



## **TRABAJO DE FIN DE MÁSTER**

**“Análisis de la Fotogrametría como técnica aplicada a la  
protección, investigación y difusión del patrimonio  
histórico-arqueológico”**

**Autor: Juan Luis Torreño Piñero**

**Tutor: José Antonio Ruiz Gil**

**MÁSTER EN PATRIMONIO, ARQUEOLOGÍA E HISTORIA MARÍTIMA**

**Curso Académico 2021/2022**

**Fecha de presentación: 03/09/2022**

**FACULTA DE FILOSOFÍA Y LETRAS**

**UNIVERSIDAD DE CÁDIZ**



## ÍNDICE

	<u>Página</u>
1. Resumen/ <i>abstract</i>	5
2. Introducción	6
2.1. Objetivos y finalidad	6
2.2. Metodología	9
3. Estado de la cuestión	13
3.1. Concepto de Patrimonio	13
3.2. Necesidad de protección, investigación y análisis del patrimonio histórico- arqueológico	15
3.3. Arqueología virtual y nuevas tecnologías: la fotogrametría	18
3.3.1. Evolución de la fotogrametría aplicada a la investigación arqueológica en España	22
4. La fotogrametría	26
4.1. Descubriendo la técnica	26
4.1.1. Definición	26
4.1.2. Evolución de la fotogrametría	30
4.1.2.1. Distintas etapas	30
4.1.2.2. Desarrollo de la fotogrametría en arqueología	38
4.2. Método de empleo	41
4.2.1. Consideraciones y procedimientos	41
4.2.2. Softwares	52
4.3. La fotogrametría como técnica aplicada al patrimonio arqueológico	54
4.3.1. La importancia de proteger nuestro pasado	54
4.3.2. Distintas utilidades	57

4.3.2.1. Documentación y registro de yacimientos y restos arqueológicos	58
4.3.2.2. Análisis del modelo fotogramétrico	60
4.3.2.3. Obtención de medidas longitudinales y volumétricas	62
4.3.2.4. Réplicas del objeto original	63
4.3.2.5. Conservación y restauración	64
4.3.2.6. Difusión y creación de productos culturales	65
4.4. Fotogrametría y arqueología: métodos y aplicaciones	67
4.4.1. Fotogrametría terrestre	67
4.4.1.1. Fotogrametría de objeto cercano	68
4.4.1.1.1. Distintas aplicaciones	69
4.4.1.1.2. Metodología	70
4.4.1.2. Fotogrametría de campo	71
4.4.1.2.1. Distintas aplicaciones	71
4.4.1.2.2. Metodología	72
4.4.2. Fotogrametría aérea	73
4.4.2.1. Uso de drones	75
4.4.2.2. Distintas aplicaciones	77
4.4.2.3. Metodología	78
4.4.2.4. Principales productos fotogramétricos	82
4.4.2.4.1. Ortofoto	82
4.4.2.4.2. Modelo Digital de Superficie (MDS) y Modelo Digital del Terreno (MDT)	83
4.4.3. Fotogrametría subacuática	86
4.4.4. Escáner láser: otra herramienta fotogramétrica	88

4.4.4.1. Definición y características	88
4.4.4.2. Escáner laser y fotogrametría: comparando resultados	90
4.5. Aplicación fotogramétrica a un caso concreto: BIC de Mesas de Asta	93
4.6. Análisis de la fotogrametría como técnica no invasiva	98
4.6.1. Ventajas y limitaciones	98
4.6.2. Posibles líneas de actuación y mejora	102
5. Conclusiones y perspectivas de futuro	104
6. Bibliografía	107
6.1. Webgrafía	116

## 1. RESUMEN

La fotogrametría digital es una técnica innovadora y de gran utilidad que ha revolucionado por completo aquellas áreas o actividades en las cuales se emplea. Particularmente, en su aplicación para con el patrimonio histórico y arqueológico resulta especialmente práctica. En el presente proyecto se analiza la fotogrametría desde sus primeros pasos a mediados del siglo XIX hasta nuestros días, insistiendo en su uso como herramienta de investigación histórico-arqueológica y en la multitud de aplicaciones de distinta índole de las que dispone. Así mismo, se muestran las posibles ventajas e inconvenientes que presenta el empleo de la misma respecto a otros métodos de documentación y registro arqueológico más tradicionales. Se aspira, por lo tanto, a que este sea un trabajo que pueda ayudar a otras personas a conocer qué es, como funciona y cuál es el alcance y utilidad de la fotogrametría cuando se emplea a favor de la protección, conservación, investigación y difusión de nuestro patrimonio.

**PALABRAS CLAVE:** Fotogrametría, investigación, digitalización, patrimonio, arqueología.

## *ABSTRACT*

Digital photogrammetry is an innovative and highly useful technique that has completely revolutionised the areas or activities in which it is used. In particular, in its application to historical and archaeological heritage it is especially beneficial. This project analyses photogrammetry from its first steps in the mid-19th century to the present day, emphasising its use as a tool for historical and archaeological research and the multitude of different applications it has. It also shows the possible advantages and disadvantages of its use with respect to other more traditional methods of archaeological documentation and recording. It is hoped, therefore, that this is a work that can help others to know what it is, how it works and what is the scope and usefulness of photogrammetry when it is used for the protection, conservation, research and dissemination of our heritage.

**KEY WORDS:** Photogrammetry, research, digitization, heritage, archaeology.

## 2. INTRODUCCIÓN

El presente proyecto se titula “*Análisis de la fotogrametría como técnica aplicada a la protección, investigación y difusión del patrimonio histórico-arqueológico*” y se encuadra dentro del Máster de Patrimonio, Arqueología e Hª Marítima de la Universidad de Cádiz (UCA), cursado en la Facultad de Filosofía y Letras durante el curso 2021/2022.

El motivo de la elección de este trabajo ha sido, principalmente, el de continuar adquiriendo y ampliando conocimientos y competencias sobre fórmulas de gestión y defensa del patrimonio histórico-arqueológico. Además de esto, consciente de la importancia de las nuevas tecnologías y de su implantación cada vez mayor en la disciplina arqueológica, me interesé por la fotogrametría digital dada su enorme aplicabilidad en la documentación, análisis e investigación de yacimientos y restos arqueológicos.

He de decir que mi tutor el profesor y doctor José Antonio Ruiz Gil también me animó en la elección de esta investigación, pues durante este curso, siendo alumno colaborador suyo, me brindó desde el primer momento la oportunidad de aprender sobre ésta y el resto de técnicas no invasivas que emplean desde la Unidad de Geodetección del Patrimonio Histórico de la Universidad de Cádiz, dirigida por el profesor y catedrático en Historia Antigua Lázaro Lagóstena Barrios. Tanto ellos como el resto de compañeros siempre han estado dispuestos a ayudar y despejar cualquier duda que tuviese al respecto.

### 2.1. OBJETIVOS Y FINALIDAD

Desde el primer momento en el que decidimos realizar un trabajo sobre la técnica fotogramétrica aplicada a la arqueología, tuvimos claro que la temática sobre la que versaría la investigación y las ideas expuestas sobre la misma debían ser distintas a lo anteriormente formulado por otros investigadores. Resulta paradójico, pero dado que la gran mayoría de investigaciones al respecto mostraban ejemplos prácticos sobre la técnica, decidimos que nuestro proyecto fuese una síntesis que aunara toda la información posible sobre fotogrametría desde sus inicios hasta nuestros días, y haciendo especial hincapié en el uso de ésta respecto al patrimonio histórico-arqueológico.

El objetivo principal consiste en crear una guía par el uso correcto y la realización de las técnicas fotogramétricas aplicadas al análisis del Patrimonio Histórico y a la protección de los bienes

patrimoniales en estudio mediante la investigación, conservación y difusión de los mismos. Así mismo, pretendíamos que el proceso de investigación me permitiese personalmente ahondar en el aprendizaje y conocimiento sobre la propia técnica, para aplicarla de una forma práctica y poder obtener en el futuro el máximo rendimiento posible de la misma. En función de esto, dividimos los objetivos de nuestro trabajo en los siguientes:

1. El primer objetivo consistió en definir en qué consiste la fotogrametría y cuáles son sus diferentes campos de aplicación y respectivas utilidades, para obtener una visión del potencial de la misma y entender por qué es considerada en la actualidad como una técnica esencial para los trabajos arqueológicos. Así mismo, presentamos una evolución diacrónica de la fotogrametría, desde sus orígenes en el siglo XIX hasta nuestros días, con la intención de conocer cuáles han sido las causas y razones que llevaron a los distintos científicos e investigadores a apostar por ella y desarrollarla tanto en su complejidad técnica como en su alcance y utilidad.
2. El segundo objetivo analiza los primeros proyectos que emplearon este método en arqueología y cuál ha sido su desarrollo desde entonces, hasta convertirla hoy en día en una técnica de uso prácticamente generalizado entre arqueólogos e investigadores, por los múltiples beneficios que aporta para la investigación arqueológica.
3. El tercer objetivo consiste en explicar la metodología de uso de la técnica, desde las consideraciones previas a tener en cuenta, la calibración de la cámara y la toma de imágenes hasta la obtención del modelo fotogramétrico final a través de las diferentes fases de restitución llevadas a cabo por ordenador. Se estudiarán también las distintas herramientas de campo empleadas para la captura fotográfica, así como los softwares del mercado más destacados para una adecuada restitución fotogramétrica, atendiendo a sus características propias, y a sus respectivas semejanzas y diferencias.
4. El cuarto objetivo destaca la importancia de la protección del patrimonio histórico-arqueológico a través de las nuevas tecnologías como la fotogrametría. Además de esto, se hace un análisis de las distintas utilidades y los beneficios que puede aportar la técnica aplicada a la conservación, investigación y difusión del patrimonio, como medio de digitalización del mismo de gran accesibilidad para la sociedad, que puede crear sinergias y flujos de trabajos entre investigadores, así como conciencia social sobre el valor de nuestro pasado.
5. En el quinto objetivo se distinguen las características particulares y el modo de empleo de la fotogrametría terrestre y aérea, tanto aplicada a objetos de pequeño y mediano

tamaño, como para superficies y elementos de mayor extensión como yacimientos arqueológicos, monumentos u otras zonas patrimoniales. Así mismo, merece especial mención el uso de RPAS (*Remotely Piloted Aircraft System*) o drones para la documentación y registro de sitios arqueológicos desde al aire, dados los buenos resultados que ofrecen tanto en tiempo como en eficacia.

6. El sexto objetivo consistió en analizar el escáner láser como herramienta de gran utilidad también para la documentación arqueológica, y comparar este método con la fotogrametría, mostrando las posibles debilidades y fortalezas de su uso, y determinando en qué situaciones resulta más adecuado y ofrece mejores resultados emplear una u otra técnica.
7. El séptimo objetivo consistirá en determinar las posibles ventajas o limitaciones que presenta el empleo de la fotogrametría frente a otros métodos y fórmulas más tradicionales de documentación y registro del patrimonio histórico-arqueológico. Por último, estableceremos las que consideramos posibles líneas de actuación y de mejora a corto plazo en el empleo de la técnica.

Con la consecución de todos los objetivos expuestos anteriormente, pretendemos obtener un trabajo lo suficientemente ordenado, limpio y completo que nos permita ampliar nuestro conocimiento sobre esta eficaz técnica, con la finalidad de poder aplicar la misma en la práctica y realizar, en un futuro próximo, trabajos fotogramétricos con la rigurosidad y la calidad que disciplinas como la Arqueología o el Patrimonio Histórico merecen y necesitan. Así mismo, esperamos que éste pueda resultar útil a otras personas e investigadores interesados en la fotogrametría digital como técnica no invasiva aplicada al patrimonio arqueológico.

## 2.2. METODOLOGÍA

Si bien es cierto, que la primera idea sobre la que pretendíamos realizar el trabajo combinaba tanto teoría sobre la técnica fotogramétrica como un ejemplo práctico de digitalización del patrimonio mediante la misma, como hemos comentado anteriormente, tras hablar con mi tutor de TFM, debatir la temática sobre la que podría versar éste y comprobar que la gran mayoría de trabajos realizados iban en esa vía, cambiamos de opinión. Es por ello que decidimos, finalmente, que la presente investigación debía sentar sus bases sobre un contenido principalmente teórico, con la intención de contribuir de algún modo al mejor entendimiento y conocimiento sobre la fotogrametría.

Desde ese momento, teníamos claro que el trabajo debía girar en torno a la utilidad de la técnica en su aplicación para con el patrimonio histórico-arqueológico. La contribución de la fotogrametría a la arqueología no se queda tan solo en la documentación y registro de yacimientos y restos arqueológicos, como a priori podemos llegar a pensar, sino que mediante un buen uso de la misma se pueden desarrollar toda una serie de proyectos que fomenten tanto el análisis y la investigación científica, como la conservación y difusión de un patrimonio cada vez más abandonado y que se debe preservar. Es entorno a ese aspecto alrededor del cual se iba a centrar la investigación y esperamos que haya dado sus frutos.

Tras tener clara esta primera idea, llegó el momento de acotar el objeto de análisis, teniendo en cuenta la exigencia que presenta un trabajo de estas características, y, por lo tanto, elegir qué aspectos resultaban más adecuados, relevantes o útiles. Para ello, consultamos información de interés sobre esta técnica aplicada a la arqueología, tanto en trabajos historiográficos y manuales sobre fotogrametría, así como en un amplio número de artículos, muchos de los cuales pertenecen a autores e investigadores extranjeros. Sabemos que la fotogrametría es una técnica de reciente uso y estudio en nuestro país, siendo, en este caso, británicos y estadounidenses quienes han investigado y escrito más sobre el tema, por lo que también debíamos aplicar nuestros conocimientos en lengua inglesa para la traducción de la información.

Para la descarga y consulta de bibliografía al respecto, hemos hecho uso de portales y redes para investigadores, como de catálogos de bibliotecas online como Académia.edu, ResearchGate, Dialnet, Google Scholar, Scopus, REBIUN (Red de Bibliotecas Universitarias y Científicas Españolas) y PARES (Portal de Archivos Españoles), entre otros. Así mismo, mi tutor José Antonio Ruíz Gil me facilitó el acceso a una amplia cantidad de bibliografía al respecto, que ha sido de gran utilidad para la investigación.

Así mismo, hemos de destacar la consulta de diversas páginas Web y revistas especializadas sobre fotogrametría que arrojan, periódicamente, los resultados de nuevos trabajos fotogramétricos e informan de los últimos avances en el uso de la técnica. Mencionaremos, por su relevancia, las siguientes: *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, *International Journal of Computer Science and Information Security (IJCSIS)*, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (ISPRS)* o *Virtual Archaeology Review* de la Universidad Politécnica de Valencia.

La consulta de las actas sobre distintos congresos científicos sobre fotogrametría y material videográfico sobre su aplicabilidad, también resultó de gran interés y utilidad para conocer mejor la técnica, su método de empleo y las distintas variantes de uso que presenta.

La asistencia y participación en el curso “Nuevas Tecnologías aplicadas a la digitalización, estudio, análisis espacial del registro arqueológico” de la Universidad de Cádiz en diciembre de 2021, me permitió también conocer de primera mano ciertas técnicas y herramientas (Fotogrametría, SIRA, Blender, RTI, Impresión 3D, Mars Epoxi, SPSS, SIG) de diversa índole enfocados en el registro, análisis e investigación del patrimonio histórico-arqueológico. Esto contribuyó a mi iniciación en el mundo de las Nuevas Tecnologías, destacando la inmersión en fotogrametría.

Además de todo esto, era conveniente recibir una correcta formación práctica en el empleo de la técnica, para conocer de primera mano las características propias de la misma y como funciona. Para ello, he tenido el privilegio de contar con la ayuda de mis compañeros de la Unidad de Geodetección, Análisis y Georreferenciación del Patrimonio Histórico de la Universidad de Cádiz, que desde su amplio conocimiento sobre la aplicación de las técnicas no invasivas me mostraron el *modus operandi* de la misma y sus múltiples aplicaciones.

Tras consultar las diversas fuentes que hemos mencionado anteriormente, y tras el conocimiento obtenido al recibir una constante formación en fotogrametría, llegó el momento de escoger que información era más relevante o útil para el presente trabajo y reducir con precisión el campo de estudio del mismo. Teníamos claro que queríamos tratar la conservación y protección del patrimonio a través de la fotogrametría y, para ello, decidimos que lo más adecuado sería introducir en qué consistía la técnica y cuál había sido su evolución, así como desarrollar la forma de realizarla adecuadamente y las distintas variantes de empleo existentes, teniendo en cuenta las ventajas y beneficios resultantes de cada una de ellas.

Ya con toda la documentación recogida y habiendo organizado la forma en qué queríamos realizar la investigación, pasamos a analizar toda la información que teníamos disponible y comenzamos a redactar el presente proyecto. Para ello, tuvimos en cuenta qué información nos resultaba más útil y la contrastamos con la máxima rigurosidad posible, aplicándola a nuestro estudio sin llegar a ser excesivamente reiterativos. Esto último fue una tarea ardua y complicada, ya que, se trata de un trabajo esencialmente teórico, y gira constantemente entorno al uso y aplicación de una misma técnica.

Mientras redactábamos el proyecto incorporábamos las citas y la bibliografía correspondiente, así como las respectivas imágenes que han permitido aportar información gráfica y complementar el contenido teórico. Todo esto con la ayuda y seguimiento constante de mi tutor, quien me orientaba en el modo en el que podía seguir encaminando la investigación y realizaba ciertas correcciones del proyecto.

Dado que la fotogrametría era un campo aún en cierta parte desconocido para mí, la información que íbamos analizando y redactando fue creando nuevas vías de investigación que nos permitían reciclar de forma continua lo escrito previamente. De este modo, fuimos revisando continuamente los datos y conjeturas aportadas, surgiendo nuevas premisas y cuestiones que debíamos tener en cuenta. Como ejemplo de esto tenemos la inclusión sobre la marcha de los distintos productos que se pueden obtener de la fotogrametría aérea (ortofotografía, MDS y MDT) o un apartado sobre el escáner láser y su comparación con la fotogrametría, por la similitud y la calidad de los resultados que se pueden obtener mediante ambas técnicas.

Una vez redactado el proyecto, el siguiente paso consistió en estimar en qué medida se habían logrado los objetivos propuestos, y cuáles eran las posibles fortalezas y debilidades de la investigación, por si debíamos incluir o prescindir de algunos datos. Así mismo, tuvimos que valorar si se había alcanzado o no la finalidad con la que iniciamos este proyecto, y cuáles eran nuestras aportaciones al conocimiento científico mediante la ejecución y redacción del mismo. Definitivamente, consideramos que habíamos superado satisfactoriamente los objetivos principales, pero a sabiendas de que aún nos queda mucho camino por recorrer tanto en el aprendizaje y el conocimiento de la fotogrametría y otras técnicas no invasivas, así como de las nuevas humanidades digitales.

Por último, llevamos a cabo una revisión final detallada del proyecto, examinando y corrigiendo aquellos posibles errores pasados por alto, y tras el visto bueno por parte del tutor, realizamos la maquetación final del mismo para su entrega y defensa en septiembre de este año 2022.



### 3. ESTADO DE LA CUESTIÓN

#### 3.1. CONCEPTO DE PATRIMONIO

No podemos entender el patrimonio como algo tangible o abstracto, pues caeríamos en la banalidad de que el propio concepto perdiese el sentido que posee intrínseco. Antes de querer definirlo, deberíamos preguntarnos qué entendemos por patrimonio y, a partir de ahí, desbrozar y comprender que no se trata de una sola cosa o de un conjunto de ellas, sino que su verdadero significado alcanza mucho más.

Lo escrito en torno a la definición, evolución, gestión y empleo del patrimonio es sumamente amplio, y por sí mismo, alcanza para realizar varios trabajos más extensos que este propio proyecto de investigación, por lo que no nos centraremos en ello, ya que no es nuestro objetivo. Lo que sí debemos procurar es entender a qué hacemos referencia cuando mencionamos el término Patrimonio, cuál es el sentido del mismo y cuál es su importancia o relevancia para el conjunto de la sociedad.

Para Hernández Cardona: “El concepto “patrimonio” es polisémico y experimenta un continuo proceso de deconstrucción y construcción” (Hernández, 2003: 455). Entendemos, por lo tanto, que el patrimonio presenta muchas acepciones distintas, todas igual de correctas, pero incompletas, pues ninguna puede concentrar todo lo que puede significar.

El patrimonio es el resultado de todo nuestro recorrido como especie, es el legado que tenemos o pervive, es la historia de nuestros antepasados y la forma en que se relacionaban, son las huellas físicas o no del pasado, etc. (Hervías, 2016: 47). En definitiva, el patrimonio debe ser entendido como mucho más que un objeto, monumento o edificio antiguo, como se puede llegar a pensar.

El término Patrimonio proviene del latín *Patrimonium*: - *patri*- (padre) y -*monium*- (recibido), lo que se podría traducir como “lo recibido de nuestros padres” que, en este caso, se refería a una propiedad privada heredada a nivel familiar (Llull, 2005: 11). Aunque el concepto ha ido variando y evolucionando a lo largo del tiempo, muchas de las acepciones del mismo siguen haciendo referencia a la propiedad para definirlo. En este sentido, la Real Academia Española lo define así:

1. m. Hacienda que alguien ha heredado de sus ascendientes.
2. m. Conjunto de los bienes y derechos propios adquiridos por cualquier título.

3. m. Patrimonialidad.

4. m. Der. Conjunto de bienes pertenecientes a una persona natural o jurídica, o afectos a un fin, susceptibles de estimación económica.

Como observamos, la idea de propiedad se mantiene en el tiempo para definir el término de Patrimonio, solo que, en la actualidad, se entiende que el legado no es individualizado, sino que es el conjunto de la sociedad quien es beneficiaria de la herencia de nuestros antepasados (Maldonado, 2019: 12-13).

Si bien esta concepción es relativamente contemporánea, ya en 1462 el Papa Pío II promulgó la bula *Cum alman nostram urbem*. Mediante esta bula defendía que las antigüedades del pasado debían ser conservadas porque son “el testimonio que muestra la fragilidad de las ocupaciones humanas” y enunció una serie de prohibiciones concretas respecto a los edificios antiguos, estableciendo sanciones en caso de incumplimiento de las normas. Esto quiere decir que, por aquel entonces, se entendía ya que los propietarios del patrimonio no eran solo los familiares, sino las generaciones presentes y futuras, a diferencia de lo que sucedía en el mundo romano (Choay, 2007: 100).

Posteriormente, durante la Ilustración en pleno siglo XVIII, surgen nuevos conceptos como el de cultura, descrita como:

“El conjunto de modelos o patrones, explícitos o implícitos, mediante los cuales una sociedad regula el comportamiento de las personas que la integran. Y eso abarcaría costumbres, prácticas, códigos, normas y reglas de la manera de ser, vestimenta, religión, rituales, normas de comportamiento y sistemas de creencias.” (García, 2012: 15).

Este primer concepto de cultura abarca ya al conjunto de la sociedad, como comenzará a globalizarse el de patrimonio tras la revolución francesa, en la cual derechos como la propiedad adquieren un carácter más general y accesible para el conjunto de la sociedad. Ya en el siglo XIX, la idea de la propiedad patrimonial engloba a todo el territorio nacional de los distintos estados, como símbolo de pertenencia y sentimiento hacia su pasado, produciéndose una transformación política y social hacia la protección del patrimonio. Sin embargo, no será hasta el siglo XX, tras los desastres ocasionados por las guerras mundiales, que la idea de defensa y conservación del patrimonio adquiera un carácter totalmente universal, principalmente tras la Segunda Guerra Mundial. Hasta entonces, las propias naciones habían aprovechado la falta de

figuras protectoras del patrimonio para expoliar y hacerse con todo aquello que podían de otros países y regiones, como es el caso de Inglaterra o EEUU (Rodríguez y González, 2013: 7).

### **3.2. NECESIDAD DE PROTECCIÓN, INVESTIGACIÓN Y ANÁLISIS DEL PATRIMONIO**

La creación de la Sociedad de Naciones en 1919 supuso un primer punto de inflexión hacia la salvaguarda del patrimonio, la cual dejaría constancia de ello en distintos documentos (Carta de Atenas de 1931, Conferencia de la Haya de 1954, Carta de Venecia de 1964, etc.) y a través de diferentes organizaciones como la UNESCO. Surge así la necesidad de proteger y velar por el patrimonio, entendiéndolo como propiedad universal, herencia de todos los países y personas. La carta de Venecia de 1964 refleja esta idea:

“Las obras monumentales de los pueblos, portadoras de un mensaje espiritual del pasado, representan en la vida actual el testimonio vivo de sus tradiciones seculares. La humanidad, que cada día toma conciencia de los valores humanos, las considera patrimonio común reconociéndose responsable de su salvaguardia frente a las generaciones futuras.” (ICOMOS, 1964: 1).

A lo largo del siglo XX, comienza a producirse una creciente internalización del patrimonio, que aboga por conservar y gestionar el mismo a través de mecanismos legales de protección y desarrollo. Para García Cuetos, durante esta etapa:

- “1. Se valora el patrimonio desde su contenido no desde la apariencia.
2. Los conjuntos urbanos y los centros históricos se convierten en objeto de atención y, por lo tanto, interesa su protección y salvaguarda.
3. Se concede importancia al ambiente, entendido como resultado de los elementos que forman parte del conjunto.
4. En los años setenta se produce una internacionalización de la preocupación patrimonial.
5. La década de los ochenta amplía el concepto de patrimonio, incluyendo los jardines históricos, los Sitios y, finalmente, con la Carta de Toledo 1986, se fija la idea de la protección de la trama urbana.” (García, 2012: 31)

A raíz de las catástrofes provocadas por las guerras mundiales, que llevaron a la destrucción y pérdida de numerosos elementos y sitios patrimoniales de incalculable valor, las distintas naciones toman una mayor consciencia acerca de la necesidad de proteger y conservar su historia y la del resto de la humanidad. Como fruto de ello se celebran diferentes reuniones en

las cuales se firman distintas cartas oficiales con el fin de establecer conductas y medidas a favor de la defensa del patrimonio, cada vez más concretas y precisas. Entre ellas encontramos: la Carta de Atenas para la Restauración de Monumentos Históricos (1931), la Convención de la Haya para la protección de bienes culturales en caso de conflicto armado (1954), la mencionada Carta de Venecia (1964) o Carta Internacional para la Conservación y Restauración de Monumentos y la Convención sobre la Protección del Patrimonio Mundial, Cultural y Natural (1972), principalmente. Además de estas, encontramos otra serie de reuniones y cartas complementarias, las cuales modificaban o incidían sobre ciertas cuestiones más específicas que debían de ser tratadas por motivos concretos, como es el caso, por ejemplo, de: Carta del restauro, Roma (1932); Carta del restauro, Venecia (1972); Carta Internacional para la Conservación de las Ciudades Históricas. Toledo (1986), Segundo Protocolo de la Haya (1999), Carta de Cracovia, etc. (Maldonado, 2019: 25-28).

Respecto a la conservación, investigación y difusión del Patrimonio histórico-arqueológico en concreto, encontramos otros textos y documentos posteriores como la Carta Internacional para la Gestión del Patrimonio Arqueológico (1990) realizada por el Comité Internacional para la Gestión del Patrimonio Arqueológico (ICAHM) y aprobada por la Asamblea General del ICOMOS en Lausana (Suiza). El siguiente fragmento de dicha carta refleja la notable consciencia adquirida sobre la importancia de la proteger, gestionar e investigar el patrimonio arqueológico correctamente para el beneficio presente y futuro de la humanidad:

“Es un hecho ampliamente aceptado que el conocimiento y la comprensión de los orígenes y del desarrollo de las sociedades humanas revisten una importancia fundamental para toda la humanidad, ya que sirven para identificar sus raíces culturales y sociales. El patrimonio arqueológico constituye el testimonio esencial de las actividades humanas del pasado. Su protección y su adecuada gestión son imprescindibles para permitir a los arqueólogos y a otros científicos estudiarlo e interpretarlo en nombre de generaciones presentes y futuras, y para beneficio de las mismas.” (ICOMOS, 1990:

1)

En la Reunión de Vantaa (Finlandia) del año 2000 titulada *Hacia una Estrategia Europea sobre Conservación Preventiva*, se establecen ciertas medidas de prevención para la conservación y protección del patrimonio histórico, arqueológico y artístico, entendiéndose que la forma de gestión más adecuada para éste pasa por reducir el riesgo de daño que puede sufrir y evitar el deterioro del mismo. En la exposición de motivos de dicho documento se argumenta:

“El patrimonio cultural es muy frágil. Los componentes físicos y tangibles de este patrimonio se ven amenazados por los demolidores estragos de las guerras y las catástrofes naturales o por los

efectos, más silenciosos, de la contaminación, los insectos, las condiciones meteorológicas o los actos aislados de vandalismo. La conservación preventiva reduce estos riesgos y aminora el ritmo de deterioro de colecciones enteras y, por ello, es pieza fundamental de toda estrategia de conservación y un medio eficaz y económico de preservar la integridad del patrimonio cultural, reduciendo la necesidad de una intervención adicional sobre los objetos por separado.” (U.E., 2000: 2)

Ante el creciente desarrollo e implantación de las herramientas informáticas y de los contenidos digitales creados, se firma en 2003 la Carta sobre la Preservación del Patrimonio Digital por la UNESCO. Mediante esta carta se pretende establecer medidas para preservar y conservar el Patrimonio Digital, dado que éste también puede perderse. Para ello, el patrimonio digital de los distintos países y zonas geográficas del mundo se debe poner a disposición del resto, con el fin de generar contenidos accesibles para todos.

“Hay que preservar y poner a disposición de cualquier persona el patrimonio digital de todas las regiones, naciones y comunidades a fin de propiciar, con el tiempo, una representación de todos los pueblos, naciones, culturas e idiomas.” (UNESCO, 2003: 81)

Por último, debemos detenernos en dos de los hitos más importantes que han provocado el desarrollo de la digitalización del patrimonio histórico-arqueológico, y que han actuado como mecanismos legales para la protección, investigación y difusión del mismo a través de herramientas y métodos electrónicos e informáticos como la propia fotogrametría. Estos son la Carta de Londres (2009) y los Principios de Sevilla (2011).

La Carta de Londres para la Visualización Computarizada del Patrimonio Cultural del 7 de febrero de 2009, se firma con el fin de establecer un consenso sobre la metodología a seguir para llevar a cabo los procesos de digitalización del contenido patrimonial y cual debía ser el nivel de resultados de los modelos digitales de los elementos culturales en general, con el objetivo de mantener el rigor científico e intelectual de los mismos. El Preámbulo de dicho documento dice así:

“La Carta pretende mejorar el rigor con el que los métodos de visualización computarizada y sus resultados se usan y evalúan en el ámbito del patrimonio cultural, favoreciendo de ese modo la mejor comprensión y el mayor reconocimiento de tales métodos y resultados.” (AA.VV., 2009: 2)

Los principios sobre los que se asienta la Carta de Londres para la creación de herramientas, métodos y técnicas que permitan una correcta, rigurosa y eficaz digitalización del patrimonio cultural son: el principio de Implementación, el principio de Propósito y Métodos, el principio

de Fuentes de Investigación, el principio de Documentación, el Principio de Sostenibilidad y el Principio de Acceso.

Mediante una serie de normas y medidas de uso y aprovechamiento de las nuevas tecnologías aplicadas a la digitalización del patrimonio, esta carta se establece como punto de referencia para el trabajo investigador de todos aquellos profesionales dedicados a la gestión del patrimonio cultural.

Por su parte, los Principios de Sevilla son promovidos por la Sociedad Española de la Arqueología Virtual (SEAV) en 2011, y se constituyen como una ampliación de la Carta de Londres (2009), pero centrados en la digitalización del patrimonio arqueológico.

