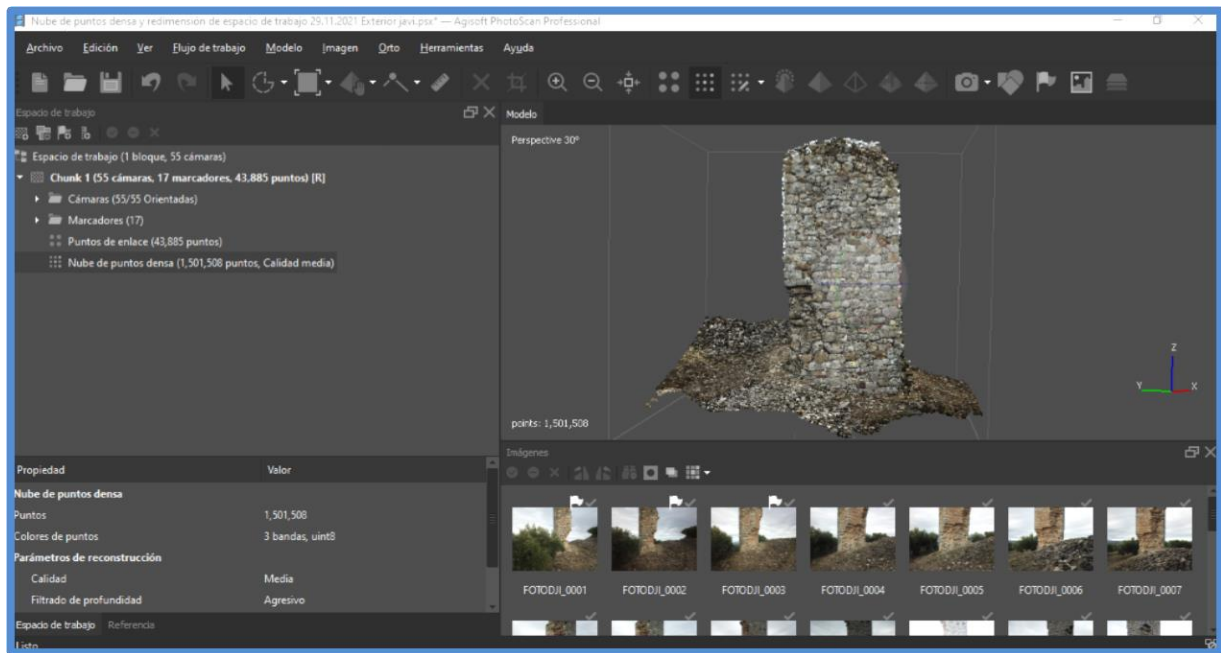


Ilustración 14 Interfaz de nube densa. Fuente propia. Agisoft PhotoScan

Por último, se encuentra la fase de creación de la textura consistente en la reproducción lo más fiel posible del color y textura del modelo con la realidad capturada, además de la creación de las ortoimágenes escaladas de los cuatro paramentos y la cubierta de Torre Benzalá (Ilust. 34, 35, 36, 37, 38) así como la obtención del modelo digital de elevaciones (MDE), tanto del alzado como de la cubierta (Ilust. 39, 40, 41, 42 y 43), pudiéndose visualizar los resultados en el capítulo del Anexo IV.

Capítulo V. Conclusiones

Tenemos la responsabilidad de que la sociedad pueda conocer su legado patrimonial como seña de identidad. Una correcta documentación de nuestro patrimonio es necesaria para realizar posteriores estudios arqueológicos e históricos, así como, acciones que potencien y favorezca la restauración y conservación del mismo, como ocurre en Torre Benzalá.

Este trabajo final de grado ha podido evidenciar que la utilización de las nuevas tecnologías, siempre de la mano de la ciencia arqueológica, previos estudios multidisciplinares históricos, geoarqueológicos, arqueológicos, etc., dan resultados de calidad milimétrica en cuanto a información y registro arqueológico tridimensional 3D, para un posterior estudio bajo otros prismas disciplinares o científicos.

Por otro lado, la utilización de las técnicas fotogramétricas, así como de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) han demostrado ser una metodología válida para el estudio arqueométrico de construcciones medievales, como es el caso de nuestro trabajo en Torre Benzalá. Además, se ha comprobado útil la utilización de RPAS/drones en este proyecto arqueológico. En nuestro caso, ha sido una ventaja tanto económica como temporal. La utilización de esta herramienta para la realización de las tomas fotográficas ha cumplido con precisión los requisitos solicitados en los cálculos previos, realizados con la metodología *Structure from Motion* (SFM).

En este trabajo hemos podido documentar la relevancia del lugar arqueológico de Torre Benzalá, basándonos en el estudio previo geoarqueológico y su contexto histórico, acudiendo tanto a las fuentes escritas como epigráficas existentes de la zona de estudio.

Por último, y no por ello menos importante, hemos documentado por medio de ortoimágenes, modelos digitales de elevación, tanto de alzado, como de la cara superior, de la precaria situación de conservación de Torre Benzalá.

Quizás con este trabajo final de grado podamos no tener que emplear el lamento que José Ramón Belida publicaba, en 1919, en el Boletín de la Real Academia de Historia:

“Solamente el abandono, la costumbre nacida de la ignorancia que mira los castillos como construcciones inservibles, y, a veces, los mira codiciosos de aprovechar sus materiales, son causas que, por lo general, contribuyen a arruinar y vejar aún más que el tiempo a tales obras de fábrica”.

Bibliografía

- Aguirre Sádaba, F. J. y Jiménez Mata, M. C. (1979). *Introducción al Jaén Islámico. Estudio geográfico e histórico*. Instituto de estudios Giennenses y Excma. Diputación Provincial de Jaén. Jaén.
- Almagro, A. (2004). *Levantamiento arquitectónico*. Universidad de Granada.
- Ballester, A. M. C. (2016). Práctica y usos de la fotogrametría digital en arqueología. *DAMA. Documentos de Arqueología y Patrimonio Histórico*, (1), 139-157.
- Bendicho, V. M. L. M. (2011). Propuesta para profundizar en La Carta de Londres y mejorar su aplicabilidad en el campo del patrimonio arqueológico. *Virtual Archaeology Review*, 2 (4), 65-69.
- Biblioteca virtual de Andalucía: Recuperado de:
http://www.bibliotecavirtualdeandalucia.es/catalogo/es/catalogo_imagenes/grupo.cmd?path=1014055 (último acceso: 11/12/2020).
- Boletín Oficial del Estado: Decreto de 22 de abril de 1949 sobre protección de los castillos españoles. BOE. 125 de 5 de mayo de 1949. Recuperado de:
<https://www.boe.es/datos/pdfs/BOE//1949/125/A02058-02059.pdf> (último acceso: 20/11/2020).
- Boletín Oficial del Estado: Decreto 1762/1972, de 15 de junio, por el que se declara de utilidad pública las obras y servicios necesarios para la revalorización del yacimiento arqueológico de Torre Benzalá (Jaén) y del entorno y ambiente propios del mismo. Recuperado de:
<https://www.boe.es/boe/dias/1972/07/11/pdfs/A12516-12516.pdf> (último acceso: 20/11/2020).
- Boletín Oficial del Estado: Ley 16/1985, de 25 de junio, del Patrimonio Histórico Español. Recuperado de: <https://www.boe.es/buscar/pdf/1985/BOE-A-1985-12534-consolidado.pdf> (último acceso: 20/11/2020).
- Carta de Londres (2006). La Carta de Londres para el uso de la visualización tridimensional en la investigación y divulgación del patrimonio cultural. Recuperado de:
http://www.londoncharter.org/fileadmin/templates/main/docs/london_charter_1_1_es.doc (último acceso: 18/11/2020).

