

TESIS DOCTORAL

NUEVAS TECNOLOGIAS APLICADAS A LA
DOCUMENTACIÓN GRÁFICA DEL PATRIMONIO



LA ALCAZABA DE GUADIX
EL CASTILLO DE PIÑAR

Editor: Universidad de Granada. Tesis Doctorales

Autor: José Antonio Benavides López

ISBN: 978-84-9163-319-8

URI: <http://hdl.handle.net/10481/47477>

UNIVERSIDAD DE GRANADA



**NUEVAS TECNOLOGIAS APLICADAS A LA DOCUMENTACIÓN
DEL PATRIMONIO:
LA ALCAZABA DE GUADIX – EL CASTILLO DE PÍÑAR**

Tesis Doctoral

JOSÉ ANTONIO BENAVIDES LÓPEZ
JUNIO 2017

UNIVERSIDAD DE GRANADA

NUEVAS TECNOLOGIAS APLICADAS A LA DOCUMENTACIÓN DEL PA-
TRIMONIO:
LA ALCAZABA DE GUADIX – EL CASTILLO DE PÍÑAR

Tesis Doctoral

JOSÉ ANTONIO BENAVIDES LÓPEZ

2017

Directores

DR. JOSÉ MARIA MARTÍN CIVANTOS

DR. JOSÉ ANTONIO ESQUIVEL GUERRERO

Tribunal nombrado por la Sra. Rectora Magnifica de la Universidad de Granada, el día.....de.....de 2017:

Presidente: ..

Secretaria: ..

Vocal: ...

Vocal: ..

Vocal: ...

Suplente: ...

Suplente: ..

Realizado el acto de defensa y lectura de la Tesis el día.....de.....de 2017 en la Universidad de Granada.

Calificación

EL PRESIDENTE

LOS VOCALES

EL SECRETARIO

Gracias Ana, por tu constante apoyo. Tú eres una parte muy importante de esta tesis.

A mis hijas Angie y Silvia y a toda mi familia y amigos.

En memoria de mis amigos, Ignacio Moreno y Mariano Martín

Agradecimientos:

A mis directores de tesis. Al profesor José María Martín Civantos por enseñarme otros valores de la arquitectura, al profesor José Antonio Esquivel Guerrero con quien aprendí que la constancia es la mayor de las virtudes.

A mi buen amigo y mejor profesor José Antonio Barrera Vera que me ayudó, animó y supo guiar.

A los compañeros y amigos del Centro de Investigación Científica de la Universidad de Granada, Francisco Luis Espigares Hervías y Miguel Ángel González Ferrer.

A mi compañero y amigo Jesús Rodríguez Bulnes por sus ayuda y maestría en el manejo de las nuevas tecnologías.

A mi familia y mis amigos por sus ánimos y ayuda.

“La felicidad no es hacer lo que uno quiere, sino querer lo que uno hace”

Jean Paul Sartre.

INDICE

PRESENTACIÓN	1
CAPITULO I.- INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 JUSTIFICACIÓN.....	3
1.2 OBJETIVOS	5
1.3 Estructura de la tesis	7
2 CAPITULO II.- EL PATRIMONIO ARQUITECTÓNICO	9
2.1 EL CONCEPTO DE PATRIMONIO EN EL CONTESTO HISTÓRICO	12
2.2 TUTELA Y PROTECCION DEL PATRIMONIO.....	19
2.2.1 CARTAS Y CONVENCIONES	20
2.2.2 ORGANISMOS E INSTITUCIONES ENCARGADOS DE LA TUTELA Y PROTECCIÓN	29
2.2.3 CONTEXTO NORMATIVO Y LEGAL	31
2.3 LA NECESIDAD PROTEGER Y CONSERVAR EL PATRIMONIO	36
2.4 CRITERIOS GENERALES DE INTERVENCION SOBRE EL PATRIMONIO	39
2.4.1 CRITERIOS ESPECÍFICOS.....	45
2.5 VALORIZACIÓN y DIFUSIÓN DEL PATRIMONIO	47
3 CAPITULO III. EL LEVANTAMIENTO ARQUITECTÓNICO Y ARQUEOLÓGICO.....	51
3.1 CONCEPTO DE LEVANTAMIENTO	54
3.2 EL VALOR HISTORICO DEL PATRIMONIO ARQUITECTÓNICO Y ARQUEOLÓGICO.....	56
3.3 ANÁLISIS ARQUEOLÓGICO DE LAS CONSTRUCCIONES HISTÓRICAS	59
3.3.1 DOCUMENTACIÓN GRÁFICA APLICADA A LA ARQUEOLOGIA.....	66
3.3.2 CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES Y TÉCNICAS CONSTRUCTIVAS.....	68
3.4 EVOLUCIÓN DE LOS SISTEMAS MÉTRICOS DE LEVANTAMIENTO	73
3.4.1 ANTECEDENTES	73
3.4.2 METODOS DE LEVANTAMIENTO	83
3.5 DOCUMENTACIÓN GRÁFICA APLICADA AL PATRIMONIO ARQUITECTÓNICO Y ARQUEOLÓGICO	135
3.5.1 DIGITALIZACIÓN SOBRE ORTOFOTOGRAFIAS 2D	143

3.5.2	DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL SOBRE MODELOS 3D	147
3.5.3	MODELIZADO SOLIDO TRIDIMENSIONAL: BIM APLICADO A LA DOCUMENTACIÓN DEL PATRIMONIO .	149
3.5.4	RECONSTRUCCIONES VIRTUALES.....	151
4	CAPITULO IV. EXPERIMENTACIÓN	153
4.1	EXPERIMENTACIÓN EN RECTIFICACIÓN FOTOGAMÉTRICA Y CALIBRACIÓN DE LALENTE	155
4.2	EXPERIMENTACIÓN EN MODELIZADO TRIDIMENSIONAL MEDIANTE SFM	157
4.2.1	ANÁLISIS COMPARADO EN LA DETECCIÓN DE PUNTOS “SHIF” y PUNTOS DE AJUSTE BUNDER DE ACUERDO AL NÚMERO DE IMÁGENES Y AL NIVEL DE AJUSTE DE PROCESAMIENTO.....	157
4.2.2	ANALISIS COMPARATIVO DE NUMERO DE PUNTOS Y TIEMPO DE PROCESAMIENTO PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA NUBE DE PUNTOS DENSA.	160
4.3	EXPERIMENTACIÓN EN EL ANALISIS COMPARADO DE MODELOS GENERADOS CON ESCANER LASER Y FOTOGAMETRÍA MULTIMAGEN	162
4.4	EXPERIMENTACIÓN CON MODELOS TRIDIMENSIONALES EN PDF	167
4.5	EXPERIMENTACIONES EN LA OBTENCIÓN DE DOCUMENTOS GRÁFICOS A PARTIR DEL MODELO 3D DE ESCANER.....	169
	Experimentación y análisis de los resultados a partir de la gestión directa de nube de puntos.....	171
	Experimentación y análisis de los resultados a partir de superficies (Mesh)	171
	Realización de sección manual a partir de la selección vista selectivas de nube de puntos o mallas.....	173
5	CAPÍTULO V: CASOS DE ESTUDIO.....	175
	LA ALCAZABA DE GUADIX Y EL CASTILLO DE PÍÑAR.	175
	LA ALCAZABA DE GUADIX	181
5.1	HISTORIOGRAFIA DE GUADIX y DE LA ALCAZABA.....	183
5.2	SITUACIÓN ADMINISTRATIVA de ALCAZABA DE GUADIX.	190
5.3	EL ESCANER LASER TERRESTRE EN EL LEVANTAMIENTO DE LA ALCAZABA DE GUADIX.....	193
5.3.1	TRABAJOS DE CAMPO	193
5.3.3	TRABAJOS DE LABORATORIO	204
5.4	APLICACIÓN DE FOTOGAMETRIA MULTIMAGEN EN LA ALCAZABA DE GUADIX	233
5.4.1	TRABAJOS DE CAMPO	235
	Captura de imágenes desde tierra.....	246

Captura de imágenes aéreas	247
5.4.2 TRABAJOS DE LABORATORIO EN FOTOGRAMETRÍA	254
5.5 CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES Y TÉCNICAS CONSTRUCTIVAS.....	275
5.5.1 TAPIAL.....	275
5.5.2 LADRILLO	278
5.5.3 SILLARES Y SILLAREJOS	280
5.6 ARQUEOLOGIA DE LA ALCAZABA. NUEVA PROPUESTA DE ANÁLISIS Y REPRESENTACIÓN ARQUEOLOGICA SOBRE MODELOS TRIDIMENSIONALES	282
5.1 HIPOTESIS DE RECONSTRUCCIÓN VIRTUAL Y DOCUMENTACIÓN GRÁFICA A PARTIR DE LAS INVESTIGACIONES ARQUEOLÓGICAS	293
5.2 DOCUMENTACIÓN GRÁFICA	298
5.2.1 DOCUMENTOS GRÁFICOS DEL ESTADO ACTUAL.....	303
5.2.1 DOCUMENTACIÓN GRÁFICA: PLANOS DE LA HIPÓTESIS CONSTRUCTIVA	312
5.3 BIM APLICADO A LA DOCUMENTACIÓN Y REGISTRO ARQUEOLÓGICO DE LA ALCAZABA DE GUADIX	319
CASTILLO DE PÍÑAR	340
5.4 HISTORIOGRAFIA Y LOCALIZACIÓN	342
5.5 LEVANTAMIENTO DEL CASTILLO DE PÍÑAR MEDIANTE ESCANER LASER.....	346
5.5.1 TRABAJOS DE CAMPO	346
5.5.2 TRABAJOS DE LABORATORIO	356
5.6 APLICACIÓN DE LA FOTOGRAMETRÍA MULTIMAGEN AL CASTILLO DE PÍÑAR.....	369
5.6.1 TRABAJOS DE CAMPO	369
5.6.2 TRABAJOS DE PROCESAMIENTO: OBTENCIÓN DE MODELO 3D FOTOGRAMÉTRICO	382
5.7 CARACTERIZACIÓN TÉCNICA CONSTRUCTIVAS	409
5.7.1 TAPIAL.....	409
5.7.2 MAMPOSTERIA.....	411
5.7.3 SILLARES y SILLAREJOS:	415
5.7.4 LADRILLO	416
5.8 ARQUEOLOGÍA DEL CASTILLO DE PÍÑAR.....	417

5.9	DOCUMENTACIÓN GRÁFICA	439
5.9.1	DOCUMENTOS GRAFICA	439
5.9.2	BIM APLICADO A LA DOCUMENTACIÓN Y REGISTRO ARQUEOLÓGICO DEL CASTILLO DE PÍÑAR	455
6	CAPÍTULO VI.- DISCUSIÓN	473
7	CAPÍTULO VII.- CONCLUSIONES	483
8	FUTURAS LÍNEAS DE ACTUACION.	487
9	BIBLIOGRAFIA.....	489
10	ANEXOS:.....	495
10.1	CARTA DEL LEVANTAMIENTO ARQUITECTÓNICO.....	496
10.2	Características técnicas de los escáneres utilizados en la investigación	503
10.3	INFORME Y RESUMEN DE LA FICHA DE INVENTARIO DE LA ALCAZABA DE GUADIX REALIZADO POR EL INSTITUTO ANDALUZ DE PATRIMONIO HISTORICO.....	505
10.4	INFORME Y RESUMEN DE LA FICHA DE INVENTARIO DEL CASTILLO DE PÍÑAR REALIZADO POR EL INSTITUTO ANDALUZ DE PATRIMONIO HISTORICO.	509
	GLOSARIO.....	511

PRESENTACIÓN

La presente tesis doctoral describe las investigaciones de tipo teórico y metodológico aplicadas a la documentación gráfica del patrimonio arquitectónico y arqueológico mediante la utilización de nuevas tecnologías, principalmente fotogramétrica multimagen, escáner laser 3D y sistemas inteligentes BIM (Building Information Modeling), necesarios para la captura, modelización, documentación y gestión del patrimonio. La aplicación de este trabajo de investigación se ha desarrollado sobre dos elementos patrimoniales de la provincia de Granada “La alcazaba de Guadix” y “El castillo de Píñar”, si bien, también se hace referencia a otras experimentaciones llevadas a cabo.

Esta tesis doctoral es consecuencia de la dedicación e interés por parte del doctorando a este ámbito de conocimiento, tanto en su faceta de investigador como de docente. Como profesor titular de Escuela Universitaria desde el año 1995, en el Dpto. de Expresión Gráfica Arquitectónica y en la Ingeniería, y en concreto en la asignatura topografía aplicada a la edificación y fotogrametría arquitectónica, he desarrollado numerosas intervenciones en la documentación del patrimonio arquitectónico y arqueológico, entre las que cabe destacar: Documentación gráfica para la elaboración del Plan director del Hospital Real de Granada (sede del rectorado de la Universidad de Granada); Levantamiento del Palacio de Buenavista (actual museo Picasso, Málaga); Documentación tridimensional de la

Carrera del Darro de Granada; alcazaba de Guadix; castillo de Píñar; Castillo de Bacor; Yacimiento romano de Salar; castillo de Íllora; castillo de Lojuela; recinto fortificado de la edad del bronce de Fuentes de Cesna; estudio geométrico de la Iglesia de la Encarnación de Montefrío; portada medieval del Corral del Carbón en Granada; Estudio geométrico de la Iglesia de San Justo y Pastor de Granada; torre Nazarí de Romilla; torre Bordonal; Iglesia de San Nicolás de Granada; modelización del abrigo rupestre de Laja Alta en Cádiz; yacimiento dolménico de Panoría, etc., así como la impartición de cursos y conferencias entre las que cabe destacar las organizadas por el Instituto Andaluz de Patrimonio Histórico en Granada y Almería o los trabajos de documentación llevados por el grupo de investigación de la Universidad de Granada. En concreto, el proyecto "Sistemas avanzados de levantamiento y documentación gráfica del patrimonio: La Alcazaba de Guadix y el castillo y villa de Íllora (Granada)", financiado por el Campus de Excelencia Internacional CEI-Biotic de la Universidad de Granada, o el proyecto de catalogación de la arquitectura fortificada de tierra PREFORTI [1]. Miembro investigador del Laboratorio para el Levantamiento y Modelización del Patrimonio Arquitectónico “SMLAB” (*Survey and Modelling Lab of Architectural Heritage*) de la Universidad de Granada.

Por desgracia, cada día nos llegan noticias de la destrucción o abandono al que está sometido el patrimonio mundial. El patrimonio se enfrenta día a día a problemas y riesgos que lo hacen peligrar y su pérdida es irreemplazable. Cada uno de nosotros somos responsables de su protección y conservación, para el mejor

1 Proyecto PREFORTI: “Metodología sostenible de conservación y mantenimiento de fortificaciones medievales de tierra del sudeste de la Península Ibérica” proyecto se-

leccionado en la convocatoria del Ministerio de Economía y Competitividad, 2015 *Proyectos Excelencia y Proyectos Retos*,

conocimiento y disfrute de la sociedad actual y de las generaciones futuras. El estado de degradación que presenta nuestro patrimonio debido a su abandono y falta de mantenimiento o conservación han motivado el desarrollo de una investigación aplicada que permita y mejore su conocimiento, protección y salvaguardia. Se ha realizado un estudio integral de los complejos arquitectónicos de la alcazaba de Guadix y el castillo de Piñar desde diferentes puntos de vista (geométrico, histórico, arqueológico, de patologías) que permita su mejor conocimiento, puesta en valor y difusión.

La confluencia de los proyectos de investigación "Estudio histórico-artístico y propuestas para la conservación del patrimonio de la ciudad de Guadix" (HAR2010-21536), financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad, y el proyecto "Sistemas avanzados de levantamiento y documentación gráfica del patrimonio: La Alcazaba de Guadix y el castillo y villa de Íllora (Granada)", financiado por el Campus de Excelencia Internacional CEI-Biotic de la Universidad de Granada, nos han permitido acometer este complejo trabajo. Como forma de contribuir a la difusión, protección y conservación del Patrimonio accitano, cabe destacar la página web www.patrimoniogudix.es [2], en la que este doctorando ha formado parte activa.

Los avances tecnológicos han propiciado la aparición de nuevas herramientas que transforman nuestros modos de registrar la realidad, y por tanto de conocerla. Los nuevos sistemas de control métrico, como la fotogrametría convergente o los escáner laser 3D han supuesto mejoras significativas en la documentación y

registro de los elementos patrimoniales transformando la metodología de trabajo, tanto en el proceso de captura como de representación, dando lugar a nuevos conceptos geométricos, como "nubes de puntos" o "modelos 3D semánticos", así como nuevo sistemas de comunicación y difusión.

Las reflexiones realizadas en la investigación para el desarrollo de la tesis, pretenden aportar mejoras significativas en el proceso de documentación y registro estableciendo protocolos de actuación que facilite a los profesionales e investigadores la obtención de la documentación necesaria de acuerdo a los objetivos previstos de conservación, investigación, catalogación, restauración, difusión, puesta en valor, en definitiva de protección del patrimonio.

2 La web www.patrimoniogudix.es, realizada por el proyecto "Estudio histórico-artístico y propuestas para la conservación del patrimonio de la ciudad de Guadix", está constituida por más de 28.000 archivos, incluyendo cerca de 1.000 archivos fotográficos, fotogramétricos y planimétricos, que superan los 2GB de espacio de memoria.

La base de datos está formada por 147 tablas alfanuméricas y ocupa un total 50 MB de espacio. El mapa interactivo contiene cerca de 150 elementos de interés histórico y turístico geolocalizados entre edificios civiles, religiosos y defensivos.

CAPITULO I.- INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia, la representación gráfica de los elementos arquitectónicos ha sido una de las herramientas fundamentales tanto para la concepción y ejecución material de un proyecto, como para la documentación o difusión de los edificios ya construidos [3]. El siglo XX puede calificarse como el de la gran valoración cultural del patrimonio, pero también es el de la mayor destrucción. Conflictos armados, saqueos, procesos de degradación medioambiental, efecto antrópico como visitas no reguladas, vandalismo o el desarrollo urbanístico, han provocado y siguen provocando el deterioro y la desaparición de un buen número de elementos patrimoniales. España es uno de los países más privilegiados en cuanto a su patrimonio cultural, sin embargo presenta graves carencias en cuanto a su protección y salvaguarda.

Los edificios patrimoniales son elementos dinámicos, resultado de diferentes acciones llevadas a cabo a lo largo de su historia de acuerdo al contexto sociocultural en el que se desarrollaron, siendo nuestro objetivo fundamental su estudio y conservación: Conocimiento, descripción, análisis, valoración, restauración, catalogación, inventario, difusión, interpretación y gestión son las acciones a llevar a cabo en el proceso de conservación

El estudio del patrimonio presenta una doble cualidad, pero dependientes entre si. Por un lado, el carácter histórico y cultural del patrimonio lo sitúa en el campo de las ciencias humanas, por el otro, su materialidad y los problemas físicos-químicos que le atañen hacen necesaria la aplicación de las ciencias experimentales. Por

tanto, su conocimiento y conservación hace necesario la colaboración de investigadores o profesionales de múltiples disciplinas. La dificultad de comprender en profundidad la complejidad de un edificio histórico o de un yacimiento; las incertidumbres respecto a las características de los materiales o el conocimiento de los hechos históricos que motivaron las alteraciones y reparaciones realizadas resulta una tarea compleja que requiere la intervención de profesionales de diferentes campos con amplia experiencia [4] en este tipo de edificios. Tal y como indica Ascensión Hernández:

este conocimiento no solo implica el análisis material sino también el análisis de su significado cultural. "el conocimiento científico más completo de un bien es la mejor garantía de su conservación, pero este conocimiento debe ir más allá de la mera acumulación de datos para convertirse en un instrumento clave para la protección de nuestro patrimonio " "Se pretende conocer el significado de los bienes y poner de manifiesto sus valores para de esta forma poder dirigir adecuadamente las actuaciones necesarias para su conservación [5].

Los elementos que forman este patrimonio son portadores de muchos valores. Cada comunidad, teniendo en cuenta su memoria colectiva y consciente de su pasado, es responsable de la identificación, así como de la gestión de su patrimonio. La conservación del patrimonio cultural debe ser llevada a cabo mediante acciones legales y administrativas planificadas y gestionadas por esa comunidad, debiendo contribuir a su desarrollo sostenible, económico y social.

3 MARTÍN TALAVERANO, R. (2014). *Documentación gráfica de edificios históricos: principios, aplicaciones y perspectivas. Arqueología de la Arquitectura*, (11), 011.

4 Recomendaciones para el análisis, conservación y restauración estructural del patrimonio arquitectónico. ICO-MOS 2004

5 HERNANDEZ MARTNEZ, A., & ASWORTH, G. (1999). *Documentos para la historia de la restauración* Universidad de Zaragoza, Departamento de Historia del Arte.

Conocer este patrimonio precisa información sobre su concepción, sobre las técnicas que se usaron en su construcción, los procesos de daño y deterioro y las alteraciones que le han afectado y, finalmente, sobre su estado actual. Uno de los aspectos indispensables para la catalogación, protección o intervención en el patrimonio arquitectónico consiste en obtener una documentación gráfica que refleje, de forma precisa, el estado actual del bien patrimonial y que mediante un detallado estudio nos permita comprender, no solo su materialidad sino también, su historia y su significado. El conocimiento de lo ocurrido en el pasado puede ayudar a prever el comportamiento futuro del patrimonio arquitectónico y constituye una indicación útil para estimar el nivel de seguridad en su estado actual. La historia es el laboratorio experimental más completo, a escala real: muestra cómo el tipo de estructura, los materiales del edificio, las conexiones, las juntas, las adiciones y las alteraciones humanas han interactuado con distintas acciones, tales como sobrecargas, terremotos, corrimientos de tierra, variaciones de la temperatura, contaminación atmosférica, etc. La tarea de los investigadores reside en interpretar correctamente los datos pertinentes para describir el comportamiento del bien a proteger.

Tal y como nos indica la Carta de Venecia 1964 [6], *la conservación y restauración de los monumentos constituyen una disciplina que se sirve de todas las ciencias y técnicas que puedan contribuir al estudio y a la salvaguardia del patrimonio monumental, no solo en su materialidad sino como el testimonio histórico. Por este motivo, la formación de los futuros conservadores debe ser interdisciplinar e incluir un estudio preciso de la historia*

6 De Venecia, C. (1964). Carta Internacional sobre la Conservación y la Restauración de Monumentos y Sitios. In *II Congreso Internacional de Arquitectos y Técnicos de Monumentos Históricos*.

y teoría de la arquitectura, así como de las técnicas y métodos de documentación y conservación, asegurando la cualificación necesaria para resolver problemas de investigación o para llevar a cabo intervenciones de manera profesional y responsable.

En este mismo sentido la carta de Cracovia indica que, los profesionales relacionados con la conservación deberán estar constantemente actualizados sobre las nuevas metodologías y técnicas, y ser conscientes del debate actual sobre teorías y políticas de conservación [7].

7 Carta de Cracovia
http://ipce.mcu.es/pdfs/2000_Carta_Cracovia.pdf

1.1 JUSTIFICACIÓN

El registro y documentación gráfica mediante las nuevas tecnologías tiene por objeto recoger la complejidad de los procesos de transformación en el tiempo que dan lugar a la arquitectura histórica o a los restos arqueológicos, aumentando de este modo su conocimiento y protección. Un extenso conocimiento del patrimonio es la base indispensable para su correcta conservación, que implica mucho más que la mera restauración, pues ésta debiera considerarse actividad excepcional [8].

La consideración del objeto arquitectónico como documento en sí mismo, contenedor de una gran cantidad de información tanto de su realidad física como de los contextos históricos y culturales que lo generaron, es razón suficiente que justifica su riguroso registro, evitando así la destrucción o alteración de indicios, que pueden no tener significado ahora pero si pudieran tenerlo en el futuro [9]. Estas intervenciones quedan aún más justificadas en aquellos casos que impliquen modificación o destrucción del mismo, como restauraciones o excavaciones, evitando la pérdida de información para que, de esta forma, puedan ser revisadas y reformuladas.

De acuerdo con la finalidad de esta tesis, en la carta de Venecia (1964) se constata la necesidad de efectuar levantamientos arquitectónicos precisos y detallados, que respondan a la forma efectiva del monumento, indicando que las técnicas y métodos fotogramétricos pueden considerarse la forma más eficaz y económica de representar gráficamente la arquitectura y la arqueología. De igual manera, el Consejo Internacional

de Monumentos y Sitios (ICOMOS) indica que *la fotogrametría ofrece la solución inmediata, óptima y generalmente única a los problemas que presenta un levantamiento*

Dentro de las instituciones responsables de la tutela del patrimonio, la Universidad, está obligada a asumir su compromiso social, no solo porque imparte formación e investigación especializada a alumnos y profesionales, sino por su capacidad generar debate sobre el estado de conservación o intervención, denunciando aquellos casos de agresión o abandono, de forma que se genere conciencia social sobre la necesidad de proteger el patrimonio. En este sentido, entendemos que la Universidad debe tener un mayor peso y capacidad para asesorar cualquier actuación sobre patrimonio. De acuerdo con la asamblea del ICOMOS 1996, se establece que el registro documental del patrimonio cultural es un acto esencial, que permite:

- Hacer que progrese el conocimiento y la comprensión del patrimonio cultural, de sus valores y de su evolución
- Suscitar el interés y la participación de todos en la preservación de dicho patrimonio, merced a la difusión de las informaciones registradas
- Asegurar una gestión y un control pertinente de los trabajos
- Se debe asegurar de que el mantenimiento y la preservación del referido patrimonio respeten sus características físicas, sus materiales, sus modos de construcción y su significación histórica y cultural

8 ALMAGRO GORBEA, A. (2004). *Levantamiento arquitectónico*. Universidad de Granada.

9 ANGULO FORNOS, R. (2012). Construcción de la base gráfica para un sistema de información y gestión

del patrimonio arquitectónico: Casa de Hylas. *Arqueología de la Arquitectura*, (9), 11-25.

Esta tesis doctoral está enfocada al estudio de los diferentes sistemas de registro y documentación gráfica del patrimonio arquitectónico y arqueológico como fuente de información para: los estudios históricos-críticos de sus fases constructivas; su análisis geométrico y constructivo; el estudio de aquellas patologías que pongan en peligro su conservación y como instrumento que facilite la comprensión, valorización y difusión de este patrimonio ahora y en el futuro. Nos planteamos un estudio comparado de los sistemas de medición así como un análisis de dos elementos patrimoniales singulares como son la Alcazaba de Guadix y del Castillo de Píñar mediante la interrelación de sus datos bibliográficos, de documentación histórica y de análisis geométrico y constructivo.

Esta investigación pretende, con arreglo al concepto actual de levantamiento arquitectónico, ofrecer un conocimiento integral [10] de estos elementos patrimoniales. Su análisis requiere la realización de una documentación gráfica que recoja la interrelación de los distintos tipos de estudios o documentos que se realicen sobre el mismo. El conocimiento íntegro del elemento patrimonial debe ser la base de cualquier política de conservación o intervención, pues solo desde el conocimiento pueden reconocerse y tutelarse sus valores culturales.

Entre los resultados obtenidos podemos destacar un análisis completo de la alcazaba de Guadix y del castillo

de Píñar y la realización de una hipótesis de la evolución histórica de los monumentos en sus diferentes etapas significativas y que han sido plasmadas mediante recreaciones virtuales en base a los datos extraídos de las intervenciones arqueológicas dirigidas por el Dr. D. José M^º Martín Civantos desde el año 2007 y Flor de Luque Martínez en 2003 y apoyadas en el trabajo de documentación gráfica llevada a cabo por este doctorando y en la que han colaborado otros investigadores entre los que cabe destacar el Dr. José Antonio Barrera Vera. Por su precisión y calidad gráfica no solo se trata de una herramienta útil para la investigación y la intervención, sino también como un instrumento para la difusión y divulgación científica.

10 *“El levantamiento es, por tanto, un proceso que debe llevar al conocimiento profundo de la obra en estudio, con el fin de poner en evidencia todos sus valores, tanto geométricos como dimensionales, figurativos como estructurales, desde los materiales empleados y las técnicas constructivas, hasta las condiciones*

de degradación y las relaciones con el contexto urbano”. (Declaración sobre el levantamiento arquitectónico, 2000, Castel Sant’Angelo, Roma, en Almagro Gorbica 2004, 26-27).

1.2 OBJETIVOS

El objetivo general de esta tesis es contribuir al conocimiento, protección y salvaguarda del patrimonio arquitectónico y arqueológico mediante la utilización de nuevas tecnologías de documentación.

Este objetivo general lo podemos a su vez descomponer en otros dentro del ámbito investigador y el académico

En el ámbito de la investigación pretendemos:

Aumentar el conocimiento de los bienes patrimoniales
Fomentar y promover el desarrollo de principios y buenas prácticas para el registro, la documentación y la gestión de la información del patrimonio arquitectónico y arqueológico.

Experimentar las metodologías de registro gráfico

Experimentar la integración de datos del registro arqueológico

Evaluar y comparar las nuevas tecnologías.

Contribuir a la difusión de los valores culturales de los bienes patrimoniales y formar a la sociedad en las ideas de respeto y conservación de los mismos.

Dentro del ámbito académico proponemos:

Formar a profesionales y alumnos sobre las herramientas, los métodos de utilización y la tecnología necesarios para la documentación del patrimonio;

Mejorar la comprensión del significado cultural de los bienes patrimoniales para mejorar su apreciación social dando lugar a una mejor protección

Proporcionar conocimiento sobre los procesos de registro e interpretación, transmitiendo: capacitación técnica, conocimiento y concienciación del valor patrimonial de la arquitectura del pasado.

Además de este objetivo general que hemos descompuesto en otros particulares, los objetivos específicos de la tesis son:

Documentar el estado actual de la alcazaba de Guadix y el castillo de Píñar” como punto de partida para su análisis, interpretación e investigación, realizando registros gráficos de forma rigurosa y precisa.

Analizar y evaluar diferentes técnicas y metodologías para la documentación gráfica del patrimonio, estableciendo protocolos de actuación en cada caso.

Analizar los daños y las causas del deterioro que presentan los casos de estudio.

Comunicar y difundir las investigaciones realizadas sobre la alcazaba de Guadix y el castillo de Píñar, sensibilizando a la sociedad sobre la importancia de la conservación de su patrimonio, de su historia.

Caracterizar las técnicas constructivas medievales empleadas en la alcazaba de Guadix y el castillo de Píñar, de manera que puedan ser puestas en relación con los estudios a nivel regional y para el antiguo reino de Granada en futuras investigaciones

Realizar modelos de reconstrucción virtual de la alcazaba de Guadix y el castillo de Píñar para su mejor comprensión y difusión.

1.3 Estructura de la tesis

La tesis se articula en tres partes:

- En la primera parte, se analiza el *corpus teórico* que sustenta el camino a seguir en el proceso científico-técnico, analizando aquellas teorías, criterios e investigaciones relacionadas con la documentación y protección del patrimonio arquitectónico y arqueológico. De esta forma, en el capítulo II, se aborda el concepto de patrimonio arquitectónico, su evolución y marco histórico, las principales directrices internacionales y la normativa vigente de ámbito estatal, autonómico y local así como los criterios de intervención y valorización. En el capítulo III, se establece el marco teórico sobre los sistemas de documentación del patrimonio, desde los sistemas de medición y representación hasta los métodos de análisis arqueológico de la arquitectura, estudiando la evolución de los sistemas métricos de levantamiento y haciendo especial hincapié en los nuevos métodos fotogramétricos y de escáner laser. Se analizan igualmente los nuevos sistemas de representación, gestión y difusión del patrimonio mediante modelos tridimensionales y entornos BIM.
- En una segunda parte, en el marco metodológico nos proponemos analizar y experimentar con distintas técnicas, instrumentos y procedimientos de registro y documentación gráfica del patrimonio (capítulo IV). En el capítulo V nos centramos en los trabajos llevados a cabo en la alcazaba de Guadix y el castillo de Píñar. Se experimenta con las nuevas tecnologías de captura (fotogrametría multimagen y escaneado laser) así como el procesamiento para la obtención de un modelo tridimensional hiperrealista.
- En la tercera parte, (capítulo VI) realizamos una discusión sobre el proceso seguido, evaluando los pros y contras de la metodología utilizada, así como estado de los procesos de conservación actuales. Seguidamente enunciamos las conclusiones de la investigación (capítulo VII) y futuras líneas de investigación (capítulo VIII).

2 CAPITULO II.- EL PATRIMONIO ARQUITECTÓNICO

Los contenidos de carácter eminentemente técnico de este trabajo de investigación nos obligan a apoyarnos sobre bases conceptuales que justifiquen nuestro estudio. Conceptos como patrimonio cultural, patrimonio arquitectónico, conservación, tutela, etc. deben ser analizados para comprender mejor la finalidad de este trabajo.

Cada momento histórico ha tenido su propio concepto de patrimonio, resultado de los avances y valoraciones culturales que se iban imponiendo en el seno de la sociedad. El concepto de patrimonio tal y como hoy lo entendemos tiene poco que ver con su concepto primigenio de *conjunto de bienes materiales heredados de los antepasados*. En la actualidad se utiliza más el término de Patrimonio cultural o Bien cultural, entendiéndolo como aquellos bienes o costumbres de propiedad colectiva en los que reconocemos algún valor histórico, artístico o cultural.

El patrimonio constituye la memoria de los modos de vida pasados y es el hilo conductor que vincula a diferentes generaciones, los que estaban antes y que vendrán después.^[11]

A lo largo del tiempo y sobre todo XX el concepto de patrimonio como herencia colectiva ha ido evolucionando hacia una concepción social ^[12] más que material, pues es la propia sociedad la que le da sentido, reconociendo en él determinadas señas de identidad colectivas. La definición de patrimonio cultural elaborada por la Conferencia Mundial de la UNESCO, celebrada

en Méjico en el año 1982 recoge estos términos indicando:

“El patrimonio cultural de un pueblo comprende las obras de sus artistas, arquitectos, músicos, escritores y sabios, así como las creaciones anónimas, surgidas del alma popular, y el conjunto de valores que dan sentido a la vida, es decir, las obras materiales y no materiales que expresan la creatividad de ese pueblo; la lengua, los ritos, las creencias, los lugares y monumentos históricos, la literatura, las obras de arte y los archivos y bibliotecas.”

Es cuantiosa la bibliografía existente relacionada con el patrimonio, siendo también abundantes las instituciones nacionales e internacionales y jurisprudencia que se ocupan de él, generando múltiples definiciones de Patrimonio cuyo significado varía en función del punto de vista y los objetivos de quien los formule ^[13]. El carácter subjetivo y polisémico del concepto de patrimonio requiere un estudio detallado de su evolución histórica para comprender su significado actual así como los criterios de intervención o valorización.

Lorena Manzini ^[14] indica que *el significado cultural de patrimonio está cargado de múltiples facetas (histórica, social, política, espiritual y artística), que integran lo que podría llamarse la singular particularidad de los bienes patrimoniales, que son producto de la sociedad que le dio origen y a la que pertenecen.*

La definición del patrimonio desarrollada en el *Diccionario de la Real Academia Española de la Lengua*, junto con la vigente Ley de Patrimonio Histórico Español de

¹¹ MÁRQUEZ VILLORA J C (2015). *Cinco razones para conservar el patrimonio histórico*

(<https://valledeelda.com/blogs/historia-y-patrimonio/153-5-razones-para-conservar-el-patrimonio-historico.html>.)

¹² GARCIA CUETOS, M.P., (2012). *El patrimonio cultural. Conceptos básicos*. Universidad de Zaragoza.

¹³ VALLE MELON, J.M., (2006). Reflexiones sobre la Documentación Geométrica del Patrimonio. *Papeles del partal*, (3), pp. 161-187

¹⁴ MANZINI, L., (2011). El significado cultural del patrimonio. *Estudios del patrimonio cultural*, (6), pp. 27-42

1985 [15] (Ley 16/1985) se presenta como una definición muy generalista e integradora del patrimonio cultural, recogiendo la concepción social ya expuesta:

“El patrimonio está constituido por todo aquello que se transmite de unas a otras generaciones y que es considerado como valioso, siendo esta consideración asignada socialmente por diversos motivos y circunstancias, pudiendo, por tanto, cambiar en función de la coyuntura”.

Del mismo modo, el Art. 1 de esta Ley (Ley 16/1985, de 25 de junio) expone que:

“Integran el Patrimonio Histórico Español los inmuebles y objetos muebles de interés artístico, histórico, paleontológico, arqueológico, etnográfico, científico o técnico. También forman parte del mismo el patrimonio documental y bibliográfico, los yacimientos y zonas arqueológicas, así como los sitios naturales, jardines y parques, que tengan valor artístico, histórico o antropológico”.

Esta visión tan generalista nos obliga a ir ajustando el concepto de patrimonio al que ahora nos interesa y así, recogemos la definición integradora de patrimonio arquitectónico propuesta en la Carta europea del patrimonio arquitectónico de 1975 [16]:

*“El patrimonio arquitectónico europeo está formado **no sólo por nuestros monumentos** más importantes, sino también por los conjuntos que constituyen **nuestras***

ciudades y nuestros pueblos tradicionales en su entorno natural o construido”

Del mismo modo el ICOMOS [17] (Consejo Internacional de Monumentos y Sitios) define patrimonio arquitectónico como *“aquellos monumentos, conjuntos arquitectónicos y sitios que poseen un valor patrimonial histórico y artístico y que conforman el entorno ambiental histórico o construido.”*

Muy acertada me parece las palabras de Márquez Villora, al indicar que el patrimonio arquitectónico es un legado que nos relaciona con el pasado y lo actualiza, lo hace presente y tangible. *“El patrimonio no es pasado muerto, viejas ruinas, objetos polvorientos o vetustas fachadas: es historia materializada”.*

2.1 EL CONCEPTO DE PATRIMONIO EN EL CONTESTO HISTÓRICO

Como ya indicamos, el concepto de Patrimonio y sus criterios de protección y valoración han venido marcados por diferentes acontecimientos a lo largo de la historia. Desde la antigüedad las obras de arte se han atesorado y conservado como objetos de museo y colección, pero no será hasta el Renacimiento, cuando se empiece a valorar el significado de los objetos del pasado y la necesidad de conservarlos.

Françoise Choay [18], analiza ampliamente el desarrollo histórico del concepto de patrimonio desde su origen hasta la actualidad. Entre sus aportaciones, expone como el papa Pío II Piccolomini en 1262 emitió el

15 GOBIERNO DE ESPAÑA., 1985. Ley 16/1985, de 25 de junio, del Patrimonio Histórico Español. *Boletín Oficial del Estado*, 29, pp. 20342-20352

16 Carta Europea del Patrimonio Arquitectónico, 1975. ICOMOS.

(http://www.esicomos.org/Nueva_carpeta/CarEuPa-Arqui_ESP.htm)

17 ICOMOS. <https://www.icomos.org/en/>

18 CHOAY, F., 1993. Alegoría del patrimonio: monumento y monumento histórico. *Arquitectura Viva*, no.33 (1993 nov.), p.15-21,

documento “*Bula Cum almam nostram urbem*”, en el que ya se tiene una idea clara del valor patrimonial de los objetos del pasado:

“los monumentos eran vestigios de la Antigüedad y testimonios irremplazables del pasado y que debían conservarse por dos razones: para que las generaciones venideras pudiesen disfrutar de la grandeza y dignidad de la ciudad (idea de herencia común) y para que los monumentos transmitiesen a la ciudadanía los valores morales de quienes los construyeron y recordasen la fragilidad de las empresas humanas (criterios morales).”