A diferencia de la Carta de Londres, que establecía ciertos principios para la digitalización del patrimonio en general, este documento especifica concretamente cuáles son los preceptos o normas bajo las cuales deben guiarse los investigadores o arqueólogos que trabajen con el patrimonio arqueológico, a fin de que se digitalice correctamente el mismo, velando así por su protección, conservación y difusión. Además de esto, en este documento se definían con precisión ciertos términos relacionados con la Arqueología Virtual, que permiten un mejor entendimiento y globalización de los mismos.

Los principios de Sevilla son los siguientes: interdisciplinariedad, finalidad, la complementariedad, autenticidad, rigurosidad histórica, eficiencia, transparencia científica, y formación y evaluación (Sociedad Española de Arqueología Virtual, 2011: 3). Como veremos en el presente trabajo, la fotogrametría aplicada a la arqueología debe de ser una técnica rigurosa y eficiente, que asiente sus bases sobre tales principios, con la idea de fomentar el rigor científico, para así poder proteger y promover el conocimiento sobre el pasado de un modo eficaz y accesible a todo el mundo.

### **3.3. ARQUEOLOGÍA VIRTUAL Y NUEVAS TECNOLOGÍAS: LA FOTOGRAMETRÍA**

El término “Arqueología Virtual” fue propuesto por el arqueólogo e informático Paul Reilly en 1990, quien lo definía como:

“Un conjunto de técnicas informáticas que permiten la visualización tridimensional (3D) de la representación virtual y realista de los objetos y edificios antiguos, cuyos restos han desaparecido o

están en un estado de preservación tan deficiente que hacen imposible su observación o muy difícil su interpretación.” (Reilly, 1990: 133)

Reilly defiende, por lo tanto, la necesidad de digitalizar tridimensionalmente el patrimonio arqueológico, para así tener réplicas o modelos idénticos al original, sin caer en la banalidad de manipular o deteriorar aún más el mismo, por el temor a perderlo para siempre. Los numerosos proyectos sobre virtualización arqueológica llevados a cabo por Reilly desde la década de los 80 en adelante, le dieron el sobrenombre de “Padre de la Arqueología Virtual”.

Cinco años más tarde de la publicación de Reilly, en 1996, Mauricio Forte y Jean Leclant publican su obra “Arqueología, paseos virtuales por las civilizaciones desaparecidas”, la cual asentaba las bases de la ya conocida como Arqueología Virtual, aunque no sería hasta unos años más tarde que el propio concepto, así como la forma de entender esta nueva forma de hacer arqueología y practicarla tomasen forma.

Esta virtualización de la arqueología se realiza a través del empleo de distintas herramientas y métodos informáticos y de digitalización que permiten trasladar elementos y restos arqueológicos del medio físico al medio digital. Estas técnicas e instrumentos de digitalización se conocen comúnmente como Nuevas Tecnologías, y mediante sus múltiples aplicaciones se pueden obtener enormes beneficios para la propia arqueología (Rodríguez, 2013: 38).

Si bien hoy día sí somos conscientes de la fragilidad del patrimonio, esto no siempre ha sido así, como ya hemos visto. Estas nuevas tecnologías aplicadas a la protección, conservación, investigación y difusión del patrimonio histórico-arqueológico tienen un uso globalizado reciente, de apenas 30 años, aunque cada vez son más los investigadores y arqueólogos que hacen uso de las mismas y reflejan los resultados de su trabajo en distintos proyectos académicos.

La constante digitalización que nos rodea y la continua especialización tecnológica, propician la aparición de estas nuevas herramientas que facilitan y benefician el trabajo arqueológico. En este sentido, se hace necesaria una adecuada formación informática de los mismos arqueólogos e investigadores. Las herramientas informáticas pueden facilitar y mejorar el trabajo de análisis en laboratorio, al igual que las máquinas e instrumentos de teledetección hacen lo propio con el respectivo trabajo de registro en campo. Santiago García Lorca ya abordaba en 1999 la necesidad de una informatización cada vez mayor de la arqueología, con el fin de obtener todas las ventajas que ofrecen las distintas aplicaciones informáticas:

“De otro lado, hemos de ser conscientes de la necesidad de arqueólogos informáticos, pues, aunque es cierto que todo el mundo puede usar aplicaciones informáticas en un momento determinado, no es menos cierto que no todos pueden desarrollar aplicaciones, esto es, programar. Y hablamos de arqueólogos informáticos, no de informáticos, ya que el oficio de arqueólogo no desaparece, sino que se potencia, pues en esta disciplina lo que se consigue es agilizar y facilitar el trabajo de investigación.” (García, 1999: 204)

La técnica fotogramétrica, objeto de nuestra investigación en este proyecto, se enmarca dentro de estas nuevas tecnologías informáticas como método de teledetección. Pero, ¿qué es la teledetección y en qué consiste?

El término teledetección nace del francés *téledétection*, que, a su vez es una traducción del término anglosajón *remote sensing*. Según López y Caselles, la teledetección puede definirse como: “la adquisición de información sobre un objeto a distancia, es decir, sin que haya contacto material entre el objeto o sistema observado y el observador” (López y Caselles, 1991: 33).

Así mismo, ya en la década de los 90, Castaño, et al., presentaban algunas de las múltiples ventajas que pueden ofrecer estas herramientas de teledetección:

- “1. Se realiza una cobertura periódica de la superficie, lo que permite estudios de evolución temporal.
2. Permite una visión global de grandes espacios, lo que homogeneiza la toma de datos.
3. Permite obtener información sobre regiones no visibles del espectro electromagnético, registrando datos inaccesibles al ojo humano.” (Castaño et al., 1996: 183-184)

La teledetección mediante fotogrametría aplicada a la arqueología permite la documentación y registro de grandes superficies de terreno, ofreciendo importantes datos acerca de la configuración del paisaje natural y urbano, así como obtener información sobre zonas y objetos arqueológicos fuera del alcance de la propia visión humana. La teledetección arqueológica ha sido un tema bastante abordado desde los primeros trabajos realizados en los 90 hasta ahora a través de diferentes publicaciones y eventos científicos (Beldevere et al., 2001; Emmolo et al., 2004; Palacios et al., 2004; Weller, 2006; Rejas et al., 2006; etc.).

Por su parte, la fotogrametría ha sido una técnica bastante estudiada, analizada y compartida en distintos trabajos y revistas académicas, sobre todo en los últimos años. El hecho que marcó un punto de inflexión en el conocimiento, adaptación y aplicación de esta técnica en arqueología fue el desarrollo del algoritmo Scale-Invariant Feature Transform (SIFT) por David Lowe

(Lowe, 1999: 1152-1155). Este algoritmo permitía una sustancial simplificación en el uso de la misma, al establecer coincidencias entre puntos comunes de las imágenes de forma automática. Fue tras la publicación definitiva de este trabajo en 2004 (Lowe, 2004: 92-108), tras corregir ciertos errores y adaptar mejor el uso de la técnica, cuando el empleo de la fotogrametría aplicada a la arqueología creció de manera exponencial.

Estas nuevas tecnologías como la fotogrametría u otras técnicas no invasivas se constituyen como herramientas de enorme potencial y utilidad que cabalgan entre las ciencias físicas y las ciencias naturales, cuyo uso permite explorar nuevos campos de conocimiento e investigación. En palabras de Flanders et al., estas técnicas son: “un dominio híbrido que cruza fronteras disciplinarias y también barreras tradicionales entre la teoría y la práctica, la implementación tecnológica y la reflexión académica” (Flanders et al., 2007: en línea).

Aparte de los numerosos y continuos trabajos científicos que han tratado el uso de la fotogrametría y otras técnicas en el terreno arqueológico desde su origen, encontramos ciertos grupos y entidades de especialistas que abogan por el empleo de estas nuevas tecnologías y que recogen en diferentes publicaciones, congresos y reuniones su labor, tal es el caso de: ISPRS (*International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*), CIPA Heritage Documentation (ICOMOS), *Computer Applications & quantitative Methods in Archaeology* (CAA), SEAV e INNOVA Center (*European Center for Innovation in Virtual Archaeology*), etc. Así mismo, diversas revistas también han tratado en profundidad el uso y las ventajas de aplicar la fotogrametría y otros métodos de Arqueología Virtual: *Virtual Archaeology Review*, *International Journal of Heritage in the Digital Era*, *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, *International Journal of Computer Science and Information Security* (IJCSIS), *The International Archives of the Photogrammetry*, etc.

La fotogrametría es una técnica en constante avance y especialización, por lo que la cantidad de trabajos académicos relacionados se incrementa continuamente. Esto requiere de una ininterrumpida actualización de contenidos y una ininterrumpida formación por parte de arqueólogos y especialistas que busquen sacar el máximo provecho de la técnica para la investigación arqueológica.

### 3.3.1. EVOLUCIÓN DE LA FOTOGRAMETRÍA APLICADA A LA INVESTIGACIÓN ARQUEOLÓGICA EN ESPAÑA

La fotogrametría en su aplicación en arqueología en España es de uso relativamente reciente, con una periodización de poco más de 40 años. Hasta los años 90 del pasado siglo, la gran mayoría de los trabajos y proyectos realizados mediante esta técnica en nuestro país se reducían casi en su totalidad al puro levantamiento topográfico de ciertos yacimientos y edificios, como método de prueba de su eficacia y utilidad, además de su empleo en el diseño de cartografía y mapas geomorfológicos. Aún no se tenía constancia de los múltiples beneficios de la técnica respecto a la arqueología. Entre la bibliografía referente a este período encontramos “*Levantamiento de la catedral de Burgos (1989)*” de Carlos Clemente San Román o “*Procesamiento digital de imágenes: Aplicaciones en fotogrametría y teledetección (1991)*” de Alfredo Ovando, por citar algunas de las más relevantes.

Tras estas primeras experiencias en el uso de la técnica se pretendió alcanzar una cierta especialización en las aplicaciones fotogramétricas en el terreno arqueológico, así como para la documentación de monumentos y sitios patrimoniales. Uno de los principales precursores de esta fotogrametría experimental en España es el arqueólogo Antonio Almagro, responsable del Gabinete de Fotogrametría del Instituto del Patrimonio Histórico Español entre 1984 y 1987. Con una dilatada trayectoria profesional sobre el empleo de la fotogrametría para la documentación del patrimonio arqueológico, Almagro ha presentado y publicado sus proyectos en distintos congresos y revistas, entre los cuales podemos destacar: *Documentación fotogramétrica en ruinas y monumentos (1973)*, *Estudio fotogramétrico del Teatro Romano de Sagunto (1978)*, *Le Rélevé Photogrammétrique de la Citadelle d'Amman (1988)*, *Photogrammetrie numerique pour la Documentation du site archéologique de Madinat al-Zahra (1992)*, *Levantamiento planimétrico del Templo de Debod (1994)*, *Planimetría del Alcázar de Sevilla (2000)*, etc. Otro de los autores que ha analizado las aplicaciones de la fotogrametría, en este caso para el estudio paisajístico, es Ángel Manuel Felicísimo; entre sus obras podemos destacar: “*Modelos digitales del terreno (1994)*” o “*Rectificación y ortorrectificación de imágenes de satélite (2003)*”, por ejemplo. Otras de las publicaciones más destacadas de este período son: “*Fotogrametría y análisis arqueológico (1996)*” de Luis Caballero, “*Fotogrametría arquitectónica: fundamentos y aplicaciones (1999)*” de Leandro Cámara, “*Fotogrametría aplicada a la documentación patrimonial (2000)*” de Silverio García-

Cortés y “*Fotogrametría terrestre aplicada a la restauración arquitectónica y prospecciones arqueológicas (2000)*” de Manuel Jáuregui.

A partir de los años 2000, la aparición de la tecnología *Structure from Motion (SfM)* provoca un incremento en el uso de la fotogrametría en arqueología, dada su versatilidad y la enorme operabilidad que ofrece en la toma y procesado de imágenes. Este período se caracteriza por la toma de imágenes para la investigación arqueológica, y la realización de planimetrías y de reconstrucciones virtuales en ciertos espacios monumentales mediante el empleo de la técnica. Entre los trabajos publicados más destacados de esta nueva etapa, destacamos: “*El modelo analítico tridimensional obtenidos por fotogrametría. Descomposición, manejo y aplicaciones en el campo de la restauración arquitectónica (2003)*” de Pablo Latorre y Leandro Cámara, “*La aplicación de la fotogrametría al estudio de los puentes romanos: el puente de Alconétar (2004)*” de Jesús Acero, “*Fotogrametría y escaneo láser 3D como técnicas de captura de datos espaciales para una base de datos craneofacial nacional (2005)*” de Alberto Chong, “*Fotogrametría de bajo coste para estudios arqueológicos de la arquitectura (2009)*” de Antonio Tomás Mozas, etc.

La mayor revolución experimentada en la aplicación de fotogrametría arqueológica tuvo lugar a partir de 2013 aproximadamente, momento en el cual la generalización en el empleo de los UAVs o drones permitió intensificar el uso de la técnica para el registro, la documentación y el análisis de yacimientos y zonas arqueológicas. En este momento, se comienza a emplear la fotogrametría para el registro de las distintas secuencias estratigráficas en arqueología de campo, además de para documentar las alteraciones sufridas por el propio patrimonio arqueológico. Algunas de las publicaciones que encontramos más relevantes de este período son: “*Fotogrametría aérea por drone en yacimientos con grandes estructuras. Propuesta metodológica y aplicación práctica en castillos medievales del Campo de Montiel (2015)*” de David Gallego Valle et al., “*Modelado 3D en patrimonio cultural por técnicas de Structure From Motion (2016)*” de José M. Pereira, “*Prácticas y usos de la fotogrametría digital en arqueología (2016)*” de Ana María Charquero, “*El uso de Fotogrametría Digital como registro complementario en Arqueología. Alcances de la técnica y casos de aplicación. (2017)*” de Gonzalo Moyano y “*La aplicación de la Fotogrametría (SfM) y las nuevas tecnologías para la mejora de la documentación, difusión y divulgación del patrimonio arqueológico (2020)*” de Alexis Maldonado.

En los últimos años, un amplio porcentaje de los trabajos fotogramétricos se han enfocado en el empleo de la técnica para la reconstrucción tridimensional de objetos y restos arqueológicos, así como para llevar a cabo proyectos de gamificación, realidad aumentada e inteligencia artificial. Cabe destacar, en especial, la combinación de la fotogrametría y la inteligencia artificial para la obtención automatizada de información arqueológica (recuento de materiales, toma de medidas longitudinales, georreferenciación exacta, etc.) a partir del uso de UAVs. Entre los proyectos y grupos de investigación que están apostando por este uso de la fotogrametría junto a la IA encontramos: ARQUIDRON, GIAP (Grup d'investigació en Aqueologia del Paisatge) del Institut Català d'Arqueologia Clàssica o IndiaArtDOC, entre otros.

Así mismo, desde los primeros usos de la fotogrametría en España han sido varias las organizaciones y entidades que han estudiado las ventajas que ofrece la misma, empleándola en buena parte de sus proyectos.

El IGN (Instituto Geográfico Nacional) emplea fotogrametría para la realización de cartografía y la obtención de información geográfica (ocupación del suelo, urbanismo, ordenación del territorio, etc.), recursos que obtiene mediante la fotografía aérea y la generación sobre las mismas de modelos de elevaciones. Desde el año 2004, desde el IGN se trabaja en el Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA), cuyo objetivo es la obtención de ortofotos digitales de alta resolución (25 o 50 cm de tamaño de píxel) y modelos digitales de elevaciones de todo el territorio español (cada 2 o 3 años).

Además, entre los organismos e instituciones que proyectan las utilidades y beneficios de la fotogrametría junto a otras herramientas y técnicas de teledetección en el campo arqueológico destaca la Sociedad Española de Cartografía, Fotogrametría y Teledetección (SECFT) que desde su fundación en 1977 realiza proyectos y actividades en el campo de la cartografía y de la información geográfica, tanto a nivel nacional como internacional.

Por su parte, la Universidad de Burgos ha apostado desde hace ya un tiempo por el uso de las nuevas tecnologías aplicadas a la investigación arqueológica, entre las que se encuentra la propia fotogrametría, impartiendo además seminarios y cursos de formación a distintos niveles de especialización. Así mismo, la Universidad de Alicante realiza cursos de iniciación en fotogrametría arqueológica donde muestran también los resultados de algunos de sus proyectos. En cuanto a la fotogrametría aérea, la Unidad de investigación, innovación y competitividad para el medio patrimonial de la Universidad de Córdoba y la Unidad de Geodetección del

Patrimonio Histórico de la Universidad de Cádiz llevan varios años trabajando en la documentación y análisis de zonas con potencial arqueológico tanto en fotogrametría aérea como terrestre.

## 4. LA FOTOGRAMETRÍA

### 4.1. DESCUBRIENDO LA TÉCNICA

#### 4.1.1. DEFINICIÓN

Etimológicamente, el término *fotogrametría* proviene de las tres raíces griegas: *photos* (luz), *grama* (lo que está dibujado), y *metron* (medir). En base a esto, podríamos decir que su significado es *medir gráficamente lo que está dibujado por medio de la luz* (Roldán, 2019: 57). Dicho término fue acuñado a comienzos del siglo XIX, con los primeros pasos de la fotogrametría a través del dibujo, y ha permanecido intacto hasta nuestros días.

Actualmente, podemos definir la fotogrametría como una técnica de medición que permite la extracción de información a través de la fotografía. Según *The International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS)*:

“La fotogrametría es la ciencia de realizar mediciones e interpretaciones confiables por medio de las fotografías, para de esa manera obtener características métricas y geométricas (dimensión, forma y posición), del objeto fotografiado.” (Soler, 2013: 27).

En cuanto a esta definición, hemos de entender a la fotogrametría como una herramienta de análisis de objetos y espacios, de pequeño y mayor tamaño, que permite mediante la toma de imágenes y el procesamiento de las mismas, a través de diferentes softwares informáticos, la extracción de datos precisos y cuantificables. Aun así, el alcance de la técnica es mucho mayor, siendo innumerables los diferentes usos y utilidades que ésta aporta en las distintas áreas y ciencias (arquitectura, cartografía, topografía, arqueología, etc.) donde se aplica.

Otras definiciones de la fotogrametría inciden más en la importancia de la toma de imágenes, la cual resulta esencial para entender en qué consiste todo el proceso fotogramétrico, como por ejemplo la establecida por Henri Bonneval en su libro *Photogrammetrie Generale*, describiéndola como:

“La técnica cuyo objeto es estudiar y definir con precisión la forma, dimensiones y posición en el espacio de un objeto cualquiera, utilizando esencialmente medidas hechas sobre una o varias fotografías de ese objeto.” (Bonneval, 1972: 35)

Se entiende la fotogrametría como una técnica que requiere cierto conocimiento en la toma de imágenes, como veremos más adelante, para que el resultado obtenido mediante la combinación de las mismas pueda ser lo más útil posible al investigador o interesado.

Por su parte, otros autores como Slama entienden la fotogrametría como:

“Arte, ciencia y tecnología de obtener información fidedigna de los objetos físicos y del medio ambiente mediante procesos de registro, medición e interpretación de imágenes fotográficas y de modelos de energía radiante electromagnética y otros fenómenos.” (Slama, 1980: 50)

En este caso, la técnica no es definida sólo en su aplicación sobre objetos físicos, sino como una herramienta útil para todo aquello que se pueda documentar y medir mediante imágenes, desde pequeñas piezas hasta grandes superficies de terreno. Esta definición se relaciona directamente con el uso de la propia fotogrametría en arqueología, al registrar a través de imágenes aéreas yacimientos arqueológicos de gran extensión, de los cuales se extraerán, mediante el proceso de restitución de las mismas y la consecuente labor de investigación, datos medibles y cuantificables.

Los fundamentos en los cuales se basa la fotogrametría se remontan a mediados del siglo XIX cuando se realizaban dibujos de edificios y obras arquitectónicas desde distintos puntos de vista diferentes que, posteriormente, permitían a su creador obtener una vista en tres dimensiones, aunque no constituyesen verdaderos modelos tridimensionales. Con la invención de la fotogrametría digital y su especialización a través de los softwares de restitución, se comenzaron a obtener productos 3D que han convertido a la fotogrametría en una técnica de sustancial aplicación e infinitas posibilidades.

Tras los últimos avances informáticos, se podría definir a la fotogrametría como una técnica que permite crear objetos y modelos tridimensionales mediante datos bidimensionales (fotografías), y que poseen información precisa y analizable sobre su forma, sus dimensiones y el espacio que ocupan en su lugar de origen (Maldonado, 2019: 58).

El principio en el que se basa la técnica fotogramétrica para la obtención de los modelos 3D es el de la estereoscopia, es decir, la visión de un mismo objeto desde dos o más posiciones distintas permitiendo así observar su profundidad. Según Montero y Sardi, la visión estereoscópica:

“Es natural del ser humano y consiste en la obtención de imágenes de un mismo objeto desde dos posiciones ligeramente diferentes, la posición de cada ojo, las cuales son transmitidas hacia el cerebro; ahí, mediante un proceso de comparación y triangulación de las imágenes capturadas, se logra interpretar las diferencias (por ejemplo, la profundidad de los objetos). Esto genera un modelo estereoscópico tridimensional en la mente del observador.” (Montero y Sardi: 2017: 28)

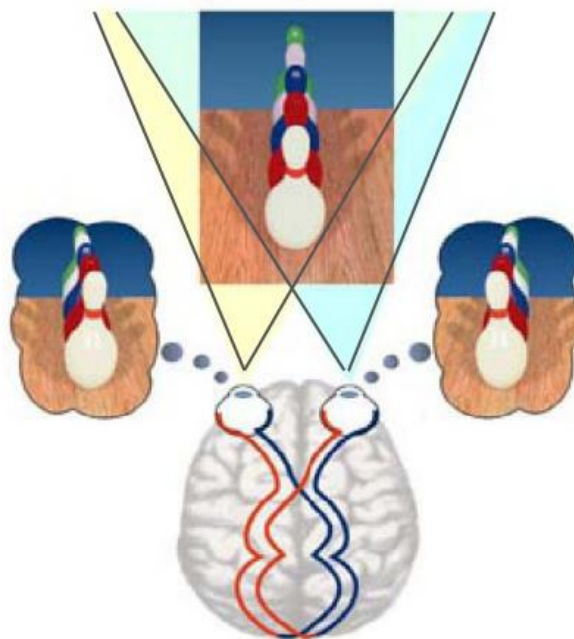


Figura 1. Ejemplo de visión estereoscópica humana (Posada, 2013: 2).

La fotogrametría funciona de un modo similar, la obtención de imágenes de un objeto con cierto solape entre sí desde distintos ángulos permite crear mediante diferentes softwares informáticos especializados un objeto digital en tres dimensiones (Montero y Sardi, 2017).

El proceso mediante el cual se transforman las imágenes en productos fotogramétricos a través de distintas fases se conoce como restitución 3D y requiere de cierto conocimiento previo. Más adelante, mostraremos en qué consisten cada una de esas fases y cuál es la forma que consideramos más correcta para llevar a cabo todo el proceso y obtener un producto tridimensional de garantías para nuestra finalidad particular.

Dado la enorme aplicabilidad que posee la fotogrametría, ésta puede operar en multitud de espacios y situaciones diferentes, por lo que deberemos proceder a emplearla de modo distinto en función de las características propias del medio físico donde se lleve a cabo el proceso de toma de imágenes. De este modo, la fotogrametría se clasifica en: terrestre y aérea.

La fotogrametría terrestre se usa para fotografías estáticas y en posiciones determinadas sobre el terreno, debiendo ser la persona que realiza la captura quien gire alrededor del objeto o espacio a fotografiar. Por su parte, la fotogrametría aérea es aquella que se lleva a cabo mediante aeronaves (drones, aviones, globos, etc.) que llevan una cámara acoplada, obteniendo las imágenes en movimiento.

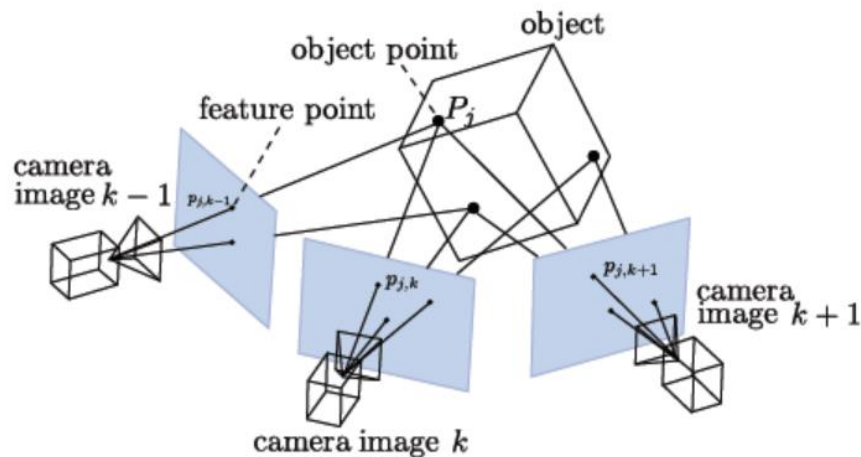


Figura 2. Método de captación de imágenes en fotogrametría estereoscópica.

Autores como Vozmediano (2006: 24), clasifican la fotogrametría según la posición de la cámara a la hora de realizar la captura, distinguiendo así tres tipos: espacial, mediante satélites; aérea, mediante aviones; y terrestres o de objeto cercano<sup>1</sup>, según si han sido empleadas en levantamientos topográficos o no, respectivamente.

En cuanto a su funcionalidad, la fotogrametría pretende obtener mucho más que un producto 3D, busca ser una reproducción visual lo más fidedigna posible con la realidad del objeto o espacio fotografiado. Mediante la obtención de un producto fotogramétrico casi idéntico al real podemos obtener datos manipulables y analizables que nos informen de la potencialidad de la pieza o lugar.

En la actualidad, la fotogrametría se aplica principalmente: en cartografía y mapeo, documentación precisa en 3D del Patrimonio Cultural, ingeniería inversa, monitoreo y análisis de deformación de estructuras, análisis de movimiento humano, mediciones industriales,

---

<sup>1</sup> Encontramos opiniones dispares respecto a la definición y concepto de fotogrametría de objeto cercano, también conocida como de corta distancia. Algunos autores como Al-Ruzoq y Abu Dabous (2017) la describen como aquella cuya distancia de captura de imágenes no debe exceder los 100 metros, otros en cambio permiten una lejanía de hasta 200 metros para considerarla de objeto cercano (Lerma et al., 2010). Esto difiere en cuanto a la fotogrametría aérea, según Miranda (2004) para que se considere de corta distancia la altura de vuelo de la aeronave no debe sobrepasar los 1000 metros desde la superficie terrestre.

urbanismo, forense, navegación, dispersión de calor, telecomunicaciones, etc. (Remondino, 2011: 1111).

## **4.1.2. EVOLUCIÓN DE LA FOTOGRAMETRÍA**

### **4.1.2.1. DISTINTAS ETAPAS**

#### **Fotogrametría plana (1850-1900)**

Los primeros pasos de la fotogrametría se remontan a mediados del siglo XIX, tras la invención de la fotografía por el francés François Arago en 1839, hecho a partir del cual diferentes científicos e investigadores intentan aplicar los principios de la misma desde distintos enfoques.

Entre las personas que más influyeron en el nacimiento y desarrollo de la técnica destacamos, principalmente, a dos: el francés Aimé Laussedat, comúnmente conocido como el padre de la fotogrametría, y el arquitecto alemán Albrecht Meydenbauer, quien definió la técnica, y aplicó la misma muchos de sus proyectos. Ambos dedicaron buena parte de su vida a impulsar el avance de la técnica a pesar de la oposición y las dificultades a la que tuvieron que enfrentarse por su carácter de pioneros.

El ingeniero militar francés Aimé Laussedat (1819-1907) llevó a cabo múltiples investigaciones sobre el uso de la fotografía para la creación de mapas topográficos. Para ello, Laussedat desarrolló el “fototeodolito”, que incorporaba una cámara fotográfica a un teodolito<sup>2</sup> convencional para capturar información topográfica de gran precisión. Mediante la creación de un original método matemático que convertía las perspectivas superpuestas de las imágenes en un solo plano, consiguió corregir los errores entre ellas de forma manual (Granshaw, 2019: 131). Así mismo, Laussedat, junto con el fotógrafo francés Félix Nadar, fue uno de los primeros en probar con la fotografía aérea mediante cometas y globos aerostáticos. El éxito del francés en el desarrollo de fotogrametría terrestre le llevó a dirigir un grupo especializado encargado de elaborar mapas cartográficos de los Alpes. Además de esto, llevaría a cabo el levantamiento fotogramétrico de distintos edificios emblemáticos de Francia (Maldonado, 2019: 61).

---

<sup>2</sup> Un teodolito es un instrumento que sirve para medir de una forma óptico-mecánica, obteniendo medidas de ángulos verticales y horizontales, con una gran precisión.

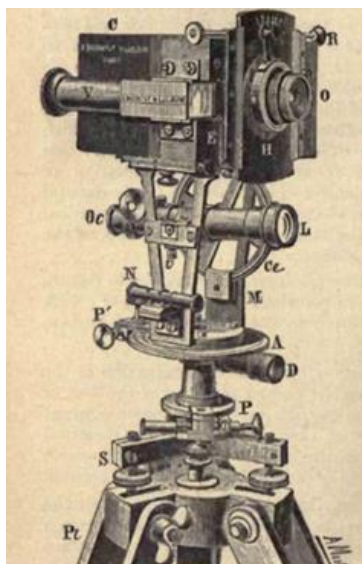


Figura 3. Ilustración del foteodolito diseñado por Laussedat y empleado en algunos de sus levantamientos fotogramétricos (Granshaw, 2019: 139).

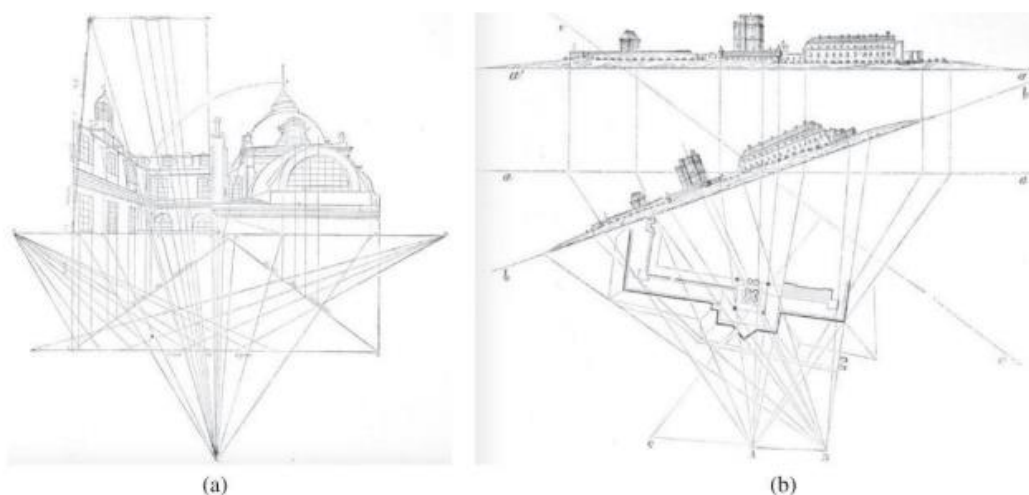


Figura 4. Fachadas de edificios levantadas mediante aplicación fotogramétrica por Laussedat en 1850 (Granshaw, 2019: 132).