- Castillo Armenteros, J. C. y Alcázar Hernández, E. M. (2006). La Campiña del alto Guadalquivir en la Baja Edad Media. La dinámica de un espacio fronterizo. *Studia Historica, Historia Medieval*, 24, 155-196.
- Castillo Armenteros, J. C. y Castillo Armenteros, J. L. (2002). Aportaciones arqueológicas al estudio de las fortificaciones señoriales del Alto Guadalquivir (Jaén) entre los siglos XV y XVI. *Mil anos de fortificações na Península Ibérica e no Magreb (500–1500)*. Lisboa: Colibri, 719-732.
- Castillo Armenteros, J. C. y Castillo Armenteros, J. L. (2003). La organización militar de la Orden de Calatrava en el Alto Guadalquivir a través de las investigaciones arqueológicas. *Arqueología y territorio medieval*, 10 (2). 181-206
- Ceraudo, G. (2013). *Aerial Photography in Archaeology. Good Practice in Archaeological Diagnostics: Non Invasive Survey of Complex Archaeological Sites*, en Corsi C., Slapsak B. y Vermeulen F. (ed.). Heidelberg: Springer, 11-30.
- Cerezo Moreno, F. y Eslava Galán, J. (1989). Castillos y atalayas del Reino de Jaén. *Riquelme y Vargas Ediciones, Jaén*.
- Eslava Galán, J. (1984). *La campaña de Quesada*. Cuadernos de Estudios Medievales y Ciencias y Técnicas Historiográficas, nº12-13. Servicios de Publicaciones, Universidad de Granada, pp. 5-23.
- Eslava Galán, J. (1999). *Los castillos de Jaén*. Ed. Osuna. Armilla, Granada.
- Europeana: recuperado de:
https://www.europeana.eu/es/item/2058801/EDH_ad75c7f86e25b695a2eab9d4533ab2ab_a_rtfifact_cho?utm_source=new-website&utm_source=old-website&utm_medium=button&utm_medium=button (último acceso: 16/12/2020).
- Fernández Díaz, M. (2016). Reflexiones sobre la aplicación de tecnologías al trabajo arqueológico y la divulgación científica del patrimonio. *La Linde*, 6, 64-78.
- Fernández Díaz, M. (2018). La profesión de piloto de drones en el ámbito del Patrimonio Cultural y la Arqueología: ciencia y divulgación desde el aire, en A. Galán y D. Pardo, (Coords.). *Las Profesiones del Patrimonio Cultural*. (75-80) Madrid: GE-IIC y ACRE.
- Giné, A. B. (2018). Fotogrametría para la conservación-restauración de bienes culturales. *Unicum. Tecnología C-R*, 57-76
- González González, J. (1946). *Las conquistas de Fernando III en Andalucía*. Hispania, Vol. XXV, Madrid.
- Guzmán Álvarez, J. R. (2004). Geografía de los paisajes del olivar andaluz. *Consejería de Agricultura y Pesca, Junta de Andalucía, Sevilla*.

- Instituto Geológico Nacional. Recuperado de: <https://www.ign.es/web/ign/portal> (último acceso: 16/12/2020).
- Jimena Jurado, M. (1639). Antigüedades del Reino de Jaén. *Biblioteca Nacional de España*. MSS/1180.
- Lista Roja del Patrimonio: Recuperado de <https://listarojapatrimonio.org/> (último acceso: 30/12/2020).
- Moya, J. A. y Muñoz Ojeda, F. J. (2017). Fotogrametría de restos arqueológicos subacuáticos. El modelo del pecio Bou Ferrer. *Actas II Jornadas de Museos y Colecciones Museográficas Permanentes de la Comunidad Valenciana*.
- Mozas Moreno, M. (2018). *Martín de Ximena Jurado: Manuscrito 1180 de la Biblioteca Nacional de España, Arqueología en Jaén en el siglo XVII: monedas y antigüedades*. Editorial Universidad de Jaén.
- Pereira, J. (2012). *Introducción a la Fotogrametría con VisualSFM*. Recuperado de <http://www.jpereira.net/software-revisiones-y-consejos/introducicon-a-la-fotogrametria-parte-1> (último acceso: 23/12/2020).
- Ramírez-Sánchez, J. (2016). *La Organización militar del Concejo de Jaén. Su sistema defensivo*. (Trabajo fin de grado no publicado), Universidad de Jaén, Andalucía.
- Red Digital de Colecciones de Museos de España. CERES. Recuperado de: <http://ceres.mcu.es/pages/SimpleSearch?index=true> (último acceso: 16/12/2020).
- Rodríguez, E. M. M. (2017). Reflexiones sobre promoción y colonización del Alto Guadalquivir en época césaro-augústea. *Gerión*, 35 (2), 491.
- Salvatierra Cuenca, V. (1995). *Guía arqueológica de la Campiña de Jaén*. El Legado Andalúsí, Granada.
- Salvatierra Cuenca, V. (1996). Jaén en la Edad Media. La historia de Jaén y sus Provincias. *Diputación provincial de Jaén*, Jaén. 113-234
- Vara Thorbeck, C. (1999). *El lunes de las navas*. Universidad de Jaén. Jaén.
- Veganzones, A. R. (1969). Nueva epigrafía tuccitana. *Boletín del Instituto de Estudios Giennenses*, (59), 9-58.
- Vidal López, C. J. (2011). *Levantamiento arquitectónico. Definición y uso de la fotogrametría*. Difusión Digital del Patrimonio Arquitectónico Aragonés. Recuperado de <https://sites.google.com/site/ddpatrimonioarqaragones/home/levantamiento-arquitectonico-definicion-y-uso-de-la-fotogrametria> (último acceso: 1/12/2020).

- Vidal, J. (2020). *El levantamiento fotogramétrico del patrimonio arquitectónico construido como herramienta de análisis y conocimiento: El caso del castell de la Vall de Perputxent*. (Trabajo de Fin de Grado). Universidad de Alicante.
- Westoby, M. J., Brasington, J., Glasser, N. F., Hambrey, M. J. y Reynolds, J. M. (2012). "Structure from Motion" photogrammetry: a low cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 179, 300-314

Anexos

Anexo I. Ilustraciones

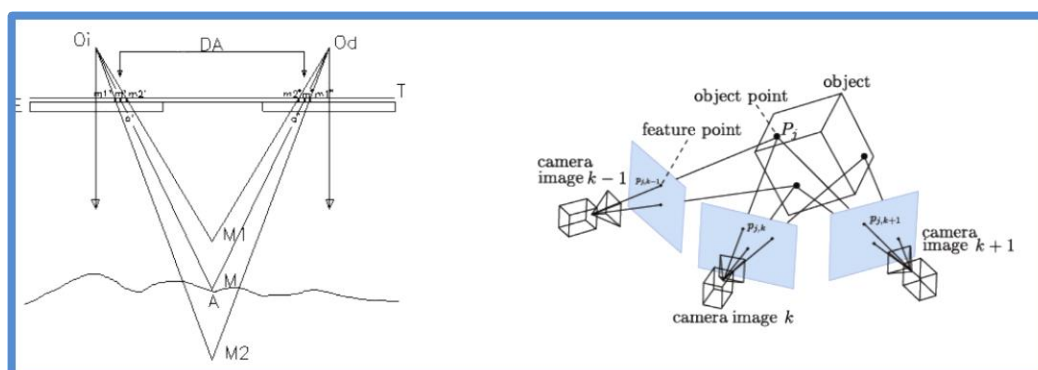


Ilustración 15 Medición estereoscopia y Structure from Motion (SfM). Fuente. Vidal López (2011)



Ilustración 16 Zona geográfica de la campiña sur de Jaén. Fuente. Castillo y Alcázar (2006)