Del mismo modo, el Papa Martín V al instalarse en Roma (1420), toma conciencia del valor simbólico de los edificios del pasado y de la necesidad de conservarlos llegando incluso a dictar normas para la conservación de los monumentos. Martín V recuperó un antiguo cargo romano de *magister viarium* y él y sus sucesores promovieron la restauración y la conservación de los viejos edificios, emitiendo leyes como las de Eugenio IV en las que prohibió seguir extrayendo piedras del Coliseo [18]. Pero no todos los Papas actuaron de la misma forma, otros favorecieron la destrucción de muchos monumentos para la construcción de nuevos edificios.

Con la Ilustración (s. XVIII) se racionalizó el interés surgido desde el Renacimiento por los restos conservados de la Antigüedad. El pasado de un pueblo es visto como elemento que los distingue e identifica siendo los restos materiales los testigos de ese pasado. Surgen las ciencias como la Arqueología o la Historia del arte, destacando la figura de Johann Winckelmann (1717-1768), quien estableció los fundamentos teóricos de la Ar-

queología. Es en esta época cuando se desarrollan trabajos de excavación como los promovidos por Carlos III en Herculiano y Pompeya [19].

Serán los destrozos sobre el patrimonio causados por la Revolución Francesa (1789), fundamentalmente sobre los bienes de la monarquía, el clero y la nobleza, los que provoquen movimientos conservacionistas para evitar esta destrucción, instaurando una nueva idea de Estado que considera que el patrimonio es un bien común y como tal, debe ser conservado y legado a las generaciones futuras. La figura más influyente en la defensa del patrimonio fue el abate Grégoire, quien afirmó que: “*los bárbaros y los esclavos detestan las ciencias y destruyen los monumentos artísticos; los hombres libres los aman y conservan*”, propiciando desde ese momento que la Revolución se identificara con la idea del Bien público y la necesidad de conservar su patrimonio [18]. De igual modo, cabe destacar la figura de Aubin-Louis Millin quien en 1790 redefinió el concepto de monumento histórico al indicar: “*monumento no son solo los edificios, sino también objetos, como estatuas o tumbas, que hicieran referencia a la historia nacional y fueran testimonio del pasado común de Francia*”. Su importancia no es tanto por la definición del objeto monumental, sino en el valor histórico que se le atribuye. Este concepto del patrimonio como “*Monumento histórico o Monumento Antiguo*” estará vigente hasta mediados del siglo XIX.

Esta doble idea de monumento fue recogida por Aloïs Rielg (1858-1905), cuando afirma que “*en todo monumento hay una concepción subjetiva, determinada por la percepción que el espectador tiene al observarlo, y una objetiva, determinada por su condición de objeto dotado de historia*” [20].

19 GARCIA CUETOS, M.P., 2012. *El patrimonio cultural. Conceptos básicos*. Universidad de Zaragoza.

20 GARCIA CUETOS, M.P., 2012. *El patrimonio cultural. Conceptos básicos*. Universidad de Zaragoza.

De acuerdo a lo que nos indica García Cuetos, la Revolución Francesa supuso un punto de inflexión en la idea de monumento, considerándolo como el elemento de referencia que integra el patrimonio común, en él que el valor de la antigüedad está por encima incluso del valor artístico [20]

En lo que respecta a España, gracias a las actividades llevadas a cabo por la Real Academia de la Historia (creada por R.D. de 18 abril de 1738), se inician los estudios sobre la Antigüedad, realizándose los llamados “*viajes literarios*”, que consistían en misiones científicas para inspeccionar y documentar inscripciones y antigüedades. Se comienzan a realizar las primeras excavaciones y documentación arqueológica, a la vez que se inician las primeras tareas legislativas de protección del patrimonio arqueológico [21].

Con motivo de los importantes viajes literarios realizados por el Marqués de Valdeflores, se redactó en 1803 la denominada “Real Cédula de S.M.”. Documento que indicaba “*el modo de recoger y conservar los monumentos antiguos, descubiertos o que se descubran en el Reyno*”, constituyendo un precedente importantísimo de legislación sobre el Patrimonio Arqueológico en toda Europa [21]. Estos importantes acontecimientos llevados a cabo por la Real Academia se verían suspendidos por la Invasión Napoleónica (1808) y no recuperaría su actividad hasta mediados del siglo XIX.

En 1844 se crea la Comisión Central de Monumentos cuya misión era catalogar e investigar el patrimonio histórico-artístico, realizando descripciones y dibujos de todos los edificios, monumentos o antigüedades

21 ALMAGRO GORBEA, M., 2002. La Real Academia de la Historia y la arqueología española. S. Quero Castro, A. Pérez Navarro (d.), *Historiografía de la arqueología española. Las instituciones*, Madrid, Museo de San Isidro, pp. 47-81

que merecieran ser conservados, elaborando una lista de edificios, monumentos y objetos artísticos que merecían ser conservados por la belleza de su construcción, por su antigüedad, por su origen o los recuerdos históricos que ofrecen [22].

Pero no sería hasta el siglo XIX, cuando comienzan valorarse y recuperarse los monumentos por parte de las instituciones, basándose en el concepto romántico de lo antiguo y por las continuas destrucciones llevadas a cabo fundamentalmente por las reformas urbanas.

Este cambio ideológico ha sido determinante en la actual concepción de patrimonio, como depositario de valores y referente del pasado perdido. Esta nueva forma de concepción científica de la historia dará lugar a diferentes escuelas y tendencias sobre como concebir e intervenir sobre el patrimonio.

Las primeras teorías sobre como concebir y restaurar un monumento surgen del arquitecto Eugene Viollet Le-Duc (1814-1879) que aboga por una concepción ideal de los edificios en el estilo en el que fueron concebidos [23]. Su principal actividad restauradora consistió en completar obras inconclusas de la época. Dictó los principios teóricos de la restauración arquitectónica que materializó en una serie de edificios medievales. De acuerdo a su teoría, enunció que “*restaurar un edificio no significa mantenerlo, repararlo o rehacerlo, sino restituirlo a su forma prístina que tal vez no se haya dado nunca*”. No concebía al monumento tal como fue, sino tal como debiera haber sido.

Frente a esta posición idealista surgen los conservacionistas románticos. Su mayor exponente, Jonh Ruskin

22 ORDIERES, I., 1995. Historia de la restauración monumental en España.

23 RIVERA BLANCO, J., 1997 Restauración arquitectónica desde los orígenes hasta nuestros días: conceptos, teoría, historia, *Mster de restauracin y rehabilitacin del patrimonio* 1997, Editorial Munilla-Lera, pp. 102-171

(1819-1900), abogaba por la conservación de los monumentos sin intervenir sobre ellos [24]. Para Ruskin, restaurar un monumento es destruirlo, es crear falsas copias e imitaciones, admitiendo como única operación válida la conservación para evitar la ruina. Tesis que recogerá en su libro *Las siete lámparas de la arquitectura* y que se sintetiza en la siguiente declaración:

“Velad con vigilancia sobre un viejo edificio; guardadle como mejor podáis y por todos los medios de todo motivo de descalabro. No os preocupéis de la fealdad del recurso de que os valgáis; más vale una muleta que la pérdida de un miembro. Y haced todo esto con ternura, con respeto y una vigilancia incesante y todavía más de una generación nacerá y desaparecerá a la sombra de sus muros. Su última hora sonará finalmente; pero que suene abierta y francamente y que ninguna intervención deshonrosa y falsa venga a privarla de los honores fúnebres del recuerdo”.

Por otro lado, figuras como las de Camillo Boito (1836-1914), intentaron conciliar las dos posiciones. Planteó que el monumento tenía que ser identificado dentro de una época y estilo para el que fue concebido (siguiendo a Viollet Le Duc), pero diferenciando las transformaciones sufridas a lo largo de su existencia. Por ello, *“era preferible dejar incompleto e imperfecto todo lo que se encuentra incompleto e imperfecto, y siempre sería mejor conservar que restaurar”*, siguiendo la opinión de Ruskin.

Lamentablemente, la pésima situación político-económica que vivió España en el siglo XIX hizo que en nuestro país no pudieran plantearse ninguna de estas iniciativas, por el contrario, la guerra de independencia,

las sucesivas desamortizaciones y en especial la Desamortización de Mendizábal (1835-1836), provocaron el mayor desastre sufrido por el Patrimonio Cultural de España, sólo comparable a la Invasión Napoleónica y las destrucciones de la última Guerra Civil [21].

Durante el reinado de Isabel II (1843-1854) vuelve a surgir una nueva sensibilización hacia el patrimonio común desarrollándose campañas para intentar conocer e inventariar los bienes patrimoniales existentes en el país. Se desarrollan las leyes de tutela y se establecieron las Comisiones Provinciales de Monumentos [25] (1844), encargadas de velar por la identificación y conservación del patrimonio, generando un concepto bastante amplio pero subjetivo de lo que hoy entendemos por patrimonio. En la Real Orden del Ministerio de Gobernación de 2 de abril de 1844 se establece [25]:

“se encargaba a los Jefes políticos que en el término de un mes remitiesen a dicho centro oficial una nota de los edificios, monumentos y objetos artísticos, de cualquiera especie que fueran, que por la belleza de su construcción, su antigüedad, su origen y el destino que habían tenido, o los recuerdos históricos que ofrecían, mereciesen ser conservados.”

Poco después, el 24 de julio de 1844, apareció publicada en la Gaceta la R.O. dictada por el Ministerio de la Gobernación, en la que se indicaba para la sección de arqueología-arquitectura [21]:

“promover excavaciones en los sitios en donde hubieran existido famosas poblaciones de la Antigüedad, excitando el celo y patriotismo de los eruditos y anticuarios; recogería cuantas monedas, medallas, noticias y otros objetos antiguos pudieran encontrarse, los clasi-

24 GONZALEZ-VARAS IBAÑEZ, I., 2006. *Conservación de bienes culturales: teoría, historia, principios y normas*.

25 LÓPEZ TRUJILLO, M.A., 2004. Las Comisiones Provinciales de Monumentos, Quijotes del pasado. *Zona arqueológica*, (3), pp. 363-370

ficaría oportunamente, y atendería, en fin, a la conservación de aquellos edificios cuyo mérito los hiciera acreedores a tal distinción”

Indicando además que, en el caso de que se necesitase intervención:

“Siempre que un edificio se hallase en mal estado e interesase a las Artes y a la Historia su conservación, propondrían las Comisiones, los medios de repararlo, para que fuesen elevados al conocimiento del Gobierno por mediación del Jefe político. Las reparaciones se efectuarían bajo la dirección de la indicada Sección, la cual debería contar en su seno con algún Profesor de Arquitectura, sin apartarse, empero, del dictamen de la Comisión.”

“Las descripciones y dibujos que se hicieran de los Monumentos no susceptibles de traslación, serían remitidos a la Comisión Central, la que procuraría darles publicidad oportunamente.”

Como puede deducirse, todas estas medidas sirvieron para estimular la actividad conservacionista dando valor a los objetos del pasado. Según García Cuestos, es en esta época cuando se revalorizan diferentes estilos como el románico y el gótico, antes menospreciados, integrando estos edificios como *Monumentos Nacionales*. [20]

Ya en el siglo XX, la preocupación mundial por la conservación del patrimonio se debió a su importante destrucción. La creación de la Sociedad de Naciones (conferencia de París, 1919) surgida tras la primera Guerra

Mundial, dio lugar a un cambio conceptual en la noción de patrimonio, dejando de considerarse este una cuestión particular de cada estado para convertirse en una cuestión de interés supra-nacional, dando lugar a la internacionalización de la tutela del Patrimonio. En este sentido, surgen organismos internacionales como la UNESCO [26], ICOMOS [27], el Consejo de Europa o la Unión Europea que convocan multitud de encuentros y conferencias para discutir y proponer ideas y soluciones a la protección y conservación del patrimonio. Si bien sus aportaciones no tienen carácter vinculante, sí que sirvieron de base para marcar los principios teóricos o incluso normativos a aplicar en cada país.

Uno de los trabajos más importantes desarrollados por la Sociedad de Naciones en relación con la protección del patrimonio fue la organización de la Conferencia de Atenas de 1931, en la que se elaboró el primer documento internacional para la conservación y restauración del patrimonio, conocido como Carta de Atenas [28]. En su redacción intervino uno de los grandes exponentes de la restauración científica, Gustavo Giovannoni (1873-1947), quien un año después redactaría la Carta italiana del restauro [29]. En ella, podemos extraer dos ideas fundamentales, por un lado la concepción de universalidad del patrimonio, y por otro, la distinción de los monumentos tanto por su valor histórico como por su valor artístico.

Esta declaración tuvo un fuerte impacto sobre los países europeos al encomendar a cada Estado las tareas de conservación. Así, en España, se redactó la primera

26 UNESCO. Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura: <http://en.unesco.org/>

27 ICOMOS: Consejo Internacional de Monumentos y Sitios Histórico-Artísticos es la única organización internacional no gubernamental que tiene como cometido promover la teoría, la metodología y la tecnología aplicada

a la conservación, protección, realce y apreciación de los monumentos, los conjuntos y los referidos sitios.

28 Carta de Atenas 1931

http://ipce.mcu.es/pdfs/1931_Carta_Atenas.pdf

29 Carta italiana del Restauro

http://ipce.mcu.es/pdfs/1932_Carta_Restauro_Roma.pdf

ley que establecía la protección y administración del patrimonio desde el Estado [30], la Ley de Patrimonio Histórico-Artístico Nacional, del 13 de mayo de 1933, que estuvo vigente hasta 1985.

Pero no será hasta 1954 en la *Convención de la Haya*³¹ cuando aparece por primera vez el concepto de **Patrimonio cultural o Bien cultural**. Esta concepción, mucho más genérica, hace referencia a la cultura de los pueblos e incluye indistintamente al patrimonio histórico o al patrimonio cultural:

*“Reconociendo que los **bienes culturales** han sufrido graves daños en el curso de los últimos conflictos armados y que, como consecuencia del desarrollo de la técnica de la guerra, están cada vez más amenazados de destrucción”*

*“...que los daños ocasionados a los **bienes culturales** pertenecientes a cualquier pueblo constituyen un menoscabo al patrimonio cultural de toda la humanidad”*

*“... que la conservación del **patrimonio cultural** presenta una gran importancia para todos los pueblos del mundo y que conviene que ese patrimonio tenga una protección internacional”*

A mediados del siglo XX, una nueva concepción cultural de la historia trae consigo una nueva forma de entender y analizar el patrimonio. *“No solo es importante conocer los hechos históricos y los objetos artísticos, sino*

comprender el contexto histórico y los motivos por los que habían sido creados” [32]. Desde entonces, la noción de patrimonio cultural se ha ido ampliando y matizando mediante la incorporación de nuevos conceptos como: patrimonio natural o con el valor documental y cultural de los Centros Históricos de las ciudades superando así la idea de monumento como objeto aislado. En la *Convención sobre la Protección del Patrimonio Mundial Cultural y Natural* [33] (Paris 1972) se equipara y unifica patrimonio cultural y patrimonio natural como un mismo concepto.

El rápido crecimiento urbano entre los años 1950-1970, tuvo un impacto negativo para el patrimonio arquitectónico y arqueológico, que fueron destruidos tanto por la renovación como por el crecimiento urbano.

La Carta de Venecia [34] (1964) traerá consigo una renovación al establecer los principios de intervención sobre el Patrimonio Cultural. También traerá consigo un cambio conceptual al indicar que un monumento histórico es algo más que un testimonio con valor documental y que los bienes patrimoniales no tienen únicamente valor artístico e histórico, sino también cultural. Muestra una concepción más amplia e integradora del término **monumento histórico**, en el que se incluye, además del concepto tradicional, los conjuntos urbanos y las obras modestas que hayan adquirido un **significado cultural**.

30 TAPIA GÓMEZ, M. Un lugar para el patrimonio. La conservación del patrimonio cultural en la red. *Ar@cne: revista electrónica de recursos en internet sobre geografía y ciencias sociales*, 2011.

31 Convención para la Protección de los Bienes Culturales en caso de Conflicto Armado

http://portal.unesco.org/es/ev.php-URL_ID=13637&URL_DO=DO_TOPIC&URL_SECTION=201.html

32 GARCIA CUETOS, M.P., 2012. *El patrimonio cultural. Conceptos básicos*. Universidad de Zaragoza.

33 UNESCO. Convención sobre la Protección del Patrimonio Mundial Cultural y Natural
http://portal.unesco.org/es/ev.php-URL_ID=13055&URL_DO=DO_TOPIC&URL_SECTION=201.html

34 Carta de Venecia (1964):
http://ipce.mcu.es/pdfs/1964_Carta_Venecia.pdf

*“La noción de **monumento histórico** comprende tanto la creación arquitectónica aislada, como el ambiente urbano o paisajístico que constituya el testimonio de una civilización particular, de una evolución significativa o de un acontecimiento histórico. Esta noción se aplica no sólo a las grandes obras, sino también a las obras modestas que con el tiempo hayan adquirido un significado cultural” (Carta de Venecia, 1964)*

Concretando dos aspectos muy importantes: que un monumento no puede ser separado de la historia de la que es testimonio, ni del ambiente en el que se encuentra.

Posteriormente, en las reuniones de Belgrado de 1980 se ampliaría más el concepto de Bien Cultural con la inclusión de elementos como el patrimonio documental *“recomendación para la protección y salvaguardia de las imágenes en movimiento”* y la de París de 1989 con la inclusión de la cultura tradicional y popular, en la que se incluyen los testimonios materiales e inmateriales de una cultura.

Una definición más amplia es recogida por la Ley de Patrimonio Histórico Español de 1985 [35] indicando:

“los bienes culturales son todos aquellos bienes materiales e inmateriales que conforman el patrimonio cultural: muebles e inmuebles, con valor artístico, histórico, paleontológico, arqueológico, etnográfico, científico o técnico; también el patrimonio documental y bibliográfico, los yacimientos y zonas arqueológicas, así como los sitios naturales, jardines y parques, que tengan valor artístico, histórico o antropológico y que por su significación e importancia justifican su preservación por parte del Estado y la colectividad en general”.

35 Ley 16/1985, de 25 de junio, del Patrimonio Histórico Español.

<https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-1985-12534>

De igual forma, en la convención para la salvaguarda del patrimonio arquitectónico de Europa (1985), se plantea la siguiente clasificación en función de los bienes inmuebles que la forman:

- **Los monumentos:** todas las realizaciones especialmente relevantes por su interés histórico, arqueológico, artístico, científico, social o técnico, comprendidas las instalaciones o los elementos decorativos que constituyen parte integrante de estas realizaciones;
- **Los conjuntos arquitectónicos:** grupos homogéneos de construcciones urbanas o rurales relevantes por su interés histórico, arqueológico, artístico, científico, social o técnico y suficientemente coherentes como para ser objeto de una delimitación topográfica;
- **Los sitios:** obras combinadas del hombre y de la naturaleza, parcialmente construidas y que constituyan espacios suficientemente característicos y homogéneos como para ser objeto de una delimitación topográfica, relevantes por su interés histórico, arqueológico, social o técnico

En definitiva, tal y como indica Tapia Gómez [36], *“el patrimonio cultural es un concepto subjetivo y dinámico que no depende de los objetos o bienes sino de los valores que la sociedad en general les atribuyen en cada momento de la historia y que determinan qué bienes son los que hay que proteger y conservar para la posteridad”*, e indica que la evolución del concepto patrimonio conlleva tres principios:

36 TAPIA GOMEZ, M., 2011. Un lugar para el patrimonio. La conservación del patrimonio cultural en la red. *Ar@cne: revista electrónica de recursos en internet sobre geografía y ciencias sociales*,

- *El concepto de patrimonio comporta mecanismos de conservación;*
- *El valor del patrimonio no sólo se basa en criterios estéticos o históricos sino en ser un reflejo de la cultura de una sociedad a lo largo de su historia;*
- *El patrimonio considera que los bienes son herencia y propiedad de un pueblo, es decir un legado común.*

Por tanto, el concepto de patrimonio ha adquirido hoy un sentido muy amplio, recogiendo no solo los elementos de valor artístico, histórico o cultural sino todas aquellas manifestaciones materiales o inmateriales que permiten explicar íntegramente los rasgos de identidad de un determinado colectivo, incluyendo en él, el patrimonio etnográfico, industrial, arqueológico o el arquitectónico.

2.2 TUTELA Y PROTECCION DEL PATRIMONIO

La necesidad de protección y defensa del patrimonio ha generado a lo largo de la historia multitud de opiniones, en muchos casos encontradas, sobre la propia definición de patrimonio o los criterios a seguir en caso de intervención. En este apartado vamos a analizar los diferentes organismos y debates relacionados con la protección e intervención en el patrimonio así como la normativa y legislación generada a partir de ellas. Prueba de ello fue el impulso que supuso la Carta de Atenas en la redacción de la Ley de Patrimonio Histórico-Artístico Nacional, vigente hasta 1985 y en la que el Estado asumía la responsabilidad de protección y administración del patrimonio

Fue tras los desastres en el patrimonio provocados por la II Guerra Mundial cuando se incrementa la preocupación por la protección y conservación del patrimonio. En 1954, se funda la UNESCO y se organiza la Convención de La Haya [37], también llamada Convención para la Protección de los Bienes Culturales en caso de Conflicto Armado. En ella *“los Estados Parte reconocen la vulnerabilidad de los bienes culturales en el curso de los conflictos armados, consideran que la conservación del patrimonio cultural representa una parte muy importante para todos los pueblos del mundo conviniendo que ese patrimonio deba tener una protección internacional”*. Para ello se comprometen, entre otras cuestiones a:

- *Disminuir las consecuencias de los conflictos armados sobre el patrimonio cultural y a adoptar medidas preventivas para dicha protección tanto en tiempo de guerra, como en tiempo de paz.*
- *Salvaguardar y respetar los bienes culturales durante el conflicto armado sin importar si dicho conflicto es internacional o interno.*
- *Instituir mecanismos para la protección de estos bienes.*
- *Marcar ciertos edificios y monumentos importantes con un emblema de protección especial.*
- *Crear unidades especiales dentro de las fuerzas armadas para proteger el patrimonio cultural.*

Con la Convención de La Haya se incluye el derecho de protección del patrimonio como una parte del derecho humanitario, de esa forma, la destrucción del patrimonio cultural de un pueblo se considera un crimen contra la humanidad.

Además, la Convención fue aprobada junto con el Protocolo, en el que se establece:

http://portal.unesco.org/es/ev.php-URL_ID=13637&URL_DO=DO_TOPIC&URL_SECTION=201.html

37 Convención de la Haya:

- *Prohibir la exportación de bienes culturales de un territorio ocupado.*
- *Exigir el retorno de este tipo de bienes al territorio del Estado al que le fueron sustraídos.*
- *Prohibir la apropiación de bienes culturales en concepto de reparación de guerra.*

Posteriormente, en la *Carta de Venecia* [38] (1965) se establecerían los principios de actuación sobre el patrimonio. En 1972, en la Convención para la Protección del Patrimonio Mundial Cultural y Natural, se creó la *Comisión de Patrimonio Mundial* [39], la cual señaló criterios de gestión e intervención en el patrimonio que hoy en día están vigentes.

Pero esta mayor sensibilización y concienciación por parte de los Estados y de la propia sociedad sobre la necesidad de protección del patrimonio no impide que este siga destruyendo, no solo por causas tradicionales, sino también por la evolución de la vida social y económica.

Los principios y criterios recogidos en las cartas constituyen una parte fundamental del corpus teórico de la restauración monumental y revelan los aspectos más problemáticos relacionados con la conservación del patrimonio, pero a casuística es tan elevada y diversa que es imposible enumerar unos criterios universalmente válidos para todo el patrimonio, por tanto, el objetivo fundamental que debe guiar cualquier intervención será la de respeto y tutela de todos sus valores.

38 Carta de Venecia 1965.

http://ipce.mcu.es/pdfs/1964_Carta_Venecia.pdf

39 Convención para la Protección del Patrimonio Mundial Cultural y Natural,

http://portal.unesco.org/es/ev.php-URL_ID=13055&URL_DO=DO_TOPIC&URL_SECTION=201.html

De igual modo se han desarrollado otros instrumentos efectivos para la tutela del patrimonio, como son los planes nacionales y autonómicos de protección, entre los que cabe destacar, por ser objeto de esta tesis el Plan Nacional de Arquitectura Defensiva (PNAD) [40] o el Plan de Arquitectura Defensiva de Andalucía (PADA). En ellos se establece como uno de sus objetivos y líneas de actuación prioritarias la elaboración de un inventario documental y gráfico en el que se relacionen las distintas categorías de arquitectura defensiva.

En el siguiente apartado se analizan aquellos documentos que, a lo largo de la historia, han ido marcado los principios que deben regir la tutela y protección del patrimonio y que nos hacen comprender mejor el contexto actual.

2.2.1 CARTAS Y CONVENCIONES

Carta de Atenas, 1931. Carta para la restauración de monumentos históricos

Este documento recoge por vez primera la importancia de la internacionalización del patrimonio, aunque no haga referencia explícita a él.

“Convencida de que la conservación del patrimonio artístico y arqueológico de la humanidad interesa a todos los Estados que tutelan la civilización, la Conferencia propone que los Estados se presten recíprocamente una co-

40 PNAD: Plan Nacional de Arquitectura Defensiva

<http://ipce.mcu.es/conservacion/planesnacionales/defensiva.html>

laboración cada vez más amplia y concreta para favorecer la conservación de los monumentos de arte y de historia”.

En él se recogen las últimas teorías sobre restauración de monumentos postuladas por Boitio, máximo exponente del *restauro moderno* y más aún las de Gustavo Giovannoni sobre *-restauro científico*, remarcando la tendencia general a abandonar las restituciones integrales de finales del siglo XIX y principios del XX propuestas por Viollet Le Duc.

La Carta de Atenas contribuyó a un importante movimiento internacional para la defensa y conservación de los bienes culturales, en ella, se recogen por primera vez los principios básicos para la conservación en monumentos históricos y enunció el deseo de que la legislación de cada Estado permitiera actuaciones de conservación en caso de urgencia. Algunos de estos principios se consideran de aplicación en la actualidad:

Cooperación internacional de todos los Estados;

- “... respetar la obra histórica y artística del pasado, sin menospreciar el estilo de ninguna época.”;
- “... mantener, cuando sea posible, la ocupación de los monumentos que les aseguren su continuidad vital, siempre y cuando el estilo moderno sea tal que respete el carácter histórico y artístico.”
- el de “consagrar el derecho de la colectividad a frente del interés privado.”;
- en el caso de ruinas se impone una escrupulosa labor de conservación y cuando esta sea imposible, volver a enterrar previa documentación precisa;
- Volver a su posición aquellos elementos originales encontrados (*anastylosis*);
- En los casos de intervención, clara distinción entre materiales nuevos y viejos;

- Colaboración multidisciplinar de las profesiones y escrupulosa investigación sobre el bien.
- Difusión del conocimiento, mediante noticias sobre trabajos en varios países en publicaciones regulares por parte de la oficina Internacional de Museos
- Considera inoportuno el traslado de obras escultóricas fuera de contexto.
- Respeto al carácter y fisonomía de la ciudad y entorno de los nuevos edificios en construcción, especialmente en cercanía de monumentos antiguos.

De igual manera se constató que la diferencia entre las legislaciones de los países en materia de protección del patrimonio, procede de la dificultad de conciliar el derecho público con el derecho privado, aprobándose que debe preponderar el derecho de la colectividad contra el interés privado.

La Carta de Atenas tuvo una especial influencia sobre las legislaciones española e italiana del momento. La Constitución republicana de 1932 atribuyó al Estado el deber de conservar el Patrimonio Histórico del país quedando recogida en la Ley de Patrimonio Histórico-Artístico Nacional de 1933, que permaneció vigente hasta 1985.

Carta del restauro, 1932

Documento italiano en el que se vierte la doctrina de Gustavo Giovannoni, recogida en la Carta de Atenas. Su finalidad es la de unificar la metodología de restauración de las superintendencias italianas y si bien su ob-

jeto quedaba limitado a los monumentos arquitectónicos, los principios generales se podían extender a toda restauración, incluso pictórica o escultórica [41].

Las normas que a partir de ella se elaboraron no tenían fuerza de Ley, sirviendo como instrucciones internas de la administración italiana en la obras de restauración. Si bien, como se reconocería en la posterior Carta del restauro de 1972, estas normas no se aplicaron en todas las restauraciones de Italia, ni en la teoría ni en la praxis.

Carta de Venecia, 1964

La importante actividad restaurada, causada por los desastres de la Gran Guerra, pusieron de manifiesto **algunos** problemas de aplicación de los criterios establecidos por el restauro científico y los planteamientos desarrollados por la Carta de Atenas, volviéndose en muchos casos a restauraciones “en estilo” para la recuperación de monumentos que habían sido prácticamente aniquilados [42]

Ante esta problemática surgió en Italia una nueva teoría de restauración “*restauro crítico*” cuyos máximos exponentes fueron Pane, Bonelli y Brandi. Esta nueva concepción restauradora fue recogida en la carta de Venecia, que acepta los postulados de la restauración científica y pone manifiesto dos importantes aspectos. Por un lado, **el objetivo fundamental de la restauración es el de conservar y revelar los valores estéticos e históricos y por otro, que toda intervención debe ir precedida obligatoriamente por un estudio arqueológico e histórico.**

41 MARTÍNEZ JUSTICIA, M J. (1996) Antología de textos sobre restauración.-

42 RIVERA BLANCO, J. (2000) La restauración monumental en España en el umbral del siglo XXI, nuevas ten-

“La restauración es una operación que debe tener un carácter excepcional. Tiene como fin conservar y revelar los valores estéticos e históricos del monumento y se fundamenta en el respeto a la esencia antigua y a los documentos auténticos. Su límite está allí donde comienza la hipótesis: en el plano de las reconstituciones basadas en conjeturas, todo trabajo de complemento reconocido como indispensable por razones estéticas o técnicas aflora de la composición arquitectónica y llevará la marca de nuestro tiempo. La restauración estará siempre precedida y acompañada de un estudio arqueológico e histórico del monumento.”

En sus principios esenciales sanciona que, para todos proyectos de restauración:

- **La obligación de respetar todas las épocas de la edificación del monumento.** Corresponsabilidad de las decisiones.

“Las valiosas aportaciones de todas las épocas en la edificación de un monumento deben ser respetadas, puesto que la unidad de estilo no es un fin a conseguir en una obra de restauración. Cuando un edificio presenta varios estilos superpuestos, la desaparición de un estadio subyacente no se justifica más que excepcionalmente y bajo la condición de que los elementos eliminados no tengan apenas interés, que el conjunto puesto al descubierto constituya un testimonio de alto valor histórico, arqueológico o estético, y que su estado de conservación se juzgue suficiente. El juicio sobre el valor de los elementos en cuestión y la decisión de las eliminaciones a efectuar no pueden depender únicamente del autor del proyecto.”

- **Legibilidad de las intervenciones.** Distinguir los materiales utilizados:

dencias: de la Carta de Venecia a la Carta de Cracovia. Actas de los Décimos Cursos Monográficos sobre el Patrimonio Histórico, 2000, vol. 6, p. 137.

“Los elementos destinados a reemplazar las partes inexistentes deben integrarse armoniosamente en el conjunto, distinguiéndose claramente de las originales, a fin de que la restauración no falsifique el documento artístico o histórico.”

– **Todas las intervenciones deben ir rigurosamente documentadas.**

“Los trabajos de conservación, de restauración y de excavación irán siempre acompañados de la elaboración de una documentación precisa, en forma de informes analíticos y críticos, ilustrados con dibujos y fotografías. Todas las fases del trabajo de desmontaje, consolidación, recomposición e integración, así como los elementos técnicos y formales identificados a lo largo de los trabajos, serán allí consignados. Esta documentación será depositada en los archivos de un organismo público y puesta a la disposición de los investigadores; se recomienda su publicación.”

Otro de los puntos destacables fue la permisividad de técnicas modernas de restauración cuya eficacia se haya demostrado con base científica y con experiencia y siempre y cuando las técnicas tradicionales se muestren inadecuadas

Convención sobre la protección del Patrimonio Mundial Cultural y Natural 1972

Organizada por la UNESCO en 1972 parte de la consideración de que el patrimonio cultural y natural están cada vez más amenazados de destrucción, no sólo por las causas tradicionales de deterioro sino también por la evolución de la vida social y económica. Hace recomendaciones específicas a los Estados respecto de la obligación de proteger, conservar, rehabilitar y transmitir a las generaciones futuras el patrimonio cultural y natural situado en su territorio así como la posible solicitud de asistencia y cooperación de otros Estados,

en aspectos financieros, artísticos, científicos y técnicos.

De igual modo, la Convención para la Protección del Patrimonio Mundial Cultural y Natural de 1972, establece los criterios gestión e intervención sobre el patrimonio cultural instando a los Estados a adoptar medidas jurídicas, científicas, técnicas, administrativas y financieras adecuadas, para identificar y proteger ese patrimonio.

Carta Europea del patrimonio arquitectónico y declaración de Ámsterdam. 1975

Ambos documentos se enmarcan dentro de la celebración del Año Europeo del Patrimonio Arquitectónico promoviendo, bajo una *política europea común*, la *conservación integral* del patrimonio.

Se recoge una nueva definición globalizadora e integradora del patrimonio, reafirmando la importancia de la ciudad en su conjunto.

“El patrimonio arquitectónico europeo está formado no sólo por nuestros monumentos más importantes, sino también por los conjuntos que constituyen nuestras ciudades y nuestros pueblos tradicionales en su entorno natural o construido”.

“El patrimonio arquitectónico es un capital espiritual, cultural, económico y social con valores irremplazables”.

En este sentido, la preservación de la continuidad histórica es esencial para la conservación o creación de un marco de vida que permita al hombre encontrar su identidad y experimentar un sentimiento de seguridad frente a las mutaciones brutales de la sociedad pero además, la conservación de los edificios existentes contribuye a la economía de los recursos y a la lucha contra el despilfarro.

*“el patrimonio arquitectónico europeo,, es herencia común de todos los pueblos y, por tanto, su conservación recaba la **solidaridad** efectiva de los Estados Europeos”*

Se deberán crear políticas activas de protección de patrimonio, estableciéndose las siguientes recomendaciones:

- La conservación integral del patrimonio arquitectónico debe ser uno de los objetivos principales de la planificación urbana y de la ordenación del territorio. Se deben tener en cuenta los valores estéticos y culturales del patrimonio arquitectónico a la hora de elaborar los objetivos y normas de acondicionamiento especial. Con este fin propone:

“elaborar el inventario de los monumentos, conjuntos arquitectónicos y sitios, incluyendo la delimitación de zonas periféricas de protección. Sería deseable que estos inventarios fueran ampliamente difundidos especialmente entre las autoridades regionales y locales, así como entre los responsables de la ordenación del territorio y del urbanismo, con el fin de llamar su atención sobre los edificios y zonas dignas de ser protegidas. Un inventario de estas características proporcionará una base realista a la conservación, ya que constituye un elemento cualitativo fundamental para la gestión de los espacios”.

- Los poderes locales son los responsables directos de la conservación del patrimonio, debiendo tener competencias precisas y amplias en materia de protección del patrimonio arquitectónico.
- La toma en consideración de los factores sociales condiciona el éxito de toda política de conservación integrada. Una política de conservación implica también la integración del patrimonio archi-

tectónico en la vida social. El esfuerzo de conservación debe ser valorado no sólo en relación con el valor cultural de los edificios, sino también con su valor de uso. En este sentido, se pone de manifiesto la necesidad de llevar políticas coherentes de utilización y reutilización del patrimonio y de tomar conciencia sobre la necesidad de moderar el crecimiento de las ciudades.

- La conservación integrada exige una adaptación de las medidas legislativas y administrativas. Efectivamente, las sucesivas ampliaciones de la noción de patrimonio arquitectónico requiere una adaptación constante de la legislación a estos valores, reforzando así mismo los medios administrativos para su cumplimiento.
- Se necesitará llevar a cabo políticas favorables a la conservación integrada mediante la aportación de medios financieros apropiados, ya sean directos o mediante deducciones impositivas.
- La conservación integrada requiere una promoción de los métodos, técnicas y competencias profesionales vinculadas a la restauración y a la rehabilitación.

Convenio para la salvaguarda del Patrimonio Arquitectónico de Europa. Convención de Granada. 1985

En esta convención se señalaron una serie de medidas para favorecer la protección del patrimonio arquitectónico, como son: beneficios fiscales, creación de asociaciones no lucrativas al servicio del patrimonio o del mecenazgo. Este documento recoge, entre otros, la obligación en la coordinación y cooperación de los diferentes Estados sobre todo en cuanto a políticas de

conservación, así como la adaptación de metodologías en materia de inventario y transmisión de conocimientos en cuanto a las nuevas tecnologías.

En este convenio se pone de manifiesto como factores fundamentales para la conservación del patrimonio: Transmitir un sistema de referencia cultural a las generaciones futuras, mejorar el marco de vida urbana y rural y favorecer el desarrollo económico, social y cultural de sus habitantes.

Por otro lado, se establecen procedimientos legales concretos para la protección del patrimonio arquitectónico, como por ejemplo:

Art. 3.- 1.-establecer un régimen legal de protección del patrimonio arquitectónico

Art. 4.- 1.- aplicar, en virtud de la protección jurídica de los bienes considerados, procedimientos de control y de autorización apropiados;

Art. 4.- 2.-a) someter a una autoridad competente los proyectos de demolición o de modificación de monumentos ya protegidos o que sean susceptibles de un procedimiento de protección, además de todo proyecto que afecte a su ambiente circundante;

Art. 4.- 2.-b) someter a una autoridad competente los proyectos que contemplen, en su totalidad o en parte, un conjunto arquitectónico o un sitio y que comporte trabajos: de demolición de edificios; de construcción de nuevos edificios; de modificaciones importantes que afecten al carácter del conjunto arquitectónico o del sitio;

Art. 4.- 2.- c) la posibilidad de que los poderes públicos impidan al propietario de un bien protegido efectuar trabajos o sustituirlo en caso de incumplimiento por su parte o d) la posibilidad de expropiar un bien protegido.

Especial interés tiene el apartado referente a información y formación, donde se considera de gran utilidad sensibilizar a la opinión pública sobre el valor de conservación de patrimonio arquitectónico, no solo como elemento de identidad cultural, sino también como fuente de inspiración y de creatividad para las generaciones presentes y futuras, mediante políticas de información y sensibilización.

En ese mismo año, la Conferencia de Ministros responsables del Patrimonio Arquitectónico destacan la puesta en valor del patrimonio arquitectónico y arqueológico como el mayor componente del patrimonio histórico europeo y como factor de desarrollo sociocultural.

Carta de Toledo. 1986: Carta internacional para la conservación de las Ciudades Históricas

Esta carta es complementaria a la “*Carta Internacional sobre Conservación y Restauración de los Monumentos y Sitios*” (*Carta de Venecia, 1964*). En ella definen los principios y objetivos así como los métodos e instrumentos de actuación apropiados para conservar las ciudades históricas grandes o pequeñas, favoreciendo la armonía entre la vida contemporánea con ellas, perpetuando el conjunto de los bienes que constituyen la memoria de la Humanidad.

Establece tres objetivos básicos:

- La conservación de las ciudades y barrios históricos solo puede realizarse mediante políticas de desarrollo económico y social, considerando el planeamiento y el urbanismo en todos sus niveles.
- Los valores a conservar son: los de carácter histórico de la ciudad o conjunto y la suma de los elementos materiales que configuran su imagen (trama o parcelario urbano, relación entre los diferentes espacios urbanos, forma y aspecto de los

edificios o las diversas funciones de la ciudad a lo largo de la historia)

- La participación o compromiso de los habitantes a los que afecta de modo directo y particular.

Este documento establece que la planificación de la conservación deberá ser llevada a cabo por estudios pluridisciplinares: análisis de datos arqueológicos, históricos, arquitectónicos, técnicos, sociológicos y económicos que deben dirigir acciones de tipo jurídico, administrativo y financiero.