El arquitecto de origen prusiano Albrecht Meydenbauer (1834-1921), casi coetáneo a Laussedat fue el responsable de designar a la fotogrametría tal y como la conocemos actualmente. Meydenbauer aplicaba la fotogrametría en sus proyectos arquitectónicos, estableciendo la realización de la misma como un proceso previo esencial al levantamiento de edificios. Así mismo, el prusiano, consciente del potencial de la técnica para la documentación y protección

del patrimonio cultural, realizó trabajos fotogramétricos destinados a la conservación de ciertos elementos culturales en su país natal, siendo el encargado de los primeros proyectos fotogramétricos para el levantamiento de edificios emblemáticos de Prusia a partir de 1885 (Pereira, 2016: 78). Fue a partir de este año cuando Meydenbauer funda y se hace responsable del Real Instituto de Fotogrametría hasta 1909, llevando a cabo un total de casi 13000 fotografías de monumentos y edificios culturales de Alemania y del extranjero (Albertz, 2002: 22).



Figura 5. Primera cámara fotogramétrica de A. Meydenbauer de 1867 (Albertz, 2002: 19).

Otro de los grandes impulsores de la fotogrametría fue el austríaco Eduard Dolezal (1862-1955), conocido como el fundador de *The International Society for Photogrammetry (ISP)* en 1910, la actual *ISPRS (The International Society for Photogrammetry and Remote Sensing)*. Así mismo, Dolezal fundó *the International Archives for Photogrammetry* y editó los primeros seis volúmenes entre 1908 y 1923 (Granshaw, 2019: 137).

Durante este período la técnica estuvo profundamente ligada con el desarrollo de ésta en operaciones y trabajos militares por la necesidad de obtener datos cartográficos precisos, y en arquitectura para el levantamiento de edificios. Aunque fueron numerosos los intentos de mejorar la técnica, ésta fue una etapa experimental, caracterizada por el uso de la fotogrametría para comprobar si resultaba más eficaz y útil que otros métodos tradicionales.

### Fotogrametría analógica (1900-1970)

A comienzos del siglo XX, la invención del estereocomparador en 1901 por el óptico alemán Carl Pulfrich supuso un hecho trascendental en el uso de esta técnica, pues este instrumento permitía identificar con exactitud los puntos iguales entre distintas fotografías, así como medir coordenadas y desviaciones angulares de alta precisión, resolviendo así un problema que había mantenido en jaque a numerosos investigadores durante años. Estos instrumentos óptico-mecánicos empleados para corregir errores entre fotografías se constituyeron como los primeros restituidores, que operaban ya mediante la visión estereoscópica. Comienza así una nueva etapa conocida como *Fotogrametría Analógica* y que abarca desde comienzos del siglo XX hasta los años 70 aproximadamente.

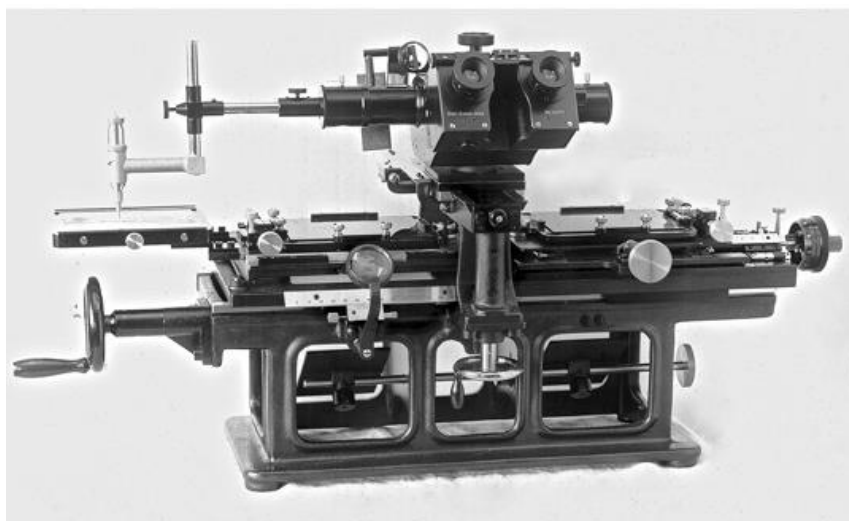


Figura 6. Fotografía del estereocomparador de Pulfrich (Lanska, D. J., et al., 2015: 10).

Tras el descubrimiento de Pulfrich, el cartógrafo austríaco Eduard Von Orel desarrollaría el esterautógrafo en 1909, un aparato automatizado capaz de asignar matemáticamente valores a los ejes X, Y y Z, y de dibujar a partir de curvas de nivel el plano del objeto fotografiado, creando los primeros modelos topográficos a partir de este avance.

Otra de las personas que más contribuyó al avance de la fotogrametría fue Hellmut Schmidt, quien en 1953 patenta los principios de la fotogrametría analítica moderna mediante el uso de fórmulas matriciales y soluciones mínimo-cuadráticas. Además de esto, se encargó de elaborar un estudio exhaustivo de la propagación de errores (Li et al., 2009: 16).

Durante este período comienza a desarrollarse la aeronáutica, recibiendo un enorme impulso la fotogrametría aérea, lo que supuso un impresionante avance de la técnica fotogramétrica.



Figura 7. Fotografía aérea del hospital de Sant Pau de Barcelona realizada por Josep Gaspar en 1929.

Hasta ese momento la fotogrametría se sigue desarrollando a partir del interés que suscitaba su aplicación en el campo militar (Maldonado, 2019: 63), aunque cada vez son más numerosos los trabajos destinados a documentar grandes áreas y zonas arqueológicas, así como su empleo sobre pequeñas piezas.

### **Fotogrametría analítica (1970-1990)**

El desarrollo de la informática durante los años 60 del siglo pasado supuso un antes y un después en el avance y la transformación de la fotogrametría. La irrupción en el mercado de ordenadores que mediante programas informáticos permitían realizar automáticamente transformaciones analítico-matemáticas provocaron un salto cualitativo en la técnica fotogramétrica, resultando de enorme eficacia respecto a los instrumentos tradicionales de medición analógica. En 1984, Ackerman aplica la teoría de los mínimos cuadrados, haciendo coincidir las imágenes entre ellas, convirtiendo así la restitución fotogramétrica en un proceso mucho más sencillo y cómodo.

El modo de proceder de la restitución analítica por computadora es similar al analógico, salvo que incorpora la automatización de los cálculos matemáticos, lo que permitía agilizar todo el proceso y resultaba sumamente más simple para el operador (Albertz y Wiedemann, 1995: 861-864).



Figura 8. Restituidor analítico DSR 14 con oculares dobles.

A mediados de los 70, Kodak presenta la primera cámara con microprocesador y carga acoplada, que permitía realizar imágenes digitales y a color. Sin lugar a dudas, esto supuso un gran avance, pues aumentó la calidad y la cantidad de las fotografías realizables. Estas primeras cámaras tenían precios elevados, quedando restringido su uso para unos pocos, y no sería hasta unos años más tarde que pudiesen ser más accesibles económicamente.



Figura 9. Primera cámara digital de la historia creada por Kodak en 1975.

El avance que supuso la transformación fotogramétrica a través de ordenadores y la aparición de nuevas tecnologías al servicio de la misma, generó el deseo de muchos investigadores por hacer uso de ésta y documentar, edificios, ciudades y yacimientos, impulsando además la realización de ortofotos aéreas.

### **Fotogrametría digital (1990-actualidad)**

Indudablemente, los mayores cambios experimentados por la fotogrametría y el avance en la en las posibilidades que ésta ofrece han sucedido desde los años 90 del pasado siglo hasta nuestros días. Esta etapa se conoce como fotogrametría digital y tiene su punto de partida en la aparición de las primeras cámaras digitales, que permitían la toma de imágenes y su almacenamiento de forma automática.

Estas imágenes digitales estaban compuestas por píxeles, convirtiéndolas en productos altamente analizables y medibles, como dirá Maldonado:

“El siguiente gran paso evolutivo, llegará con la aparición de las fotografías en soporte digital. Este tipo de imágenes mucho más estables y duraderas que sus homónimas físicas están compuestas por píxeles. Cada uno de estos píxeles llevan aparejados datos en formato numérico matricial (coordenadas, reflectancia, intensidad digital), lo que convierte a la imagen digital en un elemento matemáticamente analizable y, por ende, los procesos de cálculo llevados a cabo sobre ellas pueden ser automatizados. Esto es posible gracias a la incorporación de algoritmos matemáticos de correlación. Junto a ello, el amplio grado de reproducibilidad de estos formatos digitales los convierte en un elemento mucho más fácilmente divulgable.” (Maldonado, 2019: 66)

En la década de los 90, con la rápida evolución de la informática, surgen también los primeros restituidores digitales, es decir, ordenadores que incorporaban un software específico. La eficacia y sencillez con que operaban estos nuevos restituidores permitía que el proceso fotogramétrico resultase mucho más económico, y solventaba el posible problema del error humano al restituir las imágenes. Por ende, a través de estos nuevos ordenadores se lograba la orientación de las fotografías con mayor rapidez.

Tres de los avances más significativos de esta etapa son: el desarrollo de la estereofotogrametría digital, para la visualización estereoscópica de las imágenes a través de la pantalla del ordenador mediante las llamadas gafas 3D; la invención por Gilbert Louis Hobrough de un prototipo para

la generación de ortofotos; y la creación del software *Structure from Motion*, el cual analizamos a continuación.

La tecnología *Structure from Motion* (SfM), o también conocida como fotogrametría multimagén, orienta y escala automáticamente las imágenes para obtener modelos tridimensionales. Esto se traduce en un considerable ahorro de tiempo y en trabajar con mayor comodidad, pues permite que la cámara pueda realizar las fotografías con mayor libertad, sin necesidad de tener en cuenta la escala del objeto, el cual restituye de forma automática.

Esta nueva tecnología SfM se rige bajo los principios matemáticos de una serie de algoritmos, que identifican características comunes entre las imágenes sin importar su escala u orientación (Szeliski, 2010:192). Uno de los más conocidos es el algoritmo *Scale-invariant feature transform* (SIFT) desarrollado por el informático canadiense David Lowe en 1999 (Lowe, 1999: 1152-1155).

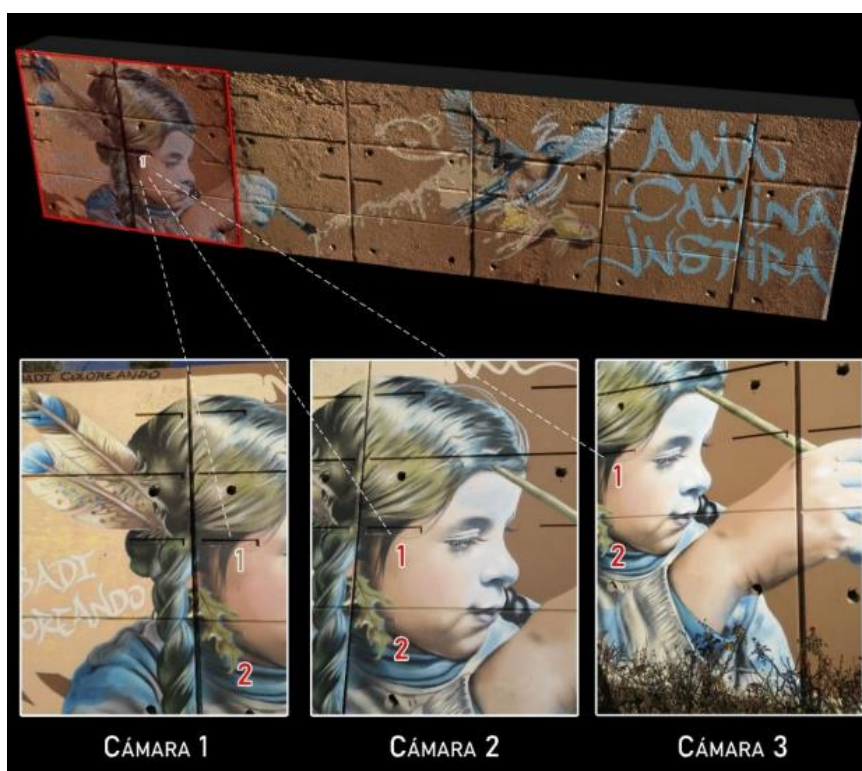


Figura 10. Ejemplo del funcionamiento de la fotogrametría *Structure from Motion* mediante la obtención de puntos comunes entre distintas fotografías a través del algoritmo SIFT (Maldonado, 2019: 68).

En definitiva, SfM resulta ser una técnica de gran utilidad que permite la documentación de distintos objetos y superficies a través del proceso fotogramétrico de una forma rápida y sencilla, y que no requiere una gran planificación previa. Esto permite que cualquier persona en posesión de una cámara de fotos y con ciertos conocimientos básicos pueda ser capaz de realizar un modelo fotogramétrico, a diferencia de otras técnicas más tradicionales.

Actualmente, los avances en fotogrametría están relacionados con la mejora de los equipos informáticos, y el desarrollo de nuevos softwares y algoritmos que permitan una especialización de la técnica cada vez mayor.

#### **4.1.2.2. DESARROLLO DE LA FOTOGRAMETRÍA EN ARQUEOLOGÍA**

Aunque no ha sido hasta la invención de la imagen digital y, más concretamente, en los últimos años cuando ha comenzado a hacerse un uso cada vez mayor de la fotogrametría en el campo de la arqueología, los principios que rigen el proceso fotogramétrico han sido empleados por algunos arqueólogos desde prácticamente la aparición de la misma en el siglo XIX.

Uno de los primeros usos de la fotografía aplicada a la arqueología llegaría de la mano del geólogo y empresario británico Joseph Prestwich. En 1859, Prestwich visita los hallazgos del arqueólogo francés Boucher de Perthes en el valle del Somme y fotografía el corte de Saint-Acheul<sup>3</sup> con la finalidad de demostrar ante la comunidad científica los descubrimientos. En la fotografía se puede apreciar como un obrero señala el lugar donde aparecieron los útiles, siendo una de las primeras muestras del uso de la fotografía para el registro y documentación de piezas arqueológicas. El trabajo de Boucher podría considerarse como una de las primeras reflexiones sobre la estratigrafía aplicada a la arqueología. De este modo Boucher sentó las bases de la arqueología estratigráfica, dando una importancia secundaria a la tipología (González, 2001: 164), y su investigación ha llegado hasta nuestros días gracias al uso de la fotografía.

El primer momento en que se constata la sustitución del dibujo por la fotografía tiene lugar a partir de los trabajos realizados por el pintor alsaciano Auguste Salzmann, con gran interés por el mundo arqueológico. Salzmann emplea la fotografía para documentar ciertos restos óseos atribuidos supuestamente a los reyes de Judea, que habían sido registrados previamente

---

<sup>3</sup> El jardín arqueológico del Saint-Acheul es un jardín público de la villa de Amiens (Francia). El sitio arqueológico se denomina así por dar nombre a la cultura prehistórica achelense. En este yacimiento se encontraron pedernales tallados (bifaces) pertenecientes al Cuaternario.

mediante el uso del dibujo por el arqueólogo francés Félix De Saulcy, y que habían recibido ciertas críticas. A diferencia de los dibujos de De Saulcy, los trabajos fotográficos de Salzmán fueron aprobados por la comunidad científica y publicados con éxito. Los resultados obtenidos recibieron el título de *Jérusalem, Étude et reproduction photographique des Monuments de la Ville Sainte depuis l'époque judaïque jusqu' à nos jours par Auguste Salzmán*. La obra de Salzmán, ayudó a corroborar la teoría de la localización de la tumba descubierta previamente por De Saulcy, y ha sido catalogada posteriormente como el primer trabajo fotográfico con una vocación meramente arqueológica (Jammes, 1981: 93).



Figura 11. Fotografía de A. Salzmán de la puerta de Damasco de Jerusalén en 1855 (Solomon-Godeau, 1981: 97).

Tras estas primeras experiencias del empleo de fotografía en arqueología, se abre una etapa en la cual numerosos arqueólogos y aficionados comienzan a hacer uso de imágenes para documentar y analizar los restos arqueológicos (González, 2001: 169). Durante esta época, las piezas eran halladas y fotografiadas en un lugar distinto al del hallazgo, pues solo importaba la documentación de la misma sin tener en cuenta la información que pudiese aportar el contexto arqueológico, algo impensable hoy día.



Figura 12. Niké encontrada durante las excavaciones de A. Conze en Samotracia (1875-1880) fotografiada desde varias perspectivas (González, 2001: 177).

No será hasta los años 70 del siglo XX, tras el salto cualitativo y cuantitativo que experimenta la fotografía, que ésta empiece a ser utilizada cada vez más por algunos profesionales de la arqueología, acotando su uso cada vez más a los propios especialistas. La evolución hacia cámaras más ligeras y manejables, así como la rapidez en la toma de imágenes, propiciaron el aumento progresivo de los investigadores interesados en su empleo dentro de la arqueología (González, 2001: 171).

En el caso español, uno de los primeros impulsores de la fotogrametría como herramienta para la documentación arqueológica fue Antonio Almagro, quien en 1973 publica su trabajo *Documentación Fotogramétrica en ruinas y monumentos* (Almagro: 1973), donde muestra las ventajas de la de la técnica en el campo de la arqueología.

Posteriormente, la aplicación de la fotogrametría arqueológica ha ido *in crescendo* progresivamente, aunque su uso sobre todo ha experimentado un salto exponencial en los últimos 15 años tras la aplicación de la tecnología Structure from Motion, por primera vez en 2006, la cual ha revolucionado el concepto de fotogrametría.

En la actualidad, la fotogrametría es aplicada como técnica no invasiva tanto en excavaciones terrestres como en arqueología subacuática, ofreciendo al especialista innumerables posibilidades de documentación, análisis y difusión del registro arqueológico. Más adelante abordaremos las ventajas del empleo de la misma frente a otros métodos más tradicionales.

## 4.2. MÉTODO DE EMPLEO

A continuación, describimos cada uno de los pasos y procedimientos necesarios para llevar a cabo el proceso fotogramétrico de una forma correcta y ordenada. Para ello nos basaremos en la aplicación de la tecnología *Structure from Motion*, que hemos mencionado anteriormente, la cual constituye en la actualidad una de las técnicas fotogramétricas más generalizadas para trabajos de distinta tipología. Así mismo, mencionaremos ciertos aspectos a tener en cuenta durante todo el proceso para la obtención de un producto final de garantías.

### 4.2.1. CONSIDERACIONES Y PROCEDIMIENTOS

#### Planear el proyecto

Uno de los primeros pasos que debemos tener en cuenta antes de realizar la captura de imágenes será el análisis del entorno natural y artificial que vamos a fotografiar:

- Estudiaremos las características del medio físico, con el fin de considerar y controlar la luz, las posibles interrupciones que pueda sufrir el proceso de toma de imágenes, las condiciones medioambientales (viento, lluvia, etc.), etc.
- Habrá que tener en cuenta la existencia o no de obstáculos en el campo de visión, pues en el caso de estar presentes habrá que salvarlos, añadir una mayor cantidad de fotos o, simplemente y si se puede, apartarlos/eliminarlos.
- Será necesario plantear nuestra toma fotográfica en situaciones de buena y uniforme iluminación, pues los cambios de luces y de sombras no benefician la captura de detalles de los objetos o espacios.

Además de esto, preferiblemente debemos llevar a cabo una correcta organización de cómo vamos a realizar nuestro proyecto fotogramétrico y, para ello, es imprescindible que registremos ciertos datos previos a la captura de imágenes, así como una vez obtenido el producto 3D final:

- Realizaremos una ficha o dossier del objeto o espacio que vamos a documentar. Esta ficha puede contener los principales datos del objeto, edificación, yacimiento, etc., que nos permitan contextualizar y entender posteriormente el levantamiento 3D.
- Otros datos importantes a registrar serían, por ejemplo: fecha de la captura de imágenes, temporalización de cada uno de los pasos del proceso, tipo de cámara empleada, calidad de las imágenes, tipo de ordenador y software empleados, etc. Es decir, todo aquello

que pueda resultar útil para la confección de un informe final sobre nuestro producto fotogramétrico.

- Así mismo, una vez generado el modelo 3D, añadiremos imágenes del propio modelo obtenido junto a los datos recopilados, incluyendo además las fotografías empleadas para el proceso. Esto nos permitirá recalcular y reevaluar nuestro modelo fotogramétrico con la información gráfica original, en el caso de que haya sufrido modificaciones posteriormente o consideremos erróneo el mismo.
- En virtud del conocimiento y del avance científico, y siempre que quepa la posibilidad y sea conveniente, intentaremos poner a disposición de otros investigadores el resultado de nuestro proyecto y sus principales características.

Otro de los aspectos más importantes a tener en cuenta antes de realizar la toma de imágenes será considerar el mínimo de fotografías necesarias para adecuar nuestro levantamiento fotogramétrico a las características exigidas por la pieza, edificio o superficie a capturar y los detalles que posea. El máximo de imágenes dependerá de la necesidad o no del proyecto, pues excedernos con las mismas puede provocar problemas en su almacenamiento y procesado.

Los modelos de grandes extensiones del terreno realizados mediante drones, los levantamientos fotogramétricos de edificios o la captura de monumentos de gran envergadura, necesitarán, por lo general, un mayor número de imágenes que otros espacios o bienes muebles más reducidos. Sin embargo, para obtener modelos tridimensionales exactos de piezas u objetos patrimoniales de pequeño tamaño deberemos capturar una cantidad mayor de imágenes que para otras de tamaño superior, con el fin de obtener buenos resultados de sus detalles y características formales (Ávila, 2018: 73).

A pesar de estas consideraciones, y gracias a los últimos avances de la fotogrametría multimagén, con solo tres fotografías de un mismo objeto se pueden extraer suficientes puntos en común para conseguir un buen modelo. Evidentemente, esto no es lo recomendable, y lo habitual será utilizar decenas o cientos de fotografías, según las características de la pieza o espacio a digitalizar. Para algunos objetos, un número escaso de imágenes puede provocar vacíos de información, no consiguiendo el resultado esperado (Maldonado, 2019: 72).

El tipo de dispositivo fotográfico a utilizar es también un aspecto a tener en cuenta, sobre todo si buscamos obtener un producto profesional. Sin embargo, es cierto que con cualquier sistema que disponga de cámara y espacio de almacenamiento suficiente, sea móvil, tablet o cámara, se

puede hacer fotogrametría, aunque obviamente la calidad de las imágenes no será la misma y, por ende, la del producto tridimensional tampoco.

Si nuestra intención es la de realizar un proyecto fotogramétrico de calidad, lo recomendable será el uso de una cámara réflex digital. Lo que sí deberemos tener en cuenta a la hora de elegir nuestra cámara, según los resultados que buscamos obtener, será tanto: la calidad y configuración del objetivo, recomendándose objetivos luminosos, con amplia apertura de diafragma<sup>4</sup>, estabilizador y distancia focal fija (50 o 35 mm); y el sensor de la cámara, para capturar píxeles de mayor o menor tamaño. Los píxeles de mayor tamaño permiten mostrar mejor los detalles en zonas de escasa iluminación de la propia imagen.

Para planificar la toma de fotografías resultará útil hacer un croquis previo con la escena y las posiciones de la cámara en la zona donde se va a realizar la fotogrametría, ya sea en la superficie terrestre o en el medio aéreo. De este modo, encontramos dos tipos de fotogrametría en función de la posición de la cámara:

- Fotografías convergentes, realizadas alrededor del elemento fotografiado con un alto nivel de solape entre las mismas. Éstas se realizan por lo general para documentar objetos aislados o habitaciones.
- Fotografías paralelas, en las que el solape se realiza de forma lateral y en las zonas superiores e inferiores, formando un mosaico de imágenes. Ésta se emplea para fotografiar superficies planas, como yacimientos mediante el uso de drones o muros.



---

<sup>4</sup> El diafragma es el elemento responsable de regular la cantidad de luz que penetra en el interior de la cámara a la hora de realizar la fotografía. Con una mayor o menor apertura de diafragma, el objetivo captará imágenes más claras o más oscuras. Este elemento se controla manualmente.

Figura 13. Ejemplo de toma fotográfica convergente alrededor de una pieza arqueológica (Maldonado, 2019: 91).



Figura 14. Ejemplo de toma fotográfica paralela de lienzo de muralla y puerta del Castillo de Villagarcía de Campos (Valladolid) (García, 2015: 49).

En algunas situaciones, lo más conveniente será combinar ambos tipos de capturas para obtener resultados más precisos. En todo caso, el objeto o elemento a fotografiar permanecerá inmóvil, siendo nosotros mismos quienes giremos alrededor de éste (Charquero, 2016: 11-12).

### **Calibración de la cámara y toma de imágenes**

En esta fase, lo primero que haremos será configurar o calibrar nuestra cámara digital. Son tres los parámetros que se relacionan entre sí para obtener una buena imagen del elemento fotografiado y se conocen como triángulo de exposición (profundidad de campo, velocidad de obturación y sensibilidad ISO). Estos parámetros se combinarán entre sí para adecuar sus características en función del objeto o espacio que se esté fotografiando. Estos son:

- Profundidad de campo: se encarga de la nitidez y el enfoque del objeto. Éste se regula mediante la apertura o cierre del diafragma, dependiendo de la luz que perciba la cámara. Cuanto más cerrado esté el diafragma más capacidad tendrá el objetivo de capturar con nitidez elementos que se encuentren a mayor distancia, al recibir menos luz; en cambio, cuanto más abierto esté, más luz recibirá y tan solo podrá capturar nítidamente elementos situados a corta distancia. Por consiguiente, la apertura o cierre de diafragma influirá en lo iluminada u oscura de la imagen resultante. Este parámetro se representa en la cámara con el valor  $f/X$ .

- Velocidad de obturación: define el tiempo que permanece abierto el diafragma u obturador, permitiendo o no tomar fotografías con mayor velocidad de captura. Por lo general, este parámetro es empleado para imágenes en movimiento. Si la velocidad de obturación es muy alta, casi no permite el paso de la luz a través del diafragma, y viceversa. Este parámetro se representa con el valor 1/X.
- Sensibilidad ISO: gestiona el sensor de la cámara digital y la luz que recibe. Las celdas fotosensibles que componen el sensor son las encargadas de transformar la luz en corriente eléctrica y generar la imagen digital. Al aumentar este parámetro el sensor recibe más corriente eléctrica, provocando que puedan aparecer puntos blancos o desenfoques en la imagen.

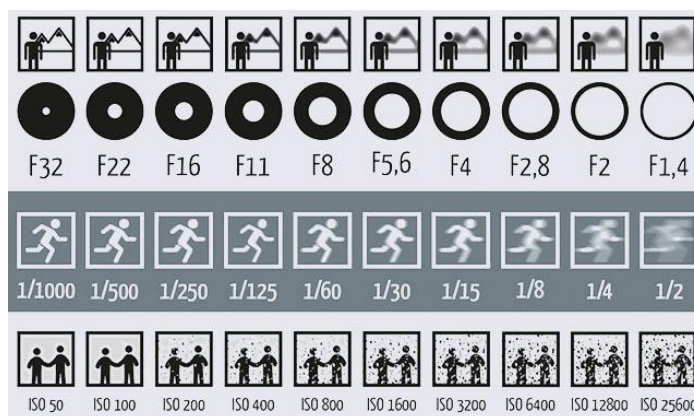


Figura 15. Ejemplo de triángulo de exposición: profundidad de campo/nitidez, velocidad de obturación y sensibilidad ISO.

Las cámaras actuales poseen una herramienta de gran utilidad conocida como exposímetro, que mide el nivel de exposición a la luz que reciben estos tres parámetros, permitiendo el ajuste manual o automático de los mismos. Por su parte, el histograma nos informa con exactitud de los colores RGB<sup>5</sup> y los niveles correspondientes de luz en la imagen, pudiendo detectar posibles deficiencias o no de algunos de estos parámetros (Pereira, 2018: 63-67).

<sup>5</sup> El modelo de colores RGB (Red, Green and Blue) está compuesta por los tres colores primarios: rojo, verde y azul, representando los colores a los que son más sensibles los conos fotorreceptores del ojo humano. Las derivaciones entre ellos general el resto de colores que podemos percibir nosotros mismos. Todos los formatos gráficos que representan imágenes y gráficos en internet se basan en este modelo de color, excepto GIF.



Figura 16. Captura de exposímetro de una cámara réflex Nikon.

Debemos tener en cuenta el espacio que ocupa el elemento a fotografiar y las condiciones climáticas del entorno, para ajustar correctamente el triángulo de exposición. Por lo tanto, debemos evitar realizar fotografías de noche o con mucho sol, debido a las sombras que se puedan generar, así como evitar todo aquello que no sea necesario, como nuestra propia sombra.

Otro factor a tener en cuenta será el encuadre de la imagen a fin de evitar que el elemento fotografiado pueda aparecer distorsionado. Cuanto más perpendicular al objeto tomemos la imagen más información podremos obtener de la misma (Conejero, 2019: 36).

Para realizar correctamente la captura es recomendable el establecimiento de dianas, con el fin de tener puntos de referencia de los elementos o estructuras a fotografiar y de obtener la georreferenciación de cada una de las mismas mediante la captura de datos a través del uso de una estación total o sistema de georreferencia. Estas dianas se emplean en fotogrametría porque ofrecen una gran precisión al proyecto, eliminando el posible error que pueda generar la propia toma de imágenes. Por lo general, las más empleadas poseen un círculo central negro relleno con círculos concéntricos a su alrededor sobre un fondo blanco, o viceversa (Romero y Civantos, 2017: 13).

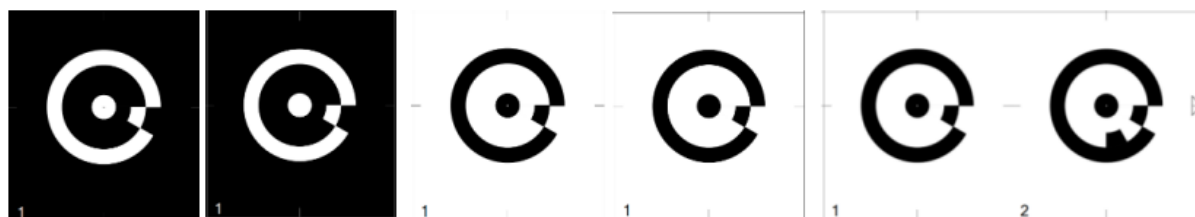


Figura 17. Tres tipos de dianas diferentes como puntos de referencia (Granados, 2020: 67).

Se recomienda realizar un primer disparo que incluya un *colorchecker*<sup>6</sup> para calibrar la exposición de los tonos como de las imágenes, con el fin de que los colores que presenta el modelo sean idénticos al real.



Figura 18. Registro de entorno lumínico mediante colorchecker para la obtención de colores reales en fotogrametría de objeto cercano.

Tras esto, podemos proceder a realizar nuestra toma fotográfica. Algo que debemos tener en cuenta es la necesidad de solapamiento entre imágenes para conseguir obtener todos los detalles posibles y que el propio software establezca los puntos comunes entre las mismas, para así crear el modelo tridimensional. Para poder crear un buen modelo 3D, se debe aplicar un solapamiento mayor al 60%, aunque lo más recomendable será un mínimo del 80% de solape para obtener un producto óptimo (Benavides, 2017:122). Así mismo, se recomienda no modificar el tamaño de las fotografías ni su rotación alrededor del elemento que estamos fotografiando. Este proceso de solape entre imágenes, que permite obtener puntos homólogos entre ellas y sus correspondientes coordenadas, recibe el nombre de *estereopar*.