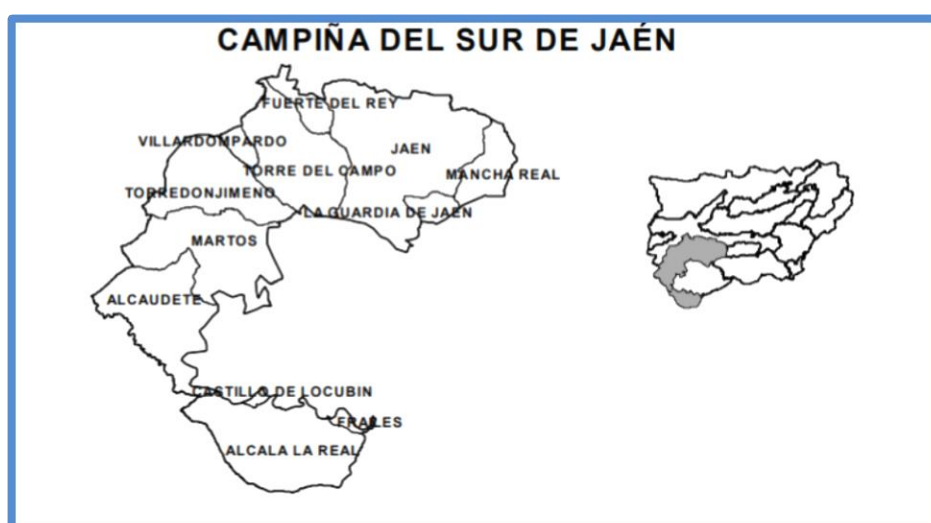


Ilustración 17 Términos municipales de la campiña sur de Jaén. Fuente. Guzmán (2004)



Ilustración 18 Exvoto Íbero 200 a. C. de Torre Benzalá. Fuente. CERES



Ilustración 19 Inscripción honorífica romana. Fuente. EUROPEANA



Ilustración 20 Portada de Catálogo de Martín Jimena Jurado. Fuente. Biblioteca Virtual de Andalucía

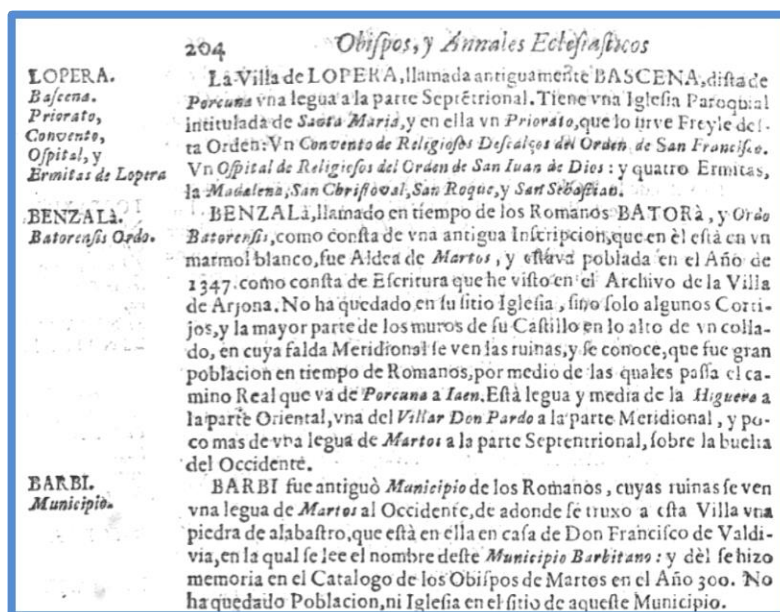


Ilustración 21 Texto de manuscrito de Obispos y Annales Eclesiásticos de Jimena Jurado. Fuente. Biblioteca Virtual de Andalucía



Ilustración 22 Baza encontrada en 1965 Torre Benzalá. Fuente CERES

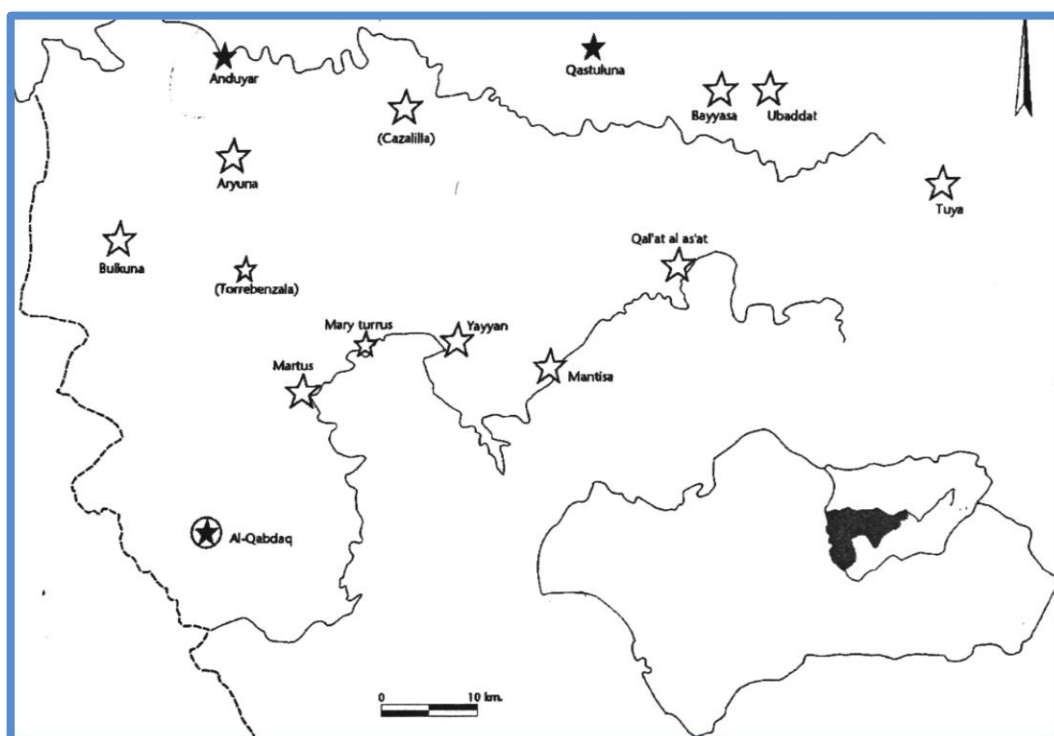


Ilustración 23 Mapa de las principales localidades en la campiña en los siglos IX-X. Fuente. Salvatierra (1995)

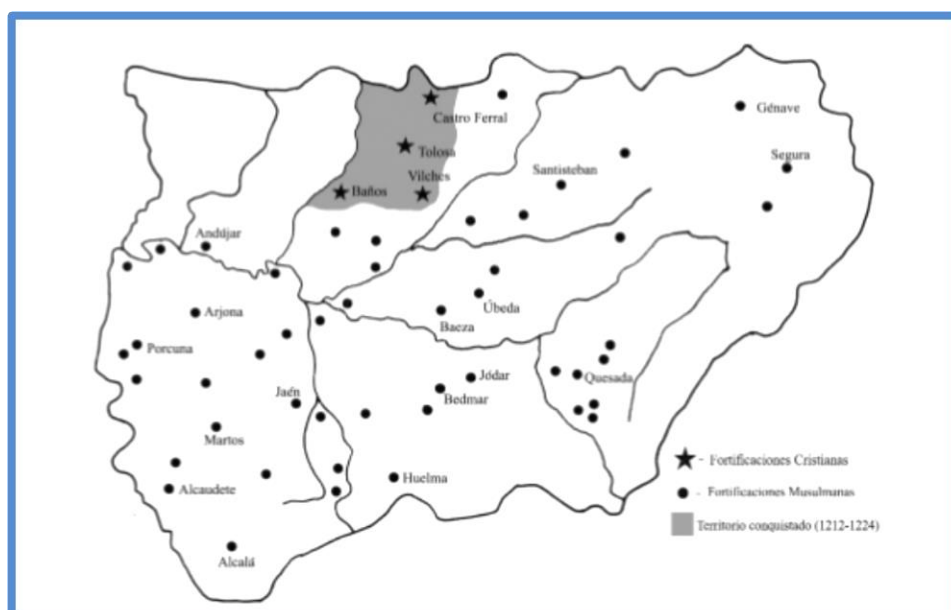


Ilustración 24 Primera fase fronteriza en el alto Guadalquivir (1212-1224). Fuente. Castillo y Alcázar (2006)