En los casos necesarios, la incorporación de elementos de carácter contemporáneo puede enriquecer el conjunto, siempre que se haga con armonía.

La tipología constructiva y el complejo entramado viario hacen necesario adoptar medidas preventivas contra catástrofes, circulación de vehículos o contaminación.

Facilitar la conservación de estos espacios requiere la participación activa de sus habitantes, sobre todo los de las futuras generaciones, programando actividades en edad escolar.

Carta del restauro 1987. Carta de la conservación y restauración de los objetos de arte y cultura.

El presente documento, pretende renovar, sustituir la "Carta Italiana del Restauro" de 1972 y al igual que la anterior se trata de un documento elaborado por el Ministerio de Instrucción Pública italiano con las normas de intervención en la actividad de conservación y restauración de objetos de arte y cultura.

En sus criterios establece que en las intervenciones de restauración que afectan a la naturaleza del material,

se rechaza la utilización de materiales de construcción modernos a favor de los materiales tradicionales [43].

“En el campo específico de la arquitectura, la experiencia de los últimos veinte años ha enseñado a desconfiar de las inserciones ocultas de materiales especiales como el acero, el hormigón pretensado, las "costuras" armadas e inyectadas con argamasas de cemento o de resinas, a causa de su capacidad de invasión, poca duración, irreversibilidad y relativa escasa fiabilidad. Por tanto, parecen preferibles aunque puedan parecer extrañas a la obra- medidas de consolidación de tipo tradicional (contrafuertes, taponamientos, cadenas, zunchos) en cuanto son fácilmente controlables y sustituibles.”

Se establecen protocolos adecuados de actuación si bien, en cada caso se estudiará de manera individualizada y justificada por escrito llevándose a cabo un diario de su realización, al que seguirá un informe final con la documentación fotográfica de antes, durante y después de la intervención. Además, serán documentadas todas las investigaciones y análisis eventualmente realizados con el auxilio de la física, la química, la microbiología y otras ciencias

A diferencia de la anterior carta de 1972 en el que no estaba contemplado, por ser un criterio más moderno, se dan instrucciones para la tutela de los Centros Históricos

En lo que respecta a las instrucciones para la conservación, mantenimiento y restauración de obras de interés arquitectónico se realiza un estudio detallado sobre los procesos de planificación así como la metodología y técnicas de intervención, incidiendo sobre aquellas unidades que suelen precisar intervención:

43 Carta del Restauro de 1987:
http://ipce.mcu.es/pdfs/1987_Carta_BienesMuebles-Italia.pdf

- Intervención de consolidación de muros.
- Sustituciones o reintegraciones de paramentos de piedra o ladrillo
- Intervenciones sobre aplicaciones decorativas en estuco
- Reintegraciones y/o sustituciones de enlucidos y/o coloraciones.
- Intervenciones de consolidación de piedra o de ladrillos vistos.
- Intervenciones de consolidación de estructuras de madera.
- Intervenciones sobre estructuras de piedra.
- Intervenciones sobre elementos metálicos.

Carta Internacional para la conservación de las poblaciones y áreas urbanas históricas, 1987 Washington

Este documento recoge íntegramente los contenidos de la Carta de Toledo del año 1986 poniendo especial énfasis en la definición de núcleos urbanos de carácter histórico: todo tipo de poblaciones (ciudades, villas, pueblos, etc.) y, más concretamente, los cascos, centros, barrios, barriadas, arrabales, u otras zonas que posean dicho carácter, con su entorno natural o hecho por el hombre

CARTA DE NARA, SOBRE LA AUTENTICIDAD 1994

El Documento de Nara en Autenticidad se concibe en el espíritu la carta de Venecia como un reconocimiento al respeto de la diversidad cultural. La autenticidad es un factor esencial en la calificación de valores culturales entendiendo que la conservación del patrimonio cultural, en todas sus formas y períodos históricos, está arraigado en los valores atribuidos a ese patrimonio. De acuerdo a esta Carta, se define conservación como: *todas las operaciones diseñadas para comprender un*

Bien Patrimonial, conocer su historia y su significado, asegurar la preservación de su material, y, en caso de ser necesario su restauración y mejoramiento.

Carta del Patrimonio Vernáculo construido, 1999

El Patrimonio Vernáculo construido constituye el modo natural y tradicional en que las comunidades han producido su propio hábitat. La continuidad de esa tradición se ve amenazada un mundo más global y tecnológicamente más avanzado.

En sus principios de conservación establece:

- *La conservación del Patrimonio Vernáculo construido debe ser llevada a cabo por grupos multidisciplina-rios de expertos, que reconozcan la inevitabilidad de los cambios, así como la necesidad del respeto a la identidad cultural establecida de una comunidad.*
- *Las intervenciones contemporáneas en edificios, conjuntos y asentamientos vernáculos deben res-pectar sus valores culturales y su carácter tradicional.*
- *Lo tradicional se encuentra sólo en ocasiones repre-sentado por estructuras singulares. Es mejor apre-ciado y conservado por el mantenimiento y preserva-ción de los conjuntos y asentamientos de carácter re-presentativo en cada una de las áreas.*
- *El Patrimonio Vernáculo construido forma parte inte-gral del paisaje cultural y esta relación ha de ser, como tal, tenida en consideración en el transcurso de los programas de conservación y desarrollo.*
- *El Patrimonio Vernáculo no sólo obedece a los ele-mentos materiales, edificios, estructuras y espacios, sino también al modo en que es usado e interpreta-do por la comunidad, así como a las tradiciones y expre-siones intangibles asociadas al mismo.*

Convención de la Haya, 1999

En la Convención de la Haya de 1999 se desarrolla un segundo protocolo que especifica más detalladamente las medidas de salvaguarda, estableciendo el Reglamento de aplicación de los acuerdos adoptados en la Convención de 1954 e incidiendo en que esta protección no será eficaz a menos que se organice en tiempo de paz.

Carta de Cracovia, principios para la conservación y restauración del patrimonio construido. 2000

Esta nueva Carta surge impulsada por el proceso de unificación Europea. Tiene como objetivo actualizar los principios de la Carta de Venecia y adecuarla al nuevo marco cultural en el cual se revalorizan las identidades propias de cada sociedad dentro del concepto de universalidad del patrimonio.

En ella se realiza una clasificación del patrimonio construido de acuerdo a diferentes ámbitos de actuación:

- Patrimonio arqueológico.
- Edificios históricos y monumentos.
- Decoración arquitectónica, escultórica y elementos artísticos.
- Ciudades históricas y pueblos
- Paisajes culturales.

Reunión de Vantaa. Hacia una estrategia europea sobre conservación preventiva, 2000

Desarrollada dentro de las Estrategias de Conservación de la Unión Europea a través del Programa Raphael, ha supuesto un cambio conceptual importante en tanto que reconoce que la prevención es la vía más segura y sostenible para la protección del patrimonio. En esta resolución se hace mención expresa a la necesidad

de implantar medidas de conservación preventiva, incluyendo la creación de planes y equipos para hacer frente al deterioro del patrimonio.

Si bien su finalidad está encaminada a la conservación de obras de museos, casi todos sus principios son de aplicación al patrimonio arquitectónico.

Carta de Baños de la Encina para la conservación de la Arquitectura Defensiva. 2006

Como consecuencia de las Jornadas Técnicas sobre Castillos y Arquitectura Defensiva Española organizadas por el Instituto del Patrimonio Histórico Español se redactó la Carta de Baños de la Encina. En ella se procedió a la revisión metodológica respecto de los criterios, métodos y técnicas de conservación y restauración llevadas a cabo hasta ese momento. Estableciéndose recomendaciones sobre la actuación en procesos de restauración y conservación en estos Bienes.

Esta Carta ha supuesto un factor importante en cuanto al aumento de la inversión, la redacción de numerosos planes directores, y la inclusión de estudios previos más exhaustivos en los proyectos de restauración y conservación de la Arquitectura Defensiva. Sin embargo, de acuerdo a lo que indica el PNAD las medidas emprendidas siguen siendo insuficientes.

En este sentido, las medidas emprendidas por algunas administraciones locales en colaboración con otros organismos (Comunidades autónomas y Estado) no solo han permitido revitalizar el valor simbólico de estas construcciones sino fomentar la dinamización económica para sus municipios en base al aumento de la oferta cultural.

Nuevos tiempos – nuevos problemas. 2016

En la **reunión de la UNESCO** celebrada en diciembre 2016 se ha discutido sobre temas tan actuales como “la protección y la promoción de la diversidad de las expresiones culturales amenazadas por la globalización”,

generada a raíz de la *Era Digital*. Si bien es cierto que los contenidos digitales han permitido una democratización de la cultura (una parte importante de los habitantes del planeta pueden tener libre acceso “virtual” y “en tiempo real” al conocimiento del patrimonio), se plantea por el contrario, que esta globalización está poniendo en peligro la identidad cultural de los pueblos.

“el entorno digital ha transformado radicalmente la escena cultural mundial, perturbando los mecanismos de regulación y modificando el estatuto de los bienes y servicios culturales...”.

De igual manera se ha discutido sobre otros temas de índole técnica como la necesidad de normalizar y organizar el almacenamiento de la inmensa información de la que se dispone y debe ser registrada.

2.2.2 ORGANISMOS E INSTITUCIONES ENCARGADOS DE LA TUTELA Y PROTECCIÓN

Relacionados con la tutela del patrimonio, han surgido multitud de organismos e instituciones de diferentes ámbitos competenciales: gubernamentales e intergubernamentales como la UNESCO [44], ICCROM [45]; organizaciones profesionales como ICOMOS [46], CIPA [47] u organizaciones e instituciones privadas como Europa Nostra, Hispania Nostra, Asociación Española de

Amigos de la Castillos, etc...y que consideramos importante citar, de acuerdo con las funciones que desarrollan.

UNESCO: Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. Fue creada tras la Segunda Guerra Mundial, en el seno de las Naciones Unidas el 4 de noviembre de 1946 en París. Su ideario se inspira en los principios de la Declaración de los Derechos Humanos y sus principales objetivos son:

Impulsar el conocimiento, valoración y difusión del patrimonio mundial para favorecer el desarrollo sostenible de todos los pueblos, preservando y promoviendo su carácter diferenciador. Desarrolla una labor fundamental como impulsor de documentos jurídicos así como Convenciones y Recomendaciones. Realiza y ejecuta proyectos en colaboración con el ICCROM, ICOMOS y otros.

ICOMOS: es el Consejo Internacional de Monumentos y Sitios Histórico Artísticos. Se fundó en Cracovia en 1965 para difundir y promover la aplicación de la Carta de Venecia de 1964. Tiene su sede en París. Entre sus objetivos figura:

- Actuar como un foro internacional que ofrezca todo tipo de posibilidades para el diálogo y el intercambio a los profesionales de la conservación;
- Reunir, profundizar y difundir información sobre los principios, técnicas, legislación y políticas de conservación y salvaguarda;

⁴⁴ UNESCO Organización de las Naciones Unidas para la Educación la Ciencia y la Cultura. <http://es.unesco.org/themes/proteger-patrimonio-y-fomentar-creatividad>

⁴⁵ Centro Internacional de Estudios para la Conservación y la Restauración de los Bienes Culturales http://portal.unesco.org/culture/es/ev.php-URL_ID=8526&URL_DO=DO_TOPIC&URL_SECTION=201.html

⁴⁶ ICOMOS: Consejo Internacional de Monumentos y Sitios Histórico-Artísticos

⁴⁷ CIPA: Comité Internacional de fotogrametría Arquitectónica.

- Colaborar, en el ámbito nacional e internacional, a la creación de centros especializados de documentación;
- Fomentar la adopción y aplicación de las convenciones y recomendaciones internacionales relativas a la protección, conservación, realce y apreciación de los monumentos, los conjuntos y los sitios histórico-artísticos;
- Participar en la elaboración de programas de formación de especialistas en conservación;
- Poner su red de expertos al servicio de la comunidad internacional.

ICOM: es el Consejo Internacional de los Museos (1946). Organización profesional que tiene por objetivo el ayudar al progreso y desarrollo de los museos. Promueve reuniones sobre los problemas que afectan al patrimonio, difunde sus actividades a través de la revista y la web.

ICCROM [48]: (International Centre for the Study of the Preservation and Restoration of Cultural Property) Centro Internacional para la Conservación y Restauración de Bienes Culturales. Es un organismo que fue creado por la UNESCO en 1959 y que tiene su sede en Roma. Proporciona asesoría técnica a países y organizaciones para la conservación de bienes culturales protegidos y también la formación en técnicas y procedimientos de restauración

OCPM: es la Organización de Ciudades del Patrimonio Mundial, que se creó en Fez en 1993. Su objetivo fue desarrollar un espíritu de solidaridad y estrecha cooperación entre las ciudades patrimonio mundial. Su fun-

ción es facilitar el intercambio de conocimientos y técnicas para la protección de monumentos y yacimientos. Difunde su actividad mediante un boletín de divulgación Noticias de la OCPM.

CIPA: (Comité Internacional de Fotogrametría Arquitectónica) Es una organización internacional que aplica la tecnología de la medición, la visualización y la informática con objeto de registrar, conservar y documentar el patrimonio cultural. Tiene dos responsabilidades: mantenerse al día con la tecnología y asegurar su utilidad para la conservación, la educación y la difusión del patrimonio cultural.

El Comité del Patrimonio Mundial es el responsable de la Convención del Patrimonio Mundial y de decidir los bienes que pueden inscribirse en la Lista del Patrimonio Mundial. Examina los informes sobre el estado de los bienes incluidos en la lista; pide responsabilidades a los Estados Parte en caso de mala gestión y tiene encomendada la asignación de fondos con cargo al Fondo del Patrimonio Mundial.

El Consejo de Europa: fue creado en 1949 y tiene su sede en Estrasburgo. Es una organización intergubernamental destinada a la cooperación de las naciones de Europa bajo principios democráticos y está especialmente comprometida y sensibilizada con los aspectos culturales. Sus actividades y mecanismos de funcionamiento están regulados a través del Convenio Cultural Europeo de 1954. El Comité del Patrimonio Cultural es el organismo encargado de velar por la conservación del patrimonio y su integración. España forma parte de pleno derecho desde 1977. Promueve jornadas, seminarios; elabora recomendaciones y apoya a los museos.

48 ICCROM: Centro Internacional de Estudios para la Conservación y la Restauración de los Bienes Culturales <http://www.iccrom.org/>

Unión Europea: en el artículo 128 del Tratado de Maastricht (1992) se incluyó por primera vez el compromiso de la UE de contribuir al desarrollo de la cultura de los países miembros dentro del respeto a la diversidad regional y nacional, pero haciendo hincapié en la existencia de un patrimonio cultural europeo común a todos los países que integran la UE.

El ICBS: (Comité Internacional del Escudo Azul), es una organización de profesionales independientes dedicados a la protección y conservación del patrimonio cultural mundial amenazado por catástrofes naturales o por las guerras y entre sus objetivos está promover a los Estados miembros a que apliquen la Convención de la Haya.

La tutela del patrimonio cultural en nuestro país tiene una larga historia. En el siglo XVII, se crearon las Academias de Bellas Artes y de la Historia y en 1844 nacieron la Comisión Central de Monumentos y las Comisiones Provinciales. En 1900 se creó el Ministerio de Instrucción Pública y Bellas Artes. Ya en época reciente, en 1977, se creó el Ministerio de Cultura, del que depende la Dirección General de Bellas Artes y Restauración de Bienes Culturales. A esta Dirección General está vinculado desde 1985 el Instituto de Conservación y Restauración de Bienes Culturales, cuyas funciones fueron asumidas a partir de 1996 por el Instituto del Patrimonio Histórico Español (IPHE) y la Subdirección General de Protección del Patrimonio Histórico.

La conservación y restauración del patrimonial constituye una de las principales funciones del IPCE (Instituto del Patrimonio Cultural de España). Dicha función se materializa en la ejecución de numerosos proyectos de intervención en bienes culturales, tanto muebles como inmuebles.

Por otro lado, las Comunidades Autonómicas, en virtud de las competencias cedidas por el Estado disponen de

organismos e instituciones encargadas de la tutela del patrimonio cultural. Es el caso del IAPH (Instituto Andaluz de Patrimonio Histórico) en Andalucía; el Centro de Conservación y Restauración de Bienes Culturales de Castilla-León; o el Centro del Patrimonio Cultural Vasco, Instituto de Conservación y Restauración de Bienes Culturales de la Xunta de Galicia, etc.

Por último, las Universidades tienen un compromiso social inexcusable en la tutela del patrimonio, tanto en la sensibilización y formación de alumnos y profesionales especializados, como en la investigación y difusión de resultados, aportando nuevos datos y un mejor conocimiento de los elementos que los forman. La capacitación de los profesores e investigadores debe ser referente obligado en cualquier actuación sobre patrimonio.

2.2.3 CONTEXTO NORMATIVO Y LEGAL

Será a partir del siglo XX, fundamentalmente tras la segunda Guerra Mundial, cuando surgirán las primeras normativas que busquen articular los instrumentos jurídicos para la preservación de nuestro patrimonio. Los principios y buenas prácticas propuestos y acordados por los especialistas, instituciones y los Estados en las diferentes Cartas y convenciones deben finalmente ser regulados de acuerdo a la legislación de cada país.

Normativa reguladora para la protección de Bienes Culturales de ámbito Europeo.

Desde la creación de la Unión Europea se han desarrollado un amplio número de regulaciones y recomendaciones relacionadas con la protección y salvaguarda del patrimonio a través de directivas, resoluciones y documentos de análisis, instando a los Estados miembros a establecer regulaciones legales para instrumentarlas. Los artículos 30 y 151, del tratado Constitutivo de la Comunidad Económica Europea, se articulan como la

base de las normas comunitarias en materia de patrimonio. Del mismo modo, en el artículo 128 del tratado de Maastricht se pone de manifiesto la necesidad de crear una normativa relativa al patrimonio dentro de la Unión Europea.

La estructura descentralizada de la UE hace que sea cada Estado, Comunidad Autónoma o Administración local la encargada de legislar o reglamentar medidas de protección y salvaguarda el Patrimonio de acuerdo a las directivas establecidas.

En lo relativo a la Conservación del Patrimonio Arquitectónico Europeo, la Asamblea del Consejo de Europa propone en la *Recomendación 880* de 1979, que debido a la insuficiencia de medios de los Poderes públicos para el mantenimiento de los bienes patrimoniales, cree conveniente la necesidad de llevar a cabo una política de desgravaciones fiscales y ayudas financieras, tanto a las autoridades locales, a los propietarios y a los donantes de fondos para la conservación arquitectónica.

Normativa reguladora para la protección de Bienes Culturales de ámbito Español

Los Bienes culturales de España cuentan con la salvaguarda de las legislaciones española e internacional. La legislación en España con respecto a la protección y conservación del patrimonio responde a tres grandes escalas similar a la organización territorial del Estado [49]: Legislación Estatal (leyes estatales, Ministerio de Cultura), Legislación Autonómica (leyes autonómicas), Reglamentación municipal (Planes especiales, normativa urbanística).

49 Plan nacional de emergencias y gestión de riesgos en patrimonio cultural [http://www.mecd.gob.es/planes-na-](http://www.mecd.gob.es/planes-nacionales/dms/microsites/cultura/patrimonio/planes-nacionales/textos-planes-nacionales/13-maquetado-emergencias.pdf)

A partir del año 1900 todas las competencias sobre protección del patrimonio en España recaían sobre la Dirección General de Bellas Artes. No será hasta la aprobación de la Carta de Atenas, cuando se establece que la responsabilidad de la conservación del patrimonio recaerá en los respectivos Estados. De esta forma el Estado español asumía la responsabilidad de protección y administración del patrimonio, redactando para ello la Ley de Patrimonio Histórico-Artístico Nacional, de 13 de mayo de 1933, que estaría vigente hasta 1985.

La Constitución Española de 1978 incorporó como obligación del Estado la protección del patrimonio, transfiriendo a las Comunidades Autónomas, en virtud del Artículo 148, ciertas competencias en esta materia. Cada Comunidad, a través de sus Estatutos ha redactado su propia legislación sobre protección de Patrimonio Histórico siendo función del Ministerio coordinar y colaborar en la realización de algunos proyectos e intervenciones.

La Constitución Española en su artículo 44 establece la obligación de los poderes públicos de

“promover y tutelar el acceso a la cultura, a la que considera un derecho universal y en cuyo concepto incluye cualquier manifestación del patrimonio artístico, lingüístico, religioso y educativo que se concreta en objetos muebles o inmuebles, definición coherente con la actual extensión del concepto de patrimonio cultural que ya incorpora el patrimonio inmaterial o intangible.”

[cionales/dms/microsites/cultura/patrimonio/planes-nacionales/textos-planes-nacionales/13-maquetado-emergencias.pdf](http://www.mecd.gob.es/planes-nacionales/dms/microsites/cultura/patrimonio/planes-nacionales/textos-planes-nacionales/13-maquetado-emergencias.pdf)

Igualmente, la carta Marga en el artículo 46, que dará lugar al fundamento jurídico de la Ley 16/1985, dispone

“la obligatoriedad de todos los poderes públicos de garantizar la conservación y promover el enriquecimiento del patrimonio histórico, cultural y artístico de los pueblos de España, y de los bienes que lo integran, cualquiera que sea su régimen jurídico y su titularidad.”

La Ley 16/1985 del Patrimonio Histórico Español consiguió agrupar en un solo texto la normativa dispersa que existía, estableciendo un reparto de competencias entre el Estado y las Comunidades Autónomas. En ella se regulan, definen e identifican las obligaciones y competencias sobre el patrimonio histórico español y su protección, obligando a los poderes públicos a proteger y difundir el patrimonio cultural:

“La protección y el enriquecimiento de los bienes que lo integran constituyen obligaciones fundamentales que vinculan a todos los poderes públicos...”

De este modo, la ley establece diferentes categorías de bienes con diferentes competencias administrativas y desiguales beneficios económicos: a) Bienes integrantes del Patrimonio Español sin declaración; b) Bienes inventariados y c) bienes declarados de interés cultural (BIC). Estos últimos gozarán de especial protección de acuerdo a LPHE.

En esta Ley se incluyen por primera vez el concepto de “entorno de protección” como elemento intrínseco al propio Bien y al que debe ser proteger, sin entrar en detalle sobre su ámbito de aplicación y características.

Además, al objeto de dar cuerpo a esta interrelación administrativa, establece la necesidad de realizar Planes Nacionales de protección de los Bienes Culturales siendo el Consejo de Patrimonio Histórico Español el encargado de elaborar dichos planes. De esta forma, en su artículo 35 establece:

“para la protección de los bienes integrantes del Patrimonio Histórico Español y al objeto de facilitar el acceso de los ciudadanos a los mismos, fomentar la comunicación entre los diferentes servicios y promover la información necesaria para el desarrollo de la investigación científica y técnica se formularán periódicamente Planes Nacionales de Información sobre el Patrimonio Histórico Español”,

De igual modo, en el Real Decreto 565, de 24 de abril de 1985, se crea el Instituto de Conservación y Restauración de Bienes Culturales, entre cuyos fines se incluye *“la elaboración de planes para la conservación y restauración del Patrimonio Histórico Español”* [50]

La LPHE regulará administrativamente los procedimientos, unificando los modelos de inscripción en registros e inventarios, y estableciendo la información mínima que deben contener. Incide en la obligación del Estado de inventariar todos los bienes culturales que conforman el patrimonio con el fin de conocerlos y protegerlos [51]. Los bienes incluidos en el Inventario General son aquellos que, según dice la ley, integran el patrimonio histórico español sin ser declarados Bienes de Interés Cultural, pero con una singular relevancia, por ser de *notable valor histórico, arqueológico, científico, artístico, técnico o cultural*.

50 Real Decreto 565, de 24 de abril de 1985 aprobado en el BOE núm. 103, de 30 de abril de 1985, páginas 11986 a 11994

<https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-1985-7398>

51 Este inventario se puede consultar en las bases de datos que figuran en la página web del Ministerio de Educación, Ciencia y Deporte:

<http://www.mcu.es/patrimonio/CE/BienesCulturales.html>

Del mismo modo, mediante Reales Decretos [52], (como el R.D 496/1987) y Reglamentos se establecen las responsabilidades y funciones de preservación, conservación y seguridad del patrimonio nacional, estableciendo las competencias de estas funciones para los órganos de dirección, conservación, investigación y administración.

Normativa reguladora para la protección de Bienes Culturales en el ámbito de las Comunidades Autónomas

Las Comunidades Autónomas regulan su patrimonio cultural a través de leyes y decretos, siendo gestionado a través de sus Consejerías y Direcciones Generales, e incidiendo de manera importante en la elaboración de las directrices para la realización Planes especiales de Patrimonio, evaluando las necesidades y programando actuaciones para la conservación y la protección de los bienes integrantes de su respectivo patrimonio. Igualmente es importante la coordinación entre la Leyes de protección del patrimonio con otras de régimen local, turismo, medio ambiente y, muy especialmente, las referentes a urbanismo y ordenación del territorio.

La Comunidad Autónoma de Andalucía cuenta con un ordenamiento jurídico propio para la protección del Patrimonio Histórico, la Ley 14/2007 de Patrimonio Histórico de Andalucía.

De acuerdo al artículo 3º, corresponde a la Comunidad Autónoma de Andalucía la competencia exclusiva sobre el Patrimonio Histórico Andaluz, sin perjuicio de las

competencias que correspondan al Estado o estén atribuidas a las entidades locales. Toda actuación sobre el patrimonio autonómico necesita de una autorización previa de la Consejería de Cultura.

Para la correcta articulación de estos cometidos se precisará la elaboración de catálogos e inventarios [53] de bienes, así como regulación de los procedimientos, obligaciones y protección especial de aquellos bienes declarados BIC (bienes de interés cultural). En el artículo 13 de la LPHA se establece la obligatoriedad de que el inventario sea público y regulado [54].

En Andalucía, al igual que en el resto del Estado, todos los bienes pertenecientes a la arquitectura defensiva cuentan con protección jurídica. De los seiscientos ochenta y tres castillos registrados en Andalucía (Almería 79, Cádiz 69, Córdoba 161, Granada 64, Huelva 29, Jaén 85, Málaga 112 y Sevilla 84), sólo una minoría cuenta con expediente individual, estando la mayoría protegidos por el decreto específico de 22 de abril de 1949 sobre protección de los castillos españoles.

52 El Real Decreto 496/1987 por el que se instrumenta el Reglamento previsto en la ley define la competencia del Consejo de Administración para la defensa, la protección y la conservación del Patrimonio Nacional, y la obligación de entidades privadas o públicas que tengan a su cargo el depósito o la explotación, de velar por su integridad.

53 Artc. 14,15 y 16 de la Ley 4/1986 de Patrimonio de la Comunidad Autónoma de Andalucía.

54 Bases de datos del inventario del Patrimonio inmobiliario de la Comunidad de Andalucía.
<http://www.juntadeandalucia.es/cultura/iaph/bdi/>

Administraciones Locales

El marco jurídico de los Ayuntamientos y entidades locales está sustentado en la Ley 7/1985 de 2 de abril reguladora de las Bases del Régimen Local. En el artículo 25 del punto 2, apartado a) se establece:

*“El Municipio ejercerá en todo caso como competencias propias, en los términos de la legislación del Estado y de las Comunidades Autónomas, en las siguientes materias. Urbanismo: planeamiento, gestión, ejecución y disciplina urbanística. **Protección y gestión del Patrimonio histórico.** Promoción y gestión de la vivienda de protección pública con criterios de sostenibilidad financiera. **Conservación y rehabilitación de la edificación**”.*

De acuerdo a la Ley 14/2007 de Patrimonio Histórico de Andalucía, en su artículo 4, apartado 2 se establece que:

“corresponde a los municipios la misión de colaborar activamente en la protección y conservación de los bienes integrantes del Patrimonio Histórico Andaluz que radiquen en su término municipal, en especial a través de la ordenación urbanística, así como realzar y dar a conocer el valor cultural de los mismos.”

*Asimismo podrán adoptar, en caso de urgencia, las medidas cautelares necesarias para **salvaguardar los bienes del Patrimonio Histórico Andaluz cuyo interés se encontrase amenazado**, sin perjuicio de cualquier otra función que legalmente tengan encomendada.*

Pero, tal y como indica Mejías López [55], existe una gran descoordinación entre la administración local y el

resto de administraciones, debido, fundamentalmente, a la falta de medios humanos y la inexistencia de un departamento de gestión específico de patrimonio histórico, quedando estas delegadas a la concejalías de cultura o urbanismos, carentes, en la mayoría de los casos, de presupuesto para la conservación.

Ante esta falta de recursos por parte de la administración y al objeto de fomentar la conservación de patrimonio arquitectónico público o privado, la convención de Granada de 1985 o la carta de Quito de 1967 hace un llamamiento a las administraciones para que favorezcan, mediante medidas fiscales la participación del ámbito privado en la preservación de los conjuntos históricos *“...estimular la iniciativa privada mediante la implantación de un régimen de exención fiscal en los edificios que se restauren con capital particular..... por motivos de utilidad pública”*

Normativa específica de aplicación para la Arquitectura Defensiva

La primera norma de gran importancia para la protección de los castillos en España tiene lugar con la aprobación del *“Decreto sobre protección de los Castillos españoles”* [56] de 22 de abril de 1949, en la que todos los castillos quedaron bajo la protección del Estado.

- *Artículo primero - **Todos los castillos de España**, cualquiera que sea su estado de ruina, **quedan bajo la protección del Estado**, que impedirá toda intervención que altere su carácter o pueda provocar su derribamiento.*

55 MEJIAS LÓPEZ, J. (2008). *Estructuras y principios de gestión del patrimonio cultural municipal*. Trea.

56 Decreto de 22 de abril de 1949. Anexo 2 del Plan Nacional de Arquitectura defensiva.

[http://www.mecd.gob.es/planes-nacionales/dms/microsites/cultura/patrimonio/planes-nacionales/planes/arquitectura-](http://www.mecd.gob.es/planes-nacionales/dms/microsites/cultura/patrimonio/planes-nacionales/planes/arquitectura-defensiva/documentos-de-referencia/decreto-de-22-de-abril-de-1949-sobre-proteccion-de-los-castillos-espa-oles/decreto-de-22-de-abril-de-1949-sobre-proteccion-de-los-castillos-espa%3%b1oles.pdf)

[defensiva/documentos-de-referencia/decreto-de-22-de-abril-de-1949-sobre-proteccion-de-los-castillos-espa-oles/decreto-de-22-de-abril-de-1949-sobre-proteccion-de-los-castillos-espa%3%b1oles.pdf](http://www.mecd.gob.es/planes-nacionales/dms/microsites/cultura/patrimonio/planes-nacionales/planes/arquitectura-defensiva/documentos-de-referencia/decreto-de-22-de-abril-de-1949-sobre-proteccion-de-los-castillos-espa-oles/decreto-de-22-de-abril-de-1949-sobre-proteccion-de-los-castillos-espa%3%b1oles.pdf)

- *Artículo segundo - Los Ayuntamientos en cuyo término municipal se conserven estos edificios son responsables de todo daño que pudiera sobrevenirles.*
- *Artículo tercero - Para atender a la vigilancia y conservación de los castillos españoles se asignará un Arquitecto Conservador con las mismas atribuciones y categoría de los actuales Arquitectos de Zona del Patrimonio Artístico Nacional.*
- *Artículo cuarto - La Dirección General de Bellas Artes, por medio de sus organismos técnicos, procederá a redactar un inventario documental y gráfico, lo más detallado posible de los castillos existentes en España.*

El estado de abandono en el que se encontraba este patrimonio dio lugar una mayor protección, elevando a la categoría de Bien de Interés Cultural, a todos los castillos de España (disposición adicional segunda de la ley de Patrimonio Histórico Español (16/1985). Posteriormente, en el año 1998 y en cumplimiento de la normativa vigente, la Dirección General de Bellas Artes encargó la realización de un inventario de castillos y estructuras de carácter defensivo.

2.3 LA NECESIDAD PROTEGER Y CONSERVAR EL PATRIMONIO

La conservación del patrimonio es el conjunto de procesos y actividades que se encargan de tutelar y preservar los bienes cuyos significados constituyen el legado cultural de los pueblos que les dieron origen [57]

57 MANZINI, Lorena. (2011) El significado cultural del patrimonio. *Estudios del patrimonio cultural*, no 6, p. 27-42.
58 GARCÍA CUETOS, María Pilar. Humilde condición. El patrimonio cultural y la conservación de su autenticidad. Trea, 2009.

El patrimonio arquitectónico posee valores artísticos, históricos, documentales, técnicos, simbólicos, que son irremplazables. Su abandono o deterioro ponen en peligro no solo los elementos materiales, sino también la subsistencia de todos estos valores.

De igual modo, la preservación de su autenticidad se muestra como un criterio fundamental para poder interpretar y conservar estos valores, insustituibles por nuevas construcciones.

“Salvaguardar la autenticidad de la herencia arquitectónica supone legar a las generaciones futuras una parte fundamental de nuestra memoria [58].

El patrimonio nos transmite experiencias del pasado y de ellas debemos aprender y mejorar. Según Juan Monterroso [59], la conservación del patrimonio (cultural, histórico, artístico, etnográfico, etc.), es fundamentalmente un acto cultural, realizado consciente y voluntariamente por el hombre para preservar un legado que ha sobrevivido al paso del tiempo.

Por diferentes circunstancias históricas, el conjunto de bienes de interés cultural han sido poco atendidos o incluso abandonados o agredidos. La preocupante situación de degradación en la que se encuentran estos bienes, requiere, entre otros, la adopción de medidas adecuadas de índole técnica, administrativa y económica para su correcta protección y conservación [60]

En este sentido nos proponemos, desde nuestra faceta como investigadores, ayudar a proteger estos bienes mediante una completa documentación gráfica e histórica.

59 MONTERROSO MONTERO J.M. (2001) Protección y conservación del Patrimonio. Principios Teóricos. Tórculo. Santiago de Compostela, 2001.

60 Carta de Baños de la Encina. <http://ipce.mcu.es/pdfs/BaniosEncina.pdf>

La alteración o deterioro es una condición intrínseca de los materiales, que les hacen perder determinadas cualidades, como resistencia, durabilidad, apariencia, belleza, etc. Es nuestra responsabilidad proteger y conservar el patrimonio para evitar, en la medida de nuestras posibilidades, que este deterioro o destrucción se siga produciendo.

Por lo general, el deterioro de los materiales se manifiesta a través de síntomas (grietas, humedades, desplomes, desprendimientos, etc.), provocados por alguna causa (asientos del terreno, filtración de aguas, contaminación, agresiones, etc.). Nuestra labor, nada fácil, consiste en identificar los síntomas para averiguar la causa que los provoca, necesitando la intervención de diferentes especialistas para este diagnóstico.

La distinta problemática que puede afectar a nuestro patrimonio cultural, abarca una amplia tipología, atendiendo a su origen, naturaleza y extensión. Los daños en los bienes culturales pueden ser clasificados en cuatro categorías: daños físicos, daños químicos, biodeterioro y alteración de la información. A su vez, los riesgos pueden ser clasificados en dos categorías en función de las causas que los originan: causas naturales (meteorológicos, climatológicos y geológicos) o causas antrópicas: como descuidos y/o negligencias (mala gestión, deficiencia y/o falta de mantenimiento), o intencionados (sabotaje, vandalismo, terrorismo y situaciones bélicas).

En la siguiente tabla, elaborada por el Ministerio de Educación, Cultura y Deporte [61], se muestran los tipos de riesgos así como los efectos que pueden causar.

61 BOE. Donde se publica la tabla de riesgos de origen natural y antrópico

<https://www.boe.es/boe/dias/2013/12/17/pdfs/BOE-A-2013-13163.pdf>

Origen	Riesgos	Efectos
NATURAL (Geológica y geomorfológica, meteorológica y climatológica)	Terremotos	<ul style="list-style-type: none"> • Deslizamientos de tierras. • Desplomes
	Subsidencia Deslizamientos de tierra	<ul style="list-style-type: none"> • Inundaciones • Incendio • Daños en estructuras
	Volcanes	<ul style="list-style-type: none"> • Daños por fuerzas físicas y por flujos piroclásticos • Lluvia de cenizas, colapso de estructuras... • Nubes de gases tóxicos, nubes ardientes... • Afectación al edificio y posible colapso de los equipos técnicos • Daños movimientos y deformaciones del terreno y coladas de lava • Incendios
	Maremotos	<ul style="list-style-type: none"> • Daños en la estructura e instalaciones del edificio
	Huracanes	<ul style="list-style-type: none"> • Inundaciones de agua y lodo y otros elementos
	Inundaciones	<ul style="list-style-type: none"> • Biodeterioro en colecciones
	Tornados	<ul style="list-style-type: none"> • Dificultad de circulación. Colapso de equipos informáticos
	Nieve/hielo/lluvia	<ul style="list-style-type: none"> • Daños y destrucción de elementos como puentes, bienes arqueológicos y culturales...
	Incendios	<ul style="list-style-type: none"> • Daños en la estructura del edificio • Pérdida total o parcial de bienes culturales • Destrucción total o parcial de documentos • Dificultad de circulación • Destrucción de equipos informáticos • Afección a paisajes culturales
	ANTRÓPICO: accidental y provocado	Negligencia
Errores técnicos		<ul style="list-style-type: none"> • Sobrecarga en la red
Falta de mantenimiento		<ul style="list-style-type: none"> • Incendios
Averías		<ul style="list-style-type: none"> • Desplome de sistemas de almacenaje • Filtraciones • Pequeñas inundaciones • Daños en colecciones • Crecimiento de vegetación
Bélicos		<ul style="list-style-type: none"> • Destrucción intencional del bien cultural o de los equipos
Sabotajes		<ul style="list-style-type: none"> • Daños en la estructura del edificio
Vandalismo		<ul style="list-style-type: none"> • Daños selectivos en colecciones
Terrorismo		<ul style="list-style-type: none"> • Daños indiscriminados en las colecciones
Psicopáticos		<ul style="list-style-type: none"> • Robo de bienes

Tabla de riesgos de origen natural o antrópico elaborado por el Ministerio de Educación, Cultura y Deporte.

Ante la elevada situación de riesgos y daños a la que está sometido el patrimonio se han creado los planes nacionales y autonómicos de protección, siendo un instrumento de gestión para prevenir, en la medida de lo posible, estos efectos.

La necesidad de proteger y conservar nuestro patrimonio requiere, entre otros, recuperar espacios con historia, dar valor a lo que en ellos se quiere ubicar, facilitar su uso, evitar riesgos a la población, resaltar, recuperar el valor de la ruina y recuperar la historia que encierran o dinamizar cultural y económicamente la zona donde se ubican

2.4 CRITERIOS GENERALES DE INTERVENCIÓN SOBRE EL PATRIMONIO

El Patrimonio cultural es muy variado y complejo y por tanto es imposible definir unos criterios que sean de aplicación a cualquier tipo de Bien, incluso siendo estos de la misma tipología. Como indica Camila Mileto *“cada edificio representa un caso completamente singular y absolutamente diferente de todos los demás”* [62]. Pero esta singularidad no implica que haya que trabajar de manera diferente e improvisada de unos edificios a otros, por el contrario la intervención sobre un Bien se basará en la adaptación de una metodología o criterios generales a ese caso específico. **En cualquier caso, las actuaciones a desarrollar vendrán marcadas a partir del Conocimiento integral específico del Bien que se pretende proteger.** Por tanto, el primer y más impor-

tante criterio de protección y salvaguarda del patrimonio es el **conocimiento científico** del Bien que se pretende conservar.

En la intervención sobre el patrimonio arquitectónico o arqueológico no solo habrá que analizar su materialidad sino también sus valores culturales y significados. Por ello, la formación de los especialistas en conservación debe ser interdisciplinar e incluir un estudio preciso de la Historia de la Arquitectura y las teorías y técnicas de conservación, así como las tecnologías y técnicas de documentación.