En todo caso, el porcentaje de solapamiento entre imágenes dependerá, así mismo, de la distancia a la que se encuentre el elemento a fotografiar y de sus características. Para obtener la

---

<sup>6</sup> La tabla de colores Colorcheker está diseñada para ofrecer una reproducción realista del color, con la finalidad de que los fotógrafos puedan predecir y controlar como lucirá el color en cualquier tipo de iluminación.

proporcionalidad de estas distancias, dividiremos la distancia de cada fotografía tomada entre la distancia de la cámara y el objeto.

Para objetos o espacios que posean formas irregulares se deben realizar varios barridos fotográficos a diferentes alturas e inclinación limitando con su contorno. Posteriormente, el software se encargará de buscar los puntos homólogos de estas fotografías que nosotros hemos organizado previamente.

Se recomienda guardar las imágenes en archivo RAW, pues éste almacena la misma tal y como las captura, sin aplicar ninguna modificación, permitiendo llevar a cabo el procesado posteriormente mediante los softwares de restitución. Las únicas trabas que presenta esta forma de almacenamiento es que ocupa mucho espacio y que, posteriormente, hay que convertir las imágenes a otros formatos más estándar, pues la mayoría de programas no trabajan en RAW (Maldonado, 2019: 90-91).

Es importante tener en cuenta todos estos aspectos mencionados sobre la captura de imágenes, tanto previamente a ésta como durante la misma, para no errar en el procedimiento y obtener fotografías lo más correctas posibles para luego realizar el trabajo de restitución en el laboratorio. Conocer y aplicar estas consideraciones nos permitirá ahorrar tiempo en campo, ya que no tendremos que repetir el proceso, agilizando mucho más la obtención del producto fotogramétrico que deseamos.

### **Procesado de imágenes y obtención del modelo 3D**

Llegados a laboratorio, el primer paso consistirá en transferir todas las imágenes contenidas en la tarjeta de memoria de nuestra cámara digital en el ordenador y crear una carpeta donde las organizaremos.

El proceso mediante el cual convertimos las imágenes planas o 2D en imágenes con volumen en 3D, y que pueden girar 360° sobre sí mismas, se conoce como restitución o renderización. Así mismo, hemos de tener en cuenta que un modelo tridimensional no es necesariamente un modelo fotogramétrico. Para que un modelo se considere fotogramétrico debe permitir la posibilidad de aprehender las propiedades geométricas del objeto que representa y, para ello, es necesario escalarlo con puntos que hayamos recogido previamente durante la captura (Moyano, 2017: 339).

Debido a que existen multitud de softwares de restitución fotogramétrica y sería imposible describir cómo opera cada uno de ellos, en el presente trabajo hemos elegido *Agisoft Metashape* como modelo para explicar el método de renderizado de imágenes. La razón por la que hemos escogido *Metashape*, y no otro software, es que este programa ofrece, a través de unos sencillos pasos, resultados óptimos y rápidos. A su vez, Agisoft permite al usuario configurar el modelo en cada una de las fases del proceso, lo cual supone una gran ventaja para la obtención de un producto final óptimo.

Como paso previo a la creación del modelo tridimensional, procederemos a eliminar aquellas fotografías que no cumplen con los objetivos de calidad propuestos para nuestro modelo. Para ello, prescindiremos de aquellas fotografías que presenten errores de nitidez, encuadre, iluminación, etc., o que simplemente resulten repetitivas o excedentes, puesto que tampoco queremos ralentizar el procesado de las imágenes innecesariamente.

Así mismo, como no nos interesan todos los elementos que aparecen en la fotografía llevaremos a cabo un filtrado de aquello que pretendemos que aparezca en el futuro modelo 3D. Algunos softwares como *Agisoft Metashape* o *Reality Capture* disponen de herramientas de borrado a partir de un filtrado manual de las partes sobrantes sobre el propio modelo. Hacerlo directamente sobre las imágenes nos ahorrará tiempo de renderizado y nos permitirá obtener un producto de mayor calidad. Cada filtrado de imagen recibe el nombre de *máscara de capa*. Este proceso nos ocupará cierto tiempo, pues debemos aplicar estas máscaras sobre cada una de las fotografías seleccionadas. Crearemos un fondo transparente sobre el que situaremos estas máscaras para que al procesar las mismas obtengamos un modelo “espacial”.

Una vez realizado esto, podemos proceder al alineamiento de las imágenes, en un proceso conocido como *Bundle Adjustment*, que gracias a algoritmos como SIFT, el cual ya hemos mencionado anteriormente, permite la extracción de puntos iguales entre las imágenes y determina su posición y orientación relativa en el espacio (Maldonado, 2019: 95).

El resultado obtenido de la extracción de puntos comunes entre las imágenes recibe el nombre de nube de puntos dispersa y la forma resultante de la misma dependerá del número de puntos homólogos detectados por el software. Así mismo, programas como *Agisoft Metashape* permiten eliminar los puntos erróneos o imprecisos obtenidos en dicha nube, lo que nos puede permitir acelerar nuestro trabajo y conseguir un modelo más exacto.

Posteriormente, procederemos a la creación de la nube de puntos densa. Para ello, el mismo software multiplica el número de puntos obtenidos inicialmente en la nube dispersa, creando un producto geométrico y volumétrico que se asemejará ya al objeto real que hemos fotografiado.

Aunque la nube de puntos densa nos ofrece una visión con forma y geometría casi idénticas a las del objeto o superficie que hemos fotografiado, ésta no se constituye aún como un elemento cerrado, pues tan solo está formada por puntos en el espacio. Es por ello que debemos cerrar el modelo mediante la aplicación de una malla digital 3D. Para este procedimiento, los programas de restitución 3D emplean algoritmos como *marching cubes* o *Poisson reconstruction*, que unen los puntos de la nube densa y crean superficies entre ellos (Kazhdan y Hoppe, 2013: 2-11).

Tras la generación de la malla digital se procede a generar un mapa de textura sobre el producto obtenido que permite obtener un visionado realista del mismo y del cual se puede obtener información precisa y de gran utilidad sobre el objeto o elemento (Avido y Vitores, 2019: 1593).

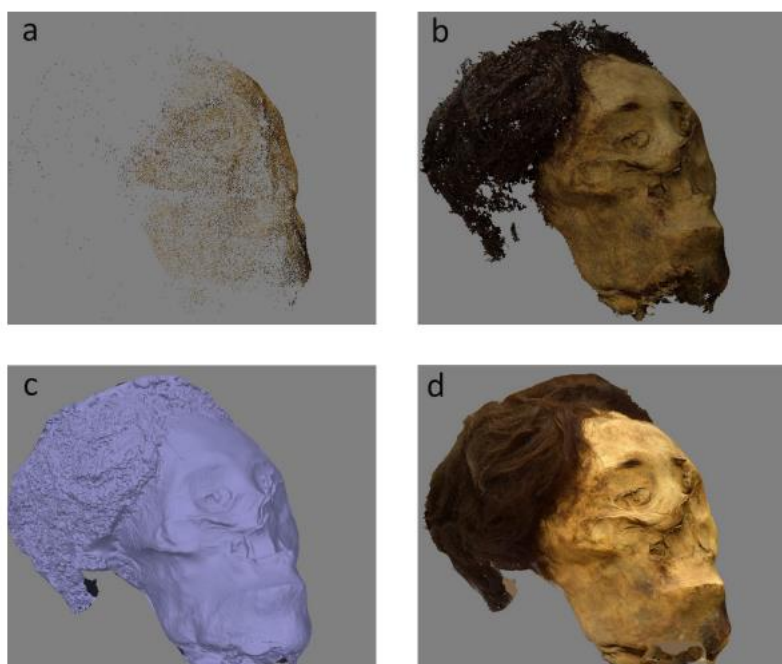


Figura 19. Ejemplo de restitución fotogramétrica de cabeza momificada de Chankay del Museo de Arqueología y Etnología de América (Universidad Complutense de Madrid): a) nube de puntos dispersa, b) nube de puntos densa, c) malla digital 3D y d) modelo texturizado (Cancio y Lescure, 2021: 248).

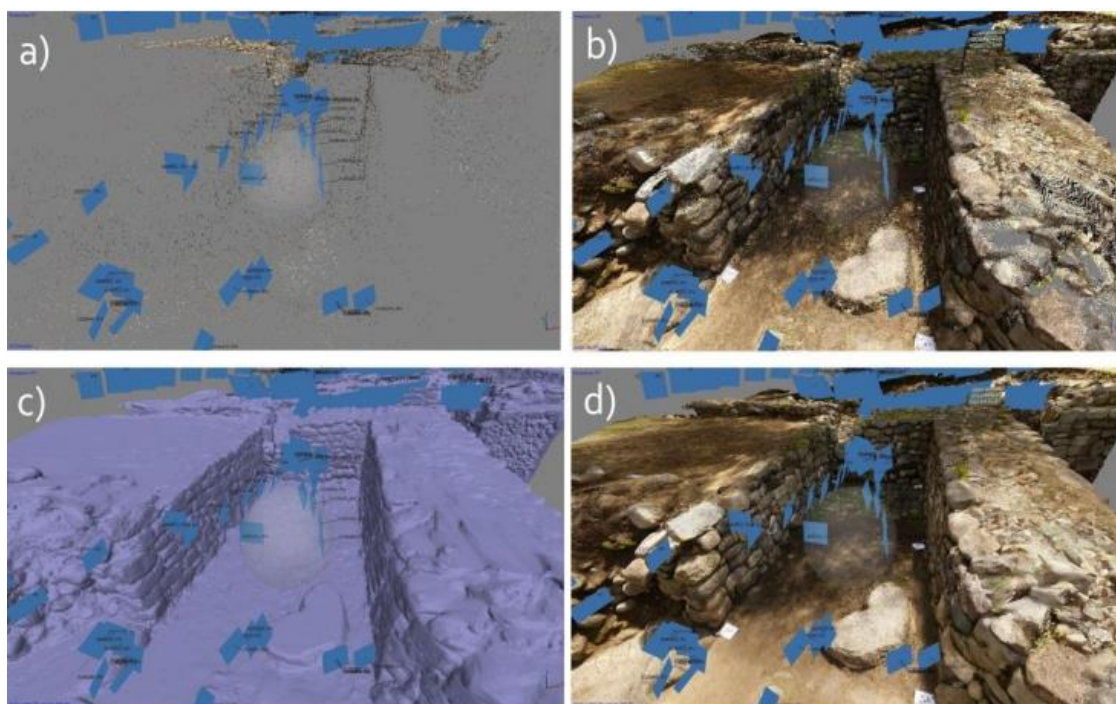


Figura 20. Ejemplo de levantamiento fotogramétrico y restitución 3D del sitio arqueológico de Todos Santos, Cuenca (Ecuador): a) nube de puntos dispersa, b) nube de puntos densa, c) malla digital 3D y d) modelo texturizado (Aparicio, P., et al., 2018: 29).

Una vez realizado esto, habremos obtenido el producto final de nuestro modelo 3D, el cual podremos analizar, medir, difundir, etc. En este sentido, son amplias las posibilidades que ofrece la fotogrametría como herramienta al servicio de la investigación. En el caso de la arqueología, podemos obtener Modelos Digitales de Elevaciones, de los cuales podemos extraer información muy valiosa sobre yacimientos o restos arqueológicos; así mismo, se pueden obtener ortofotografías, las cuales estudiaremos más adelante; o, por ejemplo, modelos digitales de objetos y restos arqueológicos a partir de los cuales podemos realizar cálculos volumétricos y mediciones precisas.

Por último, deberemos exportar nuestro modelo tridimensional a un formato universal que sea compatible con aquellos programas que ofrecen herramientas adicionales, con el fin de poder sacar el máximo provecho posible a nuestro proyecto. Algunos de los formatos más recomendables son: `-.obj.-`, `-.ply-` o `-.stl-`.

#### 4.2.2. SOFTWARES

Los softwares de restitución fotogramétrica han revolucionado la técnica y la forma de operar con ella. Mediante estos programas informáticos, como ya hemos comentado antes, podemos transformar una serie de imágenes 2D en un modelo 3D. Es por ello que, consideramos que es esencial conocer algunos de los softwares del mercado más utilizados y sus características principales.

En 1999, año en el que David Lowe inventa el algoritmo SIFT, se crea el primer software de restitución fotogramétrica *Photomodeler* de la empresa EOS SYSTEM. En este primer programa de procesamiento fotogramétrico, el usuario debía marcar manualmente seis puntos de control homólogos en al menos dos fotografías, para que las imágenes pudiesen ser identificadas en común. Mediante el principio de triangulación, el programa identificaba la trayectoria de los “haces de luz” desde el centro del objetivo de la cámara hacia los correspondientes puntos de interés marcados previamente. La repetición de este proceso en todas las imágenes que conformarían el modelo tridimensional permitía determinar los puntos que definían la geometría del objeto. Por último, mediante la unión de estos puntos de forma manual se creaban polígonos, que dispuestos entre sí, determinaban la geometría final del objeto 3D.

Este proceso resultaba algo caótico, pues requería bastante tiempo unir todos los puntos y, además, no se podía realizar sobre elementos de relieves irregulares, dado que unir los polígonos resultaba imposible. Por esta razón, *Photomodeler scanner* incorporó ciertos algoritmos de correspondencia de imágenes en su siguiente versión, que le permitían comparar de forma automática los píxeles entre fotografías, para así generar puntos tridimensionales en la propia nube de puntos (Charquero, 2016:9).

Unos años después, la empresa rusa Agisoft lanzó al mercado el software *Photoscan*. Este nuevo programa resultaba mucho más rápido, estable y preciso en la ejecución que *Photomodeler*, e incorporaba, por primera vez, la tecnología de visión por ordenador que permitía la detección y correlación inteligente de imágenes a través de la tecnología *Structure from Motion* (SfM). Esta tecnología restituye la geometría tridimensional de un objeto o espacio a través de imágenes tomadas en movimiento, sin la necesidad de marcar puntos de control manualmente.

En la actualidad, programas como *Photomodeler* y *Photoscan* desarrollan constantemente nuevos avances que permiten agilizar el proceso y obtener productos fotogramétricos cada vez más exactos y con mayor aplicabilidad.

En la actualidad, podemos encontrar tres tipos de softwares: comerciales o de pago, libres con servidores remotos, y libres y de código abierto. A continuación, mostraremos algunos detalles de cada uno de ellos:

- Los softwares comerciales, o también conocidos como softwares de escritorio, como *Photomodeler* o *Agisoft Photoscan* (actualmente conocido como *Agisoft Metashape*), se instalan en nuestros equipos y procesan las imágenes en tiempo real. El número de imágenes que permite procesar depende de la capacidad del ordenador empleado, y esto influye, por lo tanto, en la calidad del modelo 3D. Una de las grandes ventajas de estos softwares es la amplia variedad de formatos en los que permite exportar el modelo. Otros softwares comerciales son, por ejemplo: *Reality Capture*, *3DF Zephyr* (solo para Windows) o *Pix4D*. Este último se emplea específicamente para el procesado de imágenes realizadas mediante dron.
- Los softwares libres con servidores remotos permiten al usuario transferir las imágenes a un servidor que genera automáticamente el modelo 3D. En este caso, prima más disponer de una buena conexión a internet que las características de la computadora empleada. A diferencia de los softwares comerciales, estos no permiten al usuario configurar personalmente el modelo, tan solo descargarlo. Algunos de estos softwares son, por ejemplo: *Arc3D*, *Photosynth* (Microsoft) o *123D Catch* (Autodesk).
- Por último, los softwares libres y de código abierto sí permiten al usuario acceder a los datos y a la configuración del modelado, así como a la programación del propio sistema. Estos programas se pueden ejecutar desde línea de comandos o a partir de la interfaz gráfica. Su principal inconveniente es su limitación para crear tan solo la nube de puntos 3D, debiendo ser convertida la misma en malla mediante otro programa. Entre estos encontramos, por ejemplo: *Visual SfM*, *Micmac-Apero* o *Python Photogrametry Tool* (Maldonado, 2019: 74-76).

Como observamos, disponemos de distintas opciones para crear un modelo tridimensional, todo dependerá de nuestras necesidades particulares y del nivel o la calidad de los resultados que pretendemos obtener.

### **4.3. LA FOTOGRAMETRÍA COMO TÉCNICA APLICADA AL PATRIMONIO HISTÓRICO-ARQUEOLÓGICO**

Una vez hemos analizado y comprendido tanto la evolución de la fotogrametría a lo largo del tiempo como la metodología a seguir para la obtención del producto tridimensional, llega el turno de mostrar la importancia de esta técnica en su aplicación particular para con el patrimonio histórico-arqueológico, y las múltiples utilidades y beneficios que presenta.

La fotogrametría aplicada a la arqueología se designa como técnica no invasiva, es decir, que no altera, daña ni modifica el patrimonio arqueológico, debido a que el método de empleo consiste, como ya sabemos, en la toma de imágenes terrestres o aéreas. Además de esto, la propia fotogrametría se constituye como una excepcional herramienta de documentación, registro, y análisis de yacimientos y restos arqueológicos, siendo cada vez mayor su empleo para la práctica arqueológica frente al uso de otros métodos más tradicionales.

A continuación, destacaremos la importancia de conservar el patrimonio histórico-arqueológico a través de técnicas como la fotogrametría para, a posteriori, estudiar los innumerables usos y ventajas que la misma ofrece en este campo.

#### **4.3.1. LA IMPORTANCIA DE PROTEGER NUESTRO PASADO**

La arqueología en sí se constituye como una actividad destructiva, ya que al excavar estamos perdiendo ciertos elementos estructurales del terreno y el espacio que éste ocupa, así como información arqueológica irrecuperable. Andrea Carandini en su obra *Storie dalla terra. Manuale di scavo archeologico*, en su traducción al español, afirmaba que:

“Excavar equivale a quemar las páginas del único ejemplar existente de un libro inmediatamente después de su lectura. [...] No se puede levantar un estrato, la preparación de un pavimento, una cloaca o un muro sin destruirlos.” (Carandini, 1997: 18)

Nos encontramos, por lo tanto, ante la paradoja de que la producción de conocimiento científico por medio de excavaciones conduzca a los profesionales de la arqueología a la destrucción de otros datos de gran valor que podrían haber sido también objeto de análisis y de interpretación científica (De Reu et al., 2013: 1108).

Los arqueólogos, conscientes y preocupados por esta cuestión, han buscado mejorar desde hace décadas los métodos de registro, con el fin de que la información destruida y perdida en las

excavaciones fuera mínima. Obviamente, siempre ha habido excepciones, pero lejos queda ya esa arqueología del siglo XIX y comienzos del XX, en la cual solo la búsqueda y adquisición de restos arqueológicos sin proceder mediante una correcta documentación o registro.

En este sentido, y aunque no está universalmente aceptada aún, la fotogrametría es empleada por la gran mayoría de arqueólogos, aumentando progresivamente la cifra de aquellos que combinan la misma junto a otras técnicas no invasivas de geodetección, análisis y georreferenciación del patrimonio histórico. El desarrollo de la fotogrametría estereoscópica y la aparición de softwares de restitución 3D han facilitado en gran parte el trabajo de documentación y el análisis de la información arqueológica (Romero y Civantos, 2017: 11).

En la reunión de Vantaa (Finlandia) del año 2000, se redactó un documento destinado a la conservación del patrimonio, que sirve de fundamento para la buena práctica en arqueología enfocándose a la protección de los propios restos arqueológicos. El documento titulado *Hacia una Estrategia Europea sobre Conservación Preventiva*, describe que la mejor forma de conservar y proteger el patrimonio es mediante la prevención (Maldonado, 2019: 32). En el caso de la comunidad andaluza en concreto, 1992 fue la fecha clave a partir de la cual se produjo una transformación de la política a seguir sobre Bienes Culturales, abandonándose la tradicional estrategia de excavación de yacimientos y sitios arqueológicos, por la de conservación de los mismos.

Emplear técnicas como la fotogrametría para la conservación del patrimonio requiere, a su vez, de una gran consciencia de la relevancia y las características de los elementos que vamos a documentar. El registro documental del patrimonio arqueológico debe ser una actividad de rigor y que siga unos parámetros de actuación precisos y previamente estipulados, debiendo ser cautos para no perder información válida durante el proceso, pues ésta será analizada y puesta al servicio de la comunidad científica y/o para beneficio de la sociedad posteriormente.

El patrimonio histórico-arqueológico tiene un carácter social, por cuanto muestra el pasado e historia de aquellas personas o animales que habitaron previamente el lugar, y, por lo tanto, se debe preservar y conservar para su aprovechamiento y entendimiento tanto por las generaciones presente como futuras.

“Hay que preservar y poner a disposición de cualquier persona el patrimonio digital de todas las regiones, naciones y comunidades a fin de propiciar, con el tiempo, una representación de todos los pueblos, naciones, culturas e idiomas.” (UNESCO, 2003: 81)

Las mayores trabas a las que se enfrenta el propio patrimonio son la indiferencia y el abandono inconsciente por parte de la sociedad o las administraciones públicas. Es por ello que, se debe acercar a la propia masa social el conocimiento sobre su pasado y, en este sentido, la fotogrametría mediante la digitalización del patrimonio puede jugar un papel destacado en la difusión del mismo, elevando el conocimiento cultural a una escala superior dentro de la oferta turística que ofrecen las distintas ciudades y comunidades. La mejor baza para la conservación y protección del pasado es una sociedad identificada y atraída por el mismo.

En oposición al tradicional concepto de que la arqueología no produce beneficios para la sociedad, se debe promover que esta puede resultar aprovechable y rentable tanto cultural como económicamente. Y para ello, los especialistas del patrimonio debemos analizar, interpretar, conservar, transmitir, divulgar y rentabilizar correctamente el mismo (Vaquerizo, 2018: 14).

Como diría Ruiz Zapatero, en su artículo *Fragments del pasado: la presentación y sitios arqueológicos y la función social de la arqueología*, la arqueología debe ser comprendida por el conjunto de la sociedad a través de los propios yacimientos:

“Porque los arqueólogos somos socialmente responsables no sólo de preservar el pasado sino también de hacerlo accesible – física e intelectualmente – al público. Y no cabe duda de que la presentación de yacimientos y monumentos arqueológicos constituye, por la inmediatez de su mensaje y su dimensión emotiva y aún efectiva, una vía muy eficaz para divulgar el patrimonio arqueológico. Se ha llegado a decir que cuando “vendemos” arqueología como patrimonio vendemos nostalgia a un nivel muy básico. Probablemente la manera más eficaz de llegar a la gente sea a través de la comprensión de los propios sitios arqueológicos.” (Ruíz, 2009: 11).

La técnica fotogramétrica con el desarrollo de modelos 3D formalmente idénticos al elemento original permite una mejor visualización y manipulación por parte del espectador o usuario, haciéndoles partícipes y generando entusiasmo por la ciencia arqueológica.

A su vez, la fotogrametría puede permitir la reconstrucción del pasado de monumentos y sitios arqueológicos, ya que los modelos fotogramétricos pueden ser empleados por otras aplicaciones o programas para desarrollar restauraciones virtuales. La obtención de estas reconstrucciones digitales pueden ser una prueba inequívoca más de los beneficios de la técnica fotogramétrica aplicada a la arqueología en su utilidad social, ya que permiten una mayor comprensión por parte del espectador de la magnitud y trascendencia del lugar en el pasado. Como diría Fina Escrivá y José A. Madrid:

“Si se decidiera restaurar nuevamente el Coliseo y recuperar su aspecto original con sus muros perfectos, sus gradas, el *velarium*, destruiríamos físicamente parte de su historia y por tanto parte de él. Entonces la finalidad de la restauración de incrementar los valores del objeto desaparece. En palabras de la carta de Venecia no preservamos su historia y por tanto no respetamos su valor. Por ello es necesario encontrar otro camino que permita recuperar todos sus valores, todos sus estados porque con ello revelamos el objeto en su totalidad. Y ese camino no es otro que el virtual.” (Escrivá y Madrid, 2010: 14)

El empleo de nuevas tecnologías para la reconstrucción virtual de edificios y lugares históricos se constituye como una buena alternativa a la tradicional restauración de los mismos, salvando el problema que supone sobrepasar los límites por parte de los restauradores y la posible imposición de su propio criterio sobre la obra. De este modo, la sociedad recibe una aproximación a la forma y características originales de la obra, sin necesidad de alterar o modificar la misma.

En definitiva, las NNTT, las TICS, así como los recursos y soportes didácticos y pedagógicos, combinados entre sí, resultan herramientas de gran utilidad para crear experiencias únicas para el usuario y facilitar la transmisión de conocimientos sobre el patrimonio histórico-arqueológico.

#### **4.3.2. DISTINTAS UTILIDADES**

Según la Sociedad Española de la Arqueología Virtual (SEAV), la Arqueología Virtual es *la disciplina científica que tiene por objeto la investigación y el desarrollo de formas de aplicación de la visualización asistida por ordenador a la gestión integral del patrimonio arqueológico* (Sociedad Española de Arqueología Virtual, 2011: 3).

Así se definía la *Arqueología Virtual* en los Principios de Sevilla de 2011, señalando que el verdadero cometido de la digitalización arqueológica consiste en la investigación científica de este patrimonio y el desarrollo mediante la misma de distintas aplicaciones que permitan gestionarlo, ya sea mediante análisis para su conservación, a través de la musealización del mismo o difundiéndolo para crear consciencia y facilitar el interés por su protección. Por lo tanto, entendemos que ciertas técnicas como la fotogrametría en su aplicación a la arqueología deben ser empleadas hacia este fin, buscando y desarrollando distintos usos de la misma que contribuyan a la investigación, conservación y difusión del patrimonio histórico-arqueológico.

La fotogrametría puede abordar gráficamente cualquier forma de un objeto, edificio o espacio que pueda ser fotografiado, abriendo, por lo tanto, un amplio abanico de posibilidades y ámbitos de actuación. Mediante la fotogrametría en su enfoque hacia el Patrimonio cultural y arqueológico:

“Se trabaja en excavación arqueológica y lectura de paramentos, se llevan a cabo estudios de estratigrafía, se representan restos arqueológicos tanto en el contexto de la excavación como en el laboratorio, se generan modelos geométricos acerca de la forma original de los hallazgos, se elaboran planos de edificaciones ya existentes, se planifica la reconstrucción arqueológica y arquitectónica, se ilustran catálogos e inventarios, se obtienen modelos tridimensionales, se realizan tareas de restauración, se trabaja en actividades de museología, educación, divulgación...Sin olvidar en ningún momento la relación actual entre fotogrametría e informática; binomio de gran potencialidad siempre ligado a la tecnología y a sus continuos avances.” (García y Marrero, 2004: 2173)

Tal y como describen Milagrosa García y M<sup>a</sup> de la Gracia Marrero en el *XV Coloquio de historia canario-americana* (2004), la fotogrametría tiene múltiples usos respecto al Patrimonio, y no solo eso, sino que permanece en continuo estado de avance y mejora, creando la necesidad al especialista de actualizar contenidos continuamente para poder aprovechar las ventajas y beneficios que la técnica puede aportar.

A continuación, mencionamos diversos usos de la fotogrametría aplicada a la arqueología que consideramos de gran utilidad, y que facilitan y/o mejoran la investigación arqueológica.

#### **4.3.2.1. DOCUMENTACIÓN Y REGISTRO DE YACIMIENTOS Y RESTOS ARQUEOLÓGICOS**

La documentación y el registro de zonas arqueológicas se constituye como uno de los usos más demandados y efectivos de la fotogrametría en el campo de la arqueología, ya que permite obtener resultados de gran precisión en un tiempo relativamente corto. Así mismo, la técnica permite documentar áreas más amplias en un tiempo mucho menor que el dibujo arqueológico.

Como herramienta de documentación, la fotogrametría permite obtener todas las copias que se deseen de una misma pieza o elemento arqueológico, constituyéndose como una fuente de conocimiento perdurable en el tiempo. Para ello, han nacido algunas bases de datos

patrimoniales y páginas Web como *Sketchfab*, donde podemos encontrar un sinfín de reproducciones de modelos 3D de diversa tipología y procedencia.

La posibilidad de escalar y georreferenciar los modelos fotogramétricos respecto al elemento original fotografiado permite al investigador obtener información de calidad sobre la tipología y características de los yacimientos u objetos arqueológicos. Así mismo, al asignar a una nube de punto tridimensional la información topográfica sobre su ubicación exacta, cada punto de la misma queda inserto dentro de un sistema de coordenadas conocido, adquiriendo unos valores de posición tridimensional determinados, lo que nos permitirá conocer la cota a la que se encuentra cada punto de la nube (Charquero, 2016: 19).

Así mismo, la fotogrametría permite un seguimiento rápido y exacto de las unidades estratigráficas, pudiendo documentar tanto planos horizontales como verticales, superficies irregulares, zonas sensibles que no deben ser alteradas, etc. La lectura de estratos mediante la técnica resulta muy rentable, pues permite tomar detalle de elementos de pequeñas dimensiones y crear planos a distintas escalas en función de las necesidades métricas del proyecto y los objetivos del investigador (García y Marrero, 2004: 2171).

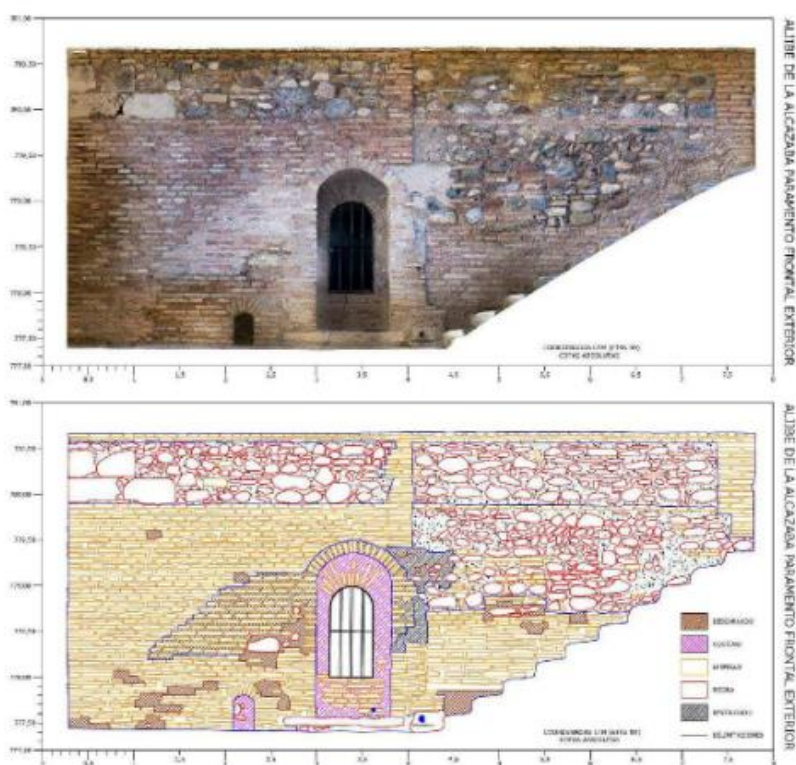


Figura 21. Comparación de ortofoto mediante fotogrametría y dibujo a mano de uno de los ventanales de una alcazaba islámica.