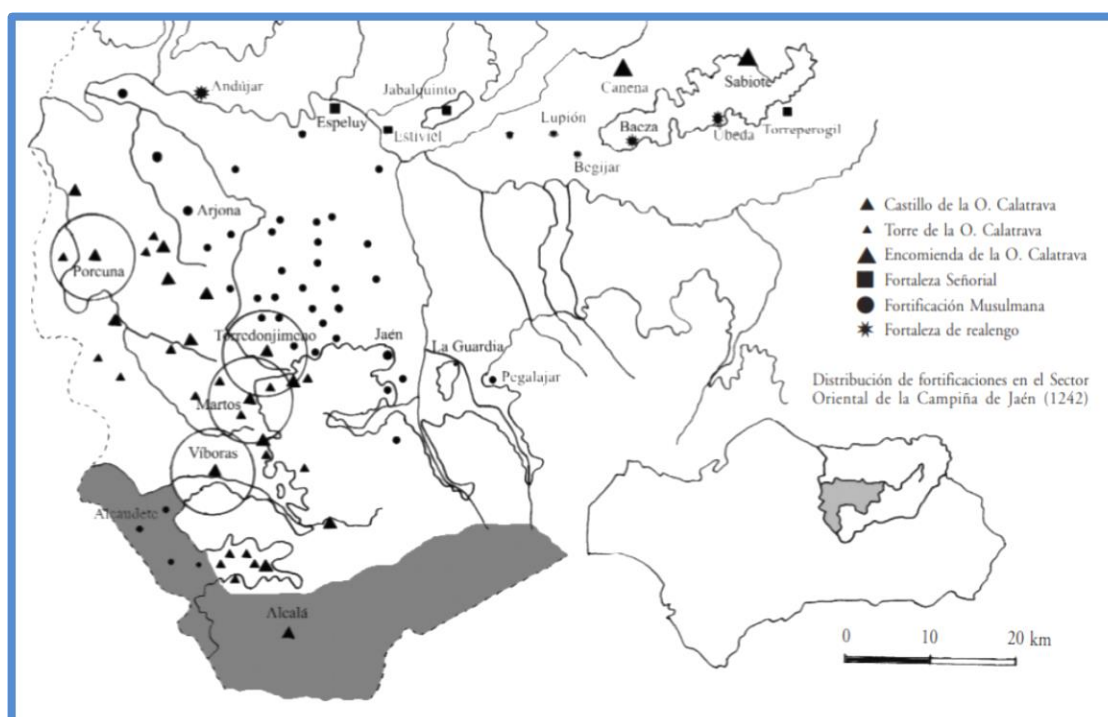


Ilustración 25 Sector fronterizo del arroyo Salado (1225-1242). Fuente. Castillo y Alcázar (2006)

Este lugar está despoblado, que ni aun iglesia queda en él, sino solamente algunos corrijos. está en el término de Martos, entre esta villa y la de Arjona distante de cada una de ellas dos leguas y media. la población era en un cerro alto el castillo, y en la falda meridional por donde pasa el camino real, que va de Bormuda a Jaén, estaban las casas y calles de aquel pueblo, que así se ven gran desmenuzadas de todo. ya del tiempo antiguo de los Romanos por los restos de edificaciones que allí se encuentran y pedruzcos de estatuas, y inscripciones, una de las quales tiene el nombre antiguo que lleva ORDO BATAE VALEATRI en la pág. 139. Después de este lugar avia 200. años. como consta por escrituras antiguas. El castillo tiene sitio muy bueno y fuerte por naturaleza en un cerro que se ve a toda la campaña A A A A



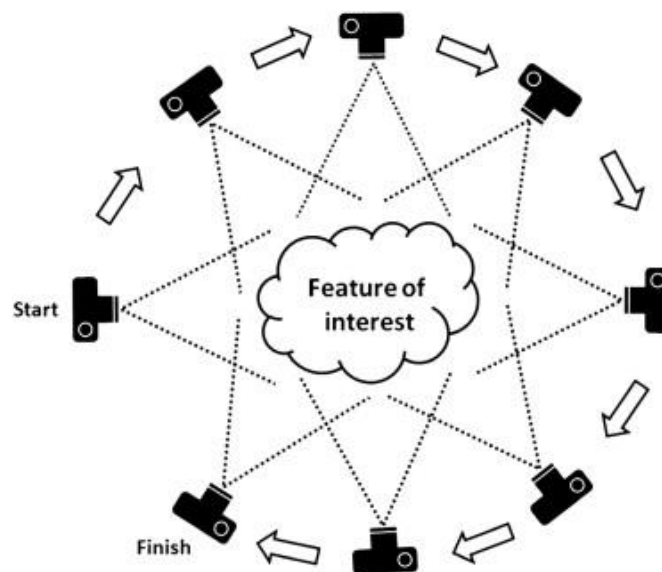


Ilustración 27 Progresión captura fotográfica. Fuente. Westoby *et al*, (2012)

Sensor Size	1/2.3" (6.16 mm × 4.55 mm), 12.35 MP
Pixel size	1.55 μm
Lens (field of view, FOV)	78.8° (f/2.2)
Image size	4000 × 3000 pixels
Focal length	4.74 mm
Focal length (35 mm equivalent)	27.64 mm
Calibration data	
Principal point X, Y	1974.82 pixels, 1491.48 pixels
Distortion coefficients: K1, K2, K3, P1, P2	−0.001, 0.0325, −0.046, 0, 0
Focus	From 0.5 m to ∞ , auto/manual focus
ISO range	100–3200 (video), 100–1600 (photographs)
Electronic shutter speed	8–1/8000 s
Photographic file format	JPEG, DNG

Ilustración 28 Características del sensor de cámara en dron DJI Mavic FC220. Fuente. <https://www.dji.com/es/products>



Ilustración 29 Disposición de cámaras según elemento a documentar. Fuente. Ballester (2016)

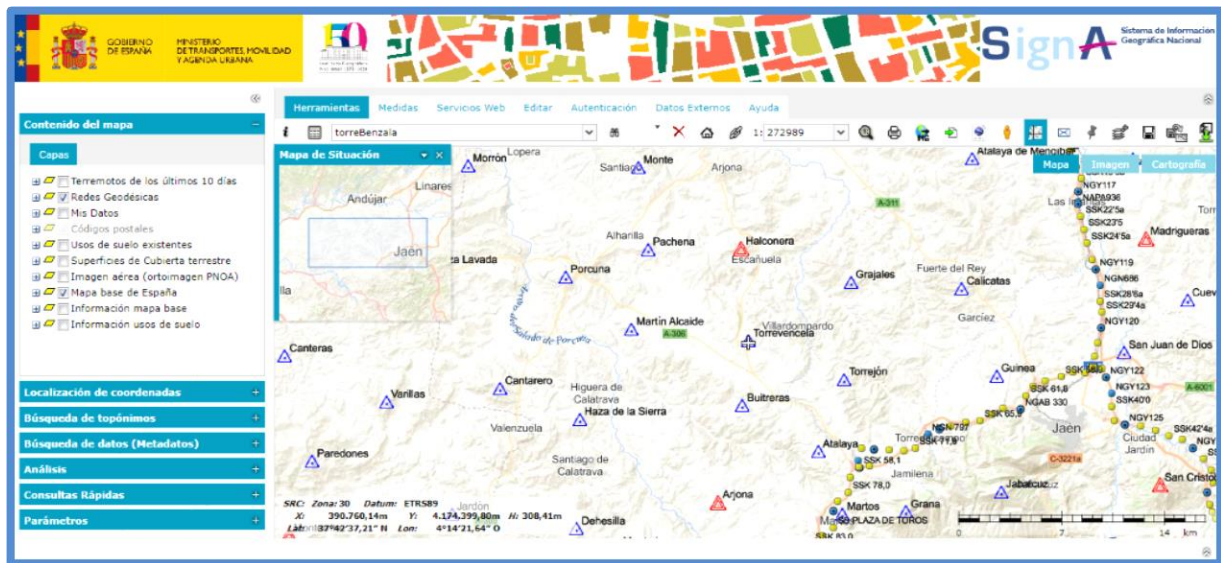


Ilustración 30 Mapa del sistema geodésico de referencia de Torre Benzalá. Fuente. Instituto Geográfico Nacional
<https://signa.ign.es/signa/Pege.aspx?>