“El valor de un edificio histórico no reside sólo en la apariencia de sus elementos individuales, sino también en la integridad de todos sus componentes, considerados como un producto único de la tecnología constructiva específica de su tiempo y lugar” [63]

De acuerdo a la *Carta de Cracovia*, cualquier intervención de reparación, restauración o rehabilitación sobre el patrimonio implica decisiones y responsabilidades, también en aquellas partes que no tienen un significado específico hoy, pero podrían tenerlo en el futuro. Los criterios de intervención, ya sea restauración o conservación, deben estar basados en una investigación profunda del objeto patrimonial que garantice su reversibilidad [64]

Del mismo modo, de acuerdo a las recomendaciones establecidas por la *Carta de Baños de la Encina*, la base imprescindible de cualquier intervención será **“el adecuado y riguroso conocimiento del Bien Patrimonial”**, especificando que no solo es importante conocer el “mo-

62 MILETO, C; VEGAS, F. El análisis estratigráfico constructivo como estudio previo al proyecto de restauración arquitectónica: metodología y aplicación. *Arqueología de la Arquitectura*, 2003, no 2, p. 189-196.

63 ICOMOS (2004) Recomendaciones para el análisis, conservación y restauración estructural del patrimonio arquitectónico.

64 Carta de Cracovia año 2000.

http://ipce.mcu.es/pdfs/2000_Carta_Cracovia.pdf

numento” sino el también “entorno” donde se inscribe. En su metodología propone los siguientes puntos generales:

- Como punto de partida de debe realizar un *“inventario georreferenciado que identifique, describa y valore, cuáles, cuántos y en qué estado se encuentran los elementos que lo constituyen”*.
- Del mismo modo, se propone que *“previa a cualquier intervención es necesaria la adquisición del mayor conocimiento posible sobre el monumento y su entorno mediante la elaboración de los siguientes estudios: análisis histórico, arqueológico, artístico y documental; análisis de su función histórico.; análisis territorial y del paisaje.; análisis material (definición geométrica, estudio del entorno, definición constructiva y estructural, estado de lesiones, caracterización de materiales que lo componen y sustentan etc.); Análisis jurídico y de normativas.; Análisis económico sobre la viabilidad de la intervención.*
- Posteriormente, propone realizar una síntesis y evaluación de toda la información adquirida así como *establecer una hipótesis para su conservación, mantenimiento, gestión y puesta en valor.*
- En este tipo de intervenciones deberán estar controladas y documentadas por parte de todas las Administraciones implicadas.
- Se establecerá un programa de conservación preventiva y mantenimiento de las intervenciones.

Para que todas estas acciones de protección del patrimonio se realicen de forma ordenada y coordinada, surgen los Planes Nacionales y Autonómicos de Protección del Patrimonio [65]. Entre sus criterios generales de intervención se establece:

- El incremento del conocimiento histórico, arqueológico, artístico o antropológico aplicado a la conservación, obtenido éste a través de programas y proyectos de investigación interdisciplinares.
- La mejora de las condiciones de conservación mediante La identificación de los materiales y la diagnosis sobre el estado de conservación y los factores que influyen en su degradación, así como la propuesta de nuevos materiales y técnicas para su restauración y protección
- Diseño de sistemas adecuados de difusión.
- Unificación de criterios de aplicación y protocolos, estableciendo metodologías de trabajo encaminadas al análisis de riesgos y conservación preventiva, tanto de los materiales como del inmueble.

Entre las acciones a llevar a cabo destacamos, de acuerdo al objetivo de la tesis, la investigación en tecnologías de la imagen y del estudio de los materiales constructivos y sus técnicas de ejecución:

“Se realizará una mejora e innovación en nuevas tecnologías de documentación científica e imagen como reflectografía, termografía, fotogrametría, radiografía, técnicas multiespectrales, microscopías de superficies, etc., que amplíen sus posibilidades de aplicación en bienes culturales, ofrezcan resultados de mejor calidad y permitan la evaluación y seguimiento de los procesos de cambio y captura de información relevante mediante la aplicación y el desarrollo de nuevas tecnologías de documentación”.

“Estudio de los procesos técnicos y materiales de ejecución de los bienes culturales tangibles a partir de las

65 Planes Nacionales de Protección del Patrimonio.
<http://www.mecd.gob.es/planes-nacionales/planes.html>

distintas fuentes de información partiendo de la observación directa, los estudios de los materiales constitutivos de los bienes culturales y de las técnicas de ejecución por medio de métodos instrumentales y de estudios físicos.”

“Estudio histórico-documental de los procesos ejecutivos, materiales y contextos de producción artística y tecnológica.”

De igual manera considera importante la **transferencia de estos conocimientos** tanto a nivel de divulgativo (centros educativos, medios de comunicación, web, etc.), como entre investigadores y profesionales dedicados a la conservación.

Entre las responsabilidades del Instituto del Patrimonio Cultural de España (IPCE) está:

- La elaboración y ejecución de planes para la conservación y restauración del Patrimonio Cultural Español.
- El estudio de métodos y técnicas actualizadas para la restauración y conservación del mismo.
- El archivo, tratamiento técnico y difusión de la documentación disponible acerca de ese patrimonio y de la referida a los proyectos, intervenciones y trabajos realizados en cada caso concreto.
- La difusión e intercambio con organismos internacionales.
- La formación de técnicos que atiendan a los fines del Instituto.
- Propuesta de celebración de convenios con otras Administraciones públicas y entidades públicas o privadas para la conservación del patrimonio.

De igual manera, la Ley de Patrimonio Histórico Andaluz establece en su artículo 20 los siguientes criterios de conservación.

La realización de intervenciones sobre bienes inscritos en el Catálogo General del Patrimonio Histórico Andaluz procurará por todos los medios de la ciencia y de la técnica su conservación, restauración y rehabilitación.

*Las restauraciones respetarán las aportaciones de todas las épocas existentes, así como las pátinas, que constituyan un valor propio del bien. La eliminación de alguna de ellas sólo se autorizará, en su caso, y siempre que quede fundamentado que los elementos que traten de suprimirse no supongan una degradación del bien y su eliminación fuese necesaria para permitir la adecuada conservación del bien y una mejor interpretación histórica y cultural del mismo. **Las partes suprimidas quedarán debidamente documentadas.***

*Los materiales empleados en la conservación, restauración y rehabilitación **deberán ser compatibles con los del bien.** En su elección se seguirán criterios de reversibilidad, debiendo ofrecer comportamientos y resultados suficientemente contrastados. Los métodos constructivos y los materiales a utilizar **deberán ser compatibles con la tradición constructiva del bien.***

*En el caso de bienes inmuebles, **se evitarán los intentos de reconstrucción**, salvo cuando en su reposición se utilicen algunas partes originales de los mismos o **se cuente con la precisa información documental y pueda probarse su autenticidad.** Si se añadiesen materiales o partes indispensables, las adiciones deberán ser reconocibles y evitar las confusiones miméticas.*

En el artículo 22 de la citada Ley de Patrimonio Histórico, se establecen los requisitos fundamentales que deben cumplir los proyectos de conservación:

*Los proyectos de conservación, responderán a **criterios multidisciplinares**, se ajustarán al contenido que reglamentariamente se determine, **incluyendo, como mínimo, el estudio del bien y sus valores culturales, la***

diagnos de su estado, la descripción de la metodología a utilizar, la propuesta de actuación desde el punto de vista teórico, técnico y económico y la incidencia sobre los valores protegidos, así como un programa de mantenimiento.

De acuerdo a las premisas establecidas en la Carta del relieve arquitettonico [66] o Carta del Levantamiento [67] [68]

“El primer nivel de salvaguarda es, obviamente, el conocimiento; conocer quiere decir, de alguna manera y en todo caso, documentar. La documentación constituye un soporte indispensable para la tutela del patrimonio cultural”.

Las peculiaridades que ofrece el patrimonio arquitectónico y arqueológico hacen necesario formular unas recomendaciones que garanticen la aplicación de unos métodos racionales de análisis y restauración, adecuados a cada contexto cultural y que requieren que los estudios y propuestas se organicen en fases sucesivas y bien definidas y que se concretan en: 1.-unos principios para la investigación y diagnóstico y 2.- medidas correctoras y de control [69]

Recomendaciones para la Investigación y Diagnosis

Conocer un edificio o yacimiento precisa información sobre su concepción, sobre las técnicas que se usaron en su construcción, los procesos de daño y deterioro y

66 Carta del relieve arquitettonico http://www.rilievourbano.org/immagini/didattica/corso_rilievo/Carta_del_rilievo.pdf

- ALMAGRO GORBEA, A, et al. (1999) Verso la " Carta del Rilievo Architettonico": testo di base per la definizione dei temi.

67ALMAGRO GORBEA, A (2004). Levantamiento arquitectónico. Universidad de Granada.

68 JIMÉNEZ MARTÍN, Alfonso; PINTO PUERTO, Francisco. Levantamiento y análisis de edificios. Tradición y

las alteraciones que le han afectado y, finalmente, sobre su estado actual. Este conocimiento requiere la recopilación y composición de tres tipos de datos: cualitativos, históricos y cuantitativos y que podemos sintetizar en:

- Definición, descripción y comprensión de la importancia histórica y cultural del edificio o yacimiento.
- Descripción de los materiales y las técnicas constructivas originales.
- Investigación histórica que abarque la vida completa del bien y que incluya tanto las modificaciones de su forma como cualquier intervención anterior.
- Descripción del estado actual que incluya identificación de daños, deterioro y posibles fenómenos progresivos, utilizando los ensayos adecuados.

El análisis histórico consiste en entender la concepción e importancia del edificio a lo largo de su existencia, así como el por qué de los materiales y técnicas utilizadas en su construcción, los cambios que se hayan producido tanto en la estructura como en su entorno y finalmente los sucesos que puedan haber causado algún daño. Los documentos usados para ello deben quedar adecuadamente registrados, valorando las fuentes en cuanto a su fiabilidad como medio para reconstruir su Historia.

- Se deberá realizar un análisis visual inicial de forma conjunta por el equipo multidisciplinar encargado

Futuro, Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla. IUCC, Sevilla, 2003.

69 ICOMOS (2003) Principios para el análisis, conservación y restauración de estructuras del patrimonio arquitectónico https://www.icomos.org/images/DOCUMENTS/Charters/structures_sp.pdf

- de la investigación o intervención y que permita enfocar adecuadamente las investigaciones posteriores.
- **Se realizará un levantamiento de planos del estado actual donde poder recoger la información necesaria para una mejor interpretación.** Se deben localizar los diferentes tipos de materiales, consignando su deterioro e irregularidades, así como los daños, poniendo particular atención en las fisuras y en las deformaciones. Debe tenerse en cuenta que las irregularidades geométricas pueden ser resultado de deformaciones previas, pero también pueden indicar una coincidencia entre distintas fases constructivas o modificaciones de las fábricas.
 - Se realizará un reconocimiento preliminar de deterioros y daños en el edificio (dirección de las fisuras, pérdidas de material, eflorescencias, etc..) así como las condiciones del terreno que pueden indicar las causas del daño. Estas observaciones pueden completarse con información obtenida mediante ensayos específicos a ser posible “no destructivos” o en su defecto intrusivo (catas), teniendo en cuenta el valor cultural que se pueda perder.
 - Por otro lado, el **diagnóstico** consiste en identificar las causas del daño, deterioro, modificación de un edificio basándose en los datos obtenidos a partir de los tres análisis descritos anteriormente: La conjunción de todos estos datos históricos, cualitativos y cuantitativos requieren grandes dotes de intuición y experiencia por parte de los investigadores.
- Para la correcta consecución de estos fines se debería cumplir que:
- El equipo pluridisciplinario trabaje conjuntamente desde las primeras fases del proyecto, así como en el examen inicial del lugar y en la preparación del programa de investigación.
 - La práctica de la conservación requiere un conocimiento exhaustivo de las características de la estructura y los materiales. Es fundamental disponer de información sobre la estructura en su estado actual, para a partir del análisis arqueológico determinar el estado original y las diferentes fases y técnicas que se emplearon en la construcción, indicando los motivos y efectos producidos.
 - En los lugares con vestigios arqueológicos soterrados pueden plantearse problemas específicos, dado que las estructuras deben estabilizarse al mismo tiempo que se realiza la excavación. Los comportamientos estructurales en una construcción puesta al descubierto por este tipo de obras pueden ser completamente diferentes a los de otra que se ha mantenido oculta. La soluciones urgentes que sea preciso adoptar para estabilizar una estructura a medida que se procede a su excavación, no deberán poner en peligro el significado integral de la edificación, tanto por lo que se refiere a su forma como a su uso.
 - El diagnóstico debe apoyarse en métodos de investigación histórica de carácter cualitativo y cuantitativo; los primeros, han de basarse principalmente en la observación de los daños estructurales y la degradación material, así como en la investigación histórica y arqueológica propiamente dicha, y los segundos, fundamentalmente en pruebas de los materiales y en el análisis estructural.
 - Antes de tomar la decisión de llevar a cabo una intervención que afecte a las estructuras, es indispensable determinar cuáles son las causas de los

daños y la degradación, y después, evaluar el grado de seguridad que dichas estructuras ofrecen.

- Todos estos aspectos relativos a la información obtenida, diagnóstico, o la decisión de intervenir, deberán recogerse, de forma descriptiva, en una **memoria informativa**.

Para la elección de las medidas correctoras y control de la eficacia de las intervenciones habrá que tener en cuenta:

- La terapia debe estar dirigida a las raíces del problema más que a los síntomas.
- La mejor terapia es la aplicación de medidas de mantenimiento de índole preventiva [70].
- No debe emprenderse acción alguna sin haber comprobado antes que resulta indispensable.
- Cada intervención debe ser proporcional a los objetivos de seguridad previamente establecidos, y limitarse al mínimo indispensable para garantizar la seguridad y la perdurabilidad del bien con el menor daño posible a los valores del patrimonio.
- El proyecto de intervención deberá basarse en una comprensión clara de factores que causaron el daño y la degradación.
- La elección entre técnicas “tradicionales” e “innovadoras” debe sopesarse caso por caso, dando siempre preferencia a las que produzcan un efecto de invasión menor y resulten más compatibles con los valores del patrimonio cultural, sin olvidar nunca cumplir las exigencias impuestas por la seguridad y la perdurabilidad.

⁷⁰ Entre las medidas de protección o conservación debemos, de acuerdo a la Carta del Restauo de 1972, distinguir entre salvaguardia y restauración. Entendiendo por *salvaguardia*, cualquier medida conservadora que no implique la intervención directa sobre la obra; se entiende por *restauración* cualquier intervención modifica-

- En ocasiones, la dificultad de evaluar el grado real de seguridad y los posibles resultados positivos de las intervenciones puede hacer recomendable emplear un “método secuencial de observación” consistente, por ejemplo, en una actuación escalonada que se inicie con una intervención de baja intensidad, de tal forma que permita ir adoptando una serie de medidas complementarias o correctoras.
- Siempre que sea posible, las medidas que se adopten deben ser “reversibles”, es decir, que se puedan eliminar y sustituir por otras más adecuadas y acordes a los conocimientos que se vayan adquiriendo.
- Deben determinarse todas las características de los materiales (especialmente cuando son nuevos) que vayan a utilizarse en una obra de restauración, así como su compatibilidad con los existentes. En ese estudio deben incluirse los impactos a largo plazo, a fin de evitar efectos secundarios no deseados.
- No deben destruirse los elementos diferenciadores que caracterizaban a la edificación en sus diferentes etapas.
- Cada intervención debe respetar, en la medida de lo posible, el concepto, las técnicas y los valores históricos de todas sus etapas especialmente las más antiguas, dejando evidencias que puedan ser reconocidas en el futuro.

dora encaminada a mantener vigente o a facilitar la lectura de un bien cultural. Siempre será preferible realizar la primera para evitar la segunda, sin embargo, el estado de deterioro que presenta el patrimonio obliga en muchas ocasiones a intervenciones de urgencia, en algunos casos de forma muy agresiva.

- En la medida de lo posible, la intervención debe responder a un plan integral de conjunto que tenga en cuenta los diferentes aspectos del bien y de su entorno.
- Deberá evitarse, siempre que sea posible, la eliminación o alteración de cualquier material de naturaleza histórica, o de elementos que presenten rasgos arquitectónicos de carácter distintivo.
- Las estructuras arquitectónicas deterioradas deben ser reparadas, y no sustituidas, siempre que resulte factible.
- Deberán mantenerse las imperfecciones y alteraciones que se hayan convertido en parte de la historia de la edificación, siempre que no atenten contra las exigencias de la seguridad.
- Sólo se debe recurrir a la alternativa de desmontar y volver a montar los elementos cuando así lo exija la propia naturaleza de los materiales y siempre que su conservación por cualquier otro medio sea imposible o incluso perjudicial.
- Los sistemas de protección provisional utilizados durante la intervención deben servir a su propósito y función sin causar perjuicios a los valores patrimoniales.
- Cualquier propuesta de intervención debe ir acompañada de un programa de control que, en la medida de lo posible, deberá llevarse a cabo mientras se ejecuta la obra.
- Durante la intervención, y después de ésta, deben efectuarse unas comprobaciones y una supervisión

que permitan cerciorarse de la eficacia de los resultados.

- **Todas las actividades de comprobación y supervisión deben registrarse documentalmente y conservarse como parte de la historia de la construcción.**

2.4.1 CRITERIOS ESPECÍFICOS

La arquitectura defensiva, a veces poco atendida en su conservación por su carácter geográficamente aislado y su difícil reutilización social, requiere instrumentos que favorezcan su conservación. En este sentido, el Plan Nacional de Arquitectura Defensiva es un instrumento de gestión y protección del patrimonio defensivo que permite y favorece la correcta coordinación de actuaciones de los diversos organismos implicados en la protección, conservación, investigación y difusión del patrimonio fortificado de España, definiendo criterios y métodos de actuación sobre este patrimonio.

Una de las primeras intervenciones en el campo de la Arquitectura defensiva, fue la publicación del segundo inventario dedicado a la Arquitectura Militar *“Inventario de protección del Patrimonio Cultural Europeo IPCE: España”* [71], y cuya finalidad fue la protección jurídica de estos Bienes. Aunque como más tarde indicaría el PNAD [72] el inventario era muy esquemático, sin incluir datos importantes sobre el estado del bien: *“este inventario era bastante esquemático y no permitía una constatación fiable de la existencia o localización de parte*

71 Considerado el primer inventario sistemático de arquitectura defensiva española, contiene 5220 monumentos, e incluye: los castillos y los recintos amurallados urbanos medievales, las torres de defensa aisladas, las atalayas de costa, los fuertes y los recintos abaluartados, los arsenales, las iglesias y los puentes fortificados e, incluso, los fortines fusileros, siendo los límites cronológicos de dichos monumentos los años 711 y 1914

72 PNAD. Plan Nacional de Arquitectura Defensiva. <http://ipce.mcu.es/conservacion/planesnacionales/defensiva.html>

de los elementos inventariados y algunos de sus datos, como el de estado de conservación, la protección legal o su utilización han quedado obsoletos en su mayoría”, por lo que 1998 por Dirección General de Bellas Artes encarga revisar y actualizar este inventario a la Asociación Española de Amigos de los Castillos

Entre los objetivos más importantes de PNAD destacamos:

- **Analizar y diagnosticar el estado de este conjunto patrimonial y de sus necesidades en cada momento.**
- **Definir criterios y métodos unificados para la adecuada conservación, restauración y puesta en valor del patrimonio defensivo.**
- **Programar, entre las Administraciones implicadas, actuaciones coordinadas para la conservación y gestión del patrimonio fortificado de España.**
- Contemplar en las intervenciones de conservación y restauración los valores simbólicos e históricos que encierra este patrimonio.
- **Incentivar la participación y el protagonismo de la sociedad civil** en el apoyo y el fomento de la cultura y la conservación.
- **Mejorar la accesibilidad.** La especial ubicación de muchos de estos bienes complica su adaptación.
- **Definir y reforzar la inclusión del entorno inmediato** de estos bienes, aplicando medidas que impidan la construcción de edificaciones cercanas que limiten su contemplación y dificulten su lectura. Las operaciones de eliminación de edificaciones adosadas no siempre son positivas tanto estéticamente como por el valor histórico que pueden conllevar
- **Difundir el conocimiento relativo al bien** y particularmente el proceso de la propia intervención realizada.

El método de actuación del PNAD se basa en la realización de un inventario de bienes que permita ejercer su adecuada protección, analizando sus problemas y proponiendo unas necesidades que permitan establecer una programación de actuaciones.

La intervención en elementos de arquitectura defensiva deberá realizarse por un equipo interdisciplinar de especialistas debidamente coordinados que contribuyan en el trabajo de investigación, cumpliendo la normativa propia de cada sector.

Indicando además que en toda intervención en el patrimonio defensivo deberá tener en cuenta las recomendaciones que establece *La Carta de Baños de la Encina*.

Entre los principios de intervención que establece el ICOMOS destacamos “*No debe emprenderse ninguna acción sin haber evaluado los beneficios y perjuicios que pueda suponer para el patrimonio arquitectónico. Cuando sean necesarias medidas urgentes de salvaguardia para evitar el colapso ..., debe evitarse en lo posible una alteración irreversible de las fábricas.*”

De igual manera en la Carta del Restauo de 1972 establece la siguiente recomendación:

Las restauraciones deben ser continuamente vigiladas y dirigidas para asegurarse de su buena ejecución y para poder intervenir rápidamente cuando aparezcan datos nuevos, dificultades o desplomes de muros; para evitar, en fin, especialmente cuando intervienen la piqueta y el martillo, que desaparezcan elementos antes ignorados o que eventualmente han pasado desapercibidos en la indagación previa, pero que son ciertamente útiles para el conocimiento del edificio y para la dirección de la restauración. En particular, antes de raspar, pintar, o eliminar eventualmente enlucidos, el director de los trabajos debe constatar la existencia o no de cualquier huella de decoración, cuáles fueron las texturas originales y el colorido de las paredes y de las bóvedas y documentarlo.

2.5 VALORIZACIÓN y DIFUSIÓN DEL PATRIMONIO

El significado cultural que atribuimos al patrimonio es una pieza fundamental para su conservación ya que condiciona su protección o abandono [74]. Este significado está cargado de múltiples facetas que la integran: histórica, social, política, espiritual y artística, producto de la sociedad que le dio origen y de aquellas que los transformaron, siendo labor de los investigadores reconocerlas e interpretarlas de una manera documentada y veraz para que aporten significado y valores al bien.

El valor histórico debe ser salvaguardado de forma prioritaria ya que encierra, no solo la historia del bien inmueble, con sus destrucciones o modificaciones, sino la de la propia sociedad que lo creó y también de aquellos que lo vivieron y transformaron en épocas posteriores.

El valor simbólico se encuentra en el valor de representación que cada sociedad, en un determinado momento le otorga, bien en sus funciones o por su imagen de representatividad.

"... No hay valores absolutos, ni eternos o permanentes, sino aquellos que las diferentes generaciones transfieren a los objetos." "La asignación del valor responde a las necesidades de la sociedad y a los cambios de paradigmas culturales..." [73].

Sin lugar a dudas, el valor de funcionalidad es una de las características propias de la arquitectura y requisito casi obligado para su conservación. Se crea o modifica para que tenga una utilidad, también cambiante a lo

largo del tiempo. Esta falta de utilidad y en algunas ocasiones de reutilización es el principal problema que presenta la conservación de muchos bienes patrimoniales.

De acuerdo a Lorena Manzini⁷⁴, el significado inicial de patrimonio está vinculado principalmente a su función, pero éste puede ser cambiante y acumulativo a lo largo de la vida del bien, enriqueciéndolo o por el contrario denostándolo, llegando incluso a perderse con el transcurso del tiempo. De igual manera, explica que el significado cultural de un bien patrimonial *es una construcción conceptual compleja que vincula las etapas de la vida histórica de un bien patrimonial y que permite comprender su razón de ser en el tiempo, detectar lo que es importante en la vida de los mismos* [74].

Los valores estéticos, artísticos o tipológicos son a su vez valores físicos del edificio que nos informan no solo de las formas sino de otros aspectos como cultura, poder, política, costumbres o economía.

Al igual que ha ocurrido con el concepto de patrimonio, el paso del tiempo ha producido un cambio conceptual respecto de la percepción del valor de cualquier bien patrimonial, de los que consideraban que los valores estaban implícitos en los propios objetos o construcciones, hasta la concepción actual, en la que estos valores son cambiantes en función de los significados que la sociedad o los especialistas le atribuyan. Como ejemplo de esta consideración diríamos, que si despojamos a unas ruinas de su significado estas no serían otra cosa que un montón de piedras o restos viejos.

Silvia Cirvini [75] sostiene que la evaluación del significado cultural tiene como objetivo identificar los rasgos

73 NICOLINI, A.; PATERLINI, O. *El Patrimonio Arquitectónico de los argentinos. Tucumán. Catamarca. Santiago del Estero.*

74 MANZINI, L. (2011). El significado cultural del patrimonio. *Estudios del patrimonio cultural*, (6), 27-42.

75 CIRVINI, S. A., & VOLTAN, J. A. G. (2006). LOS VALORES Y SIGNIFICADOS DEL PATRIMONIO VERNACULO EN TIERRA Su relación con la conservación y con la construcción de nuevas obras en la región.

y las características fundamentales que hacen al lugar importante y distintivo. Esta evaluación es un factor fundamental, ya que su resultado permite establecer los valores por los cuales debe ser conservado.

La conservación de los bienes patrimoniales implica una serie de acciones: valorización, interpretación, difusión, **uso público del bien**, educación o la creación de estrategias vinculadas al turismo cultural. Restaurar un edificio sin atribuirle un uso lo convierte en un objeto susceptible de abandono y ruina por falta de mantenimiento. La función se convierte así en una variable cultural obligada para su preservación.

La Carta Europea del Patrimonio Arquitectónico del año 1975, fue el primer documento europeo que dedicó una atención especial a este patrimonio indicando que *“El patrimonio arquitectónico es un capital espiritual, cultural, económico y social con valores irremplazables”*. Efectivamente, **la conservación del patrimonio arquitectónico y arqueológico depende en gran medida de su integración en el marco de la vida de los ciudadanos**. Deben ser ellos los que atesoren sus valores, creen estrategias de utilización, promoción y protección, considerando el patrimonio como una fuente de recursos más que una carga.

El patrimonio cultural, además del enorme valor cultural que atesora, es fuente de crecimiento económico y un importante motor de desarrollo y generador de riqueza, no sólo de forma directa, sino también como estímulo para la actividad turística (PNIC, 2011) [76]. El patrimonio cultural es uno de sus objetivos más importantes para el turismo. Este mueve a millones de visitantes en todo el mundo generando importantísimos

recursos tanto para las empresas y particulares relacionadas con este campo como para las comunidades donde se encuentra. Conseguir que esta fuente de ingresos sea permanente e inagotable requiere velar por un uso responsable y razonable del patrimonio asegurando su tutela y su conservación.

La actividad turística puede aportar grandes ventajas en el ámbito socioeconómico y cultural, mientras que al mismo tiempo puede contribuir al deterioro del elemento patrimonial y a la pérdida de la identidad local. Desde un principio, la UNESCO ha mostrado su preocupación por la relación entre turismo y patrimonio. En 1963 se celebró la Conferencia de la Naciones Unidas sobre el turismo y los viajes internacionales. En esta reunión se comienza a poner en relación el patrimonio y el turismo, al reconocer la conservación como una inversión en los proyectos de desarrollo, y el turismo cultural como efecto multiplicador de las economías [77]. Del mismo modo en diferentes documentos se incide en que esta gestión debe garantizar que la experiencia del visitante le merezca la pena y le sea satisfactoria y agradable.

Otras instituciones como el ICOMOS han celebrado coloquios sobre Protección, Conservación y Turismo dando lugar a documentos como la Carta del Turismo Cultural, en la que se constatan:

- La consideración del turismo como hecho social, humano, económico y cultural irreversible.
- El reconocimiento de los efectos positivos y negativos de la actividad turística, la protección del patrimonio cultural como base misma del turismo in-

76 PNIC (Plan Nacional Investigación Conservación del Patrimonio)

<http://www.mecd.gob.es/cultura-mecd/areas-cultura/patrimonio/mc/oicp/el-pnic/pnic.html>

77 GARCIA CUETOS, M.P., 2012. *El patrimonio cultural. Conceptos básicos*. Universidad de Zaragoza

ternacional y la necesidad de formación e información adecuadas, tanto a los distintos agentes turísticos, como a los visitantes.

- Se hace un llamamiento a la colaboración de la OMT y la UNESCO, fomentando el turismo de calidad, para evitar un crecimiento turístico descontrolado.

La IV Conferencia Europea de Ministros Responsables del Patrimonio Cultural, celebrada en Helsinki en 1996, recomienda preparar estrategias del turismo cultural sostenible asociado a la puesta en valor del patrimonio, y manifiesta, entre otros, que: *“El turismo supone una contribución positiva importante en el acceso al patrimonio cultural de un elevado número de personas, y los ingresos del turismo pueden aportar notables recursos para el mantenimiento y conservación del patrimonio cultural”*.

Como afirma M. Pilar García, *mantener el difícil equilibrio entre la utilización de nuestro patrimonio, como recurso de desarrollo y su tutela, requiere un conocimiento de sus valores y un compromiso científico y ético, más allá de intereses mercantilistas.* [77]

Entre los objetivos de cualquier intervención debe estar la de sensibilizar e implicar a la población local mediante la explicación de las actividades que en él se van a llevar a cabo. Conseguir que la población local se implique, suponen la mejor iniciativa para la protección y conservación del bien cultural, ya que son ellos los principales beneficiarios de la recuperación y los que garanticen su posterior conservación.

De acuerdo a la metodología propuesta por la Carta de Baños de la Encina, cualquier intervención sobre el patrimonio deberá darse a conocer tanto a nivel divulgativo como especializado:

“Los poderes públicos establecerán programas de difusión, promoviendo la visita, el conocimiento y la adecuada interpretación del patrimonio. Del mismo modo,

se establecerán programas de investigación que incrementen el conocimiento sobre los Bienes culturales, facilitando el acceso de su conocimiento al ciudadano”.

En este sentido los Planes Nacionales de protección proponen entre otros:

- Programas de comunicación e información pública para dar a conocer normas y recomendaciones para la prevención y atención a desastres y para dar a conocer las amenazas y la vulnerabilidad del patrimonio cultural.
- Campañas de sensibilización con diferentes recursos mediáticos: folletos explicativos, vídeos, información en Internet y redes sociales, acercando así al público a la temática de los bienes culturales y su protección, especialmente en caso de que se produzca un desastre.

A través del Plan Nacional de Educación y Patrimonio se pretende, entre otros, enseñar y sensibilizar a los niños en edad escolar mediante videojuegos, sobre los aspectos históricos más importantes relacionados con nuestro pasado.

- Presentando la diversidad cronológica y geográfica de las construcciones militares de tipo histórico en España.
- Explicando las diferentes estrategias de defensa, las distintas tipologías de armas y de protecciones que los hombres han usado en diversos contextos culturales y cronológicos.
- Sensibilizar hacia el Patrimonio Histórico, fomentando un mejor entendimiento de sus características y funciones en el pasado. Se promueve también actitudes respetuosas de las nuevas generaciones hacia esta clase de elementos patrimoniales, ya que sólo se ama, cuida y conserva lo que se conoce.

En este sentido, una interesante iniciativa de promoción y difusión del patrimonio ha sido la llevada a cabo entre la Junta de Andalucía, la Diputación de Jaén y la Federación Empresarial de Gremios de Turismo y Hostelería de la provincia de Jaén, llamada “*Ruta de los Castillos y la Batallas*”⁷⁸. Entre sus objetivos está la conservación y puesta en valor del patrimonio y de la historia de la zona, dando a conocer los castillos y las batallas que fraguaron el rumbo de la historia en la zona comprendida entre las provincias de Ciudad Real, Jaén y Granada, fomentando además el desarrollo turístico y económico de los pueblos y la sensibilización de su habitantes hacia su patrimonio.



⁷⁸ Ruta de los Castillos y Batallas. <http://castillosybatallas.com/>

3 CAPITULO III. EL LEVANTAMIENTO ARQUITECTÓNICO Y ARQUEOLÓGICO

Muchos son los documentos que hablan de la **necesidad de la documentación, registro, inventario** del patrimonio, como base para la investigación, intervención y difusión. Entre ellos, podemos destacar, la Carta de Venecia (art. 16) se indica que *“los trabajos de conservación, de restauración y de excavación irán siempre acompañados de la elaboración de una documentación precisa, en forma de informes, ilustrados con dibujos y fotografías. Esta documentación será depositada en los archivos de un organismo público y puesta a la disposición de los investigadores, recomendando su publicación”*.

De igual modo, en la Carta de Cracovia 2000 se indica la **importancia de documentar todas las intervenciones arqueológicas** por el efecto destructivo producen las excavaciones.

En este mismo sentido, tiene especial interés el documento adoptado por el ICOMOS [79] en 1996, sobre los “Principios para la creación de archivos documentales de monumentos, conjuntos arquitectónicos y sitios históricos y artísticos” en el que define:

“El registro es la recopilación de las informaciones que describen la configuración física, el estado y el uso que se da a los monumentos ..., en un determinado momento, y que constituye un elemento esencial de su proceso de conservación”

También nos indica que el registro documental del patrimonio debe acometerse con un grado de precisión que permita:

- Proporcionar un registro permanente de todos los monumentos, conjuntos arquitectónicos y sitios

que son susceptibles ser destruidos como consecuencia de riesgos naturales o derivados de la actividad humana.

En todos los casos se utilizarán métodos de registro no destructivos para el patrimonio. Técnicas que no produzcan daño alguno al edificio. Los métodos de registro y el tipo de documentación obtenida deben ser adecuados a la naturaleza del patrimonio, a su contexto cultural y a los medios económicos que se dispongan.

- Facilitar la documentación a las administraciones responsables de la protección y conservación del patrimonio, con el fin de favorecer políticas y decisiones adecuadas en el de planificación y gestión de recursos.
- Esta documentación permitirá un uso apropiado en materia de investigación, gestión, y conservación.

El uso de las nuevas tecnologías de registro, como el escáner laser y la fotogrametría multimagen, unidas al uso los nuevos sistemas de representación, facilitan enormemente esta labor, haciendo posible la captura rápida y precisa de los elementos patrimoniales, generando auténticas reproducciones tridimensionales digitales con presentación hiperrealista.

79 ICOMOS, 1996 Principios para la creación de archivos documentales de monumentos, conjuntos arquitectónicos y sitios históricos y artísticos.

3.1 CONCEPTO DE LEVANTAMIENTO

La palabra “**levantamiento**” sinónima del italiano “*rilevamento*” tiene para los técnicos un significado gráfico y sirve para indicar entre profesionales de la topografía y la arquitectura, las operaciones técnicas de medición y representación necesarias para sintetizar la grafía de un terreno o un edificio existente en sus diferentes planos.

Actualmente el levantamiento tiene un significado más amplio. Este requiere no solo conocer las técnicas y métodos de medición y documentación sino conocer también otros aspectos como materiales, metodología constructiva, evolución histórica o los procesos de deterioro que afectan al bien objeto de estudio. En definitiva, el levantamiento implica un conocimiento integral del objeto de estudio lo que implica:

- Conocer la geometría y morfología de los edificios.
- Conocer sus componentes materiales: características cualitativas y cuantitativas, físico-químicas, de producción, etc.
- Conocer los procesos tecnológicos de construcción.
- Conocer los procesos de deterioro de los materiales: las causas que lo originan, sus condicionantes y consecuencias.
- Conocer su historia: génesis, hechos históricos, funciones, procesos de transformación en el tiempo.

En el Congreso celebrado en Roma en el año 2000 sobre “*Il Rilievo dei Beni Architettonici per la Conservazione*” [80] se acordó las siguiente definición:

“El levantamiento son el conjunto de investigaciones y operaciones orientadas a determinar las características significativas, tanto morfológicas, dimensionales, figurativas y tecnológicas de un edificio, para evaluarlo e investigarlo con el propósito de construir un modelo tridimensional simplificado, a través del cual poder analizar la obra, facilitando así la interpretación de sus fases de transformación y de los diversos aspectos referidos a los temas más representativos.”.

“El levantamiento es, por tanto, un proceso que debe llevar al conocimiento profundo de la obra en estudio, con el fin de poner en evidencia todos sus valores, tanto geométricos como dimensionales, figurativos como estructurales, desde los materiales empleados y las técnicas constructivas, hasta las condiciones de degradación y las relaciones con el contexto urbano.”

Se indica además que: *las operaciones de levantamiento han de quedar finalmente reflejadas a través de la representación gráfica del modelo espacial simplificado, realizada sobre uno o más planos de representación a una escala adecuada, debiendo realizarse en soportes informáticos que permitan tanto su modelación sólida como la comunicación multimedia.*

El levantamiento arquitectónico es un proceso de investigación enfocado hacia el conocimiento de la arquitectura o de la ciudad y como toda investigación requiere, además de las restituciones gráficas y documentación fotográfica y de archivo, una descripción de todas las operaciones que conducen al logro de este resultado, es decir, es necesario documentar el procedimiento que hemos seguido, los materiales utilizados, la resolución aplicada, la documentación previa, etcétera [81]

80 CUNDARE, Cesare; CARNEVALI, Laura. (2000) *Il rilievo dei beni architettonici per la conservazione*. Edizioni Kappa.

Una definición más compleja es recogida por la Carta del Levantamiento Arquitectónico [81] [82] en la que se indica que:

“se debe entender por levantamiento arquitectónico la forma primigenia de conocimiento y por lo tanto el conjunto de operaciones, de medidas y de análisis necesarios para comprender y documentar el bien arquitectónico en su configuración completa, referida incluso al contexto urbano y territorial, en sus características dimensionales y métricas, en su complejidad histórica, en sus características estructurales y constructivas, así como en las formales y funcionales.”

“se asume que levantar un episodio arquitectónico contribuye eficazmente a la verificación del recorrido crítico del proceso constructivo, y también proyectual, seguido para su realización, como forma de comprender las razones que llevaron a las decisiones así como las decisiones mismas adoptadas sucesivamente y documentadas materialmente en el edificio.”

De acuerdo a la misma carta del relieve (Anexo I) se indica que el levantamiento general realizado sobre un bien arquitectónico debe permitir:

El conocimiento, preciso, fiable y depurado críticamente, de la configuración morfológica y dimensional del objeto, en su estado físico actual.

El conocimiento técnico, tecnológico y material del objeto, que ayude a comprender tanto sus modalidades constructivas, como sus condiciones actuales de alteración y degradación.

La posibilidad de una ágil edición temática de la planimetría del levantamiento, para profundizar en el cono-

cimiento histórico “global” del propio objeto como primer documento de sí mismo, que sólo es descifrable gracias a una cuidadosa tarea de levantamiento y de observación directa.

Observaciones históricas procedentes tanto de una aproximación preliminar documentada, indispensable para la conducción de un buen levantamiento, como de observaciones inéditas, fruto del contacto directo y frecuente con el monumento.

Este conocimiento integral necesita el uso complementario y programado de distintas técnicas de análisis que han de llevarse a cabo por distintos especialistas o profesionales de diferentes ámbitos de conocimiento. Todas estas tareas es muy difícil que pueda acometer una sola persona. Por ello, los profesionales que desarrollen las distintas trabajos o investigaciones deberán estar capacitados para utilizar sus respectivas técnicas de análisis pero también de plasmarlas y comunicarlas al resto de intervinientes con el fin obtener el conocimiento más completo. Pero además, deben ser capaces de comprender la arquitectura (Almagro, 2004) y conocer la historia.