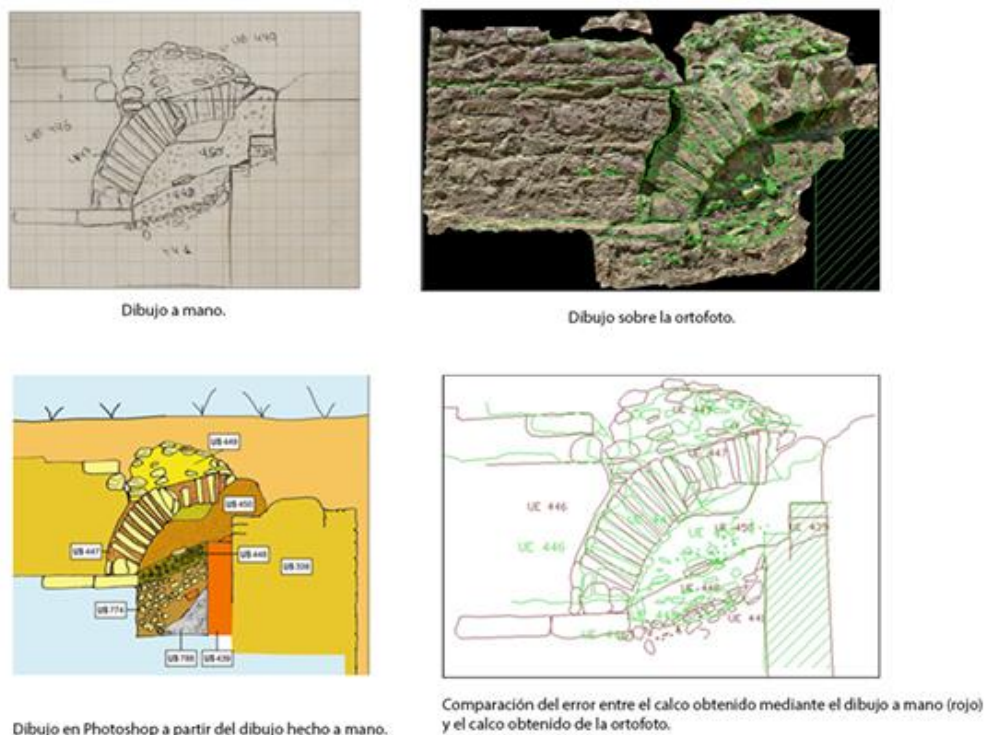


Figura 22. Comparación de distintos resultados obtenidos mediante fotogrametría y dibujo a mano de uno de los arcos rotos de las termas de la villa de Rufione en Tocioli (Italia) (Charquero, 2016: 146).

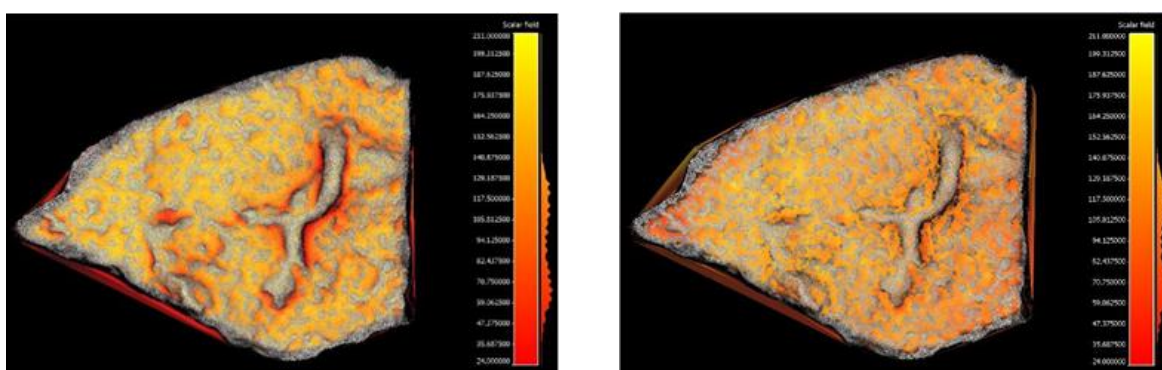
#### 4.3.2.2. ANÁLISIS DEL MODELO FOTOGRAMÉTRICO

Un modelo fotogramétrico es un producto analizable en profundidad, pudiendo revelar información de calidad sobre el elemento fotografiado. Además, el modelo 3D permite el trabajo desde el laboratorio, pudiendo investigar y analizar zonas o restos arqueológicos que, por su ubicación, estado o situación particular, resultan inaccesibles. Junto a otras técnicas no invasivas, la fotogrametría se constituye como un instrumento eficaz para la detección de yacimientos mediante la observación de imágenes aéreas y el análisis de los resultados en las distintas fases de restitución.

Dentro del uso de la fotogrametría como herramienta de análisis, las nubes de puntos extraídas de los modelos fotogramétricos proporcionan interesantes posibilidades de análisis. En este sentido, el software *CloudCompare* de procesamiento de malla y nube de puntos puede resultar muy útil, pues permite corroborar la tipología de los restos arqueológicos que son más complicados de catalogar. Así mismo, realizando periódicamente levantamientos fotogramétricos de un mismo elemento, se pueden comparar las respectivas nubes de puntos

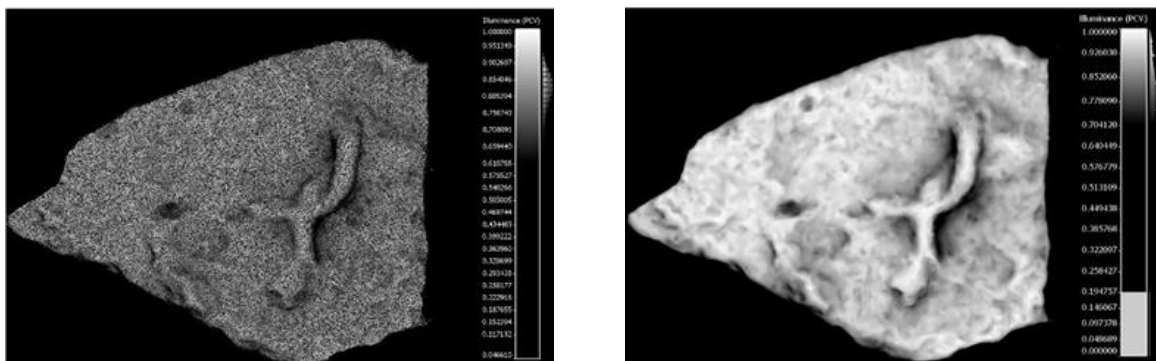
generadas y comprobar su evolución, para determinar, por ejemplo, su nivel de deterioro y poder tomar medidas preventivas (Maldonado: 2019: 138-139).

El método residual morfológico (MRM) es otra herramienta que permite obtener información analizable sobre un modelo fotogramétrico previamente obtenido. Este método, que se emplea particularmente para objetos de pequeño y mediano tamaño, permite detectar mediante una escala de colores el relieve de un objeto o su superficie y contrastar los detalles morfológicos, su color o textura. Resulta especialmente útil cuando la superficie de la pieza estudiada está demasiado erosionada, pues permite apreciar ciertos detalles que a simple vista no se diferencian (Elorza et al., 2015: 420).



Figuras 23 (izquierda) y 24 (derecha). Aplicación de MRM sobre una malla suavizada (izquierda) y sobre una malla con menor suavizado (derecha) (Torregrosa-Fuentes et al., 2018: 119).

La aplicación de la luz rasante o RTI (*Reflectance Transformation Imaging*) como instrumento de análisis permite la detección de detalles o anomalías en las piezas sobre un modelo fotogramétrico previamente obtenido. Ésta es una técnica empleada para proyectar sombras muy contrastadas en la superficie de las piezas y así poder visualizar mejor el relieve del objeto. Mediante la luz rasante se resaltan las irregularidades de la pieza, pudiendo distinguir incisiones, grabados o deformaciones. Para ello, se realiza un juego de luces digitales sobre la pieza desde diferentes perspectivas. En definitiva, esta es una herramienta útil, de bajo coste y que permite obtener resultados rápidos sobre los detalles de la pieza (Caine et al., 2019: 2).



Figuras 25 (izquierda) y 26 (derecha). Aplicación de RTI sobre nube de puntos (izquierda) y sobre malla (derecha) de una pieza con relieves antropomorfos (Torregrosa-Fuentes et al., 2018: 119).

La observación del modelo 3D y su análisis desde distintos ángulos y perspectivas nos permite observar detalles de las piezas como: marcas de fractura y talla, distintas capas de colores, restos de policromía, etc.

#### 4.3.2.3. OBTENCIÓN DE MEDIDAS LONGITUDINALES Y VOLUMÉTRICAS

Los modelos fotogramétricos correctamente escalados suponen un instrumento de medida de gran potencial. Ciertos softwares permiten manipular el producto fotogramétrico y aplicar sobre éste ciertos parámetros de medición, que permiten calcular extensiones longitudinales (altura, anchura y profundidad) en el caso de zonas arqueológicas, y medidas en el caso de objetos, cuyos resultados proporcionan datos de gran valor y precisión.

*Agisoft Metashape* permite crear ortofotografías precisas y sin distorsión altamente medibles, lo que posibilita la obtención de medidas exactas sobre la misma a escala real. Esto resulta de gran utilidad para la producción de documentación planimétrica de excavaciones y sitios arqueológicos (Maldonado, 2019: 130).

Así mismo, estos modelos pueden ser seccionados por partes, permitiendo a su vez llevar a cabo análisis cuantitativos de su forma, su capacidad volumétrica, etc., y obteniendo datos únicos altamente medibles y analizables.

La técnica fotogramétrica también permite realizar mediciones de cálculo volumétrico, pudiéndose extraer información sobre la capacidad de almacenamiento de distintos objetos o elementos arquitectónicos a partir de modelos escalados.

Otra de las grandes posibilidades que ofrece la fotogrametría digital es la de generar imágenes analizables y exactas mediante inteligencia artificial, que permiten investigar el patrimonio y las piezas fragmentadas, y unir de forma virtual las mismas para reconstruir edificios y objetos arqueológicos.

Así mismo, en los últimos años, la fotogrametría combinada con la inteligencia artificial viene desarrollando nuevos métodos de documentación y registro de yacimientos y zonas arqueológicas, mediante algoritmos que permiten diferenciar la coloración del suelo e identificar restos arqueológicos que, posteriormente, son segmentados en función de sus características formales, tamaño o capacidad. Esto es sin duda un avance sin precedentes que facilita la labor arqueológica al comparar y relacionar atributos y características comunes entre espacios arqueológicos permitiendo una mejor interpretación de los mismos por parte del investigador (López, 2022: 19-21).

#### **4.3.2.4. RÉPLICAS DEL OBJETO ORIGINAL**

Mediante el uso de impresoras 3D se pueden transformar los modelos obtenidos mediante fotogrametría en réplicas casi idénticas al objeto original fotografiado. Los únicos requisitos para ello consisten en realizar un correcto escalamiento del objeto fotogramétrico a partir de la pieza original y convertir el modelo a un formato compatible con la impresora (PLY).

Algunos autores como Brandon R. Olson (2016: 240) subrayan la importancia de estas réplicas realizadas mediante modelado 3D como sustitutas de garantías, salvando las distancias, del elemento original. Estas réplicas pueden conservar las características necesarias para estudiar la pieza sin necesidad de manipular y/o alterar el objeto original. En este sentido, la réplica se convierte en una fuente de información, permitiendo preservar el conocimiento sobre el objeto, incluso si se daña o extravía el original.

Estas impresiones 3D permiten la comodidad y la facilidad en su desplazamiento, siendo además una opción idónea para el montaje de exposiciones temporales, congresos, galerías, etc., que mediante una correcta musealización pueden llegar a ser un recurso perfecto para la difusión y transferencia de conocimiento. Además, a diferencia de la pieza original, estas réplicas pueden emplearse para experiencias hápticas<sup>7</sup> dirigidas al público, siendo

---

<sup>7</sup> El término “háptica” designa la ciencia encargada del estudio de las percepciones a través del tacto.

especialmente útil para mejorar la accesibilidad a las mismas de las personas invidentes (Pietroni y Ferdani, 2021: 1).



Figura 27. Impresión 3D del busto de Nefertiti para la exposición “3D. Imprimir el mundo” de la Fundación Telefónica Movistar.

#### **4.3.2.5. CONSERVACIÓN Y RESTAURACIÓN**

A partir de estos modelos tridimensionales se pueden observar distintos daños y anomalías sobre la pieza, advirtiéndonos de la necesidad de llevar a cabo una correcta protección y conservación de la misma con el fin de evitar un mayor deterioro. Así mismo, mediante la técnica fotogramétrica se pueden crear moldes exactos de fragmentos que pueden resultar de gran utilidad para la restauración de objetos arqueológicos.



Figura 28. Restauración de busto fúnebre de caliza alabastrina procedente de Palmira mediante impresión 3D por fotogrametría.

#### 4.3.2.6. DIFUSIÓN Y CREACIÓN DE PRODUCTOS CULTURALES

Los modelos fotogramétricos debido a su carácter digital, son productos con una potente capacidad de difusión. Tanto para la comunidad científica como para el resto de la sociedad, la posibilidad de incluir en distintos proyectos el producto tridimensional como complemento a la investigación es un recurso que puede mejorar la transmisión de conocimientos y que, además, resulta muy atractivo para el usuario.

La fotogrametría constituye el primer paso de la reconstrucción virtual del patrimonio histórico, la cual permite una mejor interpretación de los yacimientos y restos arqueológicos.

Mediante el uso de programas interactivos se puede visualizar la estructura u objeto en tres dimensiones, permitiendo al usuario interactuar con el contenido de lo que está observando. Este es el método empleado por muchas plataformas digitales como videojuegos, o por museos o instituciones culturales que mediante la creación de recursos didácticos y de interpretación, trasladan al usuario una experiencia única donde se convierte en partícipe de la propia historia (García y Marrero, 2004: 2162).

Como recurso didáctico, los productos fotogramétricos también tienen especial interés, ya que junto a la correspondiente formación teórica, permiten una mejor comprensión de los contenidos. La visualización de un espacio u objeto arqueológico idéntico al original supone un acercamiento a la realidad, permitiendo la comprensión del mismo sin necesidad de desplazamiento.

El desarrollo de estas experiencias fomentan, a su vez, el arraigo y la identificación de la sociedad con su propia historia, e incrementan el interés por el turismo cultural generando beneficios (Caro et al., 2015: 932).

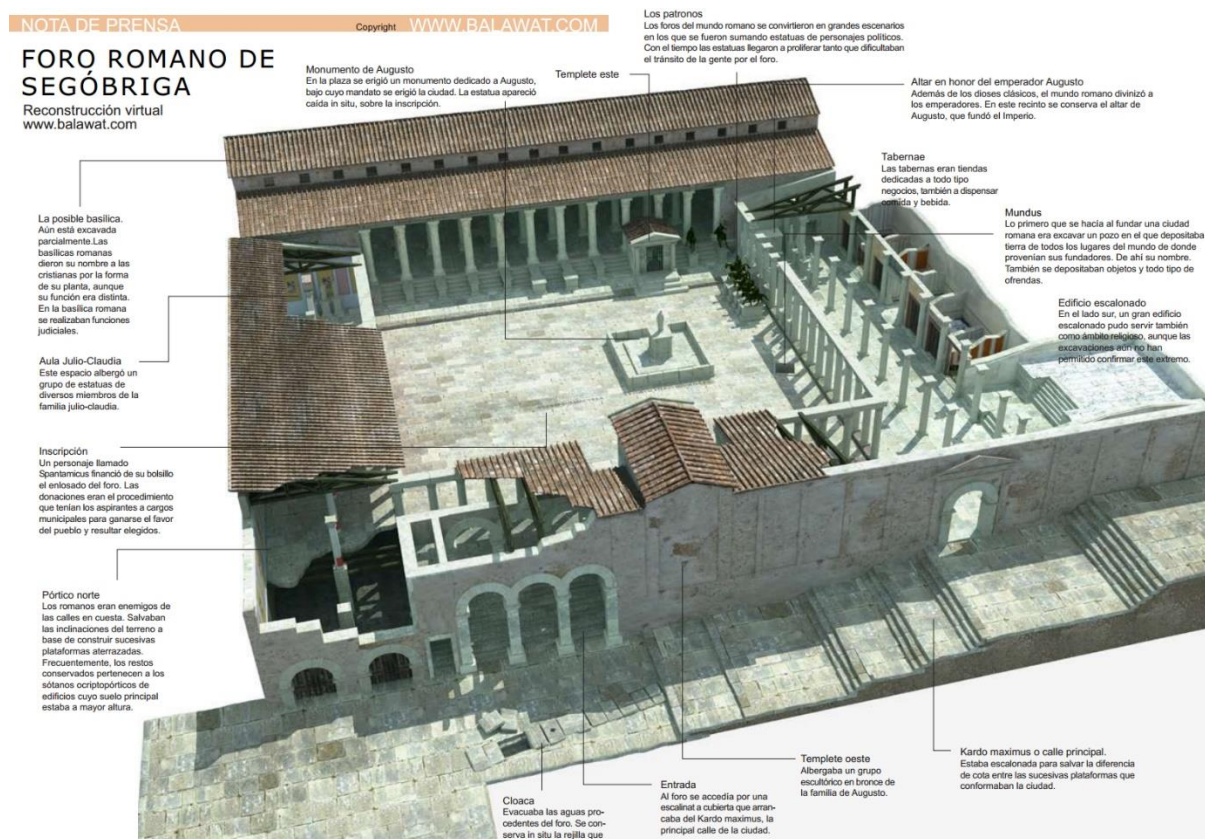


Figura 29. Reconstrucción virtual mediante fotogrametría del foro romano de Segóbriga (Cuenca). (Fotografía cedida por “Balawat: Diseño multimedia para la Arqueología y el Patrimonio Cultural”).

## 4.4. FOTOGRAMETRÍA Y ARQUEOLOGÍA: MÉTODOS Y APLICACIONES

Según las condiciones ambientales en la que se realice la captura de imágenes, se distinguen tres tipos de fotogrametría aplicada a la arqueología: terrestre, aérea y subacuática. Cada una de estas modalidades tiene su propio *modus operandi*, aunque su finalidad sea idéntica: documentar y registrar los yacimientos y restos arqueológicos mediante fotografías y obtener un modelo tridimensional útil para la investigación arqueológica y la difusión de los resultados. A continuación, explicamos en qué consisten, sus métodos de aplicación y las características particulares de cada una de ellas.

### 4.4.1. FOTOGRAMETRÍA TERRESTRE

La fotogrametría terrestre se realiza desde la propia superficie terrestre, es decir, sin el uso de vehículos aéreos no tripulados (UAV). Dentro de la misma podemos distinguir entre: fotogrametría de objeto cercano y fotogrametría de campo.

Hasta la década de los 80 del pasado siglo, momento en el que aparecen las primeras cámaras digitales, la fotogrametría terrestre aplicada a la arqueología fue prácticamente inexistente y la documentación y registro arqueológico se realizaba mediante dibujo. A partir de ese momento, la constante evolución de la fotografía y las mejoras de los dispositivos de captura, incluyendo sistemas de calibración y aplicación de imágenes digitales, así como métodos de procesamiento y adquisición de datos de alta velocidad provocó un incremento en el uso de la fotogrametría para documentar y registrar objetos de pequeño y mediano tamaño en el campo de la arqueología.

En los últimos años, la irrupción en el mercado de cámaras de gran formato y almacenamiento, y el avance en la pixelación de las imágenes, permitiendo una extracción de información en detalle de las fotografías, ha provocado que la fotogrametría sea cada vez más demandada para la arqueología. Así mismo, la reducción en el coste de las propias cámaras y de otros componentes aplicados en la toma de imágenes también ha contribuido enormemente a la expansión de su uso (Jiang et al., 2008: 824-825).

Para realizar fotogrametría terrestre tan solo es necesario delimitar el objeto o espacio a documentar, establecer dianas como puntos de control, disponer de una cámara digital y la acción humana para captar las imágenes.

#### 4.4.1.1. FOTOGRAMETRÍA DE OBJETO CERCANO

La fotogrametría de objeto cercano, o también conocida como fotogrametría a corta distancia, es aquella que se aplica sobre piezas y restos arqueológicos situados relativamente próximos al objetivo de la cámara. Esta fotogrametría, por lo general, se realiza en un corto espacio de tiempo, dependiendo del tamaño del propio objeto fotografiado y del nivel de detalles a documentar.

Por lo general, esta técnica es empleada sobre objetos de pequeño y mediano tamaño, a una distancia que puede variar entre los 10 centímetros y los 300 metros, aunque en la mayoría de ocasiones se realiza próxima al elemento con el fin de obtener imágenes de gran resolución y diferenciar la geometría y los detalles del propio objeto (Roldán Llano, 2019:65).

Normalmente, este tipo de fotogrametría se realiza *in situ* en el campo arqueológico, aunque también hay excepciones, llevándose a cabo trabajos en laboratorio y convirtiendo la labor fotogramétrica en algo más minucioso y detallista.



Figura 30. Documentación fotogramétrica de un cráneo (Azcune, 2011: 652).

Los resultados obtenidos de la fotogrametría de objeto cercano no siempre muestran la calidad deseada, sobre todo por lo rapidez en la toma de fotografías. Aun así, los modelos tridimensionales obtenidos suelen resultar mucho más precisos que los dibujos arqueológicos realizados a mano.

Las ventajas que ofrece esta fotogrametría frente al dibujo tradicional están provocando un aumento considerable de los grupos de investigación y arqueólogos que se decantan por el uso de la misma en la búsqueda de mejores y más rápidos resultados (Maldonado, 2019: 203).

#### **4.4.1.1.1. Distintas aplicaciones**

Como ya hemos comentado en el presente trabajo, los modelos tridimensionales son una herramienta perfecta para realizar mediciones y análisis sobre el elemento fotografiado de una forma flexible y eficaz. Del mismo modo ocurre sobre los objetos de pequeño y mediano tamaño. Según Rincón y Arévalo:

“Los modelos en 3D han permitido la interactividad entre objetos y personas, generando una relación que va mucho más allá de la visualización directa a una visualización virtual, lo cual permite explorar y estudiar el objeto de interés... sin alterarlo y sin que la perspectiva de la visión humana tienda a deformarlo.” (Rincón y Arévalo, 2014: 144)

Así mismo, Rincón y Arévalo afirman que, además, los modelos 3D:

“Permiten analizar especialmente la morfología de los objetos arqueológicos en su estructura como tal, tanto a escalas pequeñas como a grandes escalas, es posible analizar las relaciones entre figuras y/o movimientos que se encuentren sobre un soporte claramente discontinuo expuesto a diferentes procesos de meteorización y deterioro cuando se tienen diferentes puntos de vista a los tradicionales.” (Rincón y Arévalo, 2014: 144)

En base a esto podemos afirmar que la fotogrametría de objeto cercano permite al investigador analizar en profundidad las piezas arqueológicas (morfología, estructura, color, etc.) y compararlas con otros objetos para así determinar sus características elementales y tipológicas.

#### 4.4.1.1.2. Metodología

Para realizar correctamente la fotogrametría de objeto cercano debemos escalar el proyecto. Para ello, mediremos algunas distancias, lo más amplias posibles, entre puntos bien definidos que aparezcan en las imágenes. Como hemos comentado anteriormente, es aconsejable establecer puntos de control, con coordenadas precisas, para comparar y ajustar posteriormente la escala mediante la georreferenciación de las mismas con los puntos y las calculadas a partir de las imágenes (Balaguer, 2018: 6).

Generalmente, para este tipo de fotogrametría se aconseja emplear tiempos de exposición cortos y aperturas pequeñas del diafragma de la cámara para proporcionar una profundidad de campo suficiente.

Para obtener una correcta textura fotográfica se recomienda asegurar una buena iluminación, emplear ISO baja y evitar la sobreexposición. Actualmente, para solventar la falta o exceso de luz se emplea la opción de captura HDR (*High Dynamic Range*), mediante la cual se toman varias imágenes de una misma escena con distintas exposiciones para que cualquier zona del objeto aparezca con la iluminación adecuada en alguna de las imágenes, para luego combinar las mismas en una sola y obtener un rango dinámico más amplio que las capturas originales. Posteriormente, la combinación de una serie de fotografías de un mismo objeto creadas mediante este procedimiento nos permite obtener una textura del mismo ajustada a la realidad (Ntregka et al., 2014: 12).

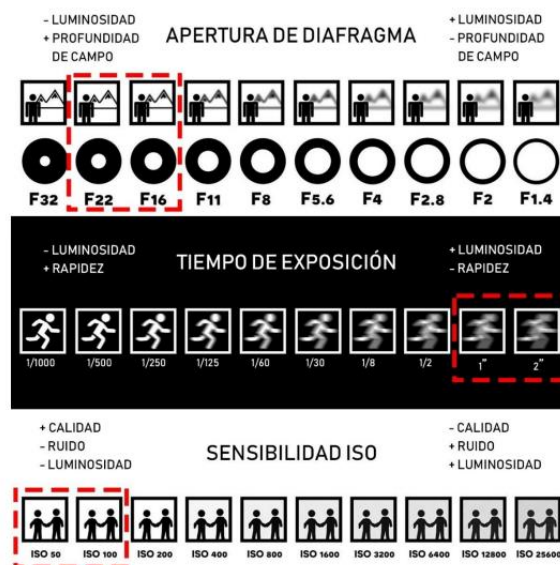


Figura 31. Valores de ajuste medio recomendados para la captura de un modelo fotogramétrico en laboratorio (Maldonado, 2019: 89).

#### 4.4.1.2. FOTOGRAMETRÍA DE CAMPO

La fotogrametría de campo puede ser tanto terrestre como aérea. Todo dependerá de las características estructurales de los elementos a documentar, de la posibilidad de realizar las fotografías desde la superficie terrestre, de la distancia a la que se encuentra aquello que queremos fotografiar y de la extensión que ocupa.

Teniendo en cuenta esto, podemos definir la fotogrametría de campo terrestre como aquella que se encarga de documentar, registrar, analizar y medir extensiones de terreno arqueológico, ya sean yacimientos u otros elementos desde la superficie terrestre.

La distancia a la cual se realiza este tipo de fotogrametría es relativamente media, ya que lo realmente interesante de su uso es la posibilidad de obtener una visión general del lugar que estamos documentando, y no de los detalles de los elementos presentes. La visión en conjunto posibilita el análisis de la zona arqueológica, permitiendo obtener información relevante sobre sus características principales y la interacción y relación entre las distintas estructuras dispuestas.



Figura 32. Modelo 3D obtenido por fotogrametría de campo del yacimiento de Casas del Turuñuelo (Badajoz, España) (Rodríguez et al., 2020: 427).

##### 4.4.1.2.1. Distintas aplicaciones

Aunque la función principal de la fotogrametría sea la visual, su empleo es trascendental dentro de la arqueología de campo, ya que permite el desarrollo de otras herramientas de protección e

investigación del patrimonio histórico-arqueológico, tales como: la conservación preventiva, el registro, la posibilidad de georreferenciar, interpretar, restaurar, proyectos topográficos y cartográficos, etc.

Dado que la actividad arqueológica es esencialmente destructiva y que sólo se puede intervenir una vez sobre cada unidad estratigráfica o yacimiento, es de vital importancia documentar toda la información posible. Mediante la fotogrametría se puede registrar mucha información de los distintos estratos y zonas arqueológicas, que una vez procesada y almacenada, puede ser consultada cuantas veces sea necesario (Caballero, 2006: 92).

La técnica resulta especialmente útil, gracias a su eficacia y eficiencia, en aquellas circunstancias en las que el arqueólogo no dispone de mucho tiempo para realizar la intervención arqueológica, como es el caso de las excavaciones de urgencia.

Antes del desarrollo de la fotogrametría actual, muchos de los yacimientos eran documentados mediante fotografías antes de ser transformados para siempre por la propia labor arqueológica o por otros motivos (ocultación, obras, catástrofes naturales, guerras, etc.). En la actualidad, a partir de varias fotografías tomadas desde distintos ángulos y mediante el procesado fotogramétrico se pueden crear reconstrucciones virtuales de esos yacimientos de gran precisión, recuperando así, aunque virtualmente, parte del patrimonio destruido y su información correspondiente. Este tipo de fotogrametría resulta muy útil aplicada a la llamada arqueología de la muerte, ya que se constatan numerosos archivos fotográficos de enterramientos aun sin estudiar ni analizar en profundidad. Este tipo de fotogrametría se conoce como *Fotogrametría involuntaria* (Aparicio et al., 2014: 11-12).

#### **4.4.1.2.2. Metodología**

La arqueóloga Ana M<sup>a</sup> Charquero Ballester escribía en 2016: “Aunque van en aumento, son escasos los ejemplos del uso de la fotogrametría para documentar completamente una excavación arqueológica” (Charquero, 2016: 149).

Seis años más tarde podemos confirmar que los proyectos que muestran el uso de la fotogrametría para la documentación completa de intervenciones arqueológicas han aumentado de forma exponencial. Actualmente, tenemos todo un abanico de propuestas para el uso de la técnica en terreno arqueológico, pero que comparten procedimientos metodológicos y fases de trabajo. A continuación, proponemos un protocolo de actuación para la realización de fotogrametría de campo:

- A) Planificación: debemos conocer la extensión total que se quiere documentar y planificar sobre el terreno la toma fotográfica. Para ello, habrá que dividir por zonas la superficie de terreno a documentar y establecer límites utilizando estructuras murarias o marcadores como elementos divisores.
- B) Colocación de dianas: estableceremos ciertos puntos de control para la toma de imágenes y para relacionar posteriormente las mismas con las superficies que hemos documentado.
- C) Toma de datos topográficos: documentaremos los puntos de control fijos establecidos previamente mediante sistemas de georreferenciación por coordenadas, con el fin de obtener con exactitud los datos referentes a su localización y escalar correctamente el modelo.
- D) Toma de fotografías: realizaremos la captura manualmente, o mediante la ayuda de un trípode o pértiga si necesitamos elevar la cámara para tomar imágenes en altura del sitio arqueológico.

#### **4.4.2. FOTOGRAMETRÍA AÉREA**

La fotogrametría aérea aplicada a la arqueología permite la observación y adquisición de información de la superficie terrestre mediante el uso de sensores alejados del terreno y su posterior análisis mediante el procesado digital y la interpretación de los resultados obtenidos (De Feo et al., 2013: 23).

En la actualidad, la captura aérea de amplias extensiones de terreno y zonas arqueológicas se realiza, por lo general, mediante el uso de vehículos aéreos no tripulados (VANT, o UAV por sus siglas en inglés), y en combinación con técnicas de triangulación topográfica. La finalidad de esta fotogrametría consiste en obtener los detalles de la superficie de terreno fotografiada, tanto en planta como en alzado y perfil.

Entre sus principales ventajas destacan: la velocidad de captura, la obtención de detalles imperceptibles al ojo humano y la posibilidad de empleo de la misma en zonas de difícil acceso terrestre.

Este tipo de fotogrametría tiene su origen en las primeras capturas fotográficas realizadas mediante cometas o globos aerostáticos a finales del siglo XIX y comienzos del siglo XX. Se considera que las primeras fotografías aéreas aplicadas en terreno arqueológico fueron

realizadas en 1899 por el arqueólogo italiano Giacomo Boni, quien capturó imágenes del foro romano desde un globo aerostático (Peinado et al., 2014: 52).

Si bien a lo largo de todo el siglo se han ido realizando distintos vuelos fotogramétricos mediante helicópteros, avionetas o satélites, el alto coste que suponían unido a la imprecisión de los mismos, por la escasa resolución de las imágenes, provocaba que su uso fuera restringido y que el resultado no fuese el esperado en la mayoría de ocasiones. Por esta razón, su empleo en arqueología y documentación del patrimonio no se conoce hasta tiempos mucho más recientes.



Figura 33. Fotografía aérea del foro romano por Giacomo Boni en 1899.

La irrupción en el uso de nuevas tecnologías como los Vehículos Aéreos no Tripulados o drones ha permitido abaratar los costes y mejorar la precisión de este tipo de proyectos. La calidad de la toma de imágenes de estos instrumentos es infinitamente superior, pudiendo obtener resoluciones en detalle de los elementos que conforman el paisaje de precisión milimétrica.

Además de su uso en arqueología, la fotogrametría aérea es empleada en muy diversos campos, destacando: fines militares, levantamientos topográficos del terreno, anteproyecto de carreteras,

canales, usos agrícolas, informes de tráfico y tránsito, urbanismo, detección de fraudes, etc. (Dsbaero, 2022).