Anexo II.⁴ Estudio Fotogramétrico SfM previo

FOTOGRAMETRÍA SfM

FASE 1: DATOS DE LA CÁMARA

• Distancia focal (f)	4.74 mm
• Tamaño del sensor (T_s)	
○ Horizontal	6.16 mm
○ Vertical	4.55 mm
• Resolución máxima (R_s)	
○ Horizontal	4000 píxeles
○ Vertical	3000 píxeles

FASE 2: G.S.D. (Ground Sample Distancia –Distancia de muestreo sobre el terreno-)

• Detalle mínimo del objeto que se desea detectar (D_m)	
○ En función de la escala del plano (1 / mp)	
▪ mp =	$0.2 \text{ mm} * mp =$ 0 mm
○ Medida directa	10 mm
• GSD mínimo ($GSD_{min} = \frac{D_m}{4}$)	2,5 mm
○ Para poder representar un detalle del objeto (al menos 4 píxeles).	
• GSD óptimo ($GSD_{opt} = \frac{D_m}{20}$)	0,5 mm
○ Para poder identificar un detalle del objeto (al menos 20 píxeles).	

⁴ Cálculo de Fotogrametría SfM para las tomas fotográficas de salida de campo.

FASE 3: ESCALA DEL FOTOGRAMA (Ef)

Tamaño del píxel (Tp) = $\frac{Ts}{Rs}$	
○ Horizontal	0,0015 mm
○ Vertical	0,0015 mm
○ Promedio = $\frac{Tp\ Horizontal + Tp\ Vertical}{2} =$	0,0015 mm
$Ef = \frac{1}{mf} = \frac{Tp\ promedio}{GSD}$	
○ $Ef\ (GSD\ mínimo) = 1/$	1635,7688 mf
○ $Ef\ (GSD\ óptimo) = 1/$	327,1538 mf

FASE 4: DISTANCIA DE DISPARO máxima (D_{max})

$Ef = \frac{1}{mf} = \frac{f}{D} \Rightarrow D = f * mf$	
○ $D_{max}\ (GSD\ mínimo)$	7,754 m
○ $D_{max}\ (GSD\ óptimo)$	1,551 m

FASE 7: Planificación. ESCALA FOTOGRÁFICA DEL LEVANTAMIENTO

Toma General	
• Distancia de disparo (D)	7,75 m
• Escala fotográfica $Ef = \frac{1}{mf} = \frac{f}{D} \Rightarrow mf = \frac{D}{f} =$	1635,021097
• GSD resultante $Ef = \frac{1}{mf} = \frac{Tp \text{ promedio}}{GSD} \Rightarrow GSD = Tp \text{ promedio} * mf =$	2,5 mm
• Lado del fotograma en el terreno (Lt)	
○ Horizontal	$Lt_H = Ts_{(horizontal)} * mf =$
▪ Ts (horizontal)	mm
○ Vertical	$Lt_V = Ts_{(vertical)} * mf =$
▪ Ts (vertical)	mm

FASE 7: Planificación. ESCALA FOTOGRÁFICA DEL LEVANTAMIENTO

Toma de Detalle	
• Distancia de disparo (D)	1,5 m
• Escala fotográfica $Ef = \frac{1}{mf} = \frac{f}{D} \Rightarrow mf = \frac{D}{f} =$	316,4557
• GSD resultante $Ef = \frac{1}{mf} = \frac{Tp \text{ promedio}}{GSD} \Rightarrow GSD = Tp \text{ promedio} * mf =$	0,5 mm
• Lado del fotograma en el terreno (Lt)	
○ Horizontal	$Lt_H = Ts_{(horizontal)} * mf =$
▪ Ts (horizontal)	mm
○ Vertical	$Lt_V = Ts_{(vertical)} * mf =$
▪ Ts (vertical)	mm

FASE 8: Planificación. RECUBRIMIENTO LONGITUDINAL (p)

Zona común entre fotogramas consecutivos o contiguos		
Toma General		
- Orientación del fotogramas - Horizontal..... ☒ ☐ - Vertical..... ☐ ☒		
Ts (horizontal)		mm
Ts Vertical)		mm
Lado del fotograma en el terreno (Lt)		
Horizontal	$Lt_H = Ts_{(horizontal)} * mf =$	m
Vertical	$Lt_V = Ts_{(vertical)} * mf =$	m
Recubrimiento longitudinal (p)		
En %	$p = \frac{Lt_H - B}{Lt_H} = 80\%$	80 %
En metros	$P = Lt_H * p / 100 = Lt_H * 80 / 100 = Lt_H * 0.8 =$	8,06 m
Distancia entre disparos (B)	$B = Lt_H - P =$	2,01 m

FASE 8: Planificación. RECUBRIMIENTO LONGITUDINAL (p)

Toma de Detalles		
- Orientación del fotogramas - Horizontal..... ☒ ☐ - Vertical..... ☐ ☒		
Ts (horizontal)		mm
Ts Vertical)		mm
Lado del fotograma en el terreno (Lt)		
Horizontal	$Lt_H = Ts_{(horizontal)} * mf =$	1,95 m
Vertical	$Lt_V = Ts_{(vertical)} * mf =$	1,44 m
Recubrimiento longitudinal (p)		
En %	$p = \frac{Lt_H - B}{Lt_H} = 80\%$	%
En metros	$P = Lt_H * p / 100 = Lt_H * 80 / 100 = Lt_H * 0.8 =$	1,56 m
Distancia entre disparos (B)	$B = Lt_H - P =$	0,39 m

FASE 9: Planificación. RECUBRIMIENTO TRANSVERSAL (q)

Zona común entre pasadas/anillos consecutivos o contiguas		
Tomas Generales		
Orientación del fotogramas		
- Horizontal..... - Vertical.....		☒ ☐
Ts (horizontal)		mm
Ts Vertical)		mm
Lado del fotograma en el terreno (Lt)		
Horizontal	$Lt_H = Ts_{(horizontal)} * mf =$	10,07 m
Vertical	$Lt_V = Ts_{(vertical)} * mf =$	7,44 m
Recubrimiento transversal (q)		
En % $q = \frac{Lt_V - A}{Lt_V} = 40\%$		40 %
En metros $Q = Lt_V * \frac{q}{100} = Lt_V * \frac{40}{100} = Lt_V * 0.4 =$		2,98 m
Distancia entre pasadas (A) $A = Lt_V - Q =$		4,46 m

FASE 9: Planificación. RECUBRIMIENTO TRANSVERSAL (q)

Tomas de Detalle		
- Orientación del fotogramas - Horizontal..... - Vertical.....		
Ts (horizontal)		mm
Ts Vertical)		mm
Lado del fotograma en el terreno (Lt)		
Horizontal	$Lt_H = Ts_{(horizontal)} * mf =$	1,94936709 m
Vertical	$Lt_V = Ts_{(vertical)} * mf =$	1,43987342 m
Recubrimiento transversal (q)		
En % $q = \frac{Lt_V - A}{Lt_V} = 40\%$		40 %
En metros $Q = Lt_V * q / 100 = Lt_V * 40 / 100 =$		0,58 m
Distancia entre pasadas/anillos (A) $A = Lt_V - Q =$		0,86 m

FASE 10: Planificación. TAMAÑO DE LOS PUNTOS DE CONTROL (PC) ARTIFICIALES⁴ (D'Ayala y Smars, 2003)

- Tamaño mínimo (5 píxeles de la imagen) - Alto = Ancho = 5 * GSD =	12,5 mm * 17,7 mm
- Tamaño máximo (8 píxeles de la imagen) - Alto = Ancho = 8 * GSD =	20,0 mm * 28,3 mm
- Tamaño del número del PC (10 píxeles de la imagen) - Altura = 10 * GSD =	25,0 mm