La redacción de un proyecto de restauración arquitectónica deberá estar precedido de un estudio atento del edificio, elaborado desde distintos puntos de vista (contexto territorial o urbano, aspectos tipológicos, las apariencias y cualidades formales, los sistemas y caracteres constructivos, etc.) tanto con relación a la obra original, como también a los posibles añadidos y modificaciones, y por tanto, será parte integrante de este estudio las investigaciones bibliográficas, iconográficas

81 JIMENEZ MARTÍN, A; PINTO PUERTO, F. (2003) *Levantamiento y análisis de edificios: tradición y futuro*. Universidad de Sevilla

82 ALMAGRO GORBEA, A. (2004) *Levantamiento arquitectónico*. Universidad de Granada.

y de archivo, etc., para recabar todos los datos históricos posibles. [83]

En este sentido, se deberá investigar y evaluar todas las fuentes existentes, buscando y analizando los documentos de cualquier época susceptible de proporcionar informaciones al caso de estudio (expedientes, estudios, levantamientos de planos, dibujos, fotografías, informes y todo documento relativo a los orígenes o a la historia del edificio). Con objeto de dar validez a esta documentación se deberá obligatoriamente dar referencia del origen de la fuente.

De igual manera, cualquier intervención en el patrimonio exige conocer las normas generales y leyes sobre el patrimonio arquitectónico y arqueológico, teniendo presente, además, las exigencias especiales relativas a la salvaguardia, conservación y restauración de los hallazgos acaecidos durante las prospecciones o los estudios previos [83]

“oportuno reconocimiento del terreno, encaminado a recoger todos los datos posibles localizados en superficie, los materiales cerámicos esparcidos, la documentación de elementos que eventualmente hayan aflorado, recurriendo además a la ayuda de la fotografía aérea y de las prospecciones del terreno (eléctricas, electromagnéticas, etc.), de modo que el conocimiento lo más completo posible de la naturaleza arqueológica del mismo permita la adopción de las directrices más oportunas para la aplicación de las normas de salvaguardia, el establecimiento de la naturaleza y límites de los vínculos, la redacción de los planes reguladores y la vigilancia en el caso de que se lleven a cabo labores agrícolas o edilicias”

En el caso de hallazgos de elementos sueltos de decoraciones de estuco, pintura, mosaico, u opus sectile, es necesario antes y durante su remoción mantenerlos unidos con lechadas de yeso, con gasas y adhesivos adecuados, de forma que se facilite su recomposición y restauración en el laboratorio. En la recuperación de vidrios es aconsejable no proceder a limpieza alguna durante la excavación ya que están fácilmente sujetos a la exfoliación. Por lo que respecta a cerámicas y terracotas es indispensable no perjudicar con lavados o limpiezas precipitadas la posible presencia de pinturas, barnices e inscripciones. Se impone una delicadeza especial al recoger objetos o fragmentos de metal, sobre todo si están oxidados, recurriendo, además de a sistemas de consolidación, también a soportes adecuados cuando sea necesario. Se deberá prestar especial atención a las posibles huellas o improntas de tejidos.

3.2 EL VALOR HISTORICO DEL PATRIMONIO ARQUITECTÓNICO Y ARQUEOLÓGICO

Uno de los aspectos centrales de la conservación del patrimonio es el estudio de los edificios del pasado, considerados como monumento y como documento. La información conservada en los restos de estas arquitecturas supone todavía una fuente por descubrir y explorar y por ello, la comprensión de las técnicas constructivas y los materiales empleados son sin duda una parte fundamental de nuestra investigación.

83 Carta del restauo, 1972. Anexo B. http://ipce.mcu.es/pdfs/1972_Carta_Restauo_Roma.pdf

El análisis histórico del patrimonio permite comprender, tanto la información que brindan los bienes patrimoniales, como el marco histórico contextual del que surgieron o en el que se transformaron. Antoni González Moreno [84] sostiene al respecto que:

“Ciertamente, la primera condición del monumento es su carácter de documento histórico, como resultado o escenario que fue de hechos, artes, técnicas y culturas. Su condición, por tanto, de memoria de la historia y de la arquitectura del pasado. Este carácter documental tiene dos aspectos fundamentales. De una parte, el valor informativo, la posibilidad de suministrar datos no sólo sobre el arte, la arquitectura y la técnica, sino también sobre la historia del propio monumento y la del país o lugar donde se halla. (...) El otro aspecto es el valor testimonial, la capacidad del monumento de dar fe y conmemorar hechos, mentalidades y artes del pasado, tan útiles para la fijación y transmisión de las identidades individuales y colectivas”.

Antoni González mantiene que los bienes patrimoniales constituyen verdaderas fuentes documentales ya que, por un lado, nos informan sobre diversos aspectos, como su historia y la del lugar y la sociedad a la que pertenecieron y además, se comportan como testimonio que validan la información que nos brindan.

Para ampliar el concepto sobre el valor informativo y testimonial del patrimonio arquitectónico y arqueológico, Waisman [85] sostiene que *“...la obra de arte o arquitectura, si bien pertenece a otro tiempo y lugar, es en*

sí mismo el testimonio histórico principal e imprescindible; el que reúne en sí los datos más significativos para su conocimiento.”

Por su parte, Ramón Gutiérrez [86] profundiza en este tema afirmando que:

“La arquitectura constituye un documento histórico excepcional. Es un testimonio cultural que nos permite extraerle una gran cantidad de informaciones, no solamente sobre la arquitectura en sí misma sino también sobre la sociedad que lo creó y lo usó.” (...) *“...la arquitectura es un testimonio que nos permite leer en él, todo el proceso cultural desde que se originó hasta nuestros días. En él podemos hallar acumuladas y sedimentadas las intervenciones culturales de una comunidad, distinguir las transformaciones físicas, los cambios de uso y funciones, las asignaciones de renovados valores estéticos o simbólicos, etc.”*

A raíz de lo expuesto, podríamos colegir que la información que nos brindan los bienes patrimoniales nos hablan de su materialidad y a través de ella de la evolución histórica de una sociedad y de los procesos culturales que la caracterizan. Pero, el edificio por sí solo no es suficiente para comprender el pasado, el estudio histórico, como ya hemos mencionado, es el que brinda el marco que hace posible la lectura de las huellas en la materialidad de las obras. [87]

Del mismo modo, Torres Balbás [88] ya reclamaba en sus escritos la necesidad de conservar los valores históricos y arqueológicos de los edificios, como un elemento fundamental a la hora de interpretarlos e intervenir

84 GONZÁLEZ-MORENO, A. (1995). Patrimonio arquitectónico: lo que el viento no se llevó. *Actas de las I Jornadas sobre Catalogación del Patrimonio Histórico. Hacia una integración interdisciplinar*, Sevilla, Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico.

85 WAISMAN, M. *El interior de la historia*. Escala, 1993.

86 GUTIÉRREZ, R. (1997). Las fuentes históricas y la heurística. In *Máster de restauración y rehabilitación del patrimonio* (pp. 172-179). Editorial Munilla-Lería.

87 MANZINI, Lorena. El significado cultural del patrimonio. *Estudios del patrimonio cultural*, 2011, no 6, p. 27-42.

88 TORRES BALBÁS, L, et al. (1918) La restauración de los monumentos antiguos. *Arquitectura: órgano de la Sociedad Central de Arquitectos*, no 8, p. 229-233.

“...Aún tendremos seguramente que realizar muchas campañas en defensa de los viejos edificios que se quieren restaurar radicalmente o completar, haciendo desaparecer su valor arqueológico, y, lo que es más grave, privándoles de la belleza y el factor pintoresco que el tiempo les ha ido prestando en una labor secular..”

Por su parte, Argán y Contardi sostiene que la investigación histórica se propone la interpretación de los significados y valores. El análisis histórico hace posible la lectura contextual de los bienes, entendidos como productos culturales, históricamente situados. [89] y afirma que:

“...la investigación histórica nunca se circunscribe a la cosa en sí. También cuando se propone como objetivo una obra singular, como sucede con frecuencia, inmediatamente sobrepasa sus límites para remontarse a los antecedentes e investigar los vínculos que la enlazan a toda una situación cultural, a individualizar sus fases, los momentos sucesivos de su formación. En la investigación la obra es analizada, entonces, en sus componentes estructurales y lo que parecía ser su unidad indivisible aparece en cambio como un conjunto de experiencias estratificadas y divididas, un sistema de relaciones, un proceso.”

Además, porque como sostiene Aróstegui [90]:

a través de la historia, reflejada en la arquitectura, se puede establecer cómo se comportan en el tiempo las realidades del hombre: sociales, económicas, tecnológicas, derivadas de sus intereses cómo las ideolo-

gías, política, las simbologías culturales. Estas realidades se caracterizan por estar compuestas por complejas relaciones que se ven manifestadas en los bienes patrimoniales. Estos pueden ser considerados como documentos, huellas, restos de cualquier tipo, que acreditan la actividad del hombre que se desarrolla conforme al tiempo y está sujeto a la perduración o cambio.

Coincidimos con Cirvini y Berjman [91] en la idea de sostiene que la historia es una herramienta, que ayuda a reconstruir el significado cultural de las construcciones:

“... a través de la crítica historiográfica, la investigación histórica puede asimismo, contribuir a reconstruir la cadena de juicios entorno a las obras, desde el momento en que fueron producidas hasta el presente, de modo de comprender los sucesivos significados y aún la falta de significado”.

Por tanto, podemos decir que el **objetivo del historiador consiste en convertir el análisis de estos restos materiales en conceptos, atribuyéndoles significados y valores**. Si bien, habrá que tener en cuenta que la subjetividad del autor puede producir significados y valores inciertos.

89 ARGAN, Giulio Carlo; CONTARDI, Bruno. *Historia del arte como historia de la ciudad*. 1984.

90 ARÓSTEGUI, Julio. (1995) *La Investigación Histórica teoría y método*..

91 CIRVINI, Silvia y BERJMAN, Sonia. (1990): “Investigación Histórica como sustento de la preservación”. En *Patrimonio Americano: Unidad, Pertenencia e identidad*. V Congreso Nacional de Preservación del Patrimonio Arquitectónico Urbano, III Seminario de Especialistas Americanos. Comisión N° 13. Mar del Plata. Argentina

3.3 ANÁLISIS ARQUEOLÓGICO DE LAS CONSTRUCCIONES HISTÓRICAS

El análisis arqueológico de las estructuras emergentes, se basa en el estudio de las relaciones estratigráficas de las diferentes secuencias constructivas que forman edificio histórico. La estratigrafía mural parte de la concepción de que, en el edificio, desde el mismo momento de su ejecución, tienen lugar una serie de acciones constructivas, ya sea de adición o de sustracción, que se rigen por los mismos principios de la estratificación arqueológica. Esta metodología ya fue recogida y sistematizada por Harris [92], que, ya en 1979 insinuaba la posibilidad del empleo de su método de análisis a los edificios históricos, si bien, la aplicación sistemática de este método estratigráfico en las construcciones históricas, ha sido llevada a cabo por los arquitectos, profesores de la Universidad de Siena, Roberto Parenti y Gian Piero Brogiolo.

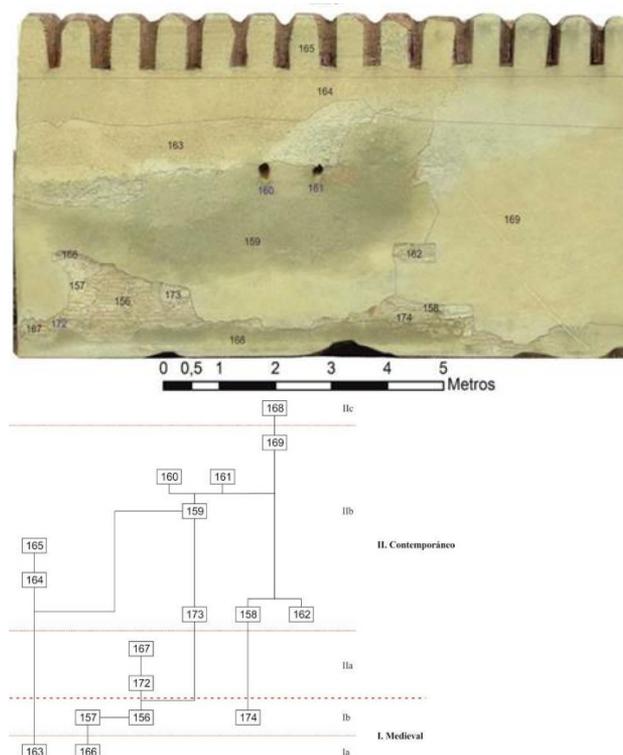
En la publicación sobre el análisis arqueológico de paramentos [93] se describe la evolución histórica de esta técnica desde sus orígenes así como sus cambios metodológicos.

El análisis estratificado de una construcción histórica, mediante el método Harris permite definir una secuencia que ordena las fases constructivas en el tiempo, convirtiéndolo en un importante documento para el conocimiento histórico.

La clasificación temporal de cada una de las acciones constructivas (unidades estratigráficas) se consigue reconociendo y aislando cada uno de los elementos mí-

nimos diferenciables y analizando las relaciones de antero-posterioridad que existe entre ellas (cubre, es cubierto, se apoya, corta, etc).

Finalmente y para una mejor definición, estas relaciones temporales son ordenadas mediante un diagrama denominando “matrix Harris”



Identificación de UEs y diagrama Harris con las secuencias constructivas correspondiente a la alcazaba de Guadix. Realizada por el arqueólogo Rouco Collazo.

Este diagrama estratigráfico (matriz) nos permitirá identificar las unidades estratigráficas ejecutadas en el mismo momento y por tanto plantear las hipótesis de la forma que tenía un edificio o yacimiento en una determinada etapa, pero también nos permitirá estudiar

92 HARRIS, E. C. (ED.). (1991). *Principios de estratigrafía arqueológica*.

93 TABALES-RODRÍGUEZ, M. A. (1997). Análisis arqueológico de paramentos. Aplicación en el patrimonio

edificado sevillano. *SPAL: Revista de prehistoria y arqueología de la Universidad de Sevilla*, (6), 264-266.

cómo se ha ido transformando en el tiempo. Por tanto, son estas relaciones estratigráficas las que dan sentido y secuencia a los elementos construidos, resultando muy importante su documentación para comprender la histórica del edificio y poder valorar de forma objetiva lo que es importante conservar o lo que es susceptible de eliminar para favorecer otros aspectos (estructurales, estéticos, históricos, etc) de la edificación.

Luis Caballero Zoreda [94], profundiza más en este tema e indica que *“lo que realmente nos importa, como arqueólogos, no son los objetos en sí, sino la relación que existe entre ellos”*, es decir, los objetos por sí solos no tienen un significado específico, es las relaciones del conjunto de datos lo que le da sentido a su estudio.

Los valores arqueológicos que el patrimonio arquitectónico posee se ponen de manifiesto mediante las relaciones estratigráficas y tipológicas de los materiales que la forman. Estas relaciones proporcionan la información necesaria para entender la evolución histórico-constructiva del edificio.

De acuerdo a Latorre y Caballero [95], este análisis estratificado de las construcciones ha permitido dar una respuesta analítica y concreta al problema de la restauración arquitectónica, indicando que partes son importantes y por tanto deben ser conservadas y que partes no lo son y por tanto, son susceptibles de demolición.

“...la aparición de la metodología para el análisis estratigráfico de las construcciones históricas, ha permitido la definición y el análisis científico y sistemático de los valores documentales de las arquitecturas del pasado.

94 CABALLERO ZOREDA, L. (2006). El dibujo arqueológico1.

95 LATORRE GONZALEZ-MORO, P; CABALLERO ZOREDA, L. (1995) La importancia del análisis estratigráfico de las construcciones históricas en el debate sobre la

Este reconocimiento permitirá decidir de forma razonada y justificada, a la hora de acometer la restauración, su conservación o eliminación”

De acuerdo a esto, Ricardo Francovich [96] manifiesta que los arqueólogos y arquitectos son los únicos responsables de tomar la decisión sobre lo que debe conservarse o eliminarse, haciendo especial hincapié en que todo lo que se elimine debe quedar perfectamente **documentado**.

... restauradores y arqueólogos son, de hecho, únicos testigos de supresiones, de anulaciones y modificaciones definitivas: a ellos y sólo a ellos, les es confiada la libertad de tomar decisiones relativas a la supervivencia de partes de construcciones, o, en su caso, de sedimentaciones históricas, y de documentar lo que suprimen.

La mayor parte del conocimiento arqueológico se basa en las excavaciones ya realizadas, pero la naturaleza destructiva de las excavaciones impide recuperar el acceso a los datos originales, siendo la documentación gráfica registrada en la intervención, el documento más parecido a la realidad. De igual forma, las intervenciones de restauración realizadas sobre los edificios pueden provocar la pérdida de las huellas o relaciones estratigráficas, debiendo quedar registradas y documentadas.

En palabras de Carandini [97], *“como la excavación es una técnica que destruye su objeto de análisis para poderlo conocer y analizar, es obligatorio documentar en el mismo momento que se produce el proceso destructivo. Excavar es ante todo documentar las relaciones que existen entre los contextos”, y en este proceso de registro,*

restauración monumental. *Informes de la Construcción*, vol. 46, no 435, p. 5-18.

96 FRANCOVICH, R. (1985). Archeologia e restauro: da contiguità a unitarietà. *Restauro e citta*, 1(2), 14-20.

97 CARANDINI, A. (1997). *Historias en la tierra: manual de excavación arqueológica*.

la documentación gráfica tiene un papel fundamental al reproducir con imágenes ciertos aspectos de la realidad que van a desaparecer. Como indica Luis Caballero “el dibujo arqueológico forma parte intrínseca del proceso técnico de la Arqueología” [98]

De nuevo Latorre y Caballero señalan que, al igual que ocurre en la excavación, en toda intervención de restauración siempre se produce una destrucción, “El convencimiento de que con la obra de restauración estamos destruyendo o transformando elementos con contenido histórico, es el que nos permite establecer paralelismo entre la manipulación que del edificio histórico se efectúa durante la obra de restauración con el proceso de una excavación arqueológica” [95]

Esta similitud destructiva exige mecanismos análogos de documentación, registro y control. Por tanto, **el adecuado registro gráfico de las relaciones estratigráficas así como la correcta definición de los materiales y sistemas constructivos se convierten en requisito básico para la salvaguarda de los valores culturales de los yacimientos y los edificios históricos.**

Como se indicó en la “Carta del levantamiento”, este debe entenderse como el proceso de conocimiento integral del objeto de estudio, contemplando tanto sus aspectos materiales como inmateriales. Para que estos análisis tengan los resultados deseados es necesario la intervención de equipos interdisciplinares relacionados con diferentes ciencias: Será necesario realizar análisis técnicos de tipo geométrico, estructural, de análisis de materiales y sus patologías, de los procesos de ejecución, etc. pero también análisis históricos, no

solo bibliográficos o artísticos sino también, y de manera muy importante, del análisis arqueológico sobre los edificios.

El objetivo principal de estos análisis arqueológicos es la lectura, documentación e interpretación de las diferentes fases constructivas del documento construido [99] [100]; “La aplicación del método conlleva el estudio y documentación de los materiales y de las técnicas constructivas que componen el edificio, proporcionando un minucioso y atento conocimiento de la materialidad del mismo”

La interpretación arqueológica de las diferentes transformaciones que sufre un edificio es realizada a partir de los procedimientos que permite asociar los distintos elementos constructivos con diferentes fases históricas. El análisis de los elementos materiales no solo nos permite conocer el objeto en sí, sino poder interpretar otros aspectos que motivaron su transformación. El estudio de la arquitectura como elemento histórico tiene un gran interés pues, como manifestación humana, es reflejo de los aspectos sociales, políticos, económicos o culturales de cada época.

Independientemente de las particularidades de cada edificio, la metodología general se basa en tres fases, consistentes en:

- Observación minuciosa y atenta del edificio y sus estratos: materiales, bordes, superficies,..., registrando las UEs sobre fichas, dibujos u ortofotografías

98 CABALLERO ZOREDA, L. (2006). El dibujo arqueológico1

99 CABALLERO ZOREDA, Luis. (1996) El análisis estratigráfico de construcciones históricas. En *Arqueología de la arquitectura: el método arqueológico aplicado al proceso de estudio y de intervención en edificios históricos: actas*. Consejería de Educación y Cultura, p. 55-74.

100 MILETO, Camilla; VEGAS, Fernando. (2003) El análisis estratigráfico constructivo como estudio previo al proyecto de restauración arquitectónica: metodología y aplicación. *Arqueología de la Arquitectura*, no 2, p. 189-196.

- Documentación gráfica rigurosa a partir de las fichas y dibujos.
- Análisis e Interpretación de los datos, con la creación de la secuencia estratigráfica e hipótesis interpretativa.

La lectura de los datos sobre los paramentos, aparentemente simple, resulta bastante complicada en la realidad, pues los materiales en los edificios históricos tienen a igualarse en tono y textura, requiriendo gran experiencia para interpretar las discontinuidades entre materiales o entre sus diferentes técnicas constructivas, quedando algunas veces dificultado por el revestimiento de sus estructuras. El registro y relación entre las UEs se realiza sobre fichas para posteriormente sistematizadas a partir de diagramas (matrices) [101], similares a los utilizados en el registro arqueológico de una excavación. Como indica Almagro, el método aplicado a la arquitectura se basa en *descomponer el edificio o partes del mismo en elementos homogéneos, es decir, partes de la fábrica que por su aspecto (materiales y forma de estar aparejados) y posición pueda asegurarse que corresponden a un único momento constructivo* [102]

Como cualquier otro proceso científico, la de intervención arqueológica requiere una sistematización del método del registro para que sea efectivo, proponiendo las siguientes pautas: [103]

-Seguimiento del método Harris (con puntualizaciones).

-Establecimiento de los criterios de representación gráfica para las plantas y alzados estratigráficos y tipológico-estructurales.

-Cumplimentación ordenada de registro: UEs, Bolsas de materiales, Cortes, Registro Gráfico, registro fotográfico.

-Utilización de un sistema de fichas apropiado al tipo de análisis:

El procedimiento consiste en realizar fichas de cada una de las unidades estratigráficas en las que se indica una descripción textual (sobre materiales, técnicas, función,...) y gráfica, asignando un código numérico y sus relaciones con los elementos contiguos (cubre a, se corta con, es cubierto por, rompe a, rellena a,...). La experiencia nos ha demostrado, que para evitar las interpretaciones subjetivas sobre un croquis, es preferible realizar un registro gráfico directo en campo mediante ortofotografías previamente obtenidas de los paramentos. Se recomienda, por tanto, disponer de una documentación gráfica previa al registro de las UEs.

101 HARRIS, Edward C. (2014) *Principles of archaeological stratigraphy*. Elsevier,

102 ALMAGRO GORBEA, A. (2004) *Levantamiento arquitectónico*. Universidad de Granada.

103 TABALES-RODRÍGUEZ, M. A. (1997). Análisis arqueológico de paramentos. Aplicación en el patrimonio edificado sevillano. *SPAL: Revista de prehistoria y arqueología de la Universidad de Sevilla*, (6), 268-269.

Base de datos de excavación. Ficha de Unidad Estratigráfica.		
ID Yacimiento	ID Intervención	Imprimir
		Volver
UE		
Nº de ficha	Fecha de creación	Última modificación
Zona	Área	Sondeo
Sector	Estructura	Complejo Estr.
Tipología funcional	Definición estratigráfica	
Datación		
Fase	Periodo	Cronología inicial Cronología final
Elementos para la datación		
Interpretación		Fiabilidad estratigráfica
Génesis		Sin relación física directa
Naturaleza		Equivalente a
Procesos posteriores		Igual a
Con relación física directa		
Se apoya en	Se le apoya	Coetáneo a
Corta a	Es cortado	
Cubre a	Es cubierto	Anterior a
Rellena a	Es rellenado	Posterior a
Se traba a	Se une a	
Asociaciones		
Complejos estructurales asociados	Estructuras asociadas	UE asociadas
Dimensiones		
Altura max		
Altura min		
Anchura max		
Anchura min		
Longitud max		
Longitud min		
Características		
Color		
Color 2		
Tonalidad		
Forma		
Textura		
Técnica constructiva		
Muestras <input type="radio"/> Si <input type="radio"/> No		
Tipo de muestreo		
Nº inventario		

Ficha para el registro de unidades estratigráficas. Realizado por Martín Civantos.

Base de datos de excavación. Ficha de Unidad Estratigráfica.			
ID Yacimiento	ID Intervención	Imprimir	UE
		Volver	
Descripción			
Intrusiones		Materiales	
Estado de conservación			
Observaciones			
Referencias históricas y bibliográficas			
Fuentes y biografía			
Datos de la ficha			
Redactor		Proyecto	
		Entidad	
		ID Proyecto	

Trasdós de la ficha para el registro de unidades estratigráficas. Realizado por Martín Civantos.

El análisis arqueológico de la arquitectura presenta una problemática específica derivada de la propia estructura del edificio. Así, por ejemplo, la unidad situada más abajo no tiene porqué ser la más antigua, pudiendo tratarse de un corte y una reparación posterior. De igual modo, un edificio no pueden ser excavado, porque supondrían su desaparición o deterioro, siendo solo analizables las caras visibles de las estructuras, lo que impide el conocimiento sobre los interiores de las mismas salvo que se realicen pequeñas catas o se realice un seguimiento continuo de las estructuras durante el proceso de restauración [104].

También presenta una mayor dificultad a la hora de obtener cronologías [105], ya que del examen superficial de las UEs es difícil encontrar artefactos que den una clara adscripción cronológica relativa, y los métodos absolutos son todavía bastante costosos.

Además del análisis de los elementos datantes que aparecen insertos en los muros, como las cerámicas, aunque de forma bastante escasa, o los criterios artísticos, no siempre fiables, hay ciertas metodologías propias para la datación de estructuras muráreas. Tienen gran importancia los estudios cronotipológicos (por ejemplo: tipología de tapial, tipos de recodo en accesos, etc.), que cuadran en un arco temporal más o menos amplio las técnicas constructivas de una región.

Requiere un trabajo exhaustivo de estudio de numerosas estructuras hasta poder realizar un buen atlas regional. Existen otros elementos arquitectónicos, como por ejemplo la amplitud de los vanos de puertas y ventanas que presentan una evolución marcada en el tiempo, también en la arquitectura vernácula, que resultan útiles como sistema de datación [106]

De igual modo, la arqueometría también tiene métodos de datación absoluta que dan un rango cronológico aproximado para los materiales constructivos. Así, la dendrocronología es útil cuando se conservan grandes vigas de madera u otro tipo de elementos ligneos. La termoluminiscencia permite datar los elementos cerámicos, como tejas y ladrillos y el radiocarbono los elementos orgánicos que hayan quedado insertos en las fábricas constructivas, como restos de madera o micro restos de carbón derivados de la fabricación de la cal y que quedan insertos en los morteros (TFM de Rouco Collazo, 2016), si bien su alto coste los hace inviables en la mayoría de los casos.

Sin duda, las fuentes escritas y pictóricas también pueden aportar otro tipo de datos, como descripciones de los planes constructivos, técnicas constructivas y los materiales, costos y duración de la obra, descripciones del estado de conservación de las estructuras y reparaciones y la evolución formal de construcciones concretas, entre otras.

104 BROGIOLO, G P; CAGNANA, A (ed.).(2012) *Archeologia dell'architettura-metodi e interpretazioni*. All'Insegna del Giglio, 2012, pag7.

105 MANNONI, T. (1984) Metodi di datazione dell'edilizia storica. *Archeologia medievale*, vol. 11, p. 396.

-CABALLERO ZOREDA, L. (2002) Sobre límites y posibilidades de la investigación arqueológica de la arquitectura. De la estratigrafía a un modelo histórico. *Arqueología de la Arquitectura*, no 1, p. 83-100.

106 FRANCOVICH, R; PARENTI, R (ed.) (1988). *Archeologia e restauro dei monumenti*. All'Insegna del Giglio,

-QUIRÓS CASTILLO, J A.(1996) Indicadores cronológicos de ámbito local: cronotipología y mensiocronología. En *Arqueología de la arquitectura: el método arqueológico aplicado al proceso de estudio y de intervención en edificios históricos: actas*. Consejería de Educación y Cultura, p. 179-187.

3.3.1 DOCUMENTACIÓN GRÁFICA APLICADA A LA ARQUEOLOGIA

Como ya hemos planteado, el registro gráfico de un edificio o yacimiento se somete a los principios universales de la estratigrafía propuestos Harris. Este sostiene que “es el dibujo de todos los planos de estrato, lo que por fin documenta la totalidad de la excavación”, abandonando el dibujo de secciones, propias del método Wheeler, que pasan a desempeñar una función auxiliar. Pero, por el contrario, las características propias de los edificios hacen que los paramentos de los muros se consideren como si fueran secciones.

“Esta estratigrafía, fosilizada y construida, se representa, por tanto, como los alzados de cortes de las catas de Wheeler, sirviendo, como aquellos, no sólo como documento de registro, sino también como instrumento de análisis de la historia del edificio” [107]

En paralelo al desarrollo metodológico del análisis estratigráfico se ha producido una importante evolución en relación al registro gráfico de las estructuras mural, buscando mayor efectividad y precisión.

A partir de los datos recogidos en campo se procederá al trazado de los planos de análisis estratigráfico en formato digital para lo que es imprescindible disponer igualmente de ortofotografías de muy buena calidad que reflejen las características diferenciadoras de los materiales (color, textura, estado de conservación) y que permitan el dibujo de los contornos de las UEs, asignándole el mismo número de identificación recogido en las fichas.



Ortofotografía del Alzado norte de Puerta de Elvira. Permite el dibujo del análisis estratigráfico directamente en campo. Elaborada por el J.A. Benavides

Sobre la ortofotografía se representan las discontinuidades de las UEs (zonas uniformes que muestran las mismas características y los mismos materiales y que revelan haber sido construidos en un mismo momento), para seguidamente identificar las relaciones de contemporaneidad, anterioridad y posterioridad, que muestran los interfaces de las unidades estratigráficas, anotándolas a través de la leyenda que permite una rápida y clara toma como la propuesta Tabales, mediante símbolos [108].

En este análisis se deberán tener en cuenta además de la imagen de la superficie, los posibles espesores de los muros o los cambios de dirección.

La realización del análisis cronológico requiere disponer de una base documental gráfica muy detallada que permita identificar los distintos elementos dibujados y las distintas relaciones entre ellos. En este sentido el uso de las ortofotografías como soporte, permite no solo el registro de las UEs más importantes así como la posible inclusión futura de otros elementos, más humildes en dimensión, pero que pueden ser importantes por su significado histórico.

107 CABALLERO ZOREDA, L. (2006). El dibujo arqueológico1.

108 TABALES-RODRÍGUEZ, M A. (2002) *Sistema de análisis arqueológico de edificios históricos*. Universidad de Sevilla, 2002.

Posteriormente, para una correcta interpretación de estos gráficos es necesario realizar el diagrama de la secuencia, representando las relaciones cronológicas de las UEs de cada paramento, de manera que los elementos coetáneos deben estar situados en la misma línea; los elementos más antiguos estarán situados en un nivel inferior y los más modernos en un nivel superior.

La datación absoluta de una UE es imposible salvo que se conozcan otros datos o indicios, tales como referencias bibliográficas o documentales, inscripciones, dataciones científicas, etc. Estableciéndose igualmente dataciones relativas del tipo *ante quem* o *post quem*, entre los diferentes elementos o filas de la matriz, lo que permitirá desentrañar aspectos importantes de la historia del edificio.

Identificada la secuencia estratigráfica en base a datos de tipo histórico o cronotipológico, se puede intentar formular una hipótesis de periodos constructivos, resultando de gran utilidad el empleo de una representación gráfica mediante esquemas de colores que facilita la rápida comprensión de la hipótesis.



3.3.2 CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES Y TÉCNICAS CONSTRUCTIVAS

Como ya hemos comentado, el análisis estratigráfico de las estructuras murales sigue los mismos principios de adición y sustracción que la estratificación arqueológica lo que permite establecer cronologías relativas entre las diferentes tipologías constructivas. En la práctica, salvo contadas ocasiones, es imposible establecer cronologías absolutas. Por tanto, hay que ser cautos a la hora de establecer correlaciones cronológicas entre las distintitas técnicas constructivas y las fechas de ejecución pues no siempre una misma tipología constructiva está directamente relacionada con periodos determinados.

Si bien es cierto que a lo largo de la historia, cada poder ha tratado de establecer su propio sistema constructivo no podemos olvidar que las diferentes técnicas coexisten en el tiempo, estando definidas por las características propias de la zona, las técnicas constructivas de la época o si el tipo de intervención a realizar es de nueva construcción o de reparación.

Por tanto, antes de adentrarnos en el análisis de las estructuras emergentes que forman un elemento constructivo es necesario hacer una descripción de las técnicas constructivas y los materiales empleados en su construcción. En nuestro caso, en los diferentes tipos de tapial, deferentes aparejos de piedra o ladrillo o los mixtos.

3.3.2.1 EL TAPIAL

La facilidad de construcción, economía de materiales y rapidez de fabricación hicieron que el tapial fuera el material más utilizado en Al-andalus, sustituyendo casi por completo a las construcciones con sillares de piedra. El tapial es en realidad, una transcripción española del término de origen bereber: “*tábiya*”. Es la técnica más característica del época Andalusí, aunque no es la única. El empleo del tapial también se dio en otras épocas y en la Edad Media en lugares diversos de la península ibérica sobre todo en la construcción de fortificaciones.

Ya en el siglo XIV, Ibn Jaldün describe con bastante detalle la técnica de construcción del tapial [109]:

“Sírvanse de dos planchas de madera, colóquense sobre fundamentos, procurando espaciarlos entre sí, según la anchura que el arquitecto quiera dar a aquellas. Sujetándose estas planchas por medio de dos travesaños de madera, ligados por cuerdas o lazos. Con otras dos planchas de pequeñas dimensiones se cierra el espacio hueco que queda entre las dos planchas grandes, (por sus extremos) y se vierte en él la mezcla de tierra o cal que enseguida se apisona con pisones contruidos al efecto. Cuando se ha apretado bien la masa y la tierra se halla suficientemente mezclada con la cal, se sigue echando tierra muchas veces hasta llenar el vacío. Con este procedimiento se mezcla de tal suerte las partículas de tierra y cal, que concluyen para formar un sólo cuerpo. En seguida se colocan las planchas sobre la parte del muro ya formada, se vierte tierra entre ellas y se continua de este modo hasta que sus masas, dispuestas en muchas líneas unas sobre otras, constituyen el muro, cuyas partes unidas parecen

109 JALDÚN, I., & JALDÚN, I. (1977). *Introducción a la historia universal (Al-Muqaddimah)* (No. 04; D20, J3.). pag. 721-722

como que no forman sino una sola pieza. Este género de construcción se llama Jabia”

Torres Balbás [110] manifiesta que la técnica consiste en:

“colocar dos tableros (*hormas en latín*) verticales y paralelos, separados a distancias igual al ancho según el grosor que se quiera dar al grueso del muro y sujetos uno al otro por unos travesaños, palos de madera horizontales llamados agujas o cárceles, que sirven de molde, y entre ellos se van rellenando con piedra-grava, a veces con piedra de río, de mayor o menor tamaño y mortero de cal, echado por capas o tongadas bien apisonadas. Al fraguar el mortero, la fábrica del muro se endurece y los tableros pueden trasladarse a ambos lados, para continuar la tapia en longitud o sobre la ya levantada. La argamasa variaba mucho pues se podía emplear en ella desde muy pequeña gravilla de río como acostumbraban los romanos, hasta piedras de bastante magnitud, como se encuentra en muros de construcciones hispanomusulmanas”

La principal técnica constructiva utilizada en la alcazaba de Guadix es el tapial o tapia. Coloquialmente se utilizan ambos vocablos como sinónimos, pero en términos técnicos, el tapial es el encofrado que se usa para construir la tapia (López Martínez, 1999). Esta técnica es una de las más extendidas en toda la zona de al-Ándalus, sobre todo a partir del siglo XI [111] [112]

110 TORRES BALBÁS, L. (1970). *Ciudades hispanomusulmanas. Tomo II. Las defensas urbanas*. Instituto hispano-árabe de cultura.

111 MALPICA CUELLO, A. (1998). Las técnicas constructivas en al-Andalus. Un debate entre la Arqueología y la Arquitectura. In *Técnicas agrícolas, industrias e constructivas en la edad Media: curso de verán, Celanova, 8-12 de xullo de 1996* (pp. 277-336). Servicio de Publicaciones.

[113]. Pasa a sustituir a la sillería califal en la arquitectura monumental impulsada por los diversos poderes en los que se desarticula el territorio musulmán peninsular, lo que ha dado a lugar a diversas interpretaciones del cambio social que provoca este cambio en las cadenas operativas

Por tanto, el tapial o tapia es una mezcla de tierra, grava, piedra y cal, y en algunas ocasiones se añaden otros componentes como fragmentos cerámicos o paja. La tierra es el principal compuesto por su disponibilidad y economía. La más adecuada es la situada bajo la tierra vegetal, compuesta por arcilla, limos y grava. La cal perfectamente aditivada con agua, constituye el aglomerante que da consistencia a la mezcla. El tapial es un tipo de construcción modular realizado mediante un encofrado construido en madera en el que se vierte un mortero por la parte superior. Se compone básicamente de tablas colocadas en horizontal y unidas por traviesas verticales llamadas costales. Para reforzar el encofrado se colocan en horizontal, perpendicularmente a las tablas, pequeñas tablillas llamadas *agujas*, que pueden o no atravesar de parte a parte el grosor del cajón. Se sitúan en la parte superior de los cajones y dan lugar a los agujeros de mechinales [114]. Además, para asegurar el encofrado todavía más, en el momento de la construcción, se usan cuerdas de esparto que se atan de costal a costal o a clavos. Si no se

112 AZUAR, R. (2004). Las técnicas constructivas y la fortificación almohade en al-Andalus. *Los almohades. Su patrimonio arquitectónico y arqueológico en el Sur de al-Andalus, Sevilla*, 57-74.

113 CANIVELL, J., & GARCÍA, A. G. (2015). Caracterización constructiva de las fábricas de tapia en las fortificaciones almohades del antiguo Reino de Sevilla. *Arqueología de la Arquitectura*, (12), 025.

114 LOPEZ MARTINEZ, F. J. (1999). Tapias y tapias. *Loggia, Arquitectura & Restauración*, (8), 74-89.

emplean estas, las agujas deben sujetarse contra las tablas o los costales mediante cuñas o clavos. Pueden aparecer además elementos accesorios, como agujas en forma de cruz de San Andrés o costales vueltos en el interior del cajón para evitar que se comben las tablas (Martín Civantos, 2002).

El encofrado se cierra también por los lados menores, formando cajones. El primero se clausura por ambos, mientras que los siguientes se apoyan en parte sobre el cajón contiguo. Estos se disponen contrapeados para darle solidez a la estructura. También existe la posibilidad de que se realice un encofrado corrido que se cierre solo al final de la estructura.

El mortero, realizado con agua, cal o yeso, tierra, árido de diversa granulometría y otros componentes como piedras de diverso tamaño o material reutilizados –la drillo, escoria, cerámicas”, es apisonado a medida que se va vertiendo, formando capas horizontales llamadas tongadas. En las caras exteriores acostumbra a recurrirse de un enfoscado de cal que sirva de revestimiento para protegerlo e impermeabilizarlo [115].

Según la disposición y la presencia de unos elementos u otros se diferencian varios tipos de tapiales. De acuerdo a Martín Civantos para la provincia de Granada podemos distinguir, el tapial de tierra, el de cal y canto, el hormigonado, el calicostrado, el calicostrado de cal y cantos y la tapia real. Sin embargo, es necesario tener en cuenta que existen muchas variantes dentro de cada tipología general [115]

Tapial de tierra: El tapial más básico es el de tierra. Está compuesto fundamentalmente por tierra con una proporción variable de cal, que le dará más dureza en

función de la cantidad (Martín Civantos, 2009b). Es habitual sobre todo para la realización de estructuras domésticas, al ser el de menos coste y menor complejidad constructiva.