Como método aplicado al trabajo arqueológico, la fotogrametría permite, entre otras cosas, la prospección de grandes áreas geográficas, la investigación y comparación de yacimientos, las síntesis planimétricas y la documentación e ilustración de resultados. Entre los principales productos obtenidos mediante el uso de fotogrametría aérea arqueológica encontramos: ortofotografías, modelos digitales de Terreno (MDT) y modelos digitales 3D, los cuales definiremos más adelante.

A continuación, trataremos el uso de drones, la metodología para realizar correctamente el proceso fotogramétrico y, por último, la utilidad de esta herramienta para el trabajo arqueológico y los distintos productos que se pueden obtener mediante la misma.

#### **4.4.2.1. USO DE DRONES**

En primer lugar, hemos de aclarar que no todos los UAV son drones, ya que los satélites también son catalogados como tal. Sin embargo, en la aplicación de la fotogrametría aérea en arqueología vamos a destacar el uso de los RPAS (del inglés *Remotely Piloted Aircraft System*) o drones, ya que resultan una herramienta apropiada y sencilla de utilizar para la documentación y registro arqueológico realizado desde el aire.

Autores como Jurgen Everaerts definen los drones como:

“Aeronaves que están diseñadas o modificadas para no llevar un piloto humano y que son operadas a través de comandos electrónicos iniciados por el controlador de vuelo o por un sistema de control de gestión de vuelo autónomo a bordo que no requiere la intervención del controlador de vuelo.” (Everaerts, 2008: 697)

El empleo de estas plataformas aéreas tiene su origen a mediados de los años cincuenta del pasado siglo en el campo militar. Estos primeros UAV's estaban destinados al reconocimiento, la vigilancia, el mapeo y para misiones militares en territorios hostiles (Orlando et al., 2016: 121). Durante los años centrales y finales del siglo XX, la fotogrametría aérea mediante drones fue expandiendo sus utilidades y áreas de trabajo, hasta llegar al siglo XXI, y, sobre todo, en los últimos años, en los cuales el menor coste de estos vehículos ha incrementado su venta y uso en arqueología.

Características \ UAV	eBee RTK	Gatewing UX5	Zephyr2	MD4-1000	Aibot X6
Plataforma					
Tipo	De ala fija			De ala rotatoria	
Envergadura	96 cm	100 cm	137 cm	103 cm	105 cm
Material	Espuma de Polipropileno expandido (EPP)	EPP, estructura de carbono	Poliéster	Fibra de carbono	Fibra de carbono
Peso	0,73 Kg	2,5 Kg	2,0 Kg	5,50 Kg	3,4 Kg
Tiempo de vuelo	45 min	50 min	60 min	88 min	30 min
Velocidad máx.	36-57 km/h	80 km/h	50-140 km/h	12 km/h	40 km/h
Altura máx.	1000 m	750 m	750	1000 m	1000 m
Precisión	3 – 20 cm	2,0 – 19,5 cm	4 cm	2 – 5 cm	2 cm
Sensores	GNSS, cámara multispectral	GNSS, cámara infrarrojo	Cámara Gimbal, multispectral	Cámara térmica, escáner láser y cámara multispectral	GNSS, Cámara termográfica, multispectral

Figura 34. Tabla comparativa de las características técnicas de diferentes plataformas UAV comerciales para fotogrametría (Orlando et al., 2016: 122).

Entre las principales ventajas que aportan estos UAV's o drones respecto a otros sistemas aéreos para la toma de imágenes encontramos que, al ser maniobrados por control remoto, permiten la posibilidad de ser posicionados de forma estática en un punto, altura y ángulo determinado, obteniendo fotografías con mayor precisión. Además de esto, realizar un vuelo fotogramétrico con dron resulta más económico que un vuelo en vehículo tripulado o la compra de imágenes satelitales de uso restringido.

El tamaño reducido de ciertos drones también resulta una gran ventaja para su uso en arqueología, permitiendo un fácil transporte y aportando una sustancial maniobrabilidad para documentar ciertas estructuras de difícil acceso.

Entre sus inconvenientes destaca la necesidad de disponer de cierto conocimiento en el uso de estas aeronaves con el fin de controlar que no se ocasionen daños o perjuicios a personas u otros elementos durante la captura de imágenes. Una adecuada formación básica en fotogrametría será suficiente para poder emplear el dron sin riesgos. Así mismo, se deben de tener en cuenta las condiciones climáticas antes de realizar la toma de imágenes, ya que el viento o la lluvia pueden perjudicar a la realización del vuelo e impedir una correcta toma.

#### 4.4.2.2. DISTINTAS APLICACIONES

Las herramientas de teledetección como la fotogrametría permiten realizar programas de preservación y conservación del patrimonio histórico a través de modelos predictivos de ubicación de sitios arqueológicos. Así mismo, permiten crear cartografía complementaria a la información esencialmente arqueológica, como pueden ser los mapas de suelos, mapas de rutas, modelos de elevación del terreno, etc.

Mediante la toma aérea de fotografías también se puede detectar cómo se proyectan ciertas sombras sobre el terreno o cómo se distribuye la vegetación en la superficie, siendo un buen indicador de la existencia de estructuras ocultas no visibles desde el propio terreno, como pueden ser restos de muros o estructuras arqueológicas de cierta envergadura.

Así mismo, una de las aplicaciones más interesantes del uso de RPAS o drones para fotogrametría aérea consiste en la obtención de imágenes multiespectrales. Estas imágenes multiespectrales nos permiten obtener información de cierta relevancia sobre el terreno arqueológico oculto en una zona determinada. Este tipo de proyecto se apoya sobre las llamadas *firmas espectrales*, que definen la forma en la que cada superficie u objeto (rocas, agua, vegetación densa, suelos desprovistos de elementos artificiales, ciudades, etc.) reflejan la energía emitida por el sol o por el satélite que transporta el sensor de radiación. A partir de los datos obtenidos, los investigadores o arqueólogos pueden interpretar la información que muestra el terreno, pudiendo distinguir a través de su huella los suelos que disponían de un mayor potencial agrícola en el pasado o la distribución de recursos de diversa tipología sobre el mismo. Los sistemas satelitales que hacen uso de la técnica fotogramétrica permiten registrar mayores extensiones de terreno que los proyectos fotográficos realizados con drones u otros vehículos aéreos no tripulados, pudiendo obtener datos de mayor resolución espacial (De Feo, 2013: 24-25).

La combinación de la fotogrametría aérea como técnica de documentación del patrimonio histórico-arqueológico junto al empleo de otras técnicas de registro topográfico, como las estaciones totales<sup>8</sup>, permite al arqueólogo adquirir documentación georreferenciada con múltiples ventajas para la investigación y el análisis de yacimientos o zonas arqueológicas.

---

<sup>8</sup> Una estación total es un teodolito con distanciómetro integrado que puede medir ángulos y distancias simultáneamente. Mediante este procedimiento, la estación total permite medir unas coordenadas de posición en el espacio, es decir, para determinar la posición y altura de un punto.

Cabe destacar que la correcta aplicación de la fotogrametría aérea sobre zonas con potencial arqueológico combinadas con el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y su correspondiente interpretación pueden permitir al arqueólogo o investigador obtener ciertos datos de gran valor sobre los asentamientos, el aprovechamiento de recursos, los modos de vida, etc., de las sociedades del pasado.

Como complemento de la técnica fotogramétrica encontramos herramientas de uso público como Google Earth, la cual constituye una buena fuente de información para la teledetección en arqueología, ya que permiten obtener imágenes detalladas de la superficie terrestre de forma gratuita.

#### **4.4.2.3. METODOLOGÍA**

Para llevar a cabo un vuelo de dron óptimo que garantice que las imágenes obtenidas precisen de la resolución, ángulo y calidad adecuadas se debe de seguir un protocolo de actuación en campo. Previo a la documentación de la zona arqueológica, deberemos planificar el vuelo, asegurando que se cumplen todas las medidas de seguridad en función del reglamento de la AESA (Agencia Estatal de Seguridad Aérea).

##### **Normativa y requisitos de vuelo**

Los requisitos y medidas preventivas a tener en cuenta para los distintos vuelos de dron dependen de diversos factores: peso del dron, zona de vuelo, transporte o no de mercancías, etc. Explicaremos a continuación cuales son las medidas de prevención necesarias, según la normativa vigente, para poder hacer uso de los mismos en arqueología. Actualmente, según la normativa en España basada en los Reglamentos Europeos RE 2019/947 y RD 2019/945:

- El dron debe volar siempre dentro del alcance visual (VLOS), excepto si se utiliza el modo *follow me* o se dispone de un observador, pudiendo hacer uso de estos dispositivos de visión en primera persona (FPV).
- La altura de vuelo no debe superar los 120 metros desde la superficie terrestre ni los 50 metros de distancia horizontal.
- En caso de encuentro con una aeronave tripulada, se debe reducir la altura, y realizar maniobras evasivas para evitar la colisión y poder aterrizar el dron lo antes posible.
- No se puede volar el dron sobre grupos de personas, y si éste dispone de cámara no se podrá grabar ni fotografiar a individuos sin su consentimiento.

- No está permitido el transporte de mercancías peligrosas.

Así mismo, según la normativa mencionada, para el vuelo de dron de hasta 250 gramos el piloto deberá haber superado con éxito el examen de AESA de nivel 1 para obtener el certificado A1/A3 de la categoría abierta, disponer de un seguro de responsabilidad civil, así como registrarse como operador de drones en AESA y registrar el dron.

Además, en zonas de espacio aéreo restringido se deberá pedir permiso con una antelación mínima de 10 días a la fecha del vuelo y, antes de realizarlo, contactar con la torre de control del aeropuerto más cercano para asegurar que no hay riesgo de encuentro con ninguna aeronave tripulada. Para poder comunicarse con el aeropuerto, el piloto deberá tener el certificado oficial de radiofonista de drones (AESA, 2022a).

### **Planificación del vuelo**

El siguiente paso consistirá en planificar correctamente el proyecto fotogramétrico. Para ello, deberemos delimitar concretamente la zona que queremos documentar y definir con exactitud los parámetros de vuelo para la adquisición de las imágenes.

Hemos de destacar que, en función del modo de vuelo, encontramos drones que operan: de forma manual, asistida o automática. Algunos drones permiten los tres modos de uso, permitiendo al operador elegir el que más se ajusta a las necesidades de la zona o elementos a documentar. Los drones que operan manualmente son aquellos que requieren ser manejados continuamente por el piloto. El modo asistido es aquel en el que el dron recibe una serie de órdenes por parte del operador y las ejecuta de forma autopilotada. Por último, en el modo automático el operador define previamente una ruta y el dron la recorre de forma autopilotada, pudiendo modificarse la misma durante el vuelo si el piloto lo desea y alternar al modo manual. El modo de vuelo automático resulta más cómodo para capturar imágenes de grandes extensiones, ya que salva el posible error humano y toma las capturas a la misma velocidad y distancia entre ellas (AESA, 2022a).

Por lo general, para delimitar la región de interés sobre la cual se va a realizar la toma de imágenes en el modo de vuelo autónomo, se empleará un mapa base georreferenciado como *Google Earth*, por ejemplo, y se trazará sobre el mismo la zona que interesa. En cambio, en el modo manual, la región de interés será definida a partir de la dirección dada al dron con el control remoto por parte del piloto de vuelo.

Una vez delimitada la región de interés, el siguiente paso consistirá en ajustar los parámetros de vuelo deseados: altura de vuelo y traslape entre imágenes, tanto longitudinal como transversalmente.

Para la toma fotográfica mediante sistemas UAV con modo de vuelo autónomo se recomienda un traslape para las imágenes de entre 60 y 80%, pudiendo aumentar el mismo en función del nivel de detalles exigido. Respecto a la altura del dron, cuanto más alejado de la zona a documentar esté el vuelo menor será la resolución, y viceversa. Para la generación de modelos 3D detallados se recomienda una altura de vuelo bajo y un alto porcentaje de traslape (Nex y Remondino, 2013: 4-5).

Para vuelos manuales, sin sistema de navegación, tanto la altura como el traslape de las imágenes quedan a disposición del piloto quien lo supervisa a través del control remoto o mediante la cámara del propio dron para realizar imágenes en intervalos de tiempos fijos (Neitzel y Klonowski, 2011: 40).

### **Adquisición de las imágenes**

Tras planificar el vuelo, podemos proceder con la toma de imágenes. En primer lugar, deberemos establecer un punto de control, mediante una diana, por ejemplo, para que el propio dron pueda localizar luego el lugar de inicio y finalización del vuelo.

Posteriormente, se iniciará el lanzamiento o despegue de la plataforma aérea. En el caso de las plataformas tipo avión deben ser lanzadas manualmente o mediante lanzadores. Sin embargo, los vehículos multirrotor como el dron despegan de forma automática.

Tras esto, la plataforma aérea localiza automáticamente el lugar de inicio de la ruta de vuelo programada y comienza a realizar la captura de imágenes en función de los parámetros establecidos previamente de forma automática si está configurada de ese modo o mediante el control y supervisión del operador (Escalante et al., 2016: 124-126).

En la actualidad, la mayoría de plataformas aéreas llevan instalados sistemas GPS/INS que permiten la georreferenciación automática de las imágenes mediante la medición de coordenadas, así como la medición de los ángulos de inclinación del propio vehículo. Estos sistemas reducen el nivel de trabajo en campo ya que permiten determinar la orientación con menos puntos de control.

Por último, una vez finalizada la captura de toda la zona de interés habrá que aterrizar el dron sobre la diana, completando así el proyecto fotográfico de campo.



Figura 35. Ejemplo de toma de imágenes por fotogrametría aérea mediante dron. Se aprecia el solape entre las distintas capturas.

### Extracción y correlación de características

El método empleado por los softwares específicos de fotogrametría aérea no difiere respecto a otros tipos de procesados fotogramétricos: identificación y relación de características homólogas entre imágenes mediante áreas comunes o de traslape; sin embargo, en este caso, la extracción de características comunes se puede realizar de dos modos distintos: mediante los algoritmos conocidos como operadores de *puntos de interés*, empleados en la fotogrametría tradicional, y mediante los llamados *detectores de región*. Según Escalante et al.:

“Los detectores de región son un conjunto de píxeles asociados con la identificación de elementos que no presentan variación frente a los movimientos de la cámara que generan rotación, cambios de puntos de vista, de escala, la presencia de ruido en la imagen o cambios de iluminación de la escena. Estos efectos son muy comunes en fotogrametría de objeto cercano y en visión por computador, por lo que estos algoritmos son desarrollados y empleados mayormente en estas áreas.” (Escalante et al., 2006: 124)

Las características particulares de las imágenes aéreas tomadas con dron, las cuales pueden captar distorsiones, pérdida de calidad, exceso o falta de iluminación, falta de resolución, etc., convierten a los detectores de región en una alternativa perfecta para la fotogrametría aérea, los cuales permiten realizar imágenes en movimiento mediante la identificación de características

comunes entre ellas a partir de la información contenida en los píxeles. Uno de los detectores de región más utilizados para este tipo de fotogrametría, y que ya hemos mencionado antes, es el algoritmo SIFT (*scale invariant feature transform*).

Una vez orientadas las imágenes y extraídas las áreas comunes entre éstas, la segunda fase del proceso consistirá en determinar las coordenadas del terreno de cada uno de los puntos comunes definidos en las imágenes y, después, asignar las coordenadas del terreno para cada uno de los píxeles mediante la etapa conocida como *densificación de nube de puntos*.

Por último, se aplicará la malla tridimensional sobre la nube de puntos densa para proporcionar forma y volumen al modelo, obteniendo el producto 3D final (Escalante et al., 2006: 126-127).

#### **4.4.2.4. PRINCIPALES PRODUCTOS FOTOGRAMÉTRICOS**

Entre los principales productos obtenidos mediante el uso de fotogrametría aérea útiles para la investigación y el análisis arqueológico encontramos: la ortofoto, el Modelo Digital del Terreno (MDT), entre el que destaca el Modelo Digital de Elevaciones (MDE), y el Modelo Digital de Superficie (MDS). A continuación, se detalla en qué consiste cada uno de ellos:

##### **4.4.2.4.1. Ortofoto**

Una ortofoto es una imagen precisa y detallada de un espacio u objeto específico, y que permite medir distancias reales debido a que las distorsiones producidas por la lente de la cámara y el ángulo de la misma se corrigen de forma automática.

Estas ortofotos pueden almacenarse en distintos formatos o extensiones: JPEG, TIFF, PNG y KML, facilitando su uso a través de diferentes herramientas digitales y hacer mediciones precisas de la zona o el elemento fotografiado.

Por lo general, estas ortofotos se utilizan para realizar levantamientos topográficos y planimétricos, así como para distinguir cambios de coloración en los suelos (los más oscuros nos alertan de la presencia de fosos, zanjas o concentraciones de materia orgánica, y los más claros nos alertan que están situados sobre posibles piedras o morteros utilizados en la construcción de muros) (Cerrato, 2011:74-75). En cambio, en aquellas zonas con relieve abrupto o desigual, o vegetación excesiva, que dificulta la observación y/o visibilidad, difícilmente se pueden diferenciar los estratos o estructuras.

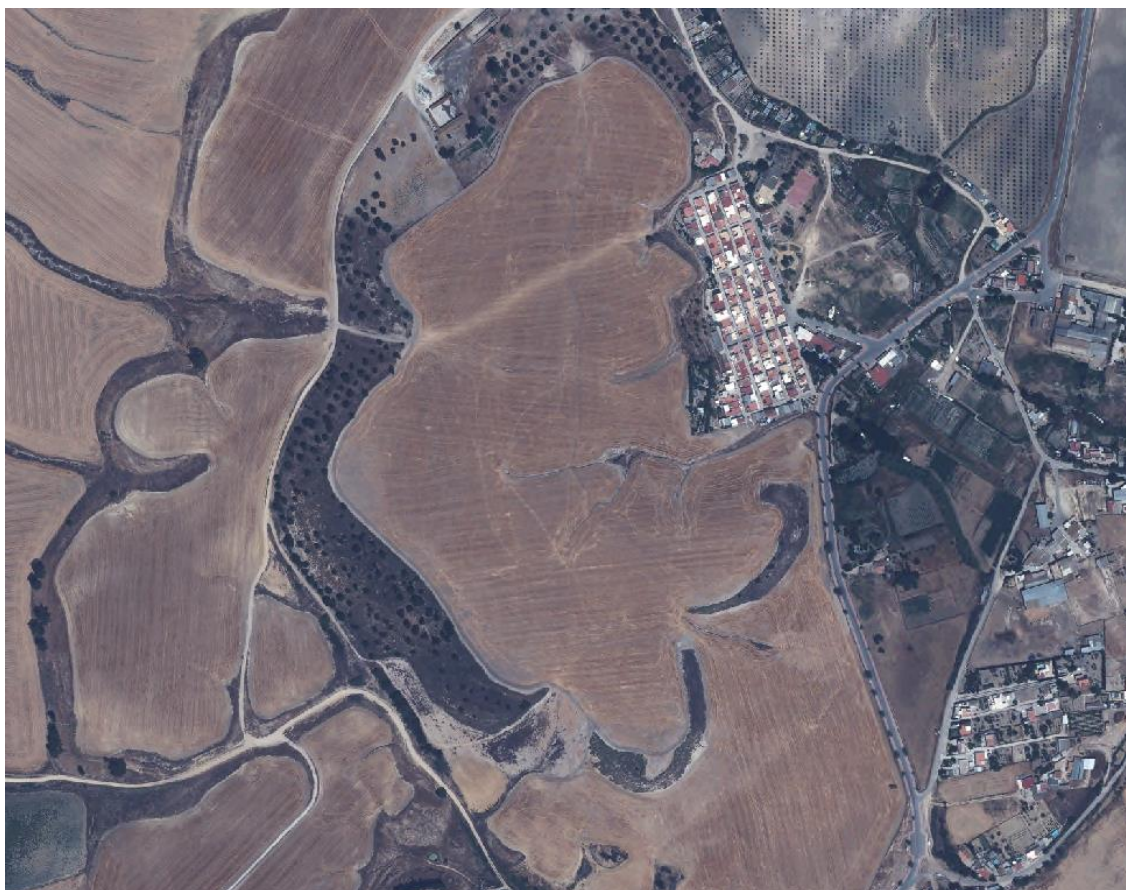


Figura 36. Ortofoto del yacimiento arqueológico de Mesas de Asta (Jerez, Cádiz).

Vozmediano define la ortofotografía como:

“Un documento fotogramétrico generado a partir de una imagen fotográfica, que conserva toda la información de ésta y con características geométricas equivalentes a las de los planos. Esto permite, que pueda ser combinado con información cartográfica o SIG (...) o que se pueda superponer sobre un modelo tridimensional para formar un modelo virtual.” (Vozmediano, 2006: 39)

Una de las aplicaciones de mayor utilidad de estas ortofotos es su uso en Sistemas de Información Geográfica para el mapeo de zonas con alto potencial arqueológico y para obtener medidas sobre la propia imagen a escala real.

#### **4.4.2.4.2. Modelo Digital de Superficie (MDS) y Modelo Digital del Terreno (MDT)**

El modelo digital de superficie (MDS) representa la información en altura de la superficie de la Tierra asociada a un sistema de referencia global, pero incluyendo todos los elementos que se

han registrado en la escena: edificios, vegetación, montañas, suelo, etc. Los MDS se aplican para el modelado tridimensional de proyectos de ingeniería, comunicaciones, urbanismo, prevención de riesgos o ambientales, etc.

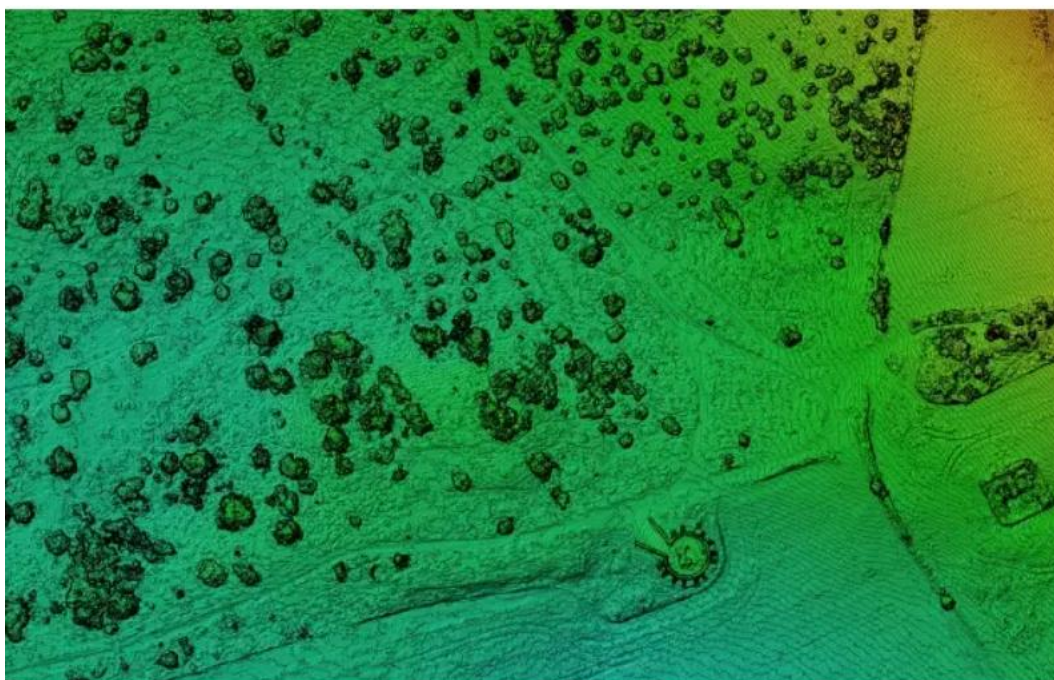


Figura 37. Modelo Digital de Superficie de la zona de la noria de Autran (Puerto Real, Cádiz)  
(Lagóstena y Calvillo, 2021: 27).

Por su parte, el modelo digital del terreno (MDT) es un MDS del que se han eliminado todos aquellos elementos que no corresponden al propio terreno o suelo, tales como: edificios, redes de comunicación, modelamiento urbano, árboles y vegetación, etc. Se representan mediante un conjunto de datos numéricos que describen la distribución espacial de una característica del territorio (Doyle, 1978: 1481) Estos modelos son especialmente útiles para estudios hidrológicos o topográficos.

Entre las aplicaciones de los MDT podemos encontrar: generación de curvas de nivel, generación de mapas de pendiente, creación de mapas en relieve, planificación de vuelos en tres dimensiones, rectificación geométrica de fotografías aéreas o de imágenes satelitales, reducción de las medidas de gravedad (también conocido como corrección topográfica), creación de proyectos de grandes obras de ingeniería, trazado de perfiles topográficos, cálculo de volúmenes, análisis de riesgos ambientales, etc.

Comúnmente, los modelos digitales del terreno (MDT) son empleados para generar modelos digitales de elevaciones (MDE), los cuales representan la altitud del terreno y de los distintos elementos naturales que lo conforman respecto al nivel del mar, mediante curvas de nivel con datos de estructura numérica (Felicísimo, 1994: 12). Aplicados a la arqueología, este tipo de representaciones espaciales son muy empleadas para grandes extensiones de terreno, ya que permiten obtener una visión mucho más precisa de la microtopografía de un determinado espacio, pudiendo analizar espacial y morfológicamente esta información (Maldonado, 2019: 174).

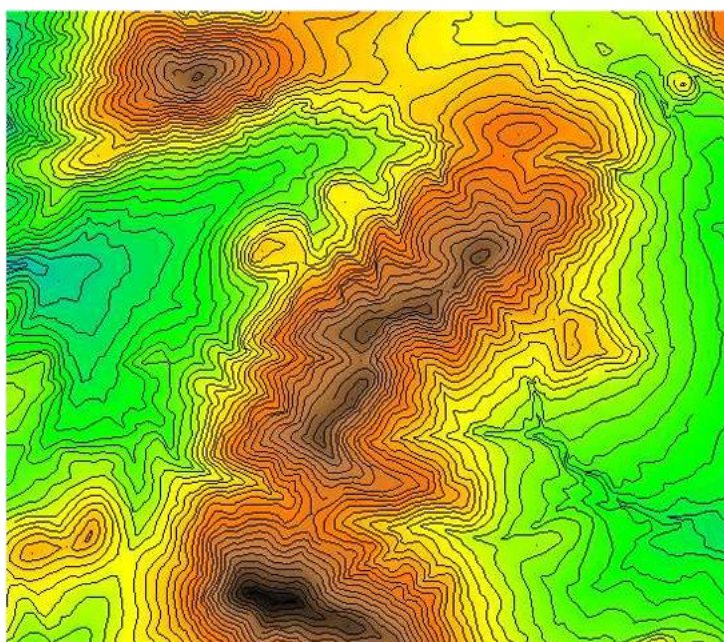


Figura 38. Modelo Digital de Elevación con curvas de nivel (Elaboración propia).

El Instituto Geográfico Nacional a través de su web pone a disposición de los usuarios un centro de descargas donde se pueden adquirir gratuitamente MDS, MDT Y MDE de distintas zonas de la geografía española. Por lo general, estos modelos se trabajan en formato ráster, en los cuales cada pixel de la imagen equivale a 5 metros y tiene un valor de elevación o cota. Por lo general, los modelos obtenidos mediante el uso de dron son de mayor precisión que los del IGN, obteniendo imágenes con una resolución por pixel de 20-25 cm (IDS, 2020).

#### 4.4.3. FOTOGRAMETRÍA SUBACUÁTICA

En cuanto a la fotogrametría subacuática la mencionaremos brevemente, básicamente por dos motivos: por la escasez de bibliografía referente sobre la misma y, además, porque el grueso de la investigación de este trabajo se centra en la documentación del patrimonio histórico-arqueológico existente en el medio físico. Aun así, hemos considerado oportuno incluir un pequeño apartado sobre la misma en este proyecto, ya que resulta de gran relevancia para la documentación y registro de yacimientos y restos arqueológicos sumergidos.

La fotogrametría subacuática consiste en la toma de imágenes bajo el agua mediante dispositivos sumergibles, es decir, que disponen de la capacidad de fotografiar en el medio acuático o están provistos de la protección adecuada para ello. Aunque sus aplicaciones están relacionadas principalmente con la biología, para el muestreo de diferentes especies de fauna y flora marina, y el seguimiento y conservación de las mismas, también se emplea en arqueología submarina y en la investigación de accidentes y naufragios.

Aplicada a la arqueología submarina, la fotogrametría permite documentar, principalmente, pecios y restos arqueológicos sumergidos, como ánforas y otro tipo de elementos de navegación. Así mismo, resulta de gran utilidad para el registro de yacimientos bajo el agua y pudiendo crear experiencias virtuales para el público en general mediante los modelos fotogramétricos obtenidos de los mismos.

La principal ventaja que presenta esta fotogrametría es que permite el registro de materiales dentro del medio acuático en el que se encuentran para obtener información sin alterar, manipular o desplazar los restos arqueológicos. Hemos de tener en cuenta que los restos sumergidos, una vez extraídos del medio natural, deben conservarse debidamente en unas condiciones ambientales idénticas o similares a las del hallazgo, pues existe el riesgo de perder o dañar la pieza al entrar en contacto con el aire y el medio terrestre (Miñano et al., 2012: 107-108).

Si bien la fotogrametría subacuática es de gran utilidad por cuanto permite obtener información de pecios y otras piezas sumergidas, que, difícilmente, serían documentados y analizados de otro modo, también nos encontramos con que las propias imágenes tomadas pueden presentar distorsiones o aberraciones por la dificultad que presenta la captura bajo el agua. Así mismo, la desigual iluminación bajo el agua o la falta de ésta a cierta profundidad pueden provocar que las imágenes no ofrezcan la nitidez suficiente. Por todo ello, se requiere de buzos y especialistas

correctamente formados en fotogrametría subacuática, así como de material sumergible adecuado para la captura de las imágenes: GPS, cuerdas de delimitación, disco Secchi<sup>9</sup>, boyas marcadoras con pesos, brújula, etc. (Carrillo, 2022: 42-45).



Figura 39. Fotomosaico del pecio fenicio Mazarrón-2 documentado mediante fotogrametría subacuática (Miñano et al., 2012: 107).

---

<sup>9</sup> Se trata de un disco plano de 20-30 cm de diámetro pintado en dos cuartos de color negro y dos blancos; y que se utiliza para medir la transparencia del agua. El nombre se debe a su inventor, el monje Pietro Angelo Secchi (Carrillo, 2022:45).

#### 4.4.4. ESCÁNER LASER

##### 4.4.4.1. DEFINICIÓN Y CARACTERÍSTICAS

El escáner laser 3D o LiDAR (*Light Detection and Ranging*) es un instrumento empleado para capturar la geometría y color de cualquier objeto o estructura en un rango de distancia determinado, a partir del almacenamiento masivo de datos. Mediante un haz de rayos láser este instrumento crea nubes de puntos espaciales, que permiten construir modelos digitales tridimensionales, mediante el procesado de los datos obtenidos del entorno.



Figura 40. Láser escáner 3D Leica RTC360.

El escáner láser fue desarrollado por primera vez por el Instituto de Fotogrametría de la Universidad de Stuttgart en 1988, liderado por el profesor Fritz Ackermann. Desde entonces, y dadas las múltiples ventajas que ofrece para la generación de modelos tridimensionales y la reconstrucción virtual, su uso se ha incrementado continuamente (Baltsavias, 1999: 83).