⁴El tamaño del PC no debe ser mayor de 60 mm * 40 mm

Anexo III. Georreferenciación

Estación	Visual	Hz	LAS LECTURAS CRECEN EN SENTIDO INVERSO						X_UTM(ETRS89)	Y_UTM(ETRS89)	h (ETRS89)
Torrevenzala	Halconera	178.8291						Halconera	408051,88	4193733,307	
Torrevenzala	Marín Alcaide	287.1839	88.3648					Marín Alcaide	400544,188	4188340,973	
		Hz	V	acimut				Des(Grad)_Torreven Buitreras	408030,678	4183054,81	
Torrevenzala	Halconera	221.1716	100.8848	-0,0723430458				174.2229			
Torrevenzala	Marín Alcaide	132.8168	101.0773	-1,480173163				307.04249	174.2257	Desorientación medi	174.2251
Torrevenzala	Buitreras	32.6291	99.7160	0,1076889908				208,8556941	174.2266	(Acimut - Lectura)	
		Hz	V	Dr	m	i					
Estación	Visual	Hz	V					X_UTM(ETRS89)	Y_UTM(ETRS89)	h (ETRS89)	
Torrevenzala	E 1000	77.7444	123.8881	15.991	2,15	0,24		408506,637	4187456,542	595,363	593.923(BP)
Torrevenzala	E 2000	55.9722	113.0381	31.877	2,15	0,24					1,2
Torrevenzala	E 3000	27.4580	116.0284	27.059	2,15	0,24					
Torrevenzala	PC 4	37.3732	115.5101	23.804	0	0,24					
Torrevenzala	PC 5	38.6803	113.3092	22.800	0	0,24					
Torrevenzala	PC 6	42.2871	115.3488	22.208	0	0,24					
E 3000	Torrevenzala	8.295	82.7728	27.053	0,085	1,500		Acimut E3000-Torreven Acimuy (grad)	Desorientación		
E 3000	PC 1	339.8422	98.3894	4.599	0,000	1,500		0,0264373059	1,883051167	-8,811948833	
E 3000	PC 2	338.2294	79.5746	4.773	0,000	1,500					
E 3000	PC 3	359.8251	64.808	4.369	0,000	1,500					
E 2000	Torrevenzala	148.1235	85.6016	31.872	0,085	1,290		Acimut E2000-Torreven Acimuy (grad)	Desorientación		
E 2000	PC 9	186.251	84.4877	9.265	0,000	1,290		0,4743373121	30,19725117	-118,9262488	
E 2000	PC 10	189.5438	98.8468	9.407	0,000	1,290					
E 2000	PC 11	186.9002	91.2491	9.824	0,000	1,290					
E 1000	Torrevenzala	250.0703	73.6039	15.998	0,085	1,185		Acimut E1000-Torreven Acimuy (grad)	Desorientación		
E 1000	PC 7	388.9318	96.7102	12.106	0,000	1,185		0,81633423	51,98945117	-198,1008488	
E 1000	PC 8	372.4338	93.841	13.122	0,000	1,185					

Ilustración 31 Lecturas de georreferenciación realizadas. Fuente propia.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
29	E 1000	PC 8	372.4338	93.641	13.122	0.000	1.185					
30												
31	Estación	Visual	X	Y	AX	Ay	X	Y	t	Z	Az	Z
32	Torrevenzala	E 1000	408506.637	4187466.542	-11.85188315	-10.95218521	408494.885	4187445.590	-8.24083323	595.363	-8.15083323	597.212
33	Torrevenzala	E 2000	408506.637	4187466.542	-14.48843881	-28.17971979	408492.089	4187428.362	-8.578207531	595.363	-8.488207531	598.875
34	Torrevenzala	E 3000	408506.637	4187466.542	-0.7152837313	-27.04954436	408506.822	4187428.492	-8.960891963	595.363	-8.870891963	598.492
35	Torrevenzala	PC 4	408506.637	4187466.542	-4.312778911	-23.41004814	408502.224	4187433.132	-5.916954024	595.363	-5.876954024	599.886
36	Torrevenzala	PC 5	408506.637	4187466.542	-4.543130771	-22.13886314	408501.964	4187434.403	-4.794824808	595.363	-4.654824808	599.808
37	Torrevenzala	PC 6	408506.637	4187466.542	-5.685771891	-21.4851883	408500.841	4187435.077	-5.460825216	595.363	-5.220825216	599.142
38	E 3000	Torrevenzala	408506.637	4187429.492	0.7151251259	27.04354846	408506.537	4187455.538	7.504738919	588.492	8.920	595.412
39	E 3000	PC 1	408506.822	4187429.492	-3.885589885	2.293047913	408501.835	4187431.788	0.2811131033	588.492	1.761	588.253
40	E 3000	PC 2	408506.822	4187429.492	-4.265718299	2.141302499	408501.558	4187431.834	1.586150085	588.492	3.085	589.578
41	E 3000	PC 3	408506.822	4187429.492	-2.92965577	3.241275056	408502.892	4187432.734	2.695674494	588.492	4.196	590.688
42	E 2000	Torrevenzala	408492.089	4187428.362	14.48815507	28.17527181	408506.555	4187455.538	7.287933184	588.875	8.493	595.363
43	E 2000	PC 9	408492.089	4187428.362	8.071182748	4.549311382	408500.140	4187432.912	7.287933184	588.875	8.578	595.453
44	E 2000	PC 10	408492.089	4187428.362	8.422717902	4.189208012	408500.491	4187432.851	2.303338576	588.875	3.593	590.488
45	E 2000	PC 11	408492.089	4187428.362	9.241850297	3.331543133	408501.310	4187431.894	0.2000150278	588.875	1.490	588.385
46	E 1000	Torrevenzala	408494.885	4187445.590	11.66678363	10.96697949	408508.542	4187455.547	7.041451548	587.212	8.141	595.354
47	E 1000	PC 7	408494.885	4187445.590	5.354753158	-10.85734105	408500.240	4187434.732	0.6261478102	587.212	1.811	589.023
48	E 1000	PC 8	408494.885	4187445.590	5.1483201	-12.06986678	408500.034	4187433.520	1.315093055	587.212	2.500	589.712
49												
50			Az	Az media								
51	Torrevenzala	E1000	-8.151	-8.146								
52	E1000	Torrevenzala	8.141									
53	Torrevenzala	E2000	-8.488	-8.491								
54	E2000	Torrevenzala	8.493									
55	Torrevenzala	E3000	-8.871	-8.865								
56	E3000	Torrevenzala	8.820									

Ilustración 32 Puntos de Control Georreferenciación calculados. Fuente propia.

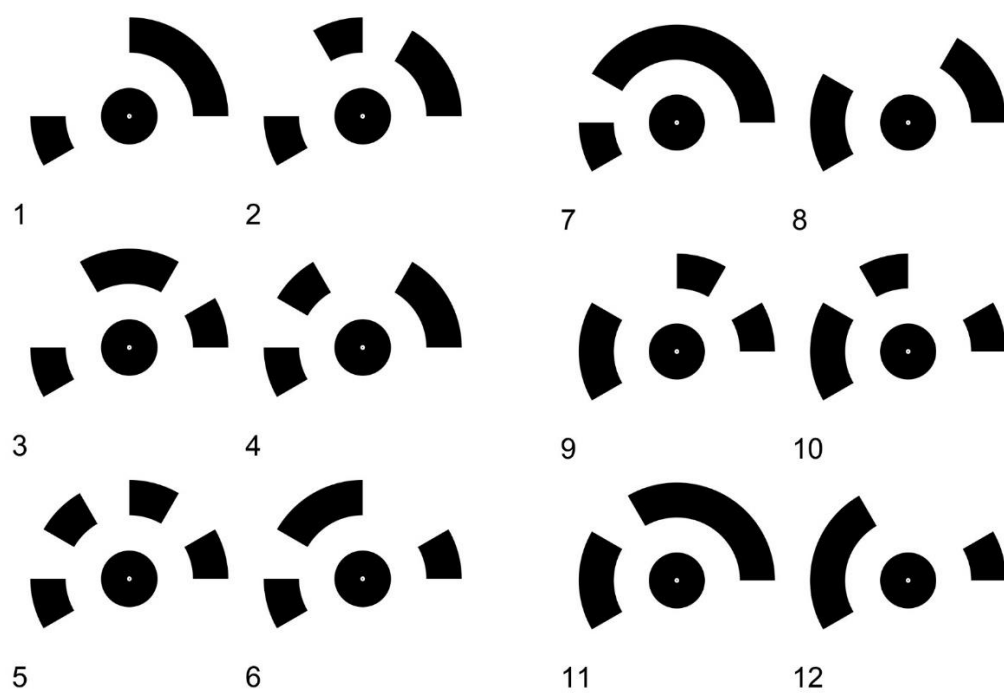


Ilustración 33 Tipología de dianas para puntos de control.