Tapial hormigonado: mortero rico en cal, con escasa o nula tierra y con abundante grava de mediano tamaño y gran dureza. El material es y se reparte de forma homogénea en el cajón. Normalmente es el usado en los aljibes, mediante encofrado continuo para evitar las fisuras entre cajones o los huecos de los mechinales.

Tapial de cal y cantos, o de calicanto: Mortero con proporción variable de cal, cuya principal característica es la presencia significativa de mampuestos de gran tamaño en el interior del núcleo, lo que le confieren bastante resistencia. La cara exterior del muro queda lisa al ser rellenada con mortero, ocultando los mampuestos. Solo en el caso de perder esta capa exterior, pueden distinguirse los mampuestos.

Tapial calicastrado, calicostrado o de cal y costra: En esta tipología, se aplica una masa rica en cal junto a los tableros del encofrado. El interior del cajón se rellena con un mortero más pobre en cal y con mayor proporción de tierra. La ejecución se realiza por tongadas apisonada de unos 9 cm dando como resultado una dura capa superficial, que se denomina costra con un acabado en cuña hacia el interior, característico de este tipo de tapial. La costra es la que le confiere gran protección y durabilidad al tapial.

Tapial real: Realizado con tongadas alternativas de tierra y cal y en la que en parte inferior y superior del cajón la forman una tongada más gruesa de cal. Martín Civantos lo encuadra en época nazarí (Martín Civantos 2009a).

115 MARTÍN CIVANTOS, J. M. (2009) “La alcazaba de Guadix: de fortaleza andalusí a cuartel militar Napoleónico”.

Boletín del Centro de Estudios Pedro Suárez: Estudios sobre las comarcas de Guadix, Baza y Huéscar. nº 22, p. 283-296.

Además, en ocasiones, con objeto de proteger o embellecer los paramentos, se aplica una capa de enlucido de mortero de arena y cal. Este enlucido se aplicaba una vez seca la obra, a la que previamente se le practicaba una serie de acanaladuras para facilitar la adherencia del mismo. Estos trazos sobre el muro en muchas ocasiones pueden llegar a confundirse con una decoración, por lo que es realmente importante su estudio [116].

En la mayoría de los casos, el acabado que presentan los paramentos se debe al enfoscado realizado para corregir las imperfecciones y cubrir las juntas y agujeros dejados por los mechinales. De acuerdo a Antonio Almagro (1991) [117] esta operación se llevaba a cabo por cajones, lo que explica que sólo se aprecien indicios de las juntas horizontales.

Como hemos indicado, si bien los estudios realizados por Martín Civantos para la provincia de Granada, permiten establecer ciertas relaciones cronotipológicas, la complejidad de datar un sistema constructivo que ha perdurado durante muchos siglos, hace que en la actualidad no sea posible establecer unas cronologías directas entre las fechas de fabricación y las diferentes tipologías de tapial.

Otro dato importante a tener en cuenta es que el tapial suele levantarse sobre una base de mampostería que sirve, para nivelar la base de los cajones a la vez que lo aísla de las humedades por capilaridad del terreno. En algunas ocasiones quedan como únicos restos visibles de estas construcciones, precisamente, sus bases de mampostería, lo que no quiere decir que toda la obra

estuviese levantada con esa técnica constructiva [118], sino que, en la mayoría de los casos, eran de tapial.

3.3.2.2 MATERIALES PÉTREOS: MAMPOSTERÍA Y SILLERÍA

Se denomina mampostería a aquel aparejo que está conformado a base de piedras de mediano, o incluso gran tamaño, colocadas a mano y unidas por argamasa, yeso o cal.

Se trata de una técnica constructiva que ha sido utilizada para cualquier tipo de construcción, desde las paratas de los bancales, donde se dispone a piedra seca, hasta la edificación de recintos fortificados, viviendas y como acabamos de comentar su empleo es frecuente como base de muros de otro material, esencialmente el tapial.

Por lo general, las piedras utilizadas para la elaboración de aparejos de mampostería, suelen proceder del lugar en el que se lleve a cabo la construcción. Los mampuestos pueden unirse por medio de un aglomerante (mortero de tierra y cal), o disponerse a piedra seca. Por su disposición, los mampuestos suelen colocarse siguiendo determinada geometría, normalmente horizontal, si bien en algunos casos no sigue ningún orden, denominándose mampostería irregular. En muchos casos, para facilitar el calzo de los mampuestos, es frecuente la utilización de ripios o fragmentos de barro cocido. En otros, las hiladas pueden quedar enmarcadas por verdugadas de ladrillo o lajas de piedra.

En ocasiones, este tipo de fábricas suelen presentarse parcialmente enfoscadas con mortero de cal, lo que le

116 LUQUE MARTÍNEZ, F. D. (2003). *El castillo de Piñar: análisis arqueológico de las estructuras de superficie*. Granada: José Javier Álvarez García.

117 ALMAGRO GORBEA, A. (1991). La torre de Romilla. Una torre nazarí en la Vega de Granada. *Al-Qantara*, 12(1), 225.

118 MALPICA CUELLO, A. (2003). *Los castillos en al-Andalus y la organización del territorio*. Cáceres: Universidad de Extremadura.

da mayor consistencia y en él caso de las estructuras castrales evita pudieran ser escaladas. Es frecuente encontrar enlucidos que dejan a la vista parte de los mampuestos, en muchos casos, realizando un llagueado a modo de vitolas sobre las piedras¹¹⁹, denominándose “enlucido envitolado”

Por otro lado, el aparejo de sillares fue la principal técnica de construcción hasta la época califal [120]. Los sillares son piezas de piedra, de granito o caliza, de gran tamaño de trabajadas para dar forma de paralelepípedo. Su disposición o aparejo respondía a diferentes formas, siendo muy frecuente en época califal la denominada de *soga y tizón*, que a partir del siglo XI apareció en las puertas de ciudades, como elemento resistente a la vez que decorativo. En otras ocasiones era frecuente utilizarla como refuerzo en la esquinas de la torres.

3.3.2.3 MATERIALES CERÁMICOS: LADRILLOS

El ladrillo estuvo presente en España desde los tiempos romanos. Su uso bien individualmente o bien mezclado en fábricas de tapial o piedra, sobre todo en los tipos mixtos bizantinos.

El ladrillo aparece mencionado normalmente asociado a la mampostería. El ladrillo árabe, no se usa en al-Andalus hasta el período taifa. Si bien su utilización inicial fue decorativa, los almorávides lo utilizaron como elemento estructural sustituyendo en mezquitas y otros

edificios los pilares pétreos y columnas por pilares de ladrillo [121]. Existen muchos casos de edificios (Giralda, Alcázar) y murallas construidas enteras en ladrillo [122]. En otras ocasiones es utilizado como elemento decorativo de suelos y puertas [123]

“el tipo de ladrillo utilizado es el ladrillo cocido a fuego. Los empleados en el edificio 5 de la madina S-SE y en otros edificios (quicialeras de puertas, soleras de escalones o portales, poyatones de cocina, etc.) viene a ser material constructivo romano reutilizado (...) El tipo más frecuente de ladrillo empleado responde al denominado “bipedalis” (dos pies) con las medidas estándar de 0’45m x 0’45m o 0’22 x 0’22”

¹¹⁹ MALPICA CUELLO, A. (1998). Las técnicas constructivas en al-Andalus. Un debate entre la Arqueología y la Arquitectura., *Celanova, 8-12 de xullo de 1996* (pp. 277-336). Servicio de Publicaciones.

¹²⁰ ESPINAR MORENO, M (2000). Materiales y sistemas constructivos de la provincia de Granada en los siglos XV y XVI. *Gaceta de Antropología*.

¹²¹ TABALES RODRIGUEZ, M.A, T. (1999). Algunas notas sobre fábricas murárias almohades de Sevilla. *Los almohades. Su patrimonio arquitectónico y arqueológico en el Sur de al-Andalus*, 75-90.

¹²² PAVON MALDONADO, B. (2005) Murallas de tapial, mampostería, sillarejo y ladrillo en el islam occidental

¹²³ AZUAR RUIZ, R. (2004). Las técnicas constructivas y la fortificación almohade en al-Andalus. *Los almohades. Su patrimonio arquitectónico y arqueológico en el Sur de al-Andalus, Sevilla*, 57-74.

3.4 EVOLUCIÓN DE LOS SISTEMAS MÉTRICOS DE LEVANTAMIENTO

En los últimos tiempos se han difundido nuevos métodos de levantamiento, tanto topográficos como fotogramétricos para la captación de datos morfológicos y dimensionales y que vienen a complementar a los métodos tradicionales de levantamientos directos e indirectos. Tras un análisis inicial de la evolución histórica profundizaremos sobre las peculiaridades e impacto que las nuevas tecnologías [124], fundamentalmente los escáner laser 3D y la fotogrametría multimagen, también denominada SFM (*Structure from Motion*), están provocando en la documentación geométrica del patrimonio, mejorando tanto en sus aspectos cuantitativos como cualitativos.

De igual manera, analizaremos y compararemos estos procedimientos con técnicas, como la fotogrametría estereoscópica, que siguen siendo referente para muchos investigadores de este sector.

En el capítulo IV experimentamos con los diferentes sistemas con el fin de analizar sus bondades e inconvenientes, así como su aplicabilidad a la compleja definición de los edificios y restos arqueológicos y los posibles condicionantes que nos encontramos en la práctica.

El uso de estos métodos incita un continuo estudio crítico de los sistemas y una comparación directa entre ellos, generando paralelamente la información necesaria para poder aportar algunas consideraciones sobre los objetos estudiados.

En la documentación del patrimonio, el método tradicional de dibujo a escala de plantas, alzados y secciones sin un soporte físico o digital que avale su bondad, hace que en muchos casos estos documentos deban ser, como mínimo, puestos en duda. A los errores propios de la medición o el dibujo hay que añadir la subjetividad de quien interpreta los datos y en algunos casos sus equivocaciones. Todos estos problemas intentan ser corregidos con las nuevas tecnologías, quedando siempre constancia de la intervención realizada a la vez que la representación, descripción y la medición de diferentes tipos de variables (tamaño, forma, volúmenes, distancias etc.) ganan en fiabilidad.

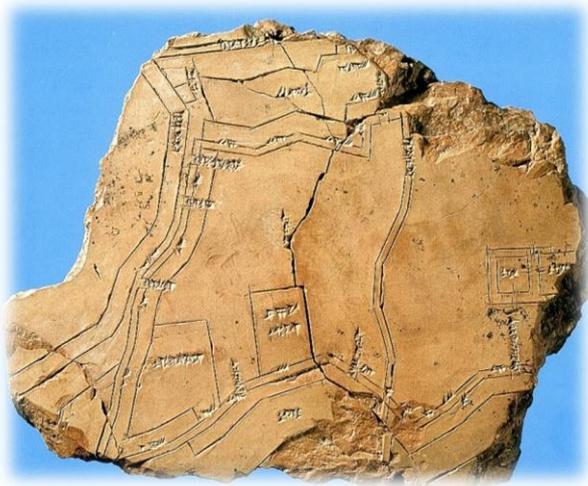
3.4.1 ANTECEDENTES

Desde tiempos inmemoriales el hombre ha sentido la necesidad de representar de la manera más fidedigna posible los objetos reales, especialmente los que para la cultura de cada época ostentasen un valor especial y cuyas características formales interesaba conservar aún después de su desaparición espacial o temporal. Desde los orígenes, muchas representaciones gráficas han estado vinculadas a la obtención de medidas de la realidad. El origen de la geometría se sitúa en el antiguo Egipto como operación catastral para la reconstrucción de los límites de las parcelas de tierra de cultivo tras su desaparición a causa de las inundaciones anuales y para la construcción de sus grandes monumentos.

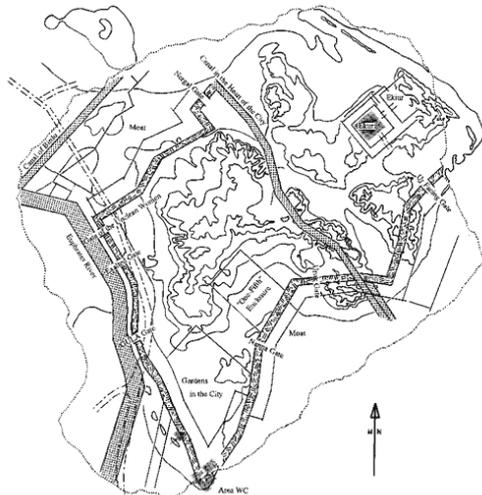
Las primeras manifestaciones gráficas que ya pueden ser catalogadas como planos proceden de Babilonia, conservándose bien gracias al soporte de mármol o arcilla sobre el que fueron grabados.

124 BARRERA VERA, J. A., PEREZROMERO, A., ORTIZ MARÍN, R., & COBO GUTIÉRREZ, C. (2011). Nuevas tec-

nologías en levantamientos aplicadas a la restauración: "El Giralduillo". *Virtual Archaeology Review*, 2(3), 115-120.



Plano de Nippur (centro religioso de los Sumerios) s. XV a.C. [125]



125 Tablilla de arcilla de NIPPUR. Se conserva en la Universidad Friedrich Schiller de Jena, (Alemania). La tablilla en su estado actual, de 21 centímetros por 18. Se ve en ella el trazado de algunos de los templos y de los edificios más importantes de Nippur, de su parque, de sus ríos y canales y, sobre todo, de sus murallas y sus puertas. El plano da más de una veintena de medidas topográficas, las cuales, una vez comprobadas sobre el terreno, han demostrado que la escala ha sido cuidadosamente respetada. Este «cartógrafo» que vivió sin duda allá por el año 1500 a. de J. C., ejecutó el plano, con la precisión y la me-

Plano moderno basado en la tablilla original Oriental Institute, University of Chicago



Plano del templo en la estatua de Gudea [126], príncipe de Lagash. (2150-2125 a.C.) Museo del Louvre.

ticulosidad que hoy día se exige a sus colegas modernos. Nippur es el yacimiento arqueológico que suministró más de tablillas cuneiformes, se cuentan en 60.000, en los que se incluyen textos administrativos y literarios...

126 El plano del templo de Gudea fue grabado con sumo cuidado y estilo, presentando la singularidad de incluir una escala gráfica. En él, nos dice que Gudea es quien ha tenido la idea, quien ha proyectado el templo y lo va a construir. Es el arquitecto del templo de Ningirsu. La tabla reproduce el plano del edificio o de un complejo arquitectónico con torreones de entrada, hornacinas, contrafuertes y pilastras

En el tratado “Storia del rilevamento architettonico e urbano” [127] se analiza la evolución histórica de la disciplina de los levantamientos arquitectónicos y urbanos desde la antigüedad mesopotámica hasta el siglo XX. Constituye un instrumento de comprensión general de la problemática de la medición y representación de la arquitectura en los diferentes periodos históricos. Se analizan los diferentes instrumentos y sistemas de representación por periodos o siglos con gran cantidad de imágenes de referencia. Por otro lado reivindica la importancia que el estudio de los documentos gráficos del pasado han tenido a lo largo de la historia como referencia de arquitecturas o ciudades que han ido cambiando o incluso no existen en la actualidad.

Igualmente, la publicación “*La representación de la ciudad en el Renacimiento*” [128], nos ofrece una completa información sobre las técnicas de documentación gráfica en etapas como la Antigüedad Clásica, y el Medioevo, estableciendo las claves del desarrollo de las técnicas de levantamiento a través de interesantes incursiones en la obra de autores como Ptolomeo, Villard de Honnecourt, Saavasorda, Leonardo Fibonacci de Pisa (Leonardo Pisano), e incluso una curiosa referencia a los conocimientos sobre levantamiento arquitectónico que pueden deducirse de citas contenidas en la biografías de algunos santos.

Por otro lado, las contribuciones de numerosos autores en el ámbito de la documentación del patrimonio son muy considerables y ayudan a profundizar en el conocimiento de las técnicas de medición y representación de las arquitecturas del pasado.

Las importantes aportaciones de los griegos como Tales de Mileto (hacia 624-548 a.C.) y Pitágoras de Samos (alrededor de 580-500 a.C.) en el campo de las matemáticas y la geometría permitieron el desarrollo de métodos e instrumentos aplicados a la astronomía, topografía y la arquitectura. Otros como Herón de Alejandría desarrollaron instrumentos tan importantes como la dioptra [129].

La necesidad de medir distancias y alturas a puntos inaccesibles provoca, desde la Antigüedad, el desarrollo teorías geométrico-matemáticas y la creación de instrumentos necesarios para tal fin. Estos instrumentos se han ido modificando a lo largo de historia pero los conceptos matemáticos permanecen sustancialmente invariables. El funcionamiento de estas maquinarias estaba basado en encontrar la coincidencia de un punto inaccesible a través de miras posicionadas para aplicar simples conceptos geométricos. Las teorías de la proporcionalidad y la semejanza de triángulos son los fundamentos de estas aplicaciones a la medición de distancias y alturas.

El espíritu práctico de los romanos y los conocimientos aportados por los griegos, hicieron que se desarrollaran instrumentos más precisos que dieran solución a los diferentes problemas de agrimensura y de levantamiento de edificios. No hubo avances importantes en la esfera de la teoría pero sí una clara mejora de las herramientas, un aumento de su variedad y una especialización de los operadores [130]. En este sentido, una de las herramientas más ingeniosas usada por los romanos fue la “*groma*” (palabra de origen griego que

127 DOCCI, M; MAESTRI, D. (1993) Storia del rilevamento architettonico e urbano.

128 ARÉVALO, F. (2003) La representación de la ciudad en el Renacimiento. Levantamiento urbano y territorial, Barcelona, Fundación Caja de Arquitectos

129 MORENO, I. (2006) Dioptra. En Nuevos elementos de ingeniería romana: III Congreso de las Obras Públicas Romanas. Consejería de Cultura y Turismo, p. 379-389.

130 ADAM, J. P. (1988) *L'arte di costruire presso i Romani. Materiali e tecniche*. Longanesi & C. ISBN 88-304-0855-7, Milan, Italy (in Italian).

significa escuadra) que permitía dividir el espacio en cuatro cuadrantes a partir de dos ejes de mira perpendiculares. La posibilidad de trazar líneas perpendiculares en base a las alineaciones definidas por las plomadas permitió a mensuros militares el trazado de los ejes viarios, “cardo” y “decumano” en las nuevas ciudades romanas [131].



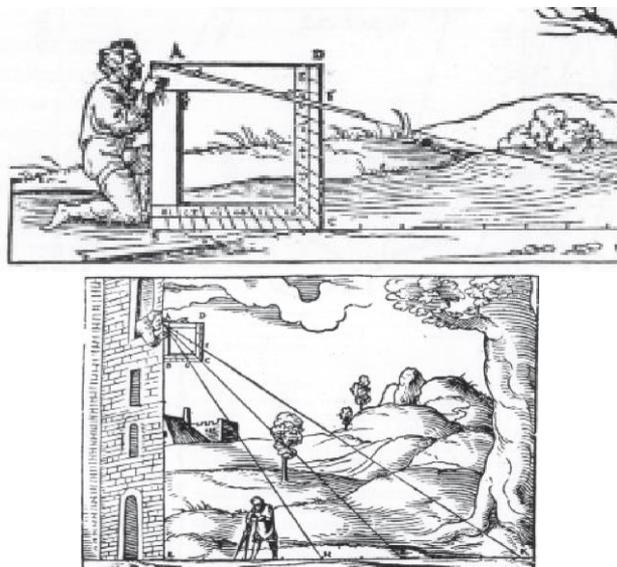
Reconstrucción de una *groma* romana.

El primer instrumento documentado para medir alturas de puntos inaccesibles utilizado por los romanos es la “*lycniá*”, una especie de bastidor cuadrado sujeto por una varilla con una mira deslizante en uno de los dos lados verticales. La varilla de apoyo dispone de una plomada para poderla nivelar. Este instrumento, llamado posteriormente cuadrante geométrico [132]

Tras la caída del imperio romano, fueron las órdenes religiosas las encargadas de conservar los tratados y conocimientos sobre el tema. Uno de los códigos que recoge documentación sobre los sistemas de medición

131 Los romanos generaron una corporación profesional de técnicos que se dedicaban al replanteo y levantamiento de terrenos, los agrimensores. Estos especialistas disponían de tratados técnicos escritos por la corporación que confluyeron en la obra *Groma Veteres* y que

y representación romanas es el conocido “*Corpus Agrimensorum Romanorum*”. [133]



Uso de lycniá y del cuadrante geométrico para la determinación de distancias. (Docci-Maestri, 1993).

A finales siglo XII y el comienzo del XIII señalamos las obras del matemático italiano Leonardo Fibonacci también conocido por Leonardo de Pisa o Leonardo Pisano [134] titulados *Liber Abaci* (libro de aritmética), *Liber quadratorum* y *Practica Geometricae* (geometría práctica) que dedica uno de los apartados a la descripción de sistemas de medición científica de ángulos, longitudes y áreas.

Será en el Renacimiento cuando se difundan tratados como el “*Ludi Matematici*” de Leon Batista Alberti, escrito entre 1450 y 1452, y en el que se presentan varios temas relativos a la medición de distancias y alturas. Este autor describe otro método basado en el uso de

definen los métodos a emplear y el marco administrativo (Adam 1988, 10).

132 DOCCI, M; MAESTRI, D. (1993) *Storia del rilevamento architettonico e urbano*.

133 ARÉVALO 2003, 31-34; Docci y Maestri 1993, 37

134 DOCCI, MAESTRI 1993, 52; Arévalo 2008, 21

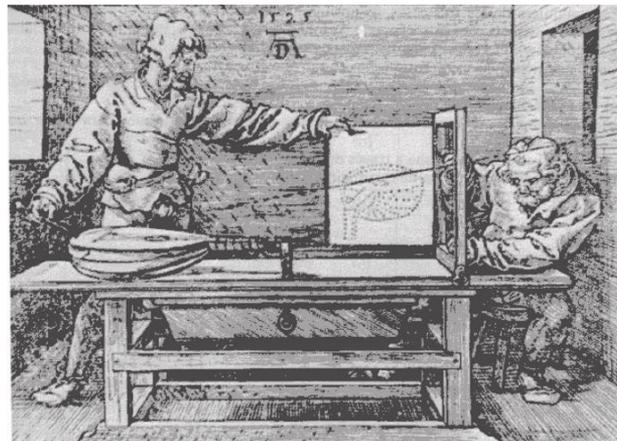
un tipo de goniómetro horizontal dividido en 48 partes, o grados, cada una de las cuales está subdividida en 4 partes, llamadas minutos [135].

No obstante, la aportación fundamental para el posterior desarrollo de la técnica fotogramétrica, no llegaría hasta que, tras la traducción de los 'Elementos' de Euclides, a partir del siglo XVI, permitieran el tratamiento matemático de los problemas de aplicación de la perspectiva a la pintura. Aportaciones como las de Vignola (1507-1573) culminan, ya en el siguiente siglo, con la obra de Girard Desargues (1591-1661), que establece los principios básicos de la Geometría Proyectiva. [133] Es de destacar por su importancia en la época, la obra de Francesco di Giorgio Martini (1439-1502) "*Trattato di architettura civile e militare*" que incluye distintos métodos de medición de distancias y altura y que acentúa la concepción práctica del dibujo como herramienta para representar y medir [136].

Son numerosos los dibujos de Leonardo da Vinci [137] sobre el tema del levantamiento de alturas y distancias con empleo de instrumentos simples y variaciones aplicables a distintas situaciones. Leonardo presenta también un método integrado de levantamiento indirecto y manual que emplea para la restitución de las murallas de las ciudades de Cesena y de Urbino. Este método consiste en la medición de las direcciones con brújula y las longitudes mediante una herramienta llamada "odómetro".

La famosa Carta a León X, atribuida a Rafael y datada al comienzo del siglo XVI, es una clara referencia a la importancia de la práctica del levantamiento como forma de documentación de las obras arquitectónicas antiguas. En la segunda parte de la carta se describe un instrumento considerado innovador y que, según el escrito, se habría tenido que emplear para el levantamiento de todos los monumentos y edificios de la ciudad de Roma. Esta herramienta consiste en un círculo graduado dotado de una brújula y de una regla para establecer alineaciones visuales [138]

Uno de los instrumentos más conocidos en el Renacimiento, y que tuvo mayor importancia en los siglos siguientes fue la construcción de la máquina para dibujar perspectivas creada por Albert Durer. En el año 1600, Jacopo Chimani realizó el primer par estereoscópico a mano. [139]



135 MERCANTI, F; LANDRA, P. I(2007) 'Ludi Matematici' di Leon Batista Alberti. 2007.

136 MASIERO, Roberto. Il vasaio e l'ingegnere. Lineamenti per la disciplina del Rilievo, 1988, no 6-7, p. 61-72.

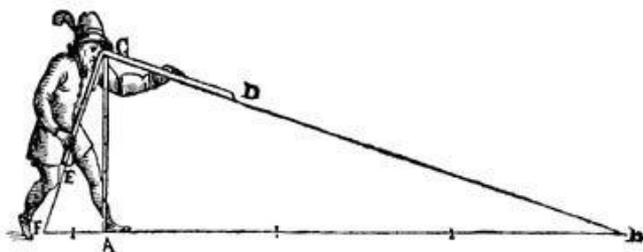
137 CARPICECI, Marco, et al. (1986) *Leonardo: la misura e il segno*. Edizioni Kappa.

138 GENTIL BALDRICH, J.M. (1992) Una relectura de la Carta sobre la Arquitectura a León X. En *Dibujo y Arquitectura*. Investigación Aplicada. Actas del IV Congreso Internacional de Expresión Gráfica Arquitectónica. p. 87-98.

139 RODRIGUEZ JORDANA, J.; NUÑEZ ANDRÉS, M A Núñez. (2008) *Fotogrametría arquitectónica*. Universitat Politècnica de Catalunya. Iniciativa Digital Politècnica.

Portillo móvil. Máquina para dibujar en perspectiva. Ilustración de Alberto Durero (año 1525) Fuente: Peiffer, 2000

La obra de Cosimo Bartoli *Del modo di misurare le distanziae ecc (1589)*, es una referencia fundamental para la comprensión de los métodos de levantamiento empleados en el siglo XVI [140]. El documento incluye nociones de álgebra, simplificación de los Elementos de Euclides, cálculo de áreas y volúmenes y la descripción de los instrumentos y de los métodos de medición indirecta.

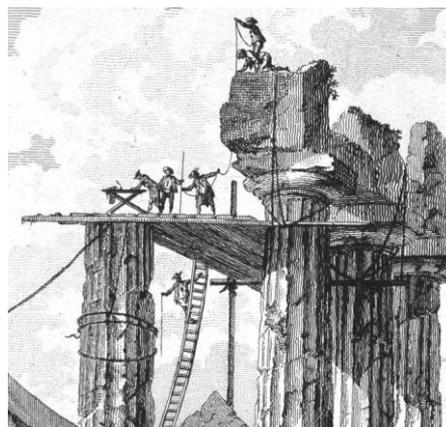


Un cambio sustancial en los métodos de medición vendría en el siglo XVIII cuando se concibe el levantamiento arquitectónico como una práctica de representación y estudio riguroso de los edificios [141]. Se em-

140 Docci y Maestri 1993, 119.

141 MASIERO, Roberto. (1988) *Il vasaio e l'ingegnere. Lineamenti per la disciplina del Rilievo*, 1988, no 6-7, p. 291.

piezan a medir y a estudiar edificios empleando escaleras y andamios, comprobando manualmente tanto las medidas generales como las de los elementos de detalle. Conjuntamente con esta nueva actitud en la fase de toma de datos, también en la parte de restitución gráfica se procura generar dibujos rigurosos que cumplan con un código de representación universal. El empleo de la técnica del grabado en las publicaciones impulsa una enorme producción y difusión de conocimientos.



Jean-Claude Richard de Saint-Non, *Vuë des ruines du Temple de Junon à Agrigente 1781-86 (Saint-Non 1829, Tome III, nº 83)*.

En el siglo XIX hay una actividad intensa de estudio y levantamiento arquitectónico. El interés despertado por el análisis y catalogación de las arquitecturas clásicas unido a las tendencias típicas de esta época, impulsan una serie de campañas de estudios de los edificios antiguos. Las herramientas empleadas en esta época para la medición de puntos inaccesibles, aunque más evolucionadas y precisas, no difieren sustancialmente de las heredadas desde el siglo anterior [142]: teodolitos, niveles y brújulas.

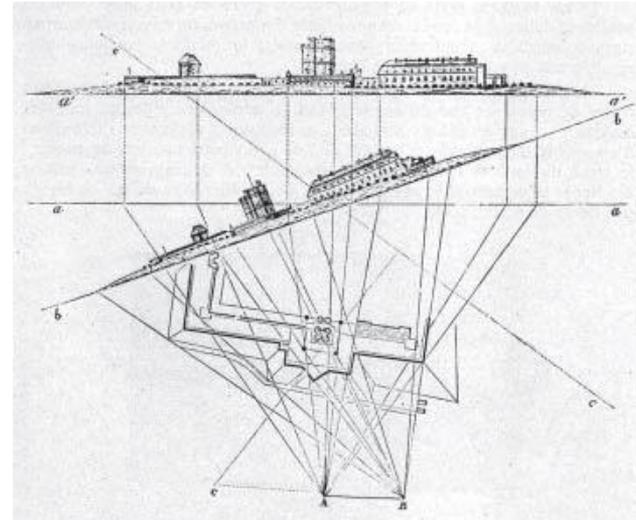
142 DOCCI, M; MAESTRI, D. (1993) *Storia del rilievo architettonico e urbano*, 238

Los avances desarrollados por Alberti o Leonardo sobre los principios que gobierna la perspectiva cónica no serían suficientes para lograr una reconstrucción inversa de los edificios. Será Johann Heinrich Lambert quien en 1759 escribió un tratado sobre la perspectiva central y la resección espacial de rayos homólogos, demostrando que desde la proyección cónica de un objeto del cual se conozca alguna dimensión y su orientación es posible obtener sus medidas reales por procedimientos gráficos, lo que permitirá, posteriormente, el desarrollo del método fotogramétrico.

Este método manual presentaba serias limitaciones debido a la imprecisión de los datos de partida, constituidos por dibujos en perspectiva cónica y conllevaban cierta aproximación a las formas reales. No obstante varios estudiosos se dedicaron a la aplicación y al perfeccionamiento del sistema llegando a utilizar dos perspectivas distintas del mismo objeto para facilitar la restitución, concepto que resultaría muy útil para el desarrollo del método fotogramétrico. En 1812 Wollaston mejoró la calidad de las imágenes producidas con la cámara oscura, lo que daría lugar a la fotografía. En 1836 Daguerre presentó en la Academia francesa de Artes y Ciencias fotografías positivas en placas metálicas que llamó daguerrotipos. Al mismo tiempo Fox Talbot ideó un método de negativo a positivo y Wheatstone inventó el estereoscopio que permitía la visión tridimensional de pares de fotografías. Al finalizar la década de los treinta, en 1839, D.F. Arago realizó la primera fotografía desde el aire.

Aime Laussedat (1819- 1907), coronel del ejército francés se dedicó a realizar los primeros experimentos para

dibujar cartografía territorial para uso militar, llamando a este método de levantamiento indirecto “*iconometría*”, para después llamarlo “*metrofotografía*” cuando empezó a utilizar las fotografías realizadas con cámara clara. Mediante estas fotografías reprodujo gráficamente la fachada del Hôtel des Invalides de París



Restitución gráfica del Castillo de Vincennes mediante iconometría, Laussedat.

Casi simultáneamente, Albrecht Meydenbauer (Albertz, 2002) [143], desarrolla y perfecciona la técnica fotogramétrica. Creó cámaras y sistemas capaces de documentar edificios de forma más precisa que los métodos tradicionales, definiendo al sistema con el nombre actual de *fotogrametría*. En 1885 fundó el primer servicio de fotogrametría para la documentación de los monumentos de Prusia “*Messhildansat*” (Real Instituto Fotogramétrico Prusiano), que se ocupó de catalogar monumentos históricos con más de 76000 fotogramas

143 ALBERTZ, J. (2002) Albrecht Meydenbauer-Pioneer of photogrammetric documentation of the cultural heritage. International Archives of Photogrammetry Remote

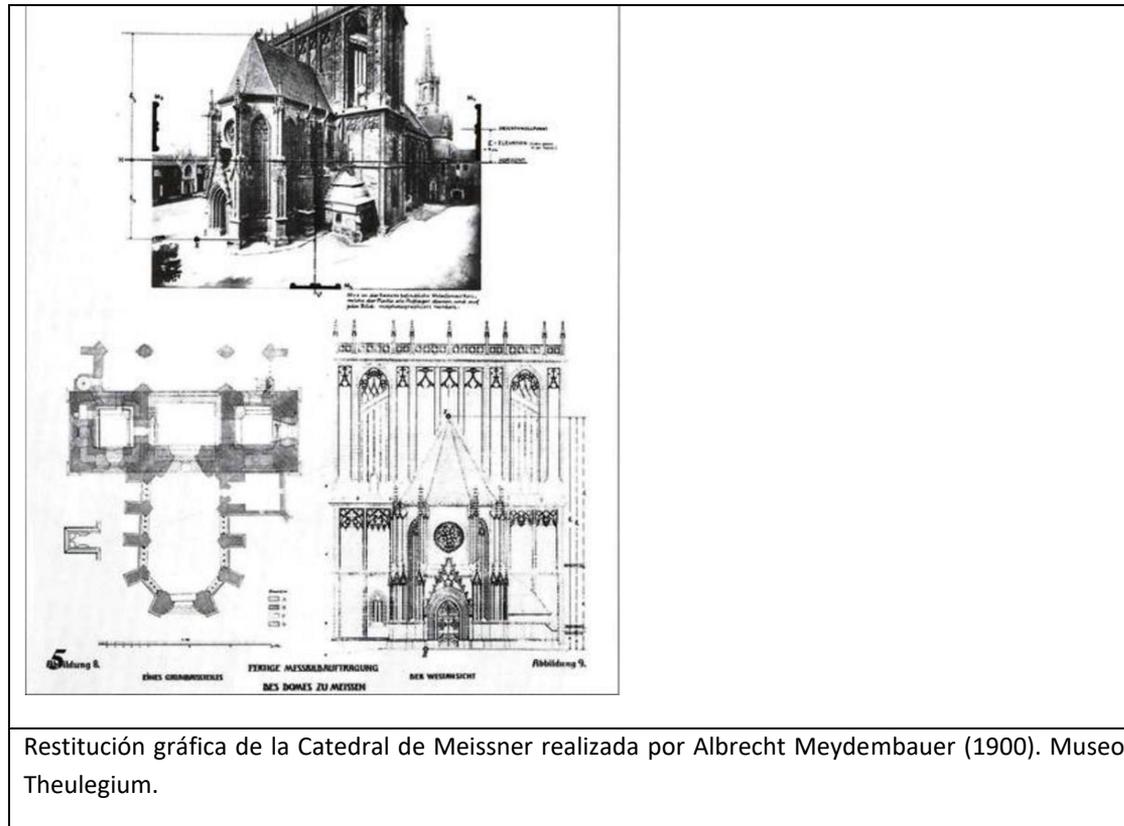
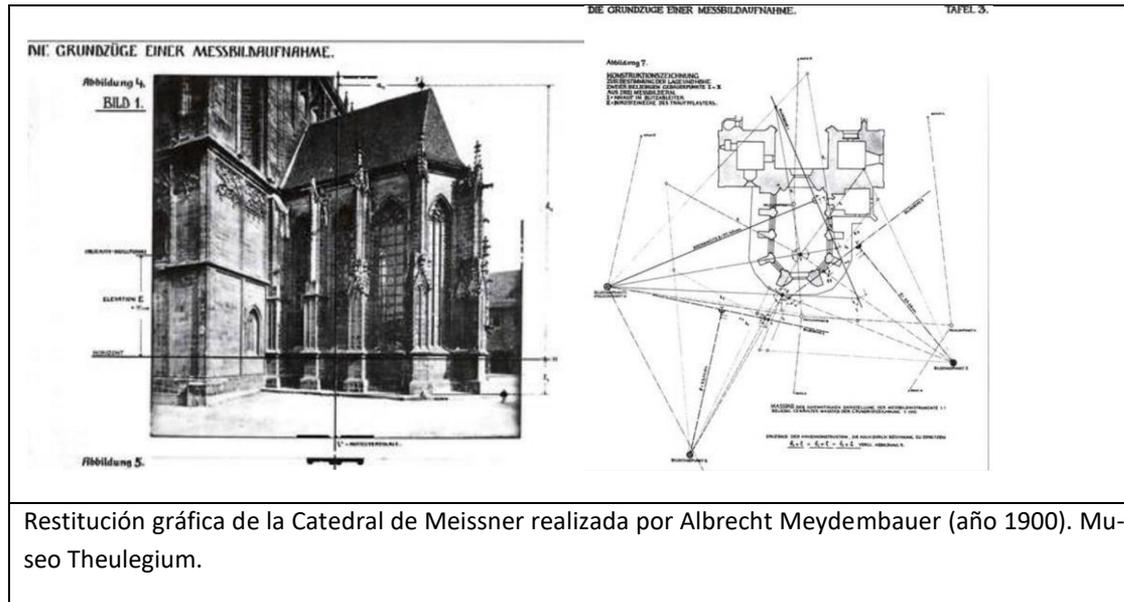
Sensing and Spatial Information Sciences, vol. 34, no 5/C7, p. 19-25.

que sirvieron para su posterior reconstrucción. Su utilización tuvo pronto aplicación en estudio del territorio mediante fotografías tomadas desde globos aerostáticos. Surgiendo dos disciplinas o procedimientos dependiendo desde donde se capturaban las fotografías: fotogrametría “aérea”, en la que las imágenes son capturadas desde un avión en movimiento y fotogrametría “terrestre”



Primera fotografía aérea de París (1867) que sirvió para realizar el plano de esta ciudad.

Los métodos utilizados por Laussedat y Meydembauer se basaban en una restitución gráfica por intersecciones de rayos perspectivos a partir de dos imágenes capturadas de un mismo objeto. Para poder realizar este procedimiento se necesitaban fotografías de gran formato, la definición de la exacta posición desde donde se había tomado cada fotografía y las direcciones de los ejes ópticos de las cámaras en cada dirección.



En el siglo XIX se desarrollaron métodos e instrumentos que permitieron un avance rápido de la técnica fotogramétrica. En 1903 el alemán Julius Neubronner ideó una cámara de 70 g de peso especial para colocarlas sobre palomas y realizar fotografías aéreas [144].



Paloma con cámara, tomada durante la I Guerra Mundial. Fuente Wikipedia.

La fotogrametría se utilizaba para determinar la posición de puntos característicos de un edificio midiendo directamente sobre una o varias fotografías, sustituyendo la labor de campo por trabajo de laboratorio, dibujándose las líneas arquitectónicas de la misma forma que en los trabajos.

En España, Antonio Terrero estableció en 1863 las bases teóricas de la fototopografía, pero no fue hasta la segunda década del siglo XX cuando empezó a utilizarse de forma generalizada, concretamente en el levantamiento y restitución del Mapa del Protectorado

de Marruecos y del Mapa Topográfico de España. El ingeniero geógrafo Torroja y Miret fue uno de los principales introductores, difusores y organizadores de los trabajos topográficos de campo. [145]

A principios del siglo XX se sistematiza la creación de archivos fotogramétricos con pares estéreos. El desarrollo de la estereofotogrametría permitió un cambio sustancial en la forma de acometer los trabajos permitiendo la restitución directa de todas las líneas arquitectónicas de forma más rápida y precisa. El desarrollo de la fotogrametría analógica permitió abandonar los métodos basados en las medidas directas sobre fotografías para realizarse sobre instrumentos óptico mecánicos.