El escaneo láser se puede realizar en dos modalidades: terrestre y aérea, aunque ambas permiten cubrir un espacio de 360° horizontal y verticalmente, y obtener resultados precisos y con rapidez. A continuación, se detalla brevemente cada una de estas modalidades.

En el caso terrestre, la estabilidad del sensor inmóvil y, por lo general, la escasa distancia a la que se sitúan los objetos a digitalizar permite obtener resultados con una resolución milimétrica y en un corto período de tiempo. Entre los escáneres láser terrestres más demandados podemos encontrar el Leica ScanStation P50 o el Leica BLK 360.

Por su parte, los escáneres laser aéreos, equipados tanto en avión como en dron, por lo general, disponen de un sensor LiDAR aerotransportado, que captura las diferencias zonales del

territorio. Uno de los más destacados es el escáner láser BLK2FLY, por ejemplo, que permite realizar vuelos autónomos con evitación avanzada de obstáculos para capturar con facilidad la realidad geográfica.

El modo de ejecución del escáner laser es similar entre los diferentes modelos del mercado: un emisor de láser infrarrojo situado en un lateral del instrumento, emite un haz de luz sobre un espejo giratorio de 360° que repele el láser de forma perfecta a 90° saliendo por la parte central del aparato. La luz infrarroja del láser emitida por el aparato unida a la rotación 360° de éste permite que la misma sea dirigida en todas las direcciones (Fovea, 2022).

Según el modelo, el escáner laser puede realizar un barrido con rango de distancia de entre 300 y 1000 metros, escaneando la superficie con una velocidad de hasta 2 millones de puntos por segundo. Así mismo, este láser permite determinar las coordenadas 3D de cada punto en el espacio, gracias a que obtiene automáticamente datos de ángulo y rotación mediante el detector óptico a la vez que se realiza el escaneo.

Entre los tipos de escáneres láser actuales encontramos una oferta muy variada y con distintas aplicaciones, como por ejemplo los dos que se emplean en el laboratorio de historia del IVAGRO (UCA), centro de operaciones de la Unidad de Geodetección del Patrimonio Histórico de la Universidad de Cádiz: el Leica BLK360, empleado para distancias cortas y con resultados rápidos y precisos; y el Leica ScanStation P50, usado para distancias más largas y para un mayor nivel de detalles, el cual requiere de un mayor tiempo de estacionamiento.

Entre los campos de aplicación del escáner láser, encontramos: arqueología, estudios arquitectónicos, planos de edificios, instalaciones industriales, inventario y GIS, seguimiento del comportamiento de estructuras y elementos estructurales, movimientos del terreno, minería y canteras, túneles y galerías, etc. (Ramos, L., et al., 2015: 2).



Figura 41. Modelo Digital del Terreno (MDT) generado a partir de escáner laser LiDAR del sitio prehistórico de Colada de Monte Nuevo (Olivenza, Badajoz) (Cerrillo y Adara, 2019: 223).

#### **4.4.4.2. ESCÁNER LASER Y FOTOGRAMETRÍA: COMPARANDO RESULTADOS**

En este apartado se realiza una comparación entre ambas técnicas, tanto la fotogrametría como el láser escáner, no con el objetivo de determinar qué técnica es más eficaz o no, sino de demostrar que ambas pueden resultar de gran utilidad para la investigación arqueológica.

Si bien ambas técnicas no invasivas aplicadas a la arqueología persiguen objetivos comunes: la documentación y registro de yacimientos y restos arqueológicos, la medición y el análisis de los mismos, la creación de modelos tridimensionales, etc., cada una de ellas presenta unas características particulares que las convierten en útiles para unos determinados proyectos y, en ocasiones, complementarias para otros de mayor envergadura.

Por su parte, aunque ambas técnicas requieren de una buena planificación previa, la fotogrametría necesita la implicación por parte del usuario que accede a ella durante la toma de imágenes, a diferencia del escáner laser que realiza la captura de forma autónoma. Por este motivo, en áreas de gran extensión, comúnmente resulta más cómodo y eficiente emplear el escáner laser, para evitar el posible error humano en la ejecución de las fotografías. En cambio, para documentar objetos de pequeño y mediano tamaño con formas regulares, ambas técnicas resultan similarmente útiles (Grussenmeyer et al., 2008: 215).

Además de esto, el escáner láser proporciona datos sobre las distancias de forma precisa y automática a través del sistema de coordenadas que incluye, a diferencia de la fotogrametría para la que sí es necesario georreferenciar las imágenes con el fin de obtener la posición de cada punto en la nube (Granados, 2020: 139).

Para zonas de difícil acceso resulta más conveniente el empleo de la fotogrametría, ya que permite capturar más ángulos y detalles que el escáner laser, el cual requiere del uso de un trípode sobre el que sustentarse.

Para proyectos rápidos y de bajo coste, también resulta mejor emplear la fotogrametría, ya que tiene la ventaja de poder realizarse con cualquier dispositivo electrónico que disponga de cámara y los instrumentos empleados para llevar a cabo la misma son más económicos que para el láser. En cambio, para proyectos en grandes yacimientos, resulta más óptimo emplear el escáner láser debido a que éste captura mejor la superficie y la cromática de las piezas arqueológicas, y en menor tiempo que la fotogrametría.

En base a esto, deducimos que usar el escáner láser resulta más adecuado para documentar grandes superficies de terreno que la fotogrametría y en menor cantidad de tiempo, aunque su precio es más elevado. Sin embargo, aunque ambos ofrecen grandes resultados para zonas arqueológicas de pequeño y mediano tamaño, así como para documentar piezas, en estos casos la fotogrametría permite obtener un mayor número de detalles que el escáner y a un precio más reducido.

Por último, hacer uso de ambas técnicas en ciertos trabajos puede ser la mejor opción para obtener información fiable, detallada y precisa de yacimientos y restos arqueológicos.



Figura 42. Modelo 3D obtenido mediante la combinación de escáner laser de largo alcance y fotogrametría aérea del foro romano de Pompeya (Italia) (Remondino, 2011: 116).

#### **4.5. APLICACIÓN FOTOGRAMÉTRICA A UN CASO CONCRETO: BIC DE MESAS DE ASTA**

Aunque el objetivo principal del presente proyecto fuese compilar la información referida a técnica fotogramétrica y realizar una síntesis sobre la aplicación de la misma respecto al patrimonio histórico-arqueológico, hemos considerado oportuno presentar además una propuesta de aplicación de la misma que nos permitiese en un futuro poner en práctica todo el conocimiento adquirido sobre los usos y beneficios de la propia técnica. Esta propuesta debía consistir en el análisis y la documentación de diferentes espacios y/o objetos arqueológicos a distinta escala con el fin de aplicar los diferentes métodos fotogramétricos que aquí se presentan. El caso de estudio elegido ha sido el BIC de Mesas de Asta (Jerez de la frontera, Cádiz), la antigua Hasta Regia romana, y sus 512 ha de extensión.

La zona arqueológica de Mesas de Asta está compuesta por varias colinas aplanadas, algunas de las cuales poseen una pendiente considerable, que destacan sobre el relieve llano circundante. La altitud máxima de la zona la encontramos en la mesa principal, conocida también como Plaza de Armas, con una cota de 78 metros sobre el nivel del mar.

Hasta el año 2000, año en que la zona arqueológica de Mesas de Asta es declarada como Bien de Interés Cultural (BIC), el yacimiento carecía de protección jurídica y legal que velara por su conservación y sufría constantemente el expolio por parte de clandestinos. A día de hoy, este escollo parece haberse solventado, o al menos en gran medida, gracias a la protección que garantizan los dueños de las fincas en las cuales se encuentra enterrado. Es por ello que consideramos de gran utilidad el empleo de la técnica fotogramétrica en esta zona arqueológica, como método sostenible de prospección, documentación y registro en un área de gran extensión que pueda permitir el análisis e investigación de la información arqueológica en superficie y su posterior difusión.

Dada la amplia superficie que ocupan los distintos yacimientos de la zona y la diversidad del registro arqueológico que podemos encontrar, lo más conveniente será emplear tanto fotogrametría terrestre como aérea, estableciendo una sistematización de uso de cada una de ellas en función de las características del área, estructura u objeto que queremos documentar.

Para la documentación del entorno paisajístico que delimita el BIC, es decir, las 512 ha que incluyen el territorio ocupado por el propio yacimiento y el resto de la zona arqueológica, lo más acertado será emplear fotogrametría aérea mediante el uso de drone en varias fases. La

amplitud de todo el territorio y las características del relieve imposibilitan la toma de imágenes en un corto espacio de tiempo o mediante otro sistema de registro arqueológico, por lo que lo más conveniente será establecer una periodización para la captura fotográfica de las diferentes zonas geográficas: norte, sur, este y oeste.

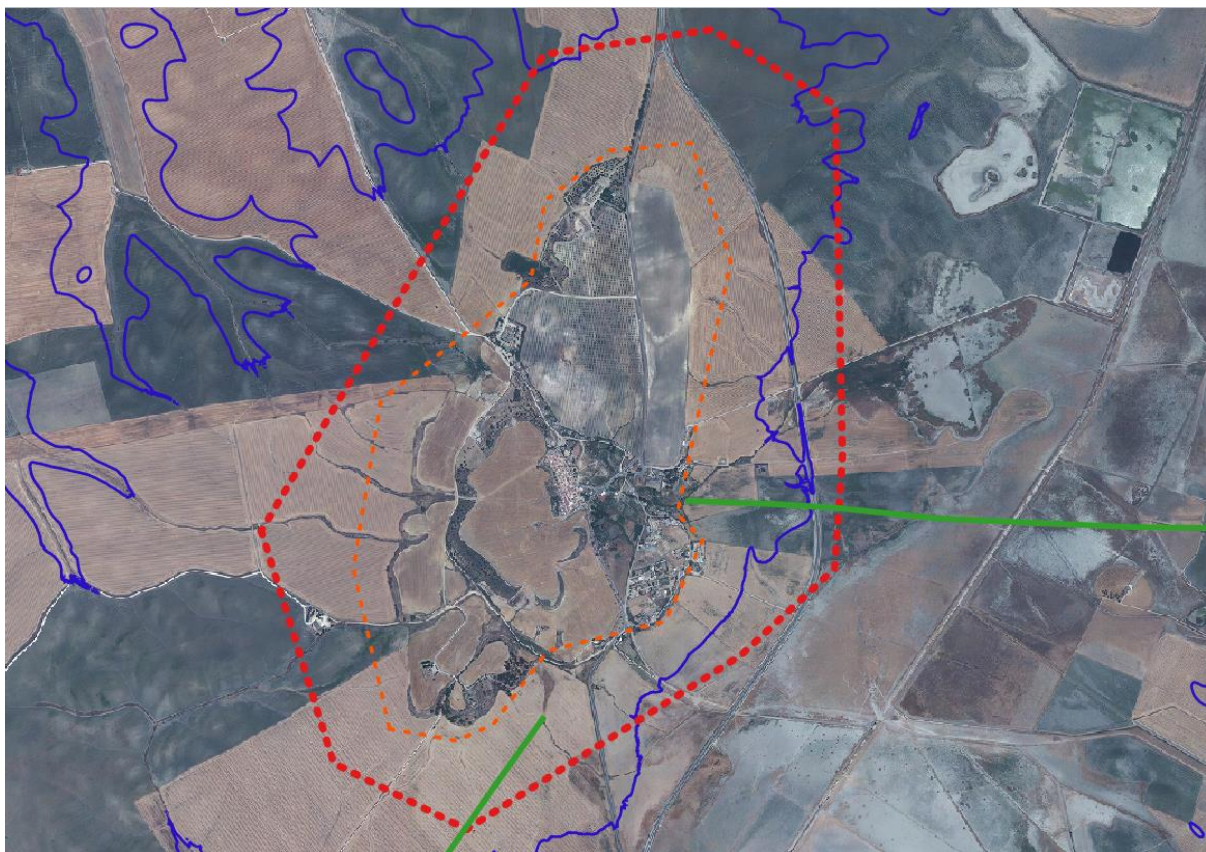


Figura 43. Delimitación de la zona arqueológica-BIC de Mesas de Asta (rojo), límites de la zona urbana y de la necrópolis (naranja), posible calzada romana (verde) y curva de nivel+10m sobre el nivel del mar (azul).

En este mapa podemos ver la amplitud de la zona arqueológica de Mesas de Asta, marcada con líneas discontinuas en color rojo. Como podemos comprobar se requerirá de una buena organización por fases de registro y documentación del terreno que ocupará varios días o semanas de trabajo.

Respecto al espacio que ocupa el propio yacimiento arqueológico, es decir, la zona urbana y la necrópolis, lo más adecuado sería combinar tanto fotogrametría aérea como terrestre. Dado que el yacimiento sigue ocupando una superficie sustancialmente amplia, la prospección fotogramétrica se haría mediante drone principalmente, aunque en este caso, mejorando el nivel

de detalle con una altura de vuelo más baja, que permita obtener una mayor resolución fotográfica.

A continuación, podemos ver el conjunto de yacimientos que componen la zona de ocupación de Mesas de Asta: en rojo distinguimos la antigua ciudad de Hasta Regia con su perímetro de muralla delimitado; en amarillo podemos ver la zona registrada como necrópolis, distinguiendo entre necrópolis oeste y este; y en verde vemos otros yacimientos que componen la zona arqueológica, donde han aparecido fragmentos de piezas y cerámica en superficie, susceptibles de ser estudiados también. Tanto el núcleo principal, como la zona de necrópolis deben ser analizadas en conjunto, aunque dada su extensión requerirá de varios días de trabajo para documentar todo el espacio que ocupa.

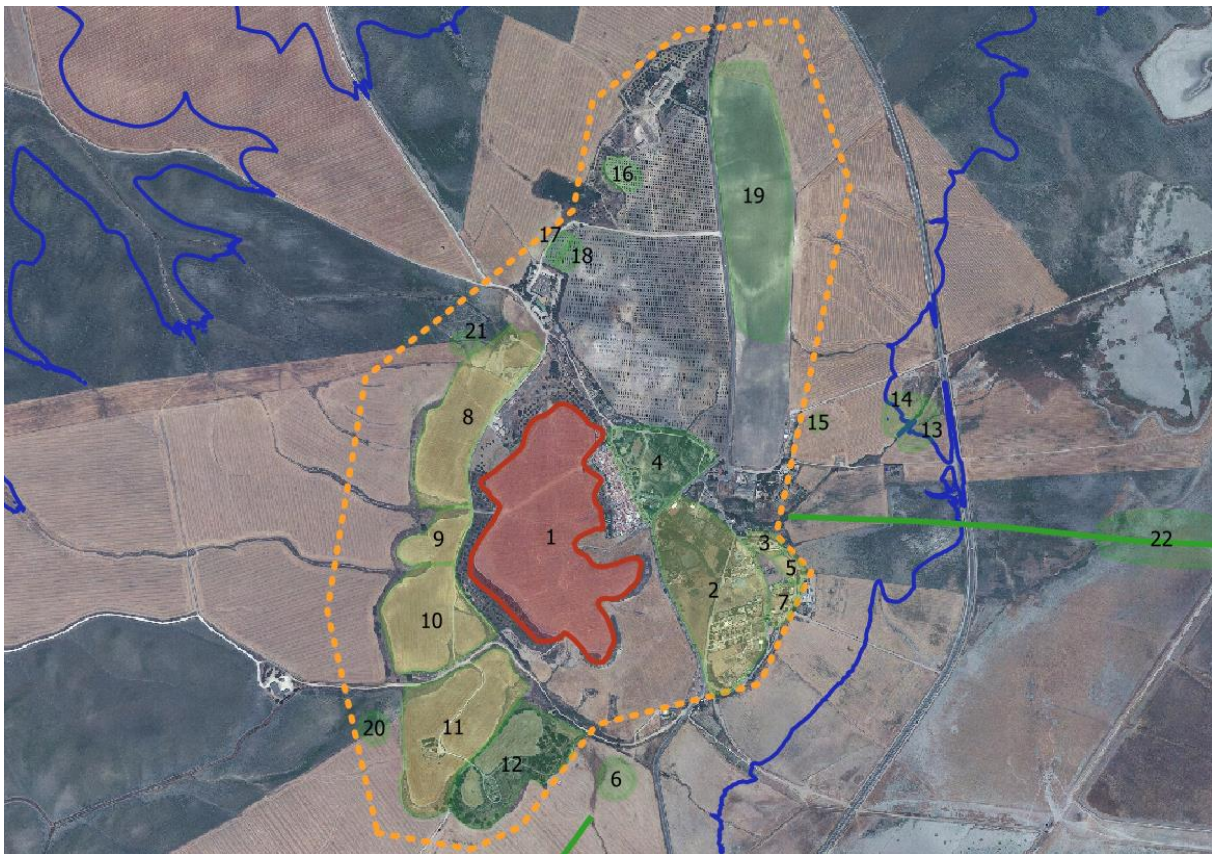


Figura 44. Delimitación de yacimientos: núcleo principal amurallado (rojo), necrópolis (amarillo), otros yacimientos (verde).

Por su parte, en la mesa principal (número 1), es decir, el núcleo principal amurallado, y alrededores, debemos destacar varios espacios dignos de ser documentados y registrados por separado, por estar expuestos, en parte, al aire libre y por el potencial de la información arqueológica que podemos obtener a través de los modelos fotogramétricos resultantes:

Por un lado, encontramos una serie de vaguadas provocadas por escorrentías que dañan los restos arqueológicos que se encuentran más superficiales y arrastran materiales desde las cotas más altas. En estas vaguadas se han documentado tanto muros como otras estructuras de cierta relevancia que se deben registrar individualmente, puesto que se encuentran en riesgo de ser modificadas o destruidas por factores climatológicos y por el paso del tiempo. En estas áreas debemos combinar tanto fotogrametría aérea como terrestre, con el fin de obtener toda la información de referencia sobre las distintas estructuras y elementos arqueológicos.



Figura 45. Mesa principal con perímetro amurallado (rojo) y distintas vaguadas registradas (celeste).

Por otro lado, deberemos documentar las estructuras arqueológicas visibles o semienterradas situadas al oeste y sur de la mesa principal, que son el resultado de las excavaciones llevadas a cabo por Manuel Esteve entre los años 1942 y 1958. Entre los restos más destacables podemos encontrar un lienzo de muralla de grandes dimensiones excavado en la campaña 1942-1943 o un impluvium excavado en la campaña de 1949-1950, por citar algunos. Dada la cubierta vegetal que cubre muchas de las estructuras y las características propias del terreno, emplearemos fotogrametría terrestre de campo a fin de obtener un resultado lo más óptimo

posible para nuestros proyectos, ya que lo que nos interesa en este caso es documentar las diferentes estructuras y espacios habitacionales, así como los distintos estratos del terreno.

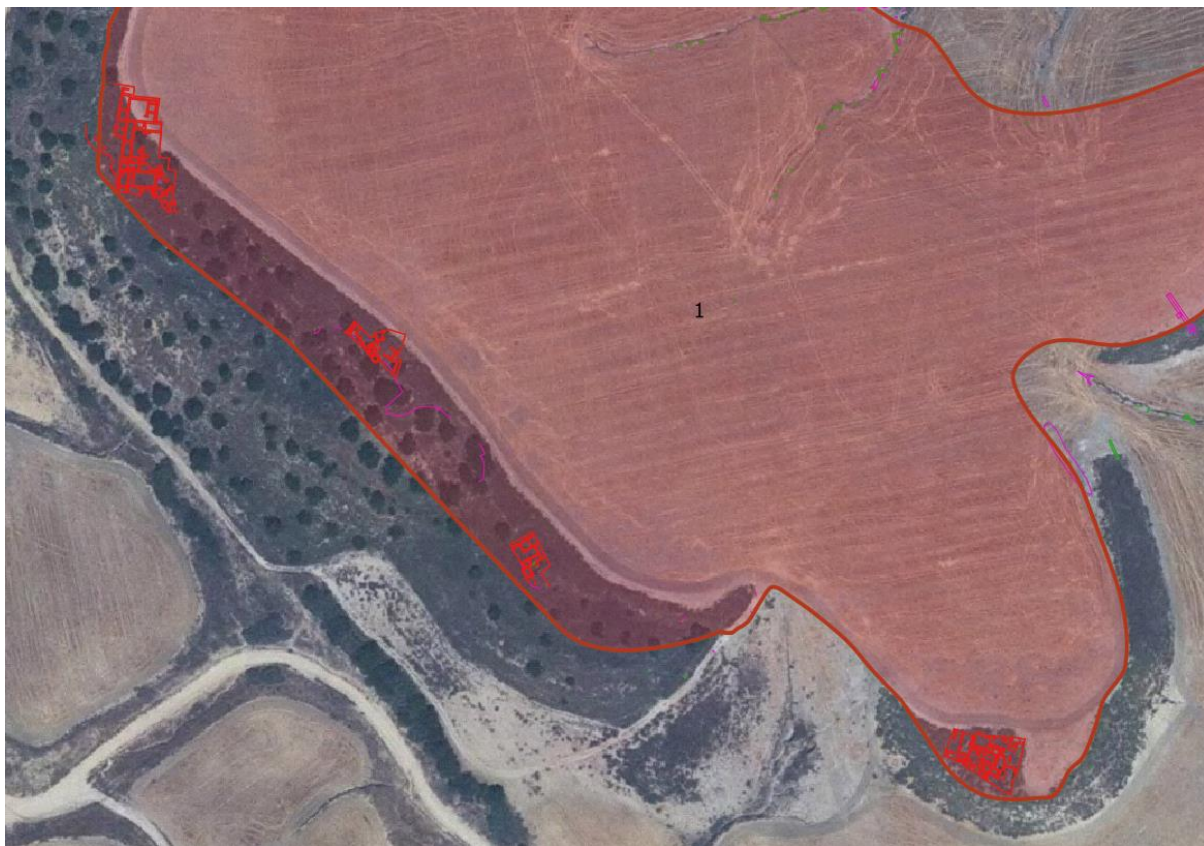


Figura 46. Imagen aérea de los planos georreferenciados (rojo) sobre el terreno de las distintas excavaciones de Esteve realizadas en la mesa principal de Mesas de Asta.

Por último, para documentar los distintos restos arqueológicos y otros elementos que podemos ver en superficie en el entorno del yacimiento, es decir, tanto los posibles bienes muebles e inmuebles como las piezas de mediano y pequeño tamaño, emplearemos la mencionada fotogrametría de objeto cercano. Esta técnica de corto alcance nos permite obtener fotografías detalladas de las piezas arqueológicas, permitiendo, a su vez, una posible musealización de las mismas mediante los modelos tridimensionales obtenidos.

## **4.6. ANÁLISIS DE LA FOTOGRAMETRÍA COMO TÉCNICA NO INVASIVA**

A lo largo de los distintos apartados de este proyecto se ha analizado la fotogrametría y el papel que representa en la defensa del patrimonio. De este modo, hemos tratado: la definición de la técnica y su evolución a lo largo del tiempo, cuál es su metodología y dónde opera, como puede intervenir a favor de la protección, conservación y difusión del patrimonio histórico-arqueológico y, por último, cuáles son los tipos de fotogrametría y sus respectivas aplicaciones en arqueología.

Con todo ello, a continuación, se presenta un balance de las ventajas y/o limitaciones que podemos encontrar al emplear la técnica fotogramétrica en el terreno arqueológico. De este modo, se enumeran una serie de razones por las cuales se destaca la fotogrametría como técnica arqueológica frente a otros métodos más tradicionales, y que provocan que cada vez más arqueólogos y especialistas la apliquen en sus proyectos y excavaciones.

### **4.6.1. VENTAJAS Y LIMITACIONES**

Como punto de partida, el proceso fotogramétrico puede permitir al arqueólogo tomar conciencia crítica y analítica de la zona que va a fotografiar, al definir cuáles son las características de la misma y qué elementos destacan para su documentación y registro. El propio inventor de la arqueología virtual Paul Reilly defiende que el proceso llevado a cabo para la creación de modelos tridimensionales de un sitio arqueológico obliga al operador a ser espacialmente explícito, es decir, a documentar concienzudamente el terreno, lo que le puede ayudar a interpretar de modo diferente las características de la propia excavación (Reilly, 1992: 96).

La fotogrametría puede convertirse en un útil complemento para la documentación y el registro arqueológico, pudiendo crear productos con los beneficios de las fotografías tradicionales, pero sin la principal desventaja de éstas: la imposibilidad de tomar medidas precisas, debido a la distorsión provocada por la perspectiva (Almagro, 2004: 351).

Como técnica fotográfica, hemos de considerar que la fotogrametría opera bajo un método riguroso y preciso, que proporciona un nivel de detalle enorme sobre el objeto, elemento o superficie fotografiada. Entre sus ventajas principales, destacan las directamente relacionadas

con el tiempo y modo de ejecución, ya que la fotogrametría permite documentar elementos sin necesidad de desplazar ni alterar el objeto o espacio a fotografiar, en un corto espacio de tiempo. Pero, además, la fotogrametría presenta otras ventajas que la colocan a la vanguardia de las técnicas no invasivas para la documentación, análisis y registro del patrimonio. En este sentido, podemos considerar que la fotogrametría permite:

- Visualizar los datos obtenidos tanto en 2D como en 3D, permitiendo al usuario tener un amplio abanico de posibilidades de investigación al respecto.
- Obtener una gran cantidad de información, independientemente de la escala. Ciertamente es que un objeto escalado permite el análisis morfométrico del mismo, permitiendo obtener ciertos datos de gran valor para la investigación; aún así, el modelo fotogramétrico ya constituye una rica fuente de información por sí solo, dado que permite apreciar detalles del elemento no perceptibles a simple vista tantas veces como el usuario lo requiera (Lerma et al., 2010: 109).
- Extraer información métrica muy precisa, es decir, un producto fotogramétrico es un producto tridimensional y, por lo tanto, se puede obtener información de sus dimensiones a escala real. Esto a su vez, permite el cálculo volumétrico, lo cual hace de la fotogrametría una herramienta perfecta para obtener información sobre capacidades y cargas de los objetos.
- Visualizar estereoscópicamente los modelos fotogramétricos, permitiendo obtener una vista en profundidad de los mismos desde distintos ángulos y perspectivas, similar a la del ojo humano. Esta visión tridimensional nos permite conceptualizar mejor los datos que percibimos, y trabajar con ellos de manera eficiente.
- La posibilidad de ser aplicado el modelo 3D obtenido para otras herramientas y técnicas, mediante el uso de un instrumental relativamente económico. Así mismo, permite el ahorro de tiempo que supondría documentar el elemento fotografiado mediante otros procedimientos o métodos.
- Operar de un modo sencillo e intuitivo, a través de dispositivos electrónicos y cámaras de gran calidad y de fácil transporte, permitiendo a cualquier usuario con un mínimo de formación la posibilidad de generar réplicas fotogramétricas.
- Registrar formas y movimientos irregulares, difíciles o imposibles de percibir visualmente (Vozmediano, 2006: 11).
- Trabajar con una técnica relativamente económica, dado que la creciente demanda en el uso de la misma está generando una progresiva reducción del coste de los propios

instrumentos necesarios para ella, generando cierta preferencia de empleo de la misma frente a otros métodos cuyo instrumental resulta más elevado de adquirir (Almagro, 2003:48).

Además de esto, la fotogrametría, como herramienta digital, está sujeta a los constantes avances de la propia tecnología, por lo que sus cualidades técnicas mejoran continuamente, así mismo aumentando la calidad del producto final obtenido. Esta dimensión digital en la cual opera la técnica permite que las imágenes sean fácilmente modificables y ajustables (ajuste de brillos, contraste, etc.) para optimizar la visualización del modelo final.

Respecto a su uso frente a otras técnicas o métodos de registro más tradicionales en arqueología como el dibujo, la fotogrametría también presenta múltiples ventajas:

- Como técnica no invasiva, la fotogrametría permite documentar y tomar medidas de yacimientos y zonas arqueológicas previas a la propia excavación. La técnica en combinación con otras herramientas de análisis superficial puede aportar gran cantidad de información sobre el terreno y las posibles estructuras o elementos del subsuelo, pudiendo mostrar el potencial arqueológico de una determinada zona.
- Permite trabajar de forma virtual a distancia pudiendo desarrollar nuevas posibilidades y nuevas vías de crecimiento para la ciencia arqueológica. La fotogrametría, al igual que otras técnicas no invasivas, persigue cada vez una mayor automatización del proceso o la obtención de resultados cada vez más precisos y rápidos, sin la necesidad de estar en el propio terreno arqueológico.
- En prospecciones arqueológicas en las cuales el tiempo de trabajo escasea y se debe documentar amplias parcelas de terreno, resulta inviable detenerse en el registro o la documentación excesiva de la zona o de los propios restos arqueológicos. En este caso, los dibujos requieren de una gran cantidad de detalles que no se pueden reflejar debidamente a la vez que se pretende cubrir grandes superficies de campo en un tiempo limitado. Es por ello que la fotografía se convierte en una herramienta de enorme uso para este tipo de actividades (Maldonado, 2019: 199).
- La fotogrametría reduce el margen de error del dibujo a mano, y aporta datos morfológicos y tipológicos mucho más precisos (textura, color, apariencia, etc.). Como ya sabemos, existe cierta problemática en torno al trazado y la exactitud de los perfiles realizados mediante métodos tradicionales como el dibujo, pero gracias a la técnica

fotogramétrica se pueden obtener resultados exactos y fiables de los distintos niveles y estratos (De Reu et al., 2013: 1118).

- Para la documentación de objetos y otros restos arqueológicos, la técnica también resulta especialmente útil, pues además de obtener información comparable mediante la misma, permite la creación de modelos 3D que, posteriormente, pueden transformarse en réplicas o productos de difusión para centros de interpretación o museos, por ejemplo.
- La fotogrametría juega un papel destacado en la conservación y protección del patrimonio histórico-arqueológico, pues permite no manipular en exceso los objetos o elementos extraídos de los yacimientos y ofrece la posibilidad de realizar reconstrucciones digitales que pueden ser empleadas para la restauración de las propias piezas arqueológicas (Maldonado y Fernández, 2020: 163).
- A diferencia del dibujo, la fotogrametría, combinada con sistemas de medición topográfica, aporta información georreferenciada de cada uno de los puntos de la nube obtenidos en el modelo tridimensional, permitiendo saber a qué cota se halla cualquier elemento u objeto posicionado dentro del campo de visión fotográfico (Kadobayashi et al., 2004: 19).

A pesar de que el empleo de estas nuevas tecnologías está ya ampliamente extendido en el terreno arqueológico, aún poseen un amplio margen de mejora, que harán de la arqueología una ciencia cada vez más precisa y abierta a un mayor número de posibilidades de investigación y análisis.

Otra ventaja de la fotogrametría respecto a ciertos métodos de documentación más tradicionales radica en la posibilidad de obtener productos digitales para la difusión científica y museística a partir de la misma.

Un buen uso de los modelos fotogramétricos puede convertirse también en un gran recurso pedagógico y didáctico en las aulas. La posibilidad de visualizar los objetos y elementos arqueológicos en tres dimensiones puede resultar un recurso muy dinámico que mejore significativamente la comprensión por parte del alumnado.

Entre sus principales inconvenientes, podemos destacar:

- Aunque por lo general, la fotografía resulta más efectiva que el propio dibujo arqueológico, la posible distorsión que provoca la perspectiva de la cámara o la propia

óptica de la misma pueden provocar que las imágenes no presenten los resultados esperados.