Anexo IV. Resultados

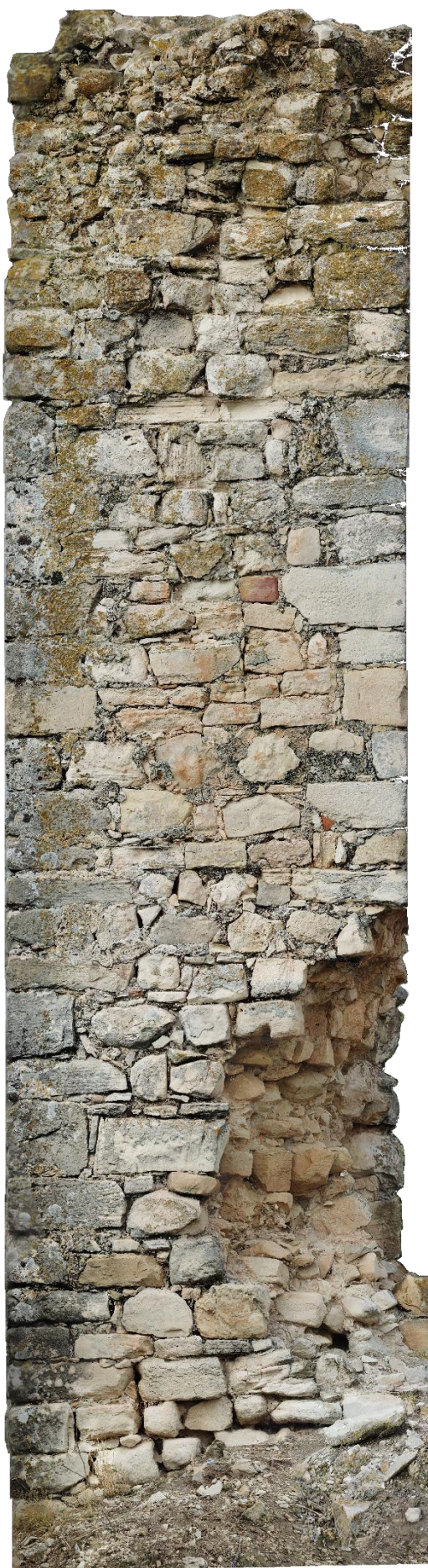


Ilustración 34 Paramento A. Ortoimagen escalada. Fuente propia.



Ilustración 35 Paramento B. Ortoimagen escalada. Fuente propia.



Ilustración 36 Paramento C. Ortoimagen escalada. Fuente propia.



Ilustración 37 Paramento D. Ortoimagen escalada. Fuente propia.



Ilustración 38 Paramento E. Ortoimagen escalada vista superior. Fuente propia.

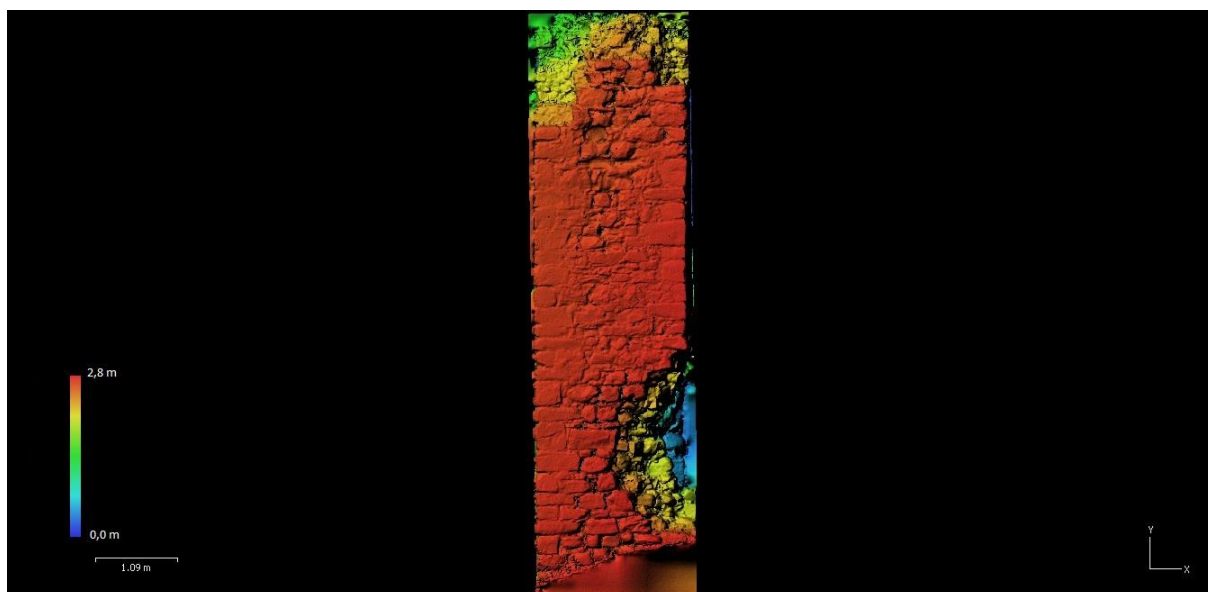


Ilustración 39 Modelo Digital de Elevaciones (MDE). Alzado A de Torre Benzalá. Fuente propia.

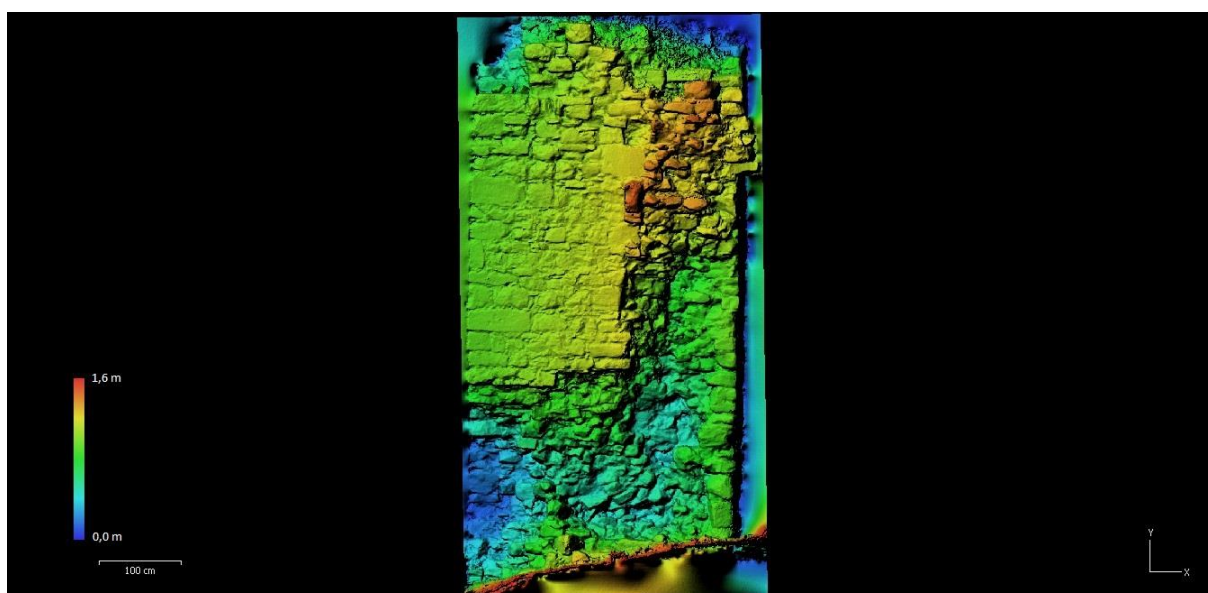


Ilustración 40 Modelo Digital de Elevaciones (MDE). Alzado B de Torre Benzalá. Fuente propia.