La aparición del ordenador permitió el desarrollo de sistemas analíticos de restitución, sustituyendo los complejos y caros sistemas analógicos, por otros de cálculo analítico, mucho más precisos y económicos así como la posibilidad de dibujo automático sobre programas de CAD. El desarrollo del CAD (Computer Aided Design – Diseño Asistido por Ordenador-), supuso un impulso espectacular a los medios de expresión gráfica.

En la actualidad el desarrollo de la fotografía digital ha permitido automatizar el sistema y generar maquetas virtuales de gran precisión, de forma extremadamente rápida y con gran calidad gráfica.

144 RODRIGUEZ JORDANA, J.; NUÑEZ ANDRÉS, M A Núñez. (2008) *Fotogrametría arquitectónica*. Universitat Politècnica de Catalunya. Iniciativa Digital Politècnica.

145 MURO MORALES, J I, et al. (2002) La fotogrametría terrestre en España (1914-1958). *Investigaciones geográficas*, nº 27, 2002; pp. 151-172.

3.4.2 METODOS DE LEVANTAMIENTO

El uso de la representación gráfica de los restos de edificios antiguos como medio de análisis y comunicación ha impulsado una evolución continua de los métodos de medición que nos proponemos analizar en este apartado.

Desde sus inicios la restitución gráfica de la arquitectura ha establecido como criterio clasificador, la medición de medición directa manual y por el otro lado los sistemas de levantamiento indirecto. El primer método precisa acceder a las partes del edificio para poder tomar medidas empleando instrumentos como cintas métricas, cuerdas, plomadas, reglas o escuadras. El segundo método se basa en la medición de alturas y distancias de puntos inaccesibles empleando sistemas que no comportan el contacto directo sino a partir de la resolución de problemas geométricos a partir de las visuales determinadas por instrumentos diseñados para tal fin. Esta clasificación tan simplista, de acuerdo a la accesibilidad o no al punto a medir ha quedado completamente desfasada de acuerdo a los nuevos instrumentos y métodos de medida, siendo complejo establecer que se entiende por método directo o indirecto en la actualidad.

En un principio podíamos definir los métodos directos como aquellos que nos aportan datos de medida o de la representación de forma directa (inmediata), sean accesibles o no. El procedimiento de medición con cinta métrica es similar al utilizado por un distanciómetro laser de mano, si bien en este segundo caso es factible medir a puntos inaccesibles. De igual modo, una medición con estación total, sea el punto accesible o

inaccesible facilita el dato medido de forma inmediata e incluso representado gráficamente sobre la pantalla del equipo. Siguiendo la casuística, la medición con escáner laser es similar a la medición con una estación total (puntos medidos en el espacio) siendo los puntos visibles y en su caso medibles de forma inmediata sobre la pantalla del portátil y por tanto, tan solo podíamos considerar, en sentido estricto, a la fotogrametría como un método indirecto pues es necesario realizar un procesamiento previo para obtener la representación del objeto de estudio, en algunos casos, por digitalización “directa” sobre una imagen métrica.

Por tanto, parece más lógico realizar una clasificación de acuerdo al método o tecnología y no en base a una clasificación general en base a sistemas antiguos.

La utilización del croquis o fotografías ayudados de medidas directas tomadas con flexómetro, distanciómetro laser o estación total sigue siendo útil hoy en día, sin embargo la posibilidad de obtener un modelo tridimensional de una forma rápida y adecuada calidad métrica puede resultar muy útil en numerosos casos. Este modelo tridimensional conserva tanto la geometría original como la textura, lo que nos permite otros datos de vital importancia para la documentación de patrimonio y que son necesarios en un proceso de investigación, restauración y rehabilitación [146], (deformaciones, erosión, agrietamientos, humedades, etc.). En este sentido la fotogrametría digital automatizada nos ofrece grandes posibilidades ya que nos proporciona gran calidad métrica y visual a un bajo coste.

Pero, independientemente del método que se vaya a seguir, en todo levantamiento se deben establecer ciertos criterios iniciales que nos van a determinar el

146 SOUTO-VIDAL, M.; ORTIZ-SANZ, J.; GIL-DOCAMPO, M. (2015) Implementación del levantamiento eficiente de fachadas mediante fotogrametría

digital automatizada y el uso de software gratuito. *Informes de la Construcción*, vol. 67, no 539, p. 107.

instrumento o método a emplear [147] (Rodríguez Navarro, 2015), como son: finalidad del levantamiento, tolerancias, establecimiento del sistema de coordenadas local o global, escala de definición, situación y orientación, protocolo de actuación y tipo de documentación necesaria (modelo 3D, ortofotografías, planos 2D rectificadas de línea, así como los formatos de comunicación o intercambio.

3.4.2.1 EL REGISTRO MANUAL

Si bien la captura manual de los datos mediante cinta métrica, distanciómetro laser o niveles ópticos y miras o las plomadas, nos permiten medir elementos geométricos simples, las complicadas tareas de representación gráfica posterior y la gran probabilidad de cometer equivocaciones los hacen más complejos que los nuevos sistemas de registro. Su sustitución por otros métodos rápidos y seguros como el uso de estaciones totales con distanciómetría laser para la medición de elementos simples, nos permite una captura más rápida y precisa de los puntos, obteniendo una representación gráfica inmediata, sobre entornos gráficos digitales, libre de equivocaciones.

La necesidad de realizar diferentes croquis a diferentes escalas, dependiendo de las magnitudes o complejidad de los elementos a representar, hace que el proceso de campo se ralentice. Como he comentado, el registro manual de datos produce múltiples equivocaciones e incertidumbres de difícil localización hasta que no se realiza el dibujo, provocando en muchos casos la obligación de volver al campo a medir. La necesidad de

realizar triangulaciones para comprobar descuadres complica aún más la toma y representación de los elementos. Sin embargo, este examen pausado y detenido para la realización de los croquis, constituye el momento idóneo para el análisis, interpretación y estructuración de los elementos que interesa documentar.

Los levantamientos a mano adolecen de una falta considerable de precisión absoluta permitiendo tan solo realizar representaciones muy simplificadas de plantas, alzados o secciones. En cualquier caso, podemos considerar que, el único levantamiento íntegramente directo es el que se utiliza en algunas excavaciones arqueológicas mediante el dibujo manual directo de plantas y alzados auxiliados por una cuadrícula de referencia con cuerdas, que ayudaban a “respetar” la escala y las proporciones. La representación se realiza generalmente sobre papel milimetrado a grandes escalas, a partir de medidas referidas a la cuadrícula auxiliar [148]. Este sistema presenta el grave inconveniente de tener que interpretar y representar formas tridimensionales complejas sobre planos bidimensionales, siendo un proceso lento y complicado, con grandes dosis de subjetividad por parte del que dibuja.

Podemos concluir que los levantamientos a mano solo son factibles cuando haya que documentar elementos con geometrías simples, de pequeñas dimensiones. Deben realizarse por profesionales con experiencia en el dibujo, pues de lo contrario siempre faltarán medidas.

147 RODRÍGUEZ-NAVARRO, P., VERDIANI, G., & PIQUERAS, T. G. (2015). Comprehensive Methodology for Documenting the Defense Towers of the Valencian Coast (Spain). *DEFENSIVE ARCHITECTURE OF THE MEDITERRANEAN*, 321.

148 ALMAGRO GORBEA, A. 2004, *Levantamiento arquitectónico*, Universidad de Granada. 62.

La realización del croquis constituye un momento esencial, no tanto por la calidad gráfica de la representación, sino porque ayuda a comprender el objeto de estudio. Su elaboración necesita analizar y comprender las formas y como interrelacionan entre sí para poder dibujarlas.

3.4.2.2 EL REGISTRO TOPOGRÁFICO

Actualmente, existen una serie de instrumentos que aportan una mayor rapidez y facilidad en el proceso de toma de datos, permitiendo incluso la medición de puntos inaccesibles mediante la utilización de la distanciometría laser. El trabajo con coordenadas absolutas permite que, independientemente del punto desde el que se levanten, dispongan de coordenadas referidas a un sistema de referencia común. La gestión informatizada de los datos, que se registran automáticamente en archivos de coordenadas para ser posteriormente importados en aplicaciones CAD, permite obtener documentos gráficos de forma eficiente y precisa, evitando por completo las equivocaciones provocadas por la manipulación humana de los datos.

La complejidad de formas y los espacios de un edificio histórico nos obliga a realizar un análisis tridimensional mediante la utilización de instrumentos y métodos que faciliten la obtención de coordenadas tridimensionales de los puntos que definen su forma bajo un mismo sistema de referencia. Como indica Antonio Almagro, *“la determinación de la forma real de un objeto arquitectónico no es labor sencilla, y máxime cuando presenta dificultades intrínsecas como pueden ser las derivadas de su tamaño o forma”* [148] a lo que habría que añadir, en muchas ocasiones, su ubicación (inaccesibilidad).

Las técnicas topográficas de medición se basan fundamentalmente en la determinación de las direcciones en que se encuentran los puntos a medir respecto del punto de estacionado. Hasta hace pocas décadas, la medición de puntos inaccesibles representaba un problema de compleja e imprecisa solución pues necesita, al menos, la resolución de problemas geométricos de intersección de visuales a un mismo punto desde dos posiciones distintas. La incorporación de la distanciometría laser ha sido crucial para el levantamiento de elementos inaccesibles (cúpulas, techos, fachadas, zonas muy peligrosas, etc.), o incluso también para la medición de puntos accesibles para los que no es necesario un segundo operador.

Hasta hace apenas dos décadas la fotogrametría estereoscópica era básicamente el único procedimiento empleado para dar coordenadas a puntos inaccesibles. Sin embargo la situación cambió notablemente con la aparición y desarrollo de la medición electrónica de distancia. La incorporación de la electrónica a los instrumentos topográficos tradicionales -medida electrónica de ángulos, medida electrónica de distancias y procesamiento y almacenamiento interno - supuso una auténtica revolución en la metodología aplicada a los levantamientos de edificios. La medida de distancias por infrarrojos sobre prisma o mejor aún, la medida electrónica mediante rayo láser han permitido realizar levantamientos de gran cantidad de puntos con gran rapidez y precisión.

La tecnología que incorporan estos instrumentos está ampliamente explicada en diversas publicaciones [149]

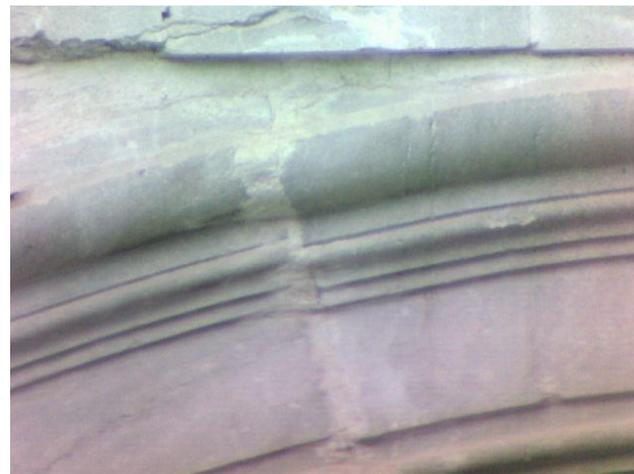
149 GOPI, S. (2007). *Advanced Surveying: Total Station, GIS and Remote Sensing*. Pearson Education India.

[150] [151], pero en esencia se basa en la determinación de la distancia a partir del tiempo que emplea la onda electromagnética en ir y volver al propio instrumento que la generó.

Al método habitual de medición de puntos se le denomina “radiación”, pues la determinación de las coordenadas de los puntos se realiza mediante el trazado de visuales o radios desde el punto de estación. Los puntos quedan registrados a partir de sus coordenadas polares esféricas (ángulo horizontal, ángulo vertical y distancia geométrica) que se transforman en sus coordenadas cartesianas mediante simples cálculos trigonométricos.

En edificios o monumentos de grandes dimensiones o cuando la configuración espacial impida la medición desde un único punto de estación se procederá a realizar el método de itinerario con la prescripciones establecidas para este tipo de red. El procedimiento itinerario consiste en definir una serie de estaciones dispuestas en un recorrido de tal manera que desde cada una de ellas podamos ver la estación anterior y la siguiente permitiendo de esta forma trasladar el sistema de referencia origen a las distintas estaciones y de esa forma poder determinar las coordenadas X, Y, Z de los puntos medidos bajo un mismo sistema de referencia [152] [153]. De esta forma se consigue trasladar el equipo con el mismo sistema de referencia a otras posiciones más adecuadas para completar el levantamiento del objeto de estudio. La determinación de las coordenadas de estos puntos debe realizarse con el rigor métrico suficiente para evitar que se trasladen

errores a los puntos medidos o que la acumulación de estos produzca errores fuera de la tolerancia máxima. Estos métodos siguen teniendo plena vigencia, bien por si solos o como método para la determinación de las coordenadas de los puntos de apoyo fotogramétricos o georreferenciación de modelos de escáner. El método de radiación mediante Estación Total es el método más preciso para la determinación de las coordenadas tridimensionales de los puntos si bien la incomodidad del trabajo en campo o el excesivo nivel de detalle que se observa a través de la imagen del antejo hacen que tenga una visión más restringida y no se capturen todos los puntos que serían necesarios para la completa documentación del organismo arquitectónico. En cualquier caso, la medición punto a punto de las formas geométricas complejas hace que el proceso sea lento e impreciso, ya que el gran aumento óptico de los anteojos (normalmente X30), hacen que cualquier irregularidad del objeto deba ser considerada en el proceso de medición.



150 DOMÍNGUEZ GARCÍA-TEJERO. (1992)., TOPOGRAFÍA GENERAL Y APLICADA.

151 BRINKER, Russell C.; WOLF, Paul R. (1982) *Topografía moderna*. Harla,

152 DOMÍNGUEZ GARCIA-TEJERO, F. (1993). Topografía general y aplicada. *Ediciones Mundi-Prensa, Madrid*.

153 CHUECA PAZOS, M., HERRÁEZ BOQUERA, J., & BERNÉ VALERO, J. L. (1996). Métodos topográficos. *TOMO II Paraninfo SA MADRID*.

El aumento de visión de la lente (X30) hace que cualquier irregularidad deba ser considerada para su documentación

Otro instrumento de gran utilidad en el levantamiento y georreferenciación topográfica es el GPS. El GPS (Global Positioning System o sistema de posicionamiento global) es un Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS) que permite determinar las coordenadas de puntos en un sistema de referencia Universal. El sistema de posicionamiento global está formado por una constelación de satélites que orbitan alrededor de la tierra en unas efemérides precisas, transmitiendo cada uno señales electromagnéticas codificadas de *Tiempo* y *Rango* que permiten determinar la distancia desde el punto de posicionamiento a cada uno de ellos. Conocida en cada momento la posición de cada uno de los satélites a partir de las estaciones de referencia en tierra, es posible, por trilateración múltiple, determinar las coordenadas precisas de cualquier punto con buena visibilidad del cielo.

La gran distancia a la que se sitúan los satélites (aprox 16.000 a 20.000 km) hace que la señal emitida sufra interferencias en su camino produciendo errores en el cálculo de la distancia. Para suplir este problema se han desarrollado diferentes sistemas de corrección de errores que implican diferentes métodos de medición en función de cómo se calculan las coordenadas precisas del punto:

- Medición en “tiempo real” también denominado RTK (Real Time Kinimetic): la corrección de errores se realiza simultáneamente a la medición, “en tiempo real”. Se necesita la utilización de dos equipos: uno fijo que determina los errores de medida

en cada milisegundo y otro equipo móvil que recibe la señal GPS y además, por radio-modem, las correcciones de errores detectadas por el equipo fijo. Dentro de este sistema podemos distinguir dos formas de operar: mediante dos equipos GPS conectados entre sí en campo o mediante un equipo en campo que se conecta, por la red móvil telefónica, a estaciones fijas de referencia que emiten las correcciones de forma ininterrumpida.

- Medición en “post proceso”: Si no se dispone de dos equipos o no hay cobertura para la conexión a la red de referencia nacional, se capturan los datos brutos y posteriormente en el ordenador se procesan los datos “*rinex*” descargados de las estaciones de referencia y mediante correspondencia de ambos se calculan sus coordenadas corregidas.

Alfonso Jiménez resume con gran claridad las ventajas del sistema GPS tiene en la documentación de elementos patrimoniales sobre todo cuando son complejos o de gran extensión “...*gran automatismo, lo que implica gran velocidad en la toma de datos, el carácter absoluto de sus coordenadas y su uso continuo, base de su capacidad para capturar datos de forma extensiva; tiene en contra el coste inicial de los equipos y los fallos de cobertura, dependiente de la geometría de los satélites; su uso es imprescindible en temas territoriales y para determinar de forma rápida y fiable la geometría de edificios extensos y de formas complejas, tales como fortificaciones y yacimientos arqueológicos*” [154]

Este sistema es empleado habitualmente en la captura de coordenadas de puntos de apoyo fotogramétrico en tierra o como base de estacionamiento para las sucesivas radiaciones a realizar con Estación Total. A la gran

154 JIMENEZ, A; PINTO, F. (2003), 93 Levantamiento y análisis de edificios. tradición y futuro. Universidad de Sevilla.

ventaja que permite la obtención de coordenadas universales georreferenciadas se contrapone la necesidad de colocar la antena sobre los puntos que sean accesibles y que además tengan suficiente cobertura espacial para recibir adecuadamente la señal emitida por los satélites. La necesidad de triangular simultáneamente a, al menos, cinco satélites situados en el cielo los hacen inservibles para la medición bajo o junto a elementos estructurales o vegetación que provocan sombra respecto de los satélites.

3.4.2.3 TLS: ESCANER LASER TERRESTRE

La incorporación de esta nueva tecnología en la documentación del patrimonio arquitectónico y arqueológico ha producido un importante aporte científico. Diversas investigaciones han puesto de manifiesto las ventajas y desventajas que esta tecnología nos aporta [155].

El escaneado láser [156] describe un método de medición mediante el cual un objeto o edificio es registrado mediante tecnología láser. Esta tecnología utiliza técnicas de medición activas, es decir, los instrumentos emiten algún tipo de radiación controlada y detectan su reflexión comparando los datos de salida y los recibidos.

Los escáneres láser se utilizan en multitud de aplicaciones: militares, medicina, biología, geología, urbanismo, topografía, telecomunicaciones, etc. Su aplicación a los instrumentos de medición ha revolucionado los métodos de levantamiento arquitectónico. Los TLS (*Terrestrial Laser Scanner*) [157] permiten el registro y análisis de estado de conservación de un Bien Patrimonial sin necesidad de tener acceso ni contacto con el objeto, permitiendo elaborar una documentación gráfica de alta definición (*High-Definition Survey*), de ahí que también se le conozca con el acrónimo HDS

La ventaja del escaneado láser es el hecho de que puede tomar una gran cantidad de puntos con una alta precisión en un periodo de tiempo relativamente corto para posteriormente ser usados en la realización de planos bidimensionales o modelos tridimensionales útiles en una gran variedad de aplicaciones. Los escáneres láser son instrumentos de línea de vista, es decir, solo pueden capturar lo que es visible desde su posición, siendo necesario realizar múltiples capturas desde diferentes emplazamientos para garantizar una cobertura completa del objeto de estudio [158].

Los escáneres láser pueden realizar un barrido completo o selectivo del elemento de estudio obteniendo una nube de puntos densa en la que además de las coordenadas tridimensionales de cada uno de los pun-

155 BORNAL, L., & RINAUDO, F. (2004). Terrestrial laser scanner data processing. In *XXth ISPRS Congress Istanbul*.

- BARRERA VERA, J. A. (2006). Aplicación de tecnologías innovadoras en la documentación geométrica del Patrimonio Arquitectónico y Arqueológico.
- LERMA, J. L., & BIOSCA, J. M. (2008). Teoría y práctica del escaneado láser terrestre. *Material de aprendizaje basado en aplicaciones prácticas. Preparado por el pro-*

yecto Herramientas de aprendizaje para el levantamiento tridimensional avanzado en la conciencia de riesgos (3DRiskMapping). Versión, 5.

156 La palabra láser es el acrónimo en inglés de las palabras amplificación de la luz por emisión inducida de radiación (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation).

157 TLS acrónimo de Terrestrial Laser Scanner.

158 LERMA, J. L.; BIOSCA, J. M. (2008) Teoría y práctica del escaneado láser terrestre. *3D Risk Mapping. Memorias*, p. 1-30.

tos se captura el valor de reflectancia del objeto medido. Este valor indica la calidad (intensidad) de la onda recibida una vez reflejada y va a depender de varios factores como: el tipo de material, textura, ángulo de incidencia, luminosidad ambiente, etc.

Un láser típico emite luz en un estrecho y coherente haz de longitud de onda bien definida, es decir, guarda una relación de fase constante en diferentes puntos a lo largo del haz. Gracias a esta propiedad los haces de láser están enfocados aun cuando se proyectan sobre objetos lejanos.

El uso del láser en los instrumentos de medición nos obliga a conocer los diferentes tipos de láser, en función de su longitud de onda, así como los riesgos [159] que estos entrañan y que en resumen clasificamos en:

- Clase 1: Seguros en condiciones razonables de utilización
- Clase 1M: Como la Clase 1, pero no seguros cuando se miran a través de instrumentos ópticos como lupas o binoculares.
- Clase 2: Láseres visibles (400 a 700 nm). Los reflejos de aversión protegen el ojo aunque se utilicen con instrumentos ópticos.
- Clase 2M: Como la Clase 2, pero no seguros cuando se utilizan instrumentos ópticos.
- Clase 3R: Láseres cuya visión directa es potencialmente peligrosa pero el riesgo es menor y necesitan menos requisitos de fabricación y medidas de control que la Clase 3B.
- Clase 3B: La visión directa del haz es siempre peligrosa, mientras que la reflexión difusa es normalmente segura.

¹⁵⁹ En la norma UNE (UNE EN 60825-1/A2: 2002) establece una clasificación de los láseres en función de los riesgos que supone su utilización

- Clase 4: La exposición directa de ojos y piel siempre es peligrosa y la reflexión difusa normalmente también. Pueden originar incendios.

El sistema generador del haz láser del escáner asegura la precisión en la generación y medición del rayo de luz. El barrido se realiza mediante un complejo sistema sincronizado: un motor paso a paso controla el incremento de giro horizontal alrededor de un eje vertical en función de la resolución deseada, mientras que un espejo basculante desvía el movimiento vertical del rayo láser.

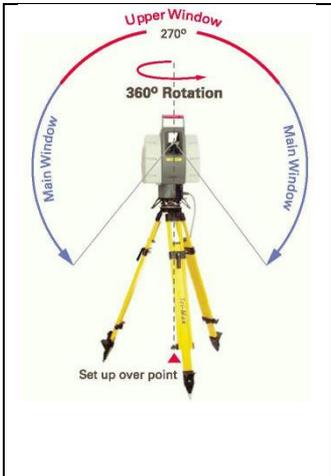
	Leica Scan Station
Método de escaneo	Tiempo de vuelo
Campo de visión	360° x 270°
Distancia de escaneo	< 300 m
Velocidad de escaneo	< 4000 pts/sg
Resolución angular vertical	0,003°
Resolución angular horizontal	0,003°
Precisión 3D	6mm/50m
Control de inclinación	compensador

Gráfico del área de captura del escáner láser HDS Scan Station
Fuente: Leica Geosystems.

Además, con el objeto de que estos modelos dispongan de una textura fotorrealista, los escáneres laser suelen incorporar cámaras internas o en su defecto, mecanismos para la adaptación de cámaras réflex externas previamente alineadas y calibradas. Las cámaras internas suelen presentar múltiples inconvenientes

provocados por la captura automática de imágenes : a) disponen de poca resolución (entre 1 Mgb y 5 Mgb); b) imágenes simultáneas con diferente iluminación o mal contrastadas, cuyos resultados finales son desechables, siendo sustituidas por cámaras externas con gran resolución y control manual por parte del operador.

En el siguiente cuadro se resumen las principales ventajas e inconvenientes del uso del escáner laser.

Ventajas:

- Rápida captura del modelo de nube de puntos
- Los modelos disponen de dimensión inmediata.
- No se necesitan grandes conocimientos técnicos

Inconvenientes

- El posicionamiento desde tierra provoca multitud de zonas indefinidas por el relieve de los objetos.
- La captura de imágenes desde la posición del escáner (a distancia u oblicuas) produce texturas de mala calidad.
- El tiempo de captura entre una y otra toma provoca un cambio de iluminación en los paramentos difícil de solucionar.
- Medición indiscriminada de objetos ajenos al elemento a documentar: personas, vehículos, etc.
- Resolución muy variable de la densidad de la nube consecuencia de la distancia escáner objeto o la inclinación del rayo respecto del paramento.

- Incertidumbre en la definición geométrica de la nube de puntos.
- Ajuste matemático de todos los procesos que queda fuera del control del operador o que requiere una importante especialización técnica. Es necesario conjugar infinidad de variables de ajuste, no siempre bien definidas.
- Coste importante de adquisición o alquiler.
- Indefinición geométrica por rebote múltiple de la onda [160]
- Necesita realizar múltiples cambios de posición para cubrir todo el objeto, necesitando siempre de una amplio solape entre las diferentes tomas.
- Importante trabajo de post-proceso para el filtrado, alineación y conjunción de las tomas.
- La incorrecta adaptación de objetivo de la cámara (distancia focal) al área de escaneado provoca zonas de la nube de puntos sin textura, o en su defecto con una resolución geométrica deficiente.

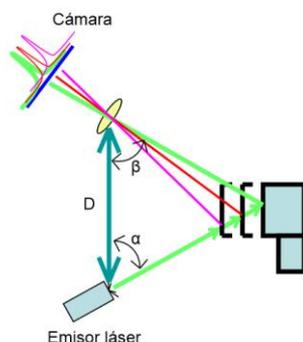
Existen varios tipos de escáneres laser, diferenciándose entre ellos en la manera en la que el escáner recibe y/o analiza la señal de radiación reflejada:

En la actualidad existen tres tipos de escáneres láser [161]: los que emplean triangulación óptica, los basados en la medición de distancias por “diferencia de fase” o los que miden por “pulsos” también llamados “tiempo de vuelo”

160 ESQUIVEL, J. A., BENAVIDES, J. A., & ESQUIVEL, F. J. (2012). El análisis de la forma de onda de los escáneres terrestres aplicados a la investigación arqueológica. *Cuadernos de Prehistoria y Arqueología de la Universidad de Granada*, 22, 413-424. FORTE, M, et al. (2012) 3D archaeology at Çatalhöyük. *International Journal of Heritage in the Digital Era*, 2012, vol. 1, no 3, p. 351-378.

161 MESA G, REGOT, J. M., NÚÑEZ, M. A., & BUILL, F. (2009). Métodos y procesos para el levantamiento de reconstrucción tridimensional gráfica de elementos del patrimonio cultural. La iglesia de Sant Sever de Barcelona. *EGA: revista de expresión gráfica arquitectónica*, (14), 82-89.

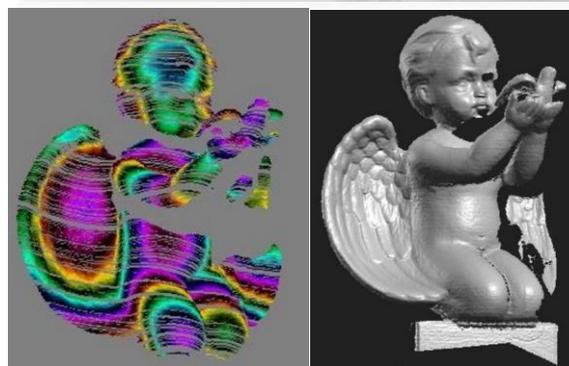
Los escáneres **laser por triangulación** determinan la posición de los puntos o líneas mediante la intersección directa por triangulación entre la posición de emisor laser y del receptor (cámara que detecta la proyección del láser sobre el objeto). La magnitud de los objetos a medir depende de la distancia base “emisor-receptor” siendo aproximadamente de 5 a 10 cm por lo que el alcance efectivo de estos equipo raras veces alcanza 1 metro. Por el contrario, dispone de una alta precisión (inferior al milímetro), estando especialmente indicados para el modelado de objetos de pequeñas dimensión.



Esquema de triangulación laser. Fuente Lerma, J. L.; Biosca

A partir de los valores conocidos de “D” (distancia de la base) y “alfa” (ángulo formado por emisor y la base) es posible determinar la profundidad exacta del objeto mediante el cálculo analítica del ángulo “Beta”.

En el mercado existen escáner por triangulación de bajo coste, como *David laser scanner*. En este caso se arrastra manualmente una línea laser a través del objeto permaneciendo fija la posición del sensor de la cámara. El ángulo formado entre cámara y objeto se calcula en base a un patrón geométrico que se sitúa detrás del objeto.



Ejemplo de escáner por triangulación de bajo coste. Fuente: David laser scanner.

Los **escáneres de medición basados en tiempo** se basan en la determinación del intervalo del tiempo entre la emisión de la onda electromagnética y su recepción en el mismo equipo después de haber rebotado sobre el objeto a medir. Los escáner de *tiempo de vuelo* o los de comparación de fases se basan en el principio siguiente: puesto que la velocidad de la luz “c” es conocida, se puede determinar la distancia “d”, recorrida por el pulso al partir de la medición del tiempo “t” que el pulso laser tarda en alcanzar el objeto y volver al detector utilizando la fórmula

$$d = \frac{c \cdot t}{2}$$

Conocida la velocidad de la luz en el vacío 299.792.458 m/s y aplicado un factor de corrección al viajar por el aire, podemos decir que la velocidad de la luz en el aire es de aproximadamente 300.000 km/s por lo que se tardaría 3 nanosegundos en recorrer un metro o 3 picosegundos en medir 1 mm. Para medir de manera precisa estos tiempos los **escáneres de tiempo de vuelo** comparan la intensidad del pulso emitido y la del recibido. La fidelidad en la comparación entre ambos pulsos, nos determinará la precisión en la medida de la distancia. La mayoría de los sistemas comerciales de medio y largo alcance proporcionan una precisión entre 6 y 10 mm.

En un sistema de tiempo de vuelo, la máxima frecuencia de pulso está determinada por el hecho de que el emisor no puede enviar un pulso hasta que no haya recibido el anterior por lo que su velocidad se limita entre 2.000 a 50.000 puntos por segundo.

La ventaja de usar un sistema de pulsos para las mediciones láser de distancia es la alta concentración de la energía transmitida lo que permite altas precisiones [162] en mediciones de larga distancia (desde centenares de metros hasta kilómetros). Los diferentes retornos de pulso debidos a la óptica y a la atmosfera inducen desiguales reflexiones de pulso lo que provoca ruidos en la nube de puntos resultante. Para asegurar la precisión de la restitución el usuario tiene que configurar algunos datos relativos a la presión, temperatura, la humedad [163]



Tipo de instrumento	Escáner láser pulsado de alta velocidad con precisión, alcance y campo de visión	
Interfaz de usuario	Portátil o Tablet PC	
Cámara	Cámara digital de alta resolución	
Precisión de medición simple	Posición* Distancia* Ángulo (horizontal/vertical)	
Tamaño de punto láser	Desde 0 - 50 m : 4 mm (basado en el tamaño del punto)	
Superficie modelada precisión/ruido	2 mm **	
Adquisición de señal de puntería	2 mm desviación estándar	
Compensador de eje doble	Resolución 1", alcance dinámico +	
Monitorización de integridad de datos	Autocomprobación periódica durante el escaneo	
Sistema de escaneo láser	Alcance	300 m @ 90%; 130 m @ 90%; 130 m @ 90%
	Velocidad de escaneo	instantánea máxima: 130000 puntos/segundo Promedio: depende de la configuración y el campo de visión
	Densidad de escaneo	< 1 mm máx, en todo el campo de visión horizontal y vertical totalmente
Clase de láser	3R (IEC-60825-1), verde visible	
Iluminación	Funcionamiento completo desde el modo de espera completa	
Fuente de alimentación	36 V; CA o CC; conectable en caliente	

Especificaciones sujetas a cambio sin previo aviso
Véase Leica ScanStation 2 Especificaciones de producto para datos técnicos

* A 50 m de alcance, un sigma

Imagen y especificaciones técnicas de uno escáner laser de pulso "tiempo de vuelo" usado en el proyecto de la firma Leica Geosystems

162 LERMA, J. L.; BIOSCA, J. M. (2008) Teoría y práctica del escaneado láser terrestre. *3D Risk Mapping. Memorias*, p. 26.

163 DOCCI Y MAESTRI (2010), Manuale di rilevamento architettonico e urbano. *Nuova edizione ampliata*.220.

En los escáneres que trabajan por **diferencia de fase**, el tiempo se determina en base a la comparación de fase entre diferentes ondas de frecuencia conocida. Para ello se utiliza el comparador de fase, emitiendo un pulso con una frecuencia determinada dentro de una onda portadora de mayor longitud que permite determinar el número exacto de ciclos completos de la onda de mayor frecuencia. En esta tecnología el tiempo se determina de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$t = \frac{\Delta\phi}{2\pi \cdot f_{modulada}}$$

Siendo :

($\Delta\Phi$) en incremento de fase ente emitida y recibida.

($f_{modulada}$) la frecuencia modulada

(t) el tiempo de ida + retorno

Por tanto, la ecuación de medición de distancia basada en la diferencia de fase viene determinada por la ecuación:

$$D = \frac{c \cdot t}{2} = \frac{c}{4\pi} \cdot \frac{\Delta\phi}{f_{modulada}}$$

El alcance de los escáneres de fase viene limitado por la determinación del número exacto de ciclos en función de las diferentes longitudes de onda emitidas y por tanto tienen menor alcance, pero tienen mayor velocidad y resolución que los escáneres de tiempo de vuelo. Esta tecnología es la misma que utilizan las Estaciones Totales topográficas.

164 LICHTI, D., ET AL. (2000) Calibration and testing of a terrestrial laser scanner. in *Int. Arch. of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2000. BALZANI, M., PELLEGRINELLI, A., PERFETTI, N., & UCCELLI, F. (2002). A terrestrial 3d laser scanner-accuracy tests. *International Archives of Photogrammetry Remote*

Scanner Faro Focus3D X 130



Escáner laser de fase utilizado en la investigación, perteneciente a la firma Faro.

Alcance Focus3D X 130: 0.6 – 130m

Velocidad de medición: hasta 976,000 puntos/segundo

Error de Rango: ± 2 mm

Cámara a color integrada: hasta 70 megapíxeles

Clase Láser: Clase 1

Peso: 5,2kg

Multi-Sensor: GPS, Brújula, Altímetro, Compensador de eje dual

Medidas: 240 x 200 x 100mm

Control: via touchscreen y WLAN:

Las nubes de puntos obtenidas por los escáneres láser presentan errores groseros que en la mayoría de los casos son superiores a los que especifican las características técnicas de los fabricantes. Diferentes investigaciones realizadas en este campo [164], establecen los siguientes tipos de errores:

- Errores instrumentales: inherentes a la fabricación del instrumento o al procedimiento de medición

Sensing and Spatial Information Sciences, 34(5/C7), 445-453.

LAHOZ, J. G., ET AL. (2006) Terrestrial laser scanning metric control: assessment of metric accuracy for cultural heritage modeling. *ISPRS Archives*, 2006, p. 25-27.

del propio instrumento. La determinación de las coordenadas tridimensionales de un solo punto se realiza a partir de la medición de distancia, y de las mediciones angulares horizontales y verticales. Cualquier error en la medición de cada uno de ellos provocará un error en la posición del punto.

- Problemas de divergencia de la huella del láser sobre el objeto o reflexiones múltiples por borde partido provocan errores considerables en la posición del punto [165]
- Errores relacionados con los objetos medidos: Color, rugosidad, ángulo de incidencia, reflectancia afectan de manera significativa al haz laser provocando ruido o errores considerables.
- Errores ambientales: la velocidad de la luz del láser depende en gran medida de la densidad del aire, las variaciones atmosféricas de temperatura, presión y humedad modifica la longitud de onda electromagnética provocando errores en la medición de distancia. Las variaciones ambientales (viento, dilataciones, vibraciones por tráfico rodado, etc.) durante el proceso de escaneado provoca distorsiones por movimiento.
- Errores metodológicos: Están íntimamente relacionados con la experiencia del operador y con la

complejidad geométrica del objeto. Posiciones inadecuadas (puntos de vista tangenciales) provocan disparidad en los datos.

La aparición de la tecnología del láser escáner 3D ha propiciado su utilización entre los investigadores en documentación del Patrimonio para la obtención de modelos digitales virtuales 3D. La mayor parte de los trabajos arqueológicos se han enfocado a digitalizar objetos de un tamaño mediano incluyendo artefactos, estatuas, etc., pero el desarrollo de instrumentos con mayor alcance y la aparición de *software* más potente han propiciado la construcción de modelos de grandes estructuras y monumentos arquitectónicos. En este sentido se han realizado trabajos enfocados a documentar las estructuras encontradas en la excavación de asentamientos arqueológicos en su totalidad [166], de zonas específicas de los asentamientos [167], estratigrafías murárias como la de San Miguel de Vitoria Gasteiz [168].

165 ESQUIVEL, J. A., BENAVIDES, J. A., & ESQUIVEL, F. J. (2012). El análisis de la forma de onda de los escáneres terrestres aplicados a la investigación arqueológica. *Cuadernos de Prehistoria y Arqueología de la Universidad de Granada*, 22, 413-424.

166 GAISECKER, T. (2005, November). Pinchango Alto-3D archaeology documentation using the hybrid 3D laser scan system of RIEGL. In *Recording, Modeling and Visualization of Cultural Heritage: Proceedings of the International Workshop, Centro Stefano Franscini, Monte Verita, Ascona, Switzerland, May 22-27, 2005* (p. 459). CRC Press.

167 DONEUS, M. & NEUBAUER, W (2005). Laser scanners for 3D documentation of stratigraphic excavations. In: *International Workshop on Recording, Modeling and Visualization of Cultural Heritage*, Ascona, Switzerland, may 22-27

ESQUIVEL GUERRERO, J. A., MORENO ORTEGA, J. J., & ESQUIVEL SUÁREZ, F. J. (2009). Modelo 3D mediante laser-scanner del Teatro Romano de Acinipo.

168 GARCÍA-GÓMEZ, I., DE GOROSTIZA, M. F., & MORAZA, A. M. (2011). Láser escáner y nubes de puntos. Un horizonte aplicado al análisis arqueológico de edificios. *Arqueología de la Arquitectura*, (8), 25-44.

Las fases del proceso de escaneo de un elemento patrimonial se dividen en tareas de campo y tareas de laboratorio [169]. Las primeras consisten en una planificación previa y en la captura metódica de datos. En las segundas, se realizan diferentes procesos informáticos de preparación de datos, registro y procesamiento de las diferentes tomas y por último obtención de los datos (planos, ortofotografías, modelos) y control de resultados.

La planificación del trabajo resulta esencial para la obtención de un correcto resultado. Determinar los objetivos que pretendemos conseguir, analizar el objeto de estudio en su conjunto, planificar las posiciones óptimas del escáner, analizar la cobertura y las obstrucciones, prever los medios auxiliares y de seguridad, fijar los puntos de apoyo topográfico o incluso planificación horaria por iluminación de paramentos o paso de personas son aspectos muy importantes a tener en cuenta para la realización del trabajo. Usando todos estos datos, se puede tomar una decisión acertada acerca de la técnica más idónea, llegando incluso a descartar la utilización de este procedimiento.

Conocer las necesidades de documentación de un edificio o yacimiento proporciona una idea clara acerca de los requerimientos en los resultados y en la precisión. Particularmente importante es el nivel de detalle (tamaño de los elementos más pequeños) de los docu-

mentos a entregar, determinando la resolución (densidad de puntos) [170] a fijar en la captura. En este sentido habrá que tener en cuenta el tamaño del elemento a documentar para establecer la resolución idónea a la escala del levantamiento, o plantear diferentes resoluciones de acuerdo al nivel de detalle general y al particular.