- El tiempo invertido en el proceso fotogramétrico puede resultar excesivo a veces, siendo necesario tener cierto conocimiento y experiencia sobre cómo funciona la técnica para acortar la duración de las distintas fases de campo y laboratorio.
- Se necesita un alto volumen de almacenamiento para archivar las imágenes y procesarlas (Rodríguez, 2012: 102), así como gestionar adecuadamente las mismas. La pérdida o el extravío de alguno de los archivos que componen el proyecto fotogramétrico puede anular el resto del trabajo.
- En cuanto a los principales inconvenientes que presentan los propios elementos fotografiados, encontramos que los objetos con superficies excesivamente lisas, colores prácticamente idénticos o muy brillantes no permiten obtener documentación tridimensional de calidad (Maldonado, 2019: 481).

#### **4.6.2. POSIBLES LINEAS DE ACTUACIÓN Y MEJORA**

A lo largo de este proyecto hemos presentado la fotogrametría como técnica aplicada al patrimonio histórico-arqueológico y hemos ido desgranando sus principales características y ventajas. Así mismo, hemos comprobado lo efectiva y útil que puede resultar la técnica en los distintos espacios y situaciones en los que puede ser empleada. Aun así, y dado que se trata de una técnica que opera en el terreno digital (toma de imágenes y procesamiento), ésta necesita una constante actualización de los conocimientos demandados para su uso.

Es necesaria una continua formación en fotogrametría que permita conocer cada vez mejor la automatización del proceso y la precisión resultante de los procedimientos mencionados en este proyecto. Así mismo, un correcto aprendizaje y conocimiento sobre los distintos softwares del mercado puede permitir al usuario disponer de una amplia gama de aplicaciones fotogramétricas, en función de las necesidades propias de cada trabajo.

Además de esto, para conseguir el máximo rendimiento de técnicas como la fotogrametría o las nuevas tecnologías aplicadas a la investigación y análisis del patrimonio histórico-arqueológico, el arqueólogo debe de tener unos conocimientos mínimos en informática y llevar a cabo un continuo aprendizaje y uso de la misma.

Se debe fomentar cada vez más el uso del software libre y producir herramientas informáticas gratuitas que permitan a cualquier usuario acceder y poder realizar proyectos fotogramétricos de calidad, sacando el máximo partido a la investigación.

## 5. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS DE FUTURO

Al plantear el presente proyecto, no éramos aún conscientes de todo lo que la fotogrametría podía aportar a la ciencia arqueológica. Creíamos que ésta era una técnica más de documentación y registro de yacimientos y restos arqueológicos, pragmática en su aplicación y que aportaba grandes resultados para el almacenamiento y la lectura de la información arqueológica.

Sin embargo, conforme investigábamos y analizábamos toda la documentación referente a la técnica fotogramétrica, tanto en los trabajos de contenido más teórico como en aquellos otros más prácticos, nos fuimos percatando cada vez más del enorme potencial de la misma. Comprendimos todo el recorrido de la misma desde los primeros trabajos arqueológicos en los que fue empleada hasta la generalización de su uso, así como la continua especialización y avance a la que está sometida día a día con el fin de mejorar sus prestaciones y sacar el máximo beneficio posible como herramienta para la protección, investigación y difusión del patrimonio arqueológico.

Si bien éste era un trabajo puramente teórico sobre fotogrametría, que no mostraba ningún caso práctico sobre la aplicación de la misma, esto no ha sido ningún impedimento para la mejora de los conocimientos ni para el aprendizaje sobre el funcionamiento de la técnica, sino todo lo contrario. Consideramos que este proyecto se constituye como síntesis, breve pero explícita, de todo lo que consideramos esencial para poder conocer e iniciarnos en el uso de este método en el terreno arqueológico, y que junto a una adecuada formación práctica puede resultar de gran interés para arqueólogos e investigadores que persigan conocer la utilidad y los beneficios de la fotogrametría.

El principal objetivo que establecimos fue el de constituir este proyecto como una guía que aunase toda la información al respecto sobre el empleo de la fotogrametría en la defensa y difusión del patrimonio arqueológico, y que pudiésemos hacer uso del mismo y actualizarlo de forma continua. Creemos haber alcanzado este objetivo y, además, durante la investigación hemos aprendido sobre ciertos usos y beneficios de la técnica que desconocíamos. Aun así, sabemos que este trabajo es tan solo una ínfima parte de todos los conocimientos que nos quedan por adquirir y aplicar respecto al empleo y aprovechamiento de la técnica fotogramétrica.

Así mismo, durante el proceso de investigación hemos comprendido cuál ha sido la evolución de la fotogrametría a lo largo del tiempo y qué provocó que distintos científicos e investigadores pusieran interés en la misma, buscando fórmulas y métodos de especialización de ésta hasta la actualidad.

Otro de los objetivos propuestos fue conocer y comprender cuál era la metodología de empleo de la técnica, tanto en el trabajo de campo como en el de laboratorio. A medida que desarrollábamos este apartado tomamos consciencia de que hacer fotogrametría no consistía tan solo en capturar unas imágenes y convertirlas posteriormente en un modelo 3D, sino que, para llevar a cabo un proyecto fotogramétrico de calidad, debíamos tener muchos factores en consideración. Gracias a la investigación llevada a cabo, hemos concretado todos los requisitos necesarios y los aspectos a tener en cuenta para realizar un levantamiento fotogramétrico adecuado, y entendimos que la técnica requiere de ciertos conocimientos sobre fotografía para las tomas y de informática para la restitución mediante software fotogramétrico, que desconocíamos previamente. Hemos de tener en cuenta que ésta es una técnica de especialización, y aunque cualquiera puede realizarla desde un dispositivo electrónico con cámara, requiere de cierta formación previa para su correcto aprovechamiento.

Pretendíamos conocer los beneficios que presenta el uso de la fotogrametría en los campos de la arqueología y el patrimonio, y para ello debíamos reflexionar, aplicar y ahondar sobre los conocimientos adquiridos durante el Máster sobre conservación y gestión patrimonial. Destacando la importancia de la protección del patrimonio histórico-arqueológico desvelamos que la fotogrametría ofrece inmensos beneficios para la ciencia arqueológica, desde el registro de información de los distintos yacimientos y la teledetección de estructuras, como la investigación y análisis de restos arqueológicos o la difusión académica o museística a través de los modelos tridimensionales.

A partir de este trabajo hemos podido conocer las características propias del uso de la fotogrametría en los distintos medios físicos donde puede llevarse a cabo: terrestre, aéreo y, en menor medida, subacuático; y definir en qué circunstancias o en qué proyectos resulta más adecuado el empleo de uno u otro sistema. Así mismo, hemos indagado en el modo de empleo de la técnica, haciendo una distinción de su funcionamiento en función de los diferentes elementos y espacios arqueológicos que se pretenden documentar, y realizando una división por tamaño y/o extensión, que reúne desde la fotogrametría de objeto cercano para la documentación de pequeñas piezas y restos arqueológicos como el uso de drones para la

documentación de grandes extensiones de terreno. Esto nos ha permitido ampliar nuestra visión acerca de las distintas opciones que presenta la técnica aplicada a la arqueología y las sustanciales ventajas que ofrece su uso respecto a otros métodos más tradicionales.

Al analizar y comparar los resultados de la fotogrametría con otras técnicas no invasivas como el escáner laser hemos ampliado nuestra propia concepción sobre la importancia del empleo de las nuevas tecnologías en la digitalización y puesta en valor del patrimonio arqueológico. Además de esto, hemos comprobado que la técnica tiene ciertas limitaciones de uso que debemos tener en cuenta, como pueden ser la incidencia en el trabajo fotográfico de los distintos entornos lumínicos o de las inclemencias meteorológicas, por ejemplo.

Para la aplicación de todo el conocimiento y el aprendizaje adquirido sobre fotogrametría mediante la investigación llevada a cabo, vimos conveniente establecer el caso de estudio mediante la aplicación de la técnica en el BIC de Mesas de Asta, el cual consideramos como una buena oportunidad para el análisis y la puesta en valor de un yacimiento arqueológico de gran relevancia en el sur peninsular y aún, en parte, desconocido para buena parte de la sociedad. Mediante la posible consecución de este proyecto a gran escala, estaríamos apostando por la protección, la investigación y la difusión del patrimonio histórico-arqueológico mediante la aplicación de una técnica novedosa y sostenible con el paisaje.

En definitiva, las nuevas tecnologías aplicadas a la arqueología como la fotogrametría se han establecido ya como complemento a la investigación para ofrecer al usuario que haga uso de las mismas innumerables posibilidades de análisis y conocimiento histórico. En la actualidad, estas técnicas adquieren cada vez mayor protagonismo debido a su sencillo funcionamiento y eficiencia, así como por la amplia variedad de aplicaciones de las que disponen y que mejoran la labor investigadora. Estas nuevos métodos y procedimientos se constituyen como herramientas de magna utilidad para la conservación y difusión del patrimonio histórico-arqueológico, un patrimonio que, a su vez, necesita de las mismas para ser puesto en valor y al servicio de la sociedad, creando consciencia sobre la importancia que tiene la protección de nuestro pasado y permitiendo su perdurabilidad en el tiempo.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

AESA, (2022a). *Guía para operadores de RPAS sobre Procedimientos de: Habilitación y Autorización*, Madrid: Ministerio de Fomento.

Albertz, J. y Wiedemann, A., (1995). Acquisition of CAD Data from Existing Buildings by Photogrammetry. En P.J Pahl y Werner (Eds.), *Computing in Civil and Building Engineering*, 859-866.

Albertz, J., (2002). Albrecht Meydenbauer-Pioneer of photogrammetric documentation of the cultural heritage. *International Archives of Photogrammetry Remote Sensing*, 34(5/C7), 19-25.

Almagro, A., (1973). Documentación fotogramétrica de ruinas y monumentos. *Bellas Artes*, 27, 45-46.

Al-Ruzouq, R., y Abu Dabous, S., (2017). Archaeological site information modelling and management base on clos-range photogrammetry and GIS. *Conservation and management archaeological site*, 19(3), 156-173.

Aparicio, P., Carmona, J.D., Fernández, M. y Martín, P.M., (2014). Fotogrametría Involuntaria: rescatando información geométrica en 3D. *Virtual Archaeology Review*, 5(10), 11-20.

Avido, D. N. y Vitores, M., (2019). Observaciones sobre el proceso de documentación 3D mediante fotogrametría. En: IDACOR-CONICET, ed. *XX Congreso Nacional de Arqueología Argentina*. Córdoba: Universidad Nacional de Córdoba, 1592-1596.

Ávila, M., (2018). *Aplicación de la tecnología 3D a las técnicas de documentación, conservación y restauración de bienes culturales*. Madrid: Universidad Complutense de Madrid.

Azcune, I., (2011). Modelizado en 3d de piezas arqueológicas. Virtualización a través de nubes de puntos. *Estudios de arqueología alavesa*, 27. Vitoria-Gazteiz: Instituto alavés de arqueología, 619-670.

Balaguer, M., (2018). *Fotogrametría de objeto cercano: planificación y desarrollo del proyecto*. Valencia: Universitat Politècnica de València.

Baltsavias, E., (1999). A comparison between photogrammetry and laser scanning. *ISPRS: Journal of photogrammetry and remote sensing*, 54(2-3), 83-94.

Beldevere, O., Burgio, A., Ciruolo, G., La Loggia G. y Maltese, A., (2001). Hyperspectral MIVIS data analyses for archaeological applications. *Fifth International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition, San Francisco*.

Benavides, J. A., (2017). *Nuevas tecnologías en la documentación del patrimonio: La alcazaba de Guadix - El castillo de Píñar*. Granada: Universidad de Granada.

Bonneval, H., (1972). *Photogrammétrie Générale*. Vol I ed. Paris: Eyrolles.

Caballero, L., (2006). El dibujo arqueológico. Notas sobre el registro gráfico en arqueología. *Papeles del Portal: revista de restauración monumental*, 3, 75-95.

Caine, M., Maggen, M. y Altaratz, D. (2019). Combining RTI & SFM. A Multi-Faceted approach to Inscription Analysis. En V. Cappellini (Ed.), *Electronic Imaging & the Visual Arts EVA 2019* Florence (97-105). Firenze: Firenze University Press.

Cancio, C. y Lescure, J., (2021). Digitalización de las cabezas momificadas del Museo de Arqueología y Etnología de América de la Universidad Complutense de Madrid. *Revista Española de Antropología Americana*, 51, 245-254.

Carandini, A., (1997). *Historias en la tierra: manual de excavación arqueológica*. Barcelona: Crítica.

Caro, J. L., Luque, A. y Zayas, B., (2015). Nuevas tecnologías para la interpretación y promoción de los recursos turísticos culturales. *PASOS*, 13(4), 931-945.

Carrillo, J., (2022). Fotogrametría submarina para la caracterización de ecosistemas. Aplicación al fondo marino de Punta de Antequera (Tenerife). Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.

Castaño, S., Ruíz, J. y Vela, A., (1996). La teledetección. Sus bases. *Ensayos: Revista de la Facultad de Educación de Albacete*, 11, 183-194.

Cerrato, D., (2011). La prospección arqueológica superficial: un método no destructivo para una ciencia que sí lo es. *Arte, arqueología e historia*, 18, 151-160.

Cerrillo, E. y López, A., (2019). Evaluación y perspectivas del uso del LiDAR en la arqueología española. *Boletín del Museo Arqueológico Nacional*, 39, 221-238.

Charquero, A. M., (2016). Prácticas y usos de la fotogrametría digital en arqueología. *DAMA Documentos de Arqueología y Patrimonio Histórico*, 1, 139-157.

Choay, F. (2007). *Alegoría del Patrimonio*. Barcelona: Gustavo Gili.

Conejero, M. J., (2019). *Fotogrametría digital terrestre como herramienta de registro arqueológico: uso y comparación aplicado al yacimiento del Castillo de Doña Blanca*. Trabajo de Fin de Máster, Universidad de Cádiz.

De Feo, M. E., Gobbo, J. D. y Moralejo, R., (2013). Hacer arqueología desde las alturas. *Museo*, 26, 23-30.

De Reu, J., Plets, G., Verhoeven, G., De Smedt, P., Bats, M., Cherretté, B., De Maeyer, W., De conynck, J., Herremans, D., Laloo, P., Van Meirvenne, V. y De Clercq, W., (2013). Towards a three-dimensional cost-effective registration of the archaeological heritage. *Journal of Archaeological Science*, 40(2), 1108-1121.

Doyle, F. J., (1978). Digital terrain models: an overview. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 44(12), 1481-1485.

Duarte, A., (2004). *A Fotogrametria a curta distancia como uma ferramenta de documentação das inscrições rupestres*. Florianópolis: Universidade federal de Santa Catarina.

Elorza, A., Martínez, J. y Pires, H., (2015). Techniques for revealing 3D hidden archeological features: Morphological residual models as virtual-polynomial texture maps. *ISPRS Archives, 3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures (25-27)*, 415-421.

Emmolo, D., Franco, V., Lo brutto, M., Orlando, P. y Villa, B., (2004). Hyperspectral Techniques and GIS for Archaeological Investigation. *Geo-Imagery Bridging Continents XXth ISPRS Congress, Istanbul, Turkey Comission 7*.

Escalante, J. O., Cáceres, J. J. y Porras, H., (2016). Ortomosaicos y modelos digitales de elevación generados a partir de imágenes tomadas con sistemas UAV. *Tecnura: Tecnología y Cultura afirmando el conocimiento*, 20(50), 119-140.

Escrivá, F. y Madrid, J. A., (2010). El mundo virtual en la restauración. Aplicaciones virtuales para la conservación y restauración del patrimonio. En UPV. Divulgación (eds): *Arché*, 4-5, 11-20.

Everaets, J., (2008). The use of unmanned aerial vehicles (UAVs) for remote sensing and mapping. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 37 (B1), 1187-1192.

Felicísimo, A. M., (1994). *Modelos Digitales del Terreno: Introducción y aplicaciones en las ciencias ambientales*. Oviedo: Pentalfa ediciones.

Flanders, J., Piez, W., y Terras, M. (2007). Welcome to Digital Humanities Quarterly. *Digital Humanities Quarterly*, 1(1), en línea.

Forte, M. y Leclant, J. (1996). *Arqueología: paseos virtuales por las civilizaciones desaparecidas*. Barcelona: Grijalvo.

García, J., (2015) Imágenes 2.5D basadas en información de reflectancia para la interpretación morfológica del patrimonio arquitectónico. *Revista de Teledetección*. 44, 43-54.

García, M. P. (2012). *El patrimonio cultural. Conceptos básicos*. Zaragoza: Pressas universitarias de Zaragoza.

García, M. y Marrero, M<sup>a</sup>. (2004). Aplicación de la fotogrametría a la excavación arqueológica: Caserones-99. En: *XV Coloquio de historia canario-americana*. Las Palmas de Gran Canaria: Cabildo Insular de Gran Canaria, 2161-2178.

González, S., (2001). Los usos de la fotografía a favor de la arqueología como ciencia moderna: Francia 1850-1914. *Cuadernos de Prehistoria y Arqueología de la Universidad Autónoma de Madrid*, 27.

Granados, I, (2020). *Introducción a la aplicación de sistemas de información geográfica y reconstrucción virtual en el estudio de la musivaria romana*. Trabajo de Fin de Máster, Universidad de Cádiz.

Granshaw, S. I., (2019). Laussedat bicentenary: origins of photogrammetry. *The Photogrammetric Record*, 34(166), 128-147.

Grussenmeyer, P., Landes, T., Voegtle, T. y Ringle, K., (2008). Comparison methods of terrestrial laser scanning, photogrammetry and tacheometry data for recording of cultural heritage buildings. *ISPRS: International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 37, 213-218.

Hernández, F. X. (2003). El Patrimonio como recurso en la enseñanza de las Ciencias Sociales. En E. Ballesteros Arranz, C. Fernández Fernández, J. A. Molina Ruiz y P. Moreno Benito (Eds.), *El Patrimonio y la Didáctica de las Ciencias Sociales*, 595.

Hervías, J. J. (2016). *Interpretación del patrimonio a través del análisis de las técnicas usadas en el museo de Jamtli*. Barcelona: Universitat de Barcelona.

ICOMOS (1964). *Carta de Venecia*. Venecia: II Congreso Internacional de Arquitectos y Técnicos de Monumentos Históricos.

ICOMOS (1990). *Carta Internacional para la Gestión del Patrimonio Arqueológico*. Lausana: Comité Internacional para la Gestión del Patrimonio Arqueológico (ICAMH).

Jammes, I., (1981). *Blanquart-Evrard et les origines de l' édition photographique française*. Ginebra: École pratique des hautes études.

Jiang, R., Jáuregui, D. y White, K., (2008). Close-range photogrammetry applications in bridge measurement: Literature review. *Measurement*, 41(8), 823-834.

Kadobayashi, R., Kochi, B., Otani, B. y Furukawa, R., (2004). Comparison and evaluation of laser scanning and photogrammetry and the combined use for digital recording of cultural heritage. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, II-5 (W3), 17-24.

Kazhdan, M. y Hoppe, H., (2013). Screened Poisson Surface Reconstruction. *ACM Transactions on Graphics*, 32(3), 1-13.

Lagóstena, L. G., Calvillo Ardila, J. A., Calvillo Risco, J. A., (2021). La aplicación de técnicas fotogramétricas para la documentación del patrimonio: el caso de la Noria de Autrán (Puerto Real, Cádiz). *Matagorda: Revista de estudios puertorrealeños*, 3, 13-40.

Lanska, D. J., Lanska, J. M. y Remler, B. f., (2015). Carl Pulfrich y sus instrumentos de identificación y Stereo-Effekt. *Neurosciences and History*, 3(1), 8-18.

Lerma, J. L., Cabrelles, M., Navarro, S., y Seguí, A. E., (2010). Terrestrial laser scanning and close range photogrammetry for 3D archaeological documentation: the Upper Paleolithic Cave of Parpalló as a case study. *Journal of Archaeological Science*, 37, 499-507.

Li, Z., Chen, J., Batsavias, E., (2008). *Advances in photogrammetry, remote sensing and spatial information science*. Congress Book ed. Londres: ISPRS.

Llull, J., (2005). Evolución del concepto y de la significación social del patrimonio cultural. *Arte, Individuo y Sociedad*, 17, 175-204.

López, C., (2022). *Restauración digital de la basílica romana de Libisosa*. Alicante: Universitat d'Alacant. Escuela Politécnica Superior.

López, M. J. y Caselles, V., (1991). Mapping burns and natural reforestation using thematic Mapper data. *Geocarto International*, 6, 31-37.

Lowe, D. (1999). Object recognition from local scale-invariant features. *The Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision*, 2, 1150-1157.

Maldonado, A., (2019). *La aplicación de la Fotogrametría (SFM) y las nuevas tecnologías para la mejora de la documentación, difusión y divulgación del Patrimonio Arqueológico de pequeño y mediano tamaño*. Granada: Universidad de Granada.

Maldonado, A. y Fernández, M. I., (2020). Técnicas de digitalización, reconstrucción y visualización 3D aplicadas a los moldes de terra sigilata del yacimiento romano de los Villares de Andújar. Las posibilidades en la difusión, estudio y conservación del patrimonio arqueológico. *Pyrenae*, 2 (51), 159-179.

Miñano, A. I., Fernández, F. y Casabán, J. L., (2012). Métodos de documentación arqueológica aplicados en arqueología subacuática: el modelo fotogramétrico y el fotomosaico del pecio fenicio Mazarrón-2. *SAGVNTVM*, 44, 99-109.

Miranda, A. (2004). *A Fotogrametria a curta distância como uma ferramenta de documentação das inscrições rupestres. (Estudio de Caso Sítio Arqueológico Santinho Norte I- SC)*. Florianópolis: Universidad Federal de Santa Catarina.

Montero Palacios, O., y Sardi Barzallo, J., (2017). *Estudio de las metodologías para el análisis de transformaciones urbano-morfológicas alrededor del río Tomebamba y de su primera línea edificada*. Cuenca: Universidad de Cuenca.

Moyano, G., (2017). El uso de Fotogrametría Digital como registro complementario en Arqueología. Alcances de la técnica y casos de aplicación. *COMECHINGONIA. Revista de Arqueología*, 21(2), 333-351.

Neitzel, F. y Klonowski, J., (2011). Mobile 3D mapping with a low-cost UAV system. *ISPRS: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 38(1), 39-44.

Nex, F. y Remondino, F., (2013). UAV para aplicaciones de mapeo 3D: una revisión. *Geomática aplicada*, 6, 1-15.

- Ntregka, A., Georgopoulos, A., Quintero, M.S., (2014). Investigation on the Use of HDR Images for Cultural Heritage Documentation. *International Journal of Heritage in the Digital Era*, 3(1), 18.
- Olson, B., (2016). The things we can do with pictures: image-based modeling and archaeology. En: U. D. Commons, ed. *Mobilizing the past for a digital future*. Wisconsin: University of Wisconsin, 237-249.
- Orlando, J., Cáceres, J. J., Porras, H., (2016). Ortomosaicos y modelos digitales de elevación generados a partir de imágenes tomadas con sistemas UAV. *Tecnura*, 20(50), 119-140.
- Palacios, H. M. y Martín-Bueno, M., (2004). La teldetección en arqueología: el instrumento SAR. *Saldvie. Estudios de Prehistoria y Arqueología*, 4, 331-361.
- Peinado, Z., Fernández, A., Hernández, L., (2014). Combinación de fotogrametría terrestre y aérea de bajo coste. el levantamiento tridimensional de la iglesia de San Miguel de Ágreda (Soria). *VAR*, 5(10), 51-58.
- Pereira, J. M., (2016). Modelado 3D en patrimonio cultural por técnicas de Structure From Motion. *PH investigación*, Volumen 6, 77-87.
- Pereira, J. M., (2018). El control de calidad en los planes de digitalización. *PH*, 95(especial 25 años), 63-67.
- Pietroni, E. y Ferdani, D., (2021). Virtual restoration and virtual reconstruction in culture heritage: terminology, methodologies, visual representation, techniques and cognitive models. *Information*, 12(167), 30.
- Posada, J.C., (2013). *La visión estereoscópica: los anaglifos*. Sevilla: Universidad de Sevilla.
- Ramos, L., Marchamalo, M., Rejas, J.G. y Martínez, R., (2015). Aplicación del Láser Escáner Terrestre a la modelización de estructuras: precisión, exactitud y diseño de la adquisición de datos en casos reales. *Informes de la construcción*, 67(538), 1-9.
- Reilly, P. (1991). Towards a Virtual Archaeology. En S. Rahtz & K. Lockyear (Eds.), *CAA90. Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology 1990 (BAR International Series 565)*, 132-139.
- Reilly, P. (1992). *Archaeology and Information Age: A global perspective*. London: Routledge.

Rejas, J. G., Burillo, F., López, R. y Farjas, M., (2006). *Hyperspectral remote sensing application in the celtiberian city of Segeda*. Rome, From Space to Place, 2nd International Conference on Remote Sensing Archaeology.

Remondino, F., (2011). Heritage recording and 3D modeling with photogrammetry and 3D scanning. *Remote sensing*, 3(6), 1104-1138.

Rincón, I. K. y Arévalo, B., (2014). Modelado de objetos arqueológicos: una propuesta usando fotogrametría digital. *INGENIO UFPSO*, 7, 143-149.

Roldán Llano, M., (2019). *Fotogrametría Digital terrestre de rango cercano como una herramienta de análisis en un basurero prehispánico del sitio arqueológico San Pedro, Sucre..* Medellín: Universidad de Antioquía.

Rodríguez, E., Celestino, S., Dorado, A. y Gutiérrez-Rodríguez, M., (2020). "Escalera al cielo de Tarteso": la escalera monumental del yacimiento de Casas del Turuñuelo (Guareña, Badajoz, España). Primeras evidencias de la fabricación de bloques de cal en la Península Ibérica. *Cuadernos de Prehistoria y Arqueología de la Universidad de Granada*, 30, 425-427.

Rodríguez, I. y González, D., (2013). *La protección del patrimonio cultural en conflictos armados. De las lecciones aprendidas al diseño estratégico*. Ministerio de Defensa: Instituto Español de Estudios Estratégicos.

Rodríguez, L. (2013). Humanidades digitales, ¿una mera etiqueta o un campo por el que deben apostar las ciencias de la documentación? *Anuario ThinkEPI*, 7, 37-43.

Romero, P. y Civantos, M., (2017). De la documentación 3D al GIS. Una metodología integral de registro de la estratigrafía y su aplicación en el MEMOLA project.. *Archaeological drawing. Disegnarecon*, 10(19), 16.

Ruiz, G., (1998). Fragmentos del pasado: la presentación de sitios arqueológicos y la función social de la arqueología. *Treballs d'Arqueologia*, 1( 5), 7-34.

Sociedad Española de Arqueología Virtual (SEAV), (2011). *Principios de Sevilla*. Sevilla, 10.

Slama, C., (1980). *Manual of Photogrammetry*. Falls Church: American Society of Photogrammetry.

Soler Alemán, E., (2013). *Levantamiento fotogramétrico y modelización tridimensional del santuario de Nuestra Señora de la Fuensanta*. Cartagena: Universidad Politécnica de Cartagena.

Solomon-Godeau, A., (1981). Un fotógrafo en Jerusalén, 1855: Auguste Salzmann y su época. *The MIT Press*, 18, 90-107.

Szeliski, R., (2010). *Computer Vision: Algorithms and Applications*. s.l.:Springer Science & Business Media.

Torregrosa-Fuentes, D., Spairani, Y., Huesca, J. A., Cuevas, J. y Torregrosa, A. J., (2018). Aplicación de la fotogrametría automatizada y de técnicas de iluminación con herramientas SIG para la visualización y el análisis de una piedra con relieves antropomorfos. *Virtual Archaeology Review*, 9(19), 114-124.

U. E. (2000). *Hacia una Estrategia Europea sobre Conservación Preventiva*. Vantaa: European Commission.

UNESCO, (2003). *Records of the General Conference*, Paris: 32 session, Vol. I.

Vaquerizo, D., (2018). Detectives del tiempo... Reflexiones sobre pasado, presente y futuro de la arqueología en España. *Complutum*, 29(1), 13-36.

Vozmediano, D., (2006). *Fotogrametría digital aplicada a la obtención de ortofotos y modelos digitales de entidades patrimoniales*. Vitoria-Gasteiz: Universidad del País Vasco.

Weller, T., (2006). *Satellites, survey and settlement: the Late Classic Maya Utilization of Bajos (Seasonal Swamps) at Tikal and Yaxha, Guatemala*. Rome, Fom Space to Place, 2nd International Conference on Remote Sensing Archaeology.

## 6.2. WEBGRAFÍA

- AA.VV. (2009). *London Charter*. [En Línea]. Recuperado de: <https://www.londoncharter.org/downloads.html> [Consultado el 08/08/2022].
- AESA, (2022a). *AESA: Agencia Estatal de Seguridad Aérea*. [En línea]. Recuperado de: <https://www.seguridadaerea.gob.es/es> [Consultado el 11/08/2022].
- Dsbaero, 2022. *Dsb aero: servicios técnicos con dron*. [En línea]. Recuperado de: <https://dsbaero.com/2021/08/05/fotogrametria-aerea-con-drones-que-es-y-para-que-sirve/> [Consultado el 09/08/2022].
- Figura 2. Recuperado de: <https://sites.google.com/site/ddpatrimonioarqaragones/home/levantamiento-arquitectonico-definicion-y-uso-de-la-fotogrametria?tmpl=%2Fsystem%2Fapp%2Ftemplates%2Fprint%2F&showPrintDialog=1> [Consultado el 17/07/2022].
- Figura 7. Recuperado de: <https://www.pressreader.com/spain/lavanguardia/20200412/282900912713448> [Consultado el 17/07/2022].
- Figura 8. Recuperado de: [http://pdi.topografia.upm.es/cepeda/Curso\\_2004/InstruAnali1.pdf](http://pdi.topografia.upm.es/cepeda/Curso_2004/InstruAnali1.pdf) [Consultado el 19/07/2022].
- Figura 15. Recuperado de: <http://imagencritica.blogspot.com/2016/08/exposiciones-equivalentes.html> [Consultado el 22/07/2022].
- Figura 16. Recuperado de: <https://www.zoomescuela.com/el-exposimetro-controlar-la-luz/> [Consultado el 22/07/2022].
- Figura 18. Recuperado de: <https://torrejonestudio.com/documentacion-3d-objetos-arqueologicos/> [Consultado el 24/07/2022].
- Figura 21. Recuperado de: <http://www.toposur.com/> [Consultado el 31/07/2022].
- Figura 27. Recuperado de: <https://www.fundaciontelefonica.com.ar/exposiciones/3d-imprimir-el-mundo/> [Consultado el 03/08/2022].
- Figura 28. Recuperado de: <https://terraeantiquae.com/profiles/blogs/protesis-en-3d-para-restaurar-el-patrimonio-destruido-en-siria?overrideMobileRedirect=1> [Consultado el 03/08/2022].

- Figura 33. Recuperado de: <http://www.historiayarqueologia.com/2012/11/memoria-y-realidad-las-excavaciones-de.html> [Consultado el 07/08/2022].
- Figura 35. Recuperado de: <https://www.renderarquitectura.mx/post/que-es-fotogrametr%C3%ADa> [Consultado el 14/08/2022].
- Figura 36. Recuperado de: [\[https://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/index.jsp](https://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/index.jsp) [Consultado el 15/08/2022].
- Figura 40. Recuperado de: <https://leica-geosystems.com/es-cl/products/laser-scanners/scanners/leica-rtc360> [Consultado el 16/08/2022].
- Fovea (2022). *Medición 3D con Escáner laser (LIDAR)* [En línea]. Recuperado de: <https://www.fovea.es/medicion-escaner-laser-3d-terrestre/> [Consultado el 16/08/2022].
- Idstopografía, (2020). *IDS topografía.* [En línea]. Recuperado de: <https://www.idstopografia.com/diferencias-entre-los-modelos-digitales-de-terreno/> [Consultado el 11/08/2022].