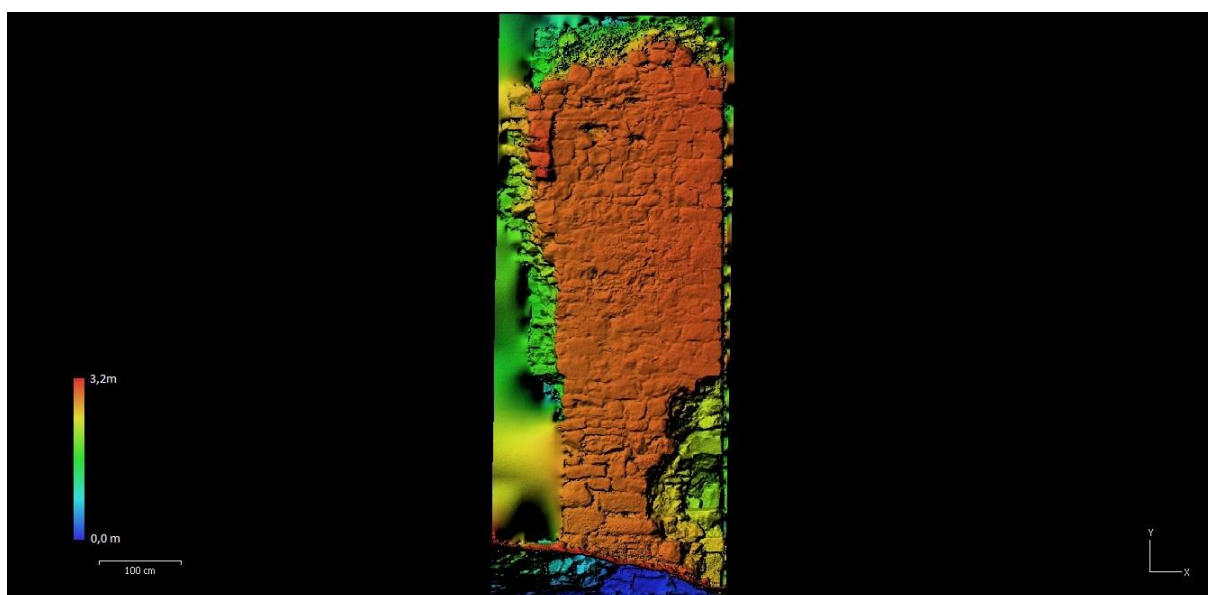


Ilustración 41 Modelo Digital de Elevaciones (MDE). Alzado C de Torre Benzalá. Fuente propia.

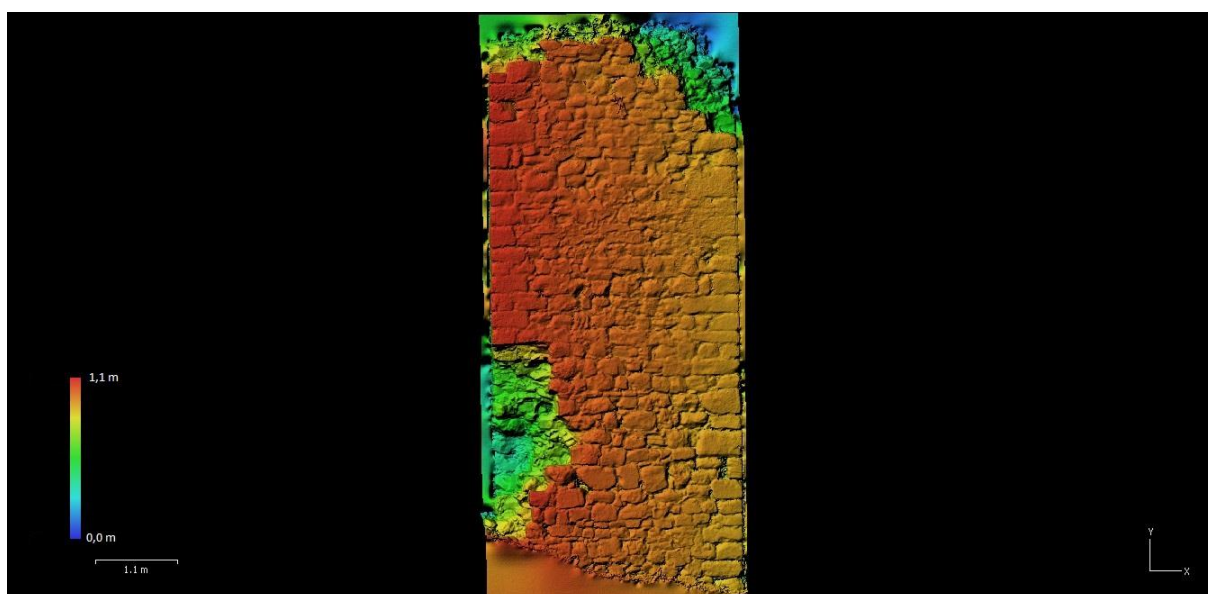


Ilustración 42 Modelo Digital de Elevaciones (MDE). Alzado D de Torre Benzalá. Fuente propia.

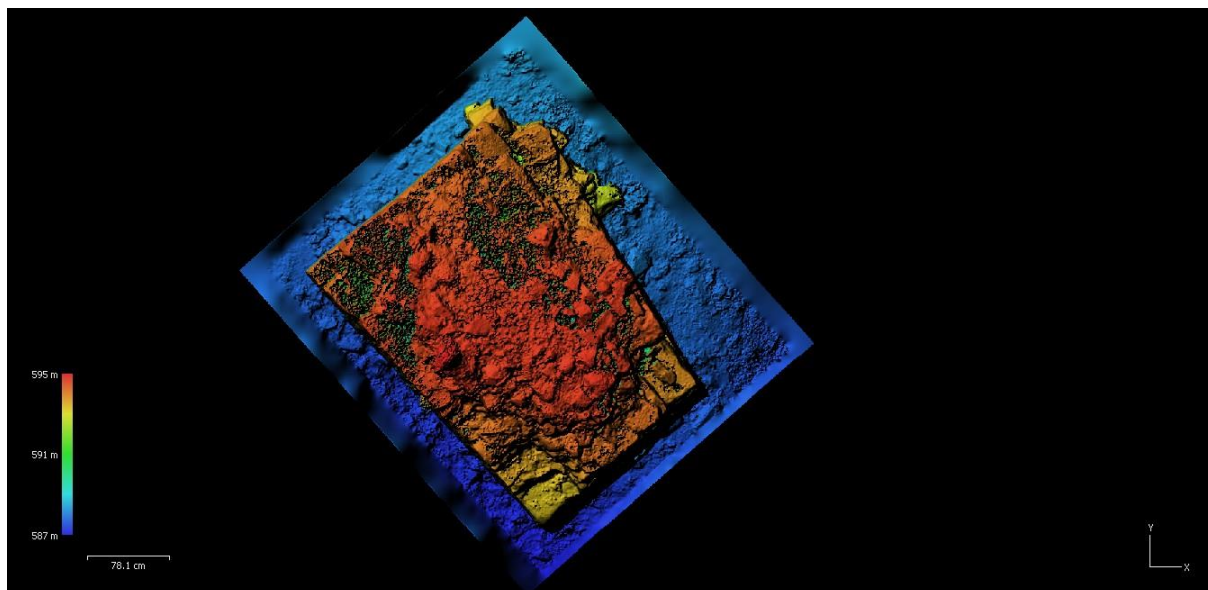


Ilustración 43 Modelo Digital de Elevaciones (MDE). Vista Superior de Torre Benzalá. Fuente propia.