Kopacik y Korbasova [171] describen un minucioso análisis para determinar configuración óptima del escáner para alcanzar la precisión requerida. Además de la posición de escáner, es muy importante fijar la posición de los puntos de referencia (generalmente dianas reflectantes o esferas) que permitan registrar y georreferenciar las diferentes nubes de puntos realizadas desde diferentes posiciones en un mismo sistema de referencia.



Imagen de tipos dianas y puntos de referencia. Planas, cilíndricas y esféricas.

169 RODRÍGUEZ-NAVARRO, P., VERDIANI, G., & PIQUERAS, T. G. (2015). Comprehensive Methodology for Documenting the Defense Towers of the Valencian Coast (Spain). *DEFENSIVE ARCHITECTURE OF THE MEDITERRANEAN*, 321.

170 BARBER, D., MILLS, J AND BRYAN, P, (2003) *Towards a standard specification for terrestrial Laser scanning of cultural heritage*. in *CIPA International Archives for Documentation of Cultural Heritage*.

171 KOPACIK, A. AND KORBASOVA, M. (2004) *Optimal Configuration of Standpoints by Application of Laser Terrestrial Scanners*. *INGEO 2004 and FIG Regional Central and Eastern European Conference on Engineering Surveying*. Bratislava, Slovakia.

Fases del trabajo con TLS (laser escáner terrestre):

Trabajos de campo:

Las posiciones óptimas para el estacionamiento del escáner vienen condicionadas por la geometría y el entorno del objeto a levantar, pero en cualquier caso, estas deben ser elegidas de manera que garanticen una máxima cobertura y precisión. Por lo general, para poder capturar por completo el objeto es necesario realizar varias tomas desde puntos distintos. La complejidad de formas que presenta la arquitectura unido a los obstáculos situados entre el escáner y el objeto a levantar hace que en la mayoría de los casos queden zonas sin registrar.

El estacionado de un escáner es similar al estacionado de una Estación Total. En este caso habrá que tener en cuenta si la georreferenciación de los escaneados se va a realizar a partir de las coordenadas conocidas de los puntos de estacionado o si por el contrario se georreferencian a partir de las coordenadas conocidas de las dianas de referencia o de puntos singulares. En todos los casos será necesario medir estos puntos por procedimientos topográficos.

A continuación se procede al ajuste de las variables del instrumento: definición de área de escaneo, resolución deseada [172] o filtrado de los elementos no deseados (por reflectividad o distancia).

La definición de la resolución (distancia sobre el objeto entre dos puntos consecutivos) provocará un giro angular horizontal del escáner mediante un motor paso a paso y otro vertical mediante el espejo del osciloscopio, produciendo resoluciones variadas en función de la distancia escáner-objeto. Esto implica que a la mitad de la distancia escáner-objeto, la resolución de la nube

de puntos sea el doble de la definida, al igual que una distancia doble, la resolución será la mitad.

Esta falta de homogeneidad en la resolución de la nube en función de la distancia es uno de los principales inconvenientes que presenta la medición con escáner laser. En la práctica se hace necesario fijar la resolución deseada sobre el objeto a escanear más lejano provocando que en objetos cercanos tengamos una resolución excesiva que posteriormente se podrán filtrar mediante *software*.

El proceso de escaneado se realiza de forma automática grabando los datos sobre un ordenador portátil o sobre la memoria interna del escáner. En el caso del portátil, los datos se visualizan automáticamente sobre la pantalla pudiéndose comprobar, in situ, la bondad de los datos obtenidos. La duración de cada toma dependerá del tipo de escáner, de la resolución elegida y del área definida, siendo esta muy variable. Por lo general, para los escáneres de tiempo de vuelo, se debe realizar un segundo escaneado de resolución mucho más alta (milimétrica), sobre las dianas de referencia con objeto de localizar con mayor precisión su centro geométrico.

Trabajos de oficina:

La primera y más importante fase del proceso de oficina, también llamado “de gabinete”, consiste en la alineación y registro de todos los escaneos en un único sistema de referencia, es decir, en una única nube de puntos que contenga todos los registros.

Este registro deberá hacerse de acuerdo a la metodología especificada en el siguiente esquema. Sin lugar a dudas, la combinación de todos ellos nos proporcionará el resultado más óptimo para el registro.

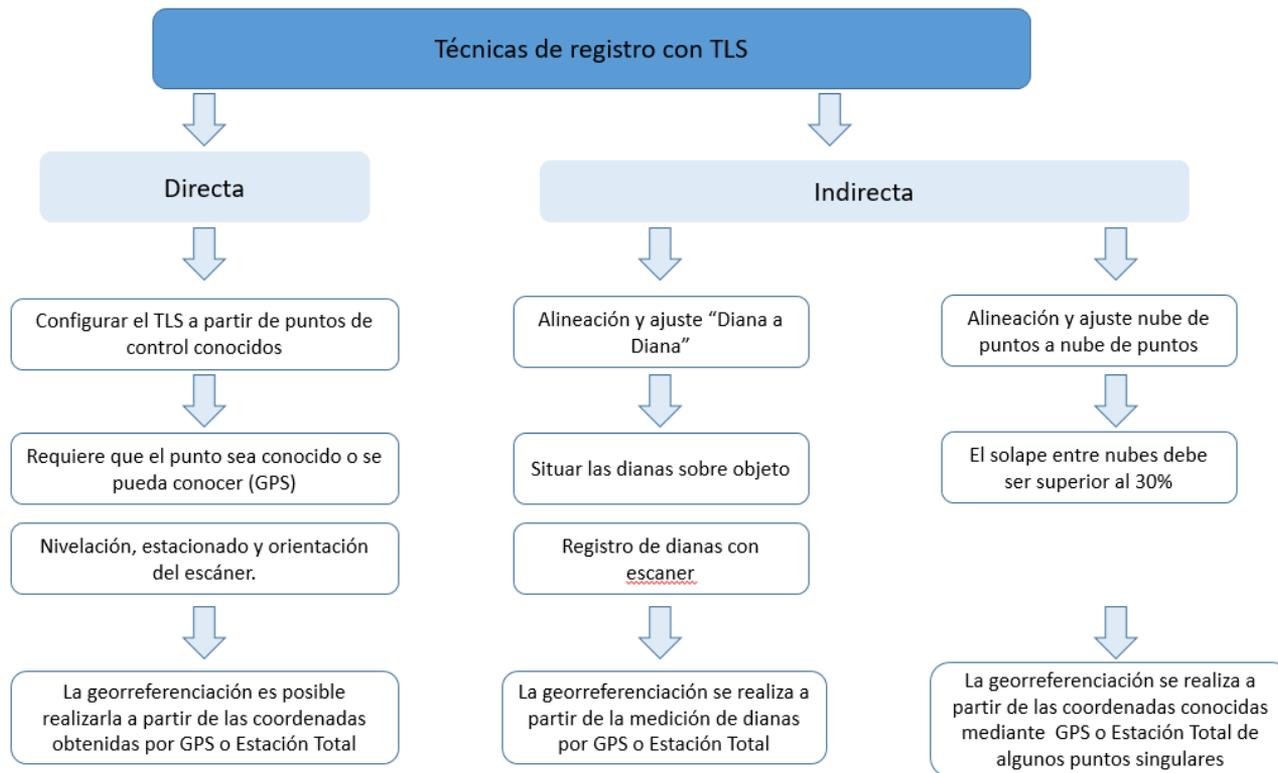
172 BARBER, D., & MILLS, J. (2007) WWW, ENGLISH_HERITAGE 3D Laser Scanning for Heritage, Advice

and Guidance to users on laser scanning in archaeology and architecture.

La obtención de modelo gráfico a partir de la nube de puntos implica una serie de operaciones que permitan extraer las características geométricas del objeto a partir del modelo tridimensional.

La gestión directa de nubes de puntos en entornos de CAD está permitiendo un ahorro importante en tiempo de post-procesado. La visualización del modelo de nube de puntos mediante cortes (lonchas) constituye una ayuda importante para el dibujo de las secciones que permitan un adecuado estudio geométrico (ver experimentación realizada en el capítulo IV: *Experimentación en la obtención de documentos gráficos a partir de modelos 3D de escáner*).

La transformación de la nube de puntos en una superficie de malla de triángulos implica la realización de complicados y costosos procesos de filtrado, suavizado, texturizado, etc. generando un modelo que no siempre se adapta por completo a la realidad. En muchos procesos como el mapeado de texturas, no hay correspondencia entre el trabajo realizado con el resultado obtenido.



Técnicas de registro de puntos por TLS. Es necesario tener en cuenta, ya que el trabajo de campo condiciona el registro posterior.

3.4.2.4 FOTOGRAMETRÍA

La fotogrametría tiene como objetivo conseguir información espacial de objetos a partir de las medidas efectuadas en fotografías. Esta técnica ha evolucionado considerablemente a partir de la mejora en el procesamiento informático y la visión por computador aunque sus principios geométricos siguen siendo los expuesto en la segunda mitad del siglo XIX por el arquitecto alemán Albrecht Meydenbauer.

Frente a los métodos de medición directa sobre edificios o yacimientos, la fotogrametría se basa en la utilización de imágenes fotográficas para, a partir de la reconstrucción geométrica de sus haces proyectivos, obtener la representación geométrica del elemento a documentar.

Genéricamente podemos definir fotogrametría como aquella ciencia o técnica que permite medir elementos reales a partir de fotografías. De una manera más formal podemos considerar la fotogrametría como la disciplina que lleva a cabo medidas indirectas de objetos utilizando perspectivas fotográficas [173]

Esta técnica permite hacer un levantamiento completo, preciso, rápido y objetivo de un objeto sin necesidad de tener contacto físico ni causar deterioro del mismo.

De acuerdo a Bonneval, la fotogrametría es: *“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” [174].

Otra definición más precisa nos la ofrece Slama [175]: *“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”*

La Sociedad Americana de Fotogrametría y Teledetección (ASPRS) nos ofrece una definición más amplia, indicando *“el arte, ciencia y tecnología para la obtención de medidas fiables de objetos físicos y su entorno, a través de grabación, medida e interpretación de imágenes y patrones de energía electromagnética radiante y otros fenómenos”* [176].

Por último, la definición más aceptada la propone ISPRS (International Society for Photogrammetry and Remote Sensing) como *“la fotogrametría es el arte, ciencia y tecnología para obtener información fiable acerca de la Tierra y su medio ambiente, o de otros objetos físicos, a partir de imágenes procedentes de sensores y mediante procesos de grabación, medición, análisis y representación”*.

El uso más general de la técnica fotogramétrica ha consistido en la obtención de documentos gráficos de elementos arquitectónicos, normalmente fachadas de los edificios o estructuras históricas, necesarios para su catalogación, conservación y/o restauración. Esta tecnología, fuertemente implantada y consolidada desde su origen en el siglo XIX, ha sufrido en los últimos años fuertes transformaciones motivadas por el desarrollo

173 RODRIGUEZ JORDANA, J.; NUÑEZ ANDRÉS, M A Núñez. (2008) *Fotogrametría arquitectónica*. Universitat Politècnica de Catalunya. Iniciativa Digital Politècnica.

174 BONNEVAL, H. (1972) *Photogrammétrie générale*. 1. Enregistrement photographique des gerbes perspectives. Eyrolles.

175 SLAMA, C. et al. (1980) *Manual of photogrammetry*. American Society of photogrammetry,

176 ASPRS, (2004) *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing*

de la fotografía digital y el aumento de potencia de los equipos informáticos. La fotografía digital nos proporciona imágenes de forma inmediata, pudiendo comprobar su calidad y retomar las fotografías en caso necesario, pero la gran ventaja de la fotografía digital es que la medición y el análisis automatizado de sus datos numéricos pueden utilizarse para un procesamiento fotogramétrico informatizado, obteniendo mayor precisión en la medida sobre imagen. En esta tesis nos proponemos analizar estas nuevas tecnologías basadas en las imágenes digitales capturadas desde tierra o desde UAV [177] y sus potencialidades de cara a la documentación gráfica del patrimonio.

En esencia los fundamentos de la nueva fotogrametría digital son los mismos que los enunciados en el siglo XIX, si bien los nuevos desarrollos tecnológicos han ido adaptando los procesos para que el trabajo se desarrolle de forma más fácil, rápida y precisa. Los modernos avances en fotogrametría terrestre, hoy día denominada “de objeto cercano” junto con el uso de *drones* han transformado los protocolos de actuación facilitando el registro de los datos y mejorando significativamente la calidad de los resultados.

La fotogrametría mediante UAV (*drone*) a baja altura aprovecha la gran resolución de las imágenes de objeto cercano con el nuevo punto de vista desde el aire evitando las oclusiones propias de la fotogrametría terrestre. Por otro lado, el importante desarrollo tecnológico en aplicaciones informáticas ha permitido la generación de programas fotogramétricos capaces de modelar, de forma casi automática, objetos complejos

177 UAV: Unmanned Aerial Vehicle (vehículo aéreo no tripulado), también denominado *Drone*

178 DALLAS, R. W. A. (1996). Architectural and archaeological photogrammetry. Close range photogrammetry and machine vision, 283-303.

a partir de múltiples imágenes, siendo una de sus aplicaciones más importantes la documentación de patrimonio arquitectónico y arqueológico.

La fotogrametría aporta numerosas ventajas en los levantamientos arquitectónicos [178] [179] que podemos concretar en:

- Proporciona un nivel homogéneo de registro de datos de toda una fachada o estructura, siendo en gran medida independiente del nivel de detalle de la fachada.
- Proporciona una buena precisión absoluta en todo el elemento a medir.
- Respeto la integridad del elemento a documentar al no necesitar contacto. Se trata de un método no destructivo.
- La captura digital de los datos permite la conexión directa con sistemas CAD.
- Se obtiene un registro tridimensional de los datos.
- Disminuye el riesgo del operador al no tener que acceder a zonas peligrosas como ocurre con los métodos directos.
- El archivo de los fotogramas posibilita una futura evaluación de los datos.

Sin embargo, es también importante reconocer sus limitaciones:

- Es una técnica que requiere especialización: se requieren conocimientos amplios de topografía, fotografía, geometría e informática.

179 ALVAREZ GONZALEZ, I., LOPETEGI GALARRAGA, A. L., MESANZA MORAZA, A., RODRÍGUEZ MIRANDA, Á., VALLE MELÓN, J. M., VICENTE ESPINA, I. (2003). Diferentes propuestas para la representación geométrica de edificios históricos. *Arqueología de la Arquitectura*, (2), 9-12.

- El trazado de dibujos de línea no siempre es precisa, sobre todo en aquellas representaciones tridimensionales complejas o donde no existe cambios de textura (esculturas, molduras, paramentos pintados, etc.)

A continuación analizamos los hitos más importantes que han marcado la historia fotogrametría del siglo XX para de esta forma, comprender y valorar mejor los logros actuales. Podemos establecer tres fases diferenciadas directamente relacionadas con las técnicas empleadas [180]:

Fase Analógica (1901-1950): La visualización del modelo estereoscópico se basa en componentes ópticos y en el empleo de instrumentos mecánicos para la restitución gráfica del modelo.

Los orígenes de la fotogrametría analógica se encuentran en la invención del principio de la marca flotante por F. Soltze en 1892. En 1901 Karl Pulrich ideó una máquina llamada *estereocomparador* que aplicaba el concepto de la visión en relieve para deducir las coordenadas punto por punto de manera más directa respecto a los métodos geométricos anteriores. La idea central de la fotogrametría analógica es sustituir los cálculos matemáticos por instrumentos óptico-mecánicos, en los que la reconstrucción de los rayos perspectivas se realiza empleando los mismos principios que regulan la vista natural del hombre a través de la fusión de dos imágenes generadas por los ojos y que permiten apreciar la profundidad y el relieve de los objetos y de los espacios. Los complejos instrumentos restituidores, tenían un precio muy elevado y exigía operadores muy especializados por la complejidad de operaciones a realizar.

El oficial de ingenieros austriaco Eduard Von Orel (Almagro, 2004)¹⁸¹ consiguió construir un instrumento denominado “*estereoautógrafo*” en el que se podían observar la marca flotante sobre dos fotografías estereoscópicas quedando representado automáticamente el punto en dos dimensiones sobre una mesa de dibujo.

Fase Analítica (1950-1990): El verdadero cambio en la evolución de los instrumentos dedicados al levantamiento por fotogrametría se debió a la aparición de los ordenadores. Gracias a estos se sustituyó la restitución mecánica de los modelos estereoscópicos por transformaciones analítico-matemáticas a través de programas informáticos. El proceso de restitución analítico es similar al analógico, consintiendo en posar la marca flotante sobre el modelo estereoscópico una vez se ha orientado los fotogramas (Hernández, 2006). El ajuste, la corrección de errores y la restitución gráfica se realiza por métodos matemáticos transformando las coordenadas de la imagen en coordenadas analíticas tridimensionales en el espacio, para simultáneamente ser representados sobre programas de CAD, lo que permitía la comprobación inmediata de los resultados obtenidos. En 1958 el ingeniero finlandés Uki Helava propuso los principios teóricos y constructivos del *restituidor analítico*. En este aparato se sustituían los complejos mecanismos tradicionales de elaboración de coordenadas con un procesador que determinaba las coordenadas analíticas de los puntos agilizando notablemente la restitución gráfica.

Fase Digital (1990- actualidad): Se sustituyen las fotografías en soporte físico por fotografías digitales mucho más estables y duraderas. Estas imágenes quedan definidas numéricamente mediante píxeles en las que

¹⁸⁰ HERNÁNDEZ D. (2006) Introducción a la fotogrametría Digital. Universidad de Castilla La Mancha, p. 81-87.

¹⁸¹ ALMAGRO GORBEA, A. 2004, *Levantamiento arquitectónico*, Universidad de Granada. 62.

se conoce sus coordenadas sobre la imagen y la intensidad digital (tono o tonos para imagen en color), lo que permite la automatización de determinadas fases del proceso mediante la aplicación de algoritmos matemáticos de correlación. Este proceso tiene lugar sobre ordenadores, desapareciendo los costosos y complejos equipos óptico-mecánicos. Se obtienen representaciones gráficas de mayor calidad con un menor tiempo y costo.

A su vez en esta fase digital podemos distinguir dos sub-fases:

Estereofotogrametría digital (EFD estéreo fotogrametría digital): Se realizan los mismos procedimientos que la restitución analítica pero utilizando imágenes digitales sobre el monitor del ordenador. En 1986 Gugan y Dowman [182] exponen las características fundamentales de un sistema fotogramétrico digital: la visión estereoscópica sobre la pantalla del ordenador; la digitalización en tiempo real; manejo de grandes volúmenes de imágenes; mayor automatización y precisión.

Todas las transformaciones relativas a las orientaciones se desarrollan de manera matemática mediante algoritmos que determinan las incógnitas a partir de los datos disponibles.

A continuación, la visualización de las imágenes se realiza de manera estereoscópica a partir de diferentes sistemas tecnológicos: imágenes coloreadas con gafas de anaglifos (uso de lentes bicolors donde las imágenes deben colorearse con estos mismos colores contrapuestos para anular la visión de cada imagen sobre cada uno de los ojos) o mediante gafas polarizadas que permiten una visión alternada de las dos imágenes en monitores. En esta tecnología podemos distinguir entre los monitores activos (realizan el cambio de polaridad) o monitores pasivos (convencionales) con gafas activas.

182 GUGAN, D. J.; DOWMAN, I. J. (1986) Design and implementation of a digital photogrammetric system. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 26, no 2, p. 100-109.



Imagen izquierda y derecha de un par estereoscópico. La cámara se desplaza longitudinalmente para capturar un objeto desde dos puntos de vista diferentes. Capilla de la Cartuja de Miraflores (Burgos)

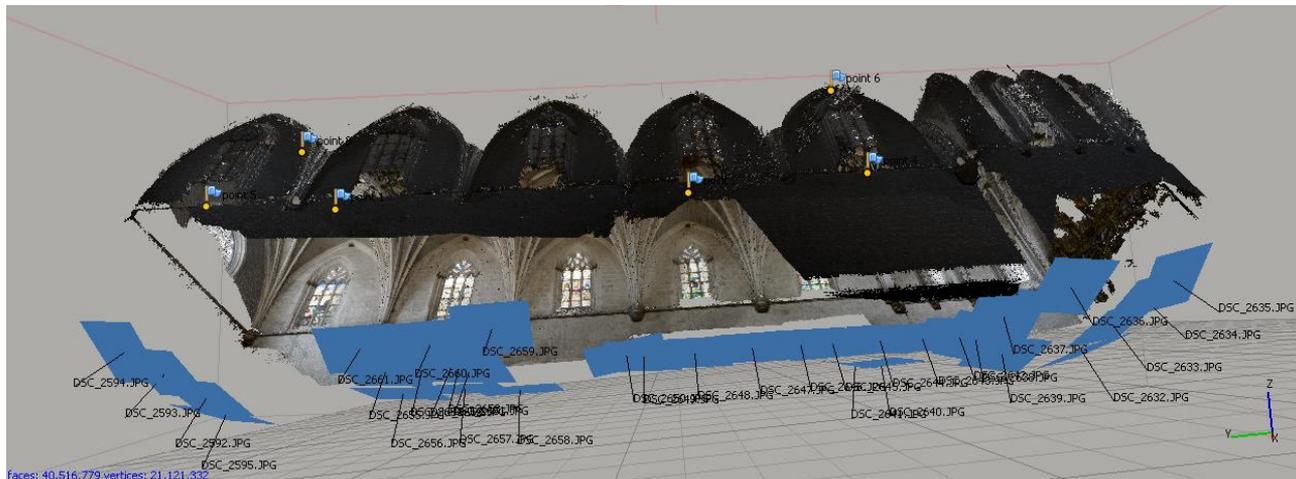
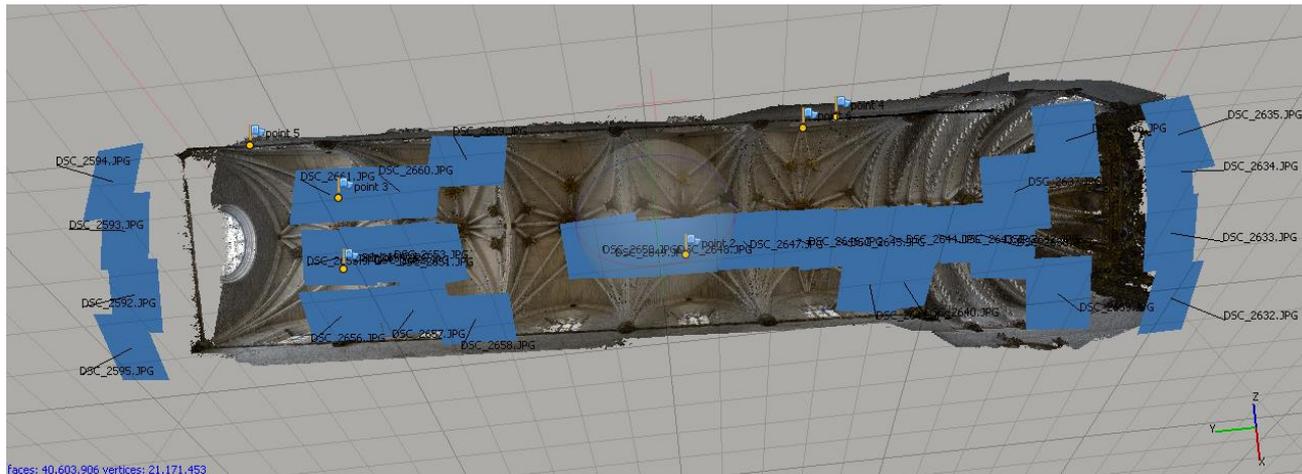
El movimiento y posado de la marca flotante se realiza con un simple ratón evitando el uso de los complejos volantes de los restituidores analíticos. El desplazamiento tridimensional (en profundidad) se realiza con el *trackball* del mismo ratón. El posado sobre los puntos permite el cálculo de las coordenadas tridimensionales del objeto generando entidades gráficas vectoriales que son visualizadas sobre el propio modelo tridimensional, detectando rápidamente las irregularidades geométricas de la restitución o los elementos que faltan por restituir.

Este método presenta importantes ventajas como la eliminación de instrumentos complejos que encarecen y complican su aplicabilidad. El trabajo con datos digitales no introduce ninguna fuente externa de error salvo la propia de las características y calidad de las imágenes digital o los errores intrínsecos de los puntos de control. En cualquier caso, necesita de operadores especializados para el posado de la marca flotante sobre el modelo estereoscópico virtual, así como conocimientos sobre representación gráfica.



Reconstrucción estereoscópica mediante anaglifo (rojo-azul) de las bóvedas de la Capilla de la Cartuja de Miraflores (Burgos). Elaborado por J.A.Benavides

Estructura desde el movimiento (SFM, Structure From Motion): se trata de una fotogrametría altamente automatizada a través de la visión computacional, que permite obtener un modelo 3D del objeto de estudio a partir de múltiples fotografías no estructuradas del mismo, capturadas con una cámara que se desplaza, solucionando de este modo las importantes limitaciones provocadas por los modelos estereoscópicos. La aplicación de los ajustes de haces ha demostrado ser la herramienta idónea cuando es necesario la captura de una gran número de imágenes para la completa documentación de los elementos patrimoniales. Sus aportaciones en cuanto a facilidad de uso, rapidez, calidad gráfica de los modelos y precisión requieren un apartado específico en esta tesis *Fotogrametría de imágenes múltiples: SFM*



Reconstrucción 3D de la bóveda de la Capilla de la Cartuja de Miraflores (Burgos). Realizado por J.A.Benavides

El desarrollo de estas nuevas metodologías necesita del conocimiento de los principios tecnológicos y matemáticos que los rigen:

3.4.2.4.1 LA IMAGEN DIGITAL

Las fotografías, elemento base de toda fotogrametría, nos aportan información cualitativa y cuantitativa del objeto fotografiado (tipo de material, textura, antigüedad, entorno, tamaño aproximado en relación a otros objetos, proporciones, etc.). En las fotografías digitales, también denominadas "imágenes", se añaden

otras cualidades que hacen que haya sustituido, casi por completo, a las fotografías analógicas:

- el valor numérico de los elementos que la componen (píxeles)
- Fácilmente reproducibles,
- Geométricamente estables y permanentes.

- su gran poder de comunicación y difusión a través de internet [183].

Una imagen digital es una matriz bidimensional compuesta por celdas denominados *pixels* [184] que disponen de un color o tono (gris) denominado Número Digital (ND). Este número digital puede variar entre 0 y 255 en las imágenes en escala de grises, correspondiéndose con las 256 tonalidades posibles (0 = negro; 255=blanco). Las imágenes en color están formadas por niveles espectrales correspondientes a los colores básicos: Rojo, Verde y Azul (en inglés RGB). Cada uno de estos niveles dispone a su vez de 256 tonalidades. La combinación de ellos nos da un valor de $(256)^3 = 16.777.216$, o lo que es lo mismo dieciséis millones de tonos posibles.

Si bien es factible convertir una imagen analógica en digital mediante digitalización, esta no dispone de los metadatos intrínsecos de la imagen, como son: distancia focal, resolución o posición de punto principal, necesitando procesos de calibración manual para conseguirlos.

Las imágenes son producidas a partir de sensores digitales que detectan la radiación ambiental reflejada o emitida por los objetos en forma de ondas electromagnéticas. Los más conocidos son los sensores que utilizan las cámaras digitales para captar el espectro visible para el ojo humano (longitud de onda de 400nm hasta 700 nm), existiendo otros sensores que permiten captar otras longitudes de onda (infrarrojos, ultravioleta, etc.)

183 Millones de fotografías son capturadas a diario y compartidas en la red, mostrándonos casi de forma inmediata y georreferenciada no solo el objeto, sino su

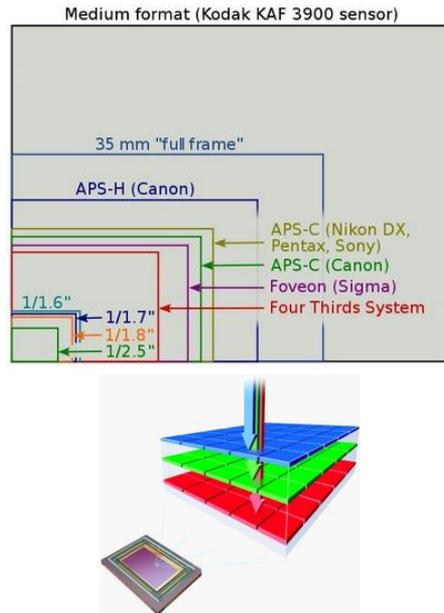
En una imagen digital podemos distinguir cinco parámetros que van a ser determinantes en el proceso fotogramétrico:

- **Resolución geométrica:** Este parámetro está íntimamente relacionado con el tamaño del menor objeto identificable en ella. En una imagen digital este valor viene determinado por el tamaño del pixel que a su vez, será función del tamaño del sensor y el número de elementos en el que está dividido. Su tamaño, expresado en micras, da poca información sobre su resolución real, por lo que este se traduce a unidades de terreno en función de la escala de la fotografía, surgiendo el concepto de GSD (Ground Sample Distance), o lo que es lo mismo, el tamaño del pixel proyectado sobre el objeto real. Es importante advertir que en muchos casos no hay proporcionalidad entre el tamaño del sensor y el tamaño de pixel, y mucho menos existe una relación directa entre el número de pixels y la calidad de la imagen.

Los sensores digitales están formados por un sustrato semiconductor que capta la señal electromagnética de la luz y la transforma y almacena en valores digitales.

estado de conservación. Aplicaciones como “Panorama” o “Flickr” nos permiten conocer cualquier lugar del mundo en diferentes momentos.

184 PIXEL.-Picture Element

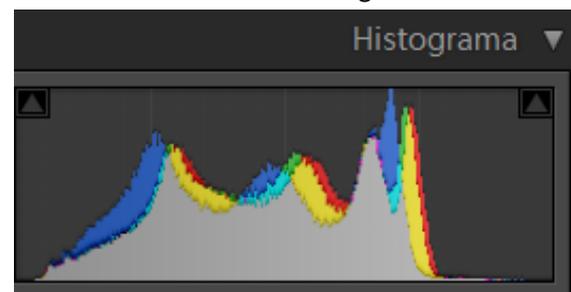


(izq) Diferentes tamaños de sensor. El formato "full frame" equivale al formato fotográfico de 35 mm (36 mm x 24 mm). (der) Sensor de silicio y gráfico de captura en un mismo píxel de tres niveles diferentes de longitud de onda correspondientes a los colores primarios Rojo, verde y azul.

- **Resolución Radiométrica:** Capacidad que tiene un sensor para captar las diferencias de radiación recibida. Aunque como hemos comentado una imagen en todos grises dispone de 256 valores (2^8) y una en color dispone de tres niveles (2^8)³, 16777216 valores posibles, lo cierto es que la particularidad de los sensores determina la fiabilidad con la que fijan estos valores. La determinación de los valores radiométricos de las imágenes es extremadamente importante en las operaciones para correlación au-

tomática de imágenes digitales, para ello los programas de fotogrametría guardan la información de un punto y la de una matriz de puntos vecinos y la comparan con una matriz semejante de otras imágenes [185]. Es evidente que un cambio de orientación, escala, iluminación, etc., en la captura de dos imágenes consecutivas modificará los valores radiométricos de sus píxeles. Para evitar este problema, los programas analizan la covarianza entre las diferentes matrices dando un coeficiente de correlación entre -1 y 1. El valor 1 corresponde a la máxima correlación (imagen idéntica); el 0 a ninguna, y el -1 a su imagen contraria (negativo)

- **La Resolución espectral** indica el número de banda o niveles que puede distinguir un sensor. En una imagen en gris dispone de un nivel, al igual que las imágenes en color disponen de tres niveles correspondientes al Rojo, Verde y Azul. Los sensores multiespectrales son capaces de registrar para cada píxel diferentes valores de longitud de onda.



El histograma es una gráfica que muestra la radiometría de cada una de los niveles espectrales de una imagen

¹⁸⁵ ACKERMANN, F. (1984) Digital image correlation: performance and potential application in photogrammetry. The Photogrammetric Record, 1984, vol. 11, no 64, p. 429-439.

- **La resolución temporal** de una imagen digital indica la periodicidad con la que se registran las imágenes. El tiempo de captura entre una imagen y otra en fotogrametría de objeto cercano nos va a determinar el área de solape entre estas imágenes. Es un factor determinante en fotogrametría aérea en movimiento, pero no para la captura estática.
- **La escala** (relación de semejanza entre el objeto en la imagen y el real) va a determinar de forma decisiva la precisión en el proceso fotogramétrico. Esta vendrá determinada, fundamentalmente por la distancia al objeto y el ángulo de apertura de la lente que es función de su distancia focal, pero también por el tamaño del sensor.

De ahí que, a la hora de realizar una fotogrametría nos debamos plantear diferentes problemas relacionados con: la elección de la cámara y los objetivos (distancia focal), la distancia de captura al objeto o número de fotografías necesarias.

La fotografía se considera una herramienta poderosa y expresiva en el análisis de arquitectura, constituye un material de gran importancia, no solo por sus implicaciones técnicas como la fotogrametría, sino por su valor de registro del estado actual de los objetos o elementos patrimoniales. Pero es necesario conocer que, si bien una fotografía es una proyección central o cónica, en ella se producen múltiples deformaciones de acuerdo al punto de vista (cambios de escala, orientación o inclinación, etc.) y otras intrínsecas a la cámara, como la deformación de la lente o ajuste interno de su geometría, que impiden medir directamente sobre ellas. Las técnicas fotogramétricas tratan de dar solución a estos problemas, permitiendo, tras una serie de ajustes, aplicar técnicas proyectivas para determinar de forma indirecta la posición precisa de los puntos en el espacio.

3.4.2.4.2 LA CAMARA DIGITAL

En la actualidad la imagen digital ha superado, por múltiples razones, a la fotografía analógica pudiéndose decir que el 100% de la fotografía actual es digital.

Una cámara digital es idéntica a una cámara analógica en la que se sustituye la película por un sensor matricial (CCD) *charge-coupled device* (*dispositivo de carga acoplada*) y por tanto la captura de una imagen digital deberá cumplir las mismas condiciones de iluminación (apertura de diafragma, velocidad de obturación, sensibilidad, etc) que una fotografía analógica.

Las cámaras están formadas por un conjunto de mecanismos: ópticos (conjunto de lentes), mecánicos (accionamiento de diafragma y cortinilla) y electrónicos que permiten la captura de la imagen de muy alta calidad si bien estas contienen errores que no son apreciables a simple vista, sí lo son en un proceso fotogramétrico. El paso de los rayos de luz a través de las lentes produce aberraciones de índole geométrica y cromática, dando lugar a distorsiones de la imagen que deben ser calculadas y corregidas previamente a cualquier otro proceso de orientación.

En la actualidad se comercializan cámaras convencionales con formato *Full frame*, equivalente al fotográfico de 35 mm convencional (36 mm x 24 mm) que suministran altísimas prestaciones en cuanto a resolución geométrica y calidad radiométrica. Ejemplo de ello, son las cámaras Nikon D-810 con una resolución de 7360 x 4912 pixel (36,3 megapíxeles), utilizada en la investigación o la Canon 5D mark IV, resolución de 6720 x 4480 (30,3 megapíxeles).

3.4.2.4.3 FUNDAMENTOS de FOTOGRAMETRÍA

La fotogrametría basa sus procedimientos en el hecho de que la fotografía bajo un punto de vista óptico-proyectivo se puede considerar equivalente a una proyección central, similar al ojo humano, resultando así posible aplicar en ella los conceptos que regulan la geometría descriptiva.

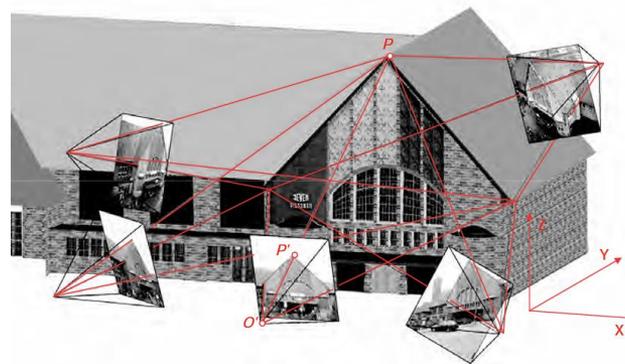
El principio de la fotogrametría consiste en determinar las coordenadas tridimensionales de cualquier punto a partir de dos o más fotografías tomadas desde posiciones significativamente distintas o lo que es lo mismo, la reconstrucción del modelo tridimensional del objeto a partir de imágenes bidimensionales capturadas de él. Esta relación, imagen–objeto3D requiere la medición de coordenadas sobre la imagen y el conocimiento de algunas dimensiones del objeto. La relación entre ambos se establece a partir de la determinación de los parámetros de orientación interna y externa, es decir, la reconstrucción de la posición y orientación de las imágenes en el espacio.

La capacidad de nuestra mente para fusionar en una misma entidad dos imágenes de un mismo objeto, pero ligeramente desplazadas, se denomina visión estereoscópica. La visión estereoscópica nos permite la observación de objetos en tres dimensiones posibilitando la medición de la profundidad. Para que esto sea posible, cada ojo debe ver una sola imagen, reproduciendo las mismas condiciones en la que se tomaron para que los haces de visión de los ojos puedan intersectar, es decir, el ojo izquierdo solo debe ver la imagen

capturada a la izquierda y el ojo derecho la imagen derecha.

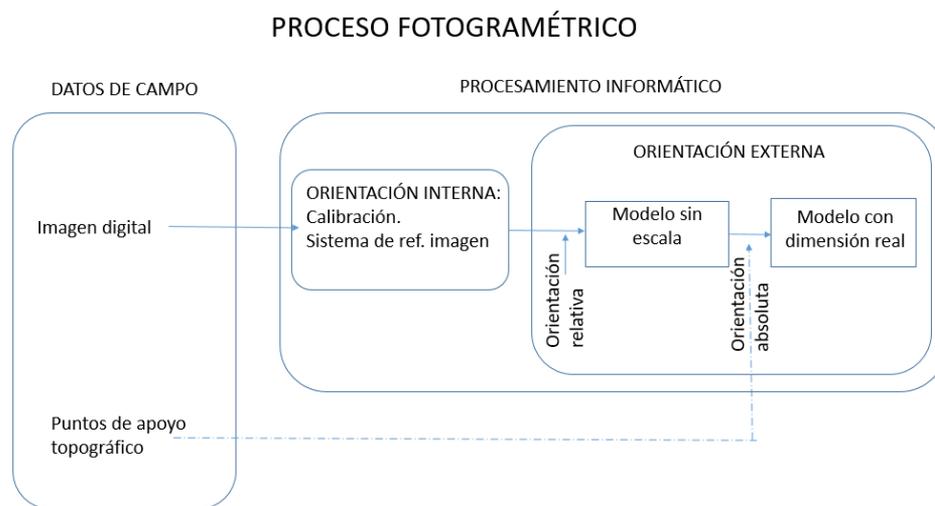
Por tanto, el problema fundamental de la fotogrametría consiste en la reconstrucción de la geometría en el espacio de las posiciones y orientaciones de las imágenes, para a partir de ellas reconstruir la posición los puntos en el espacio, mediante la intersección de haces proyectivos que unen puntos homólogos situados en imágenes distintas.

El campo fundamental de la fotogrametría analógica y analítica ha sido exclusivamente la determinación cuantitativa de magnitudes geométricas. La capacidad de la fotogrametría digital de aplicar la textura fotográfica sobre los modelos digitales nos aporta además otro tipo de información cualitativa como tipo de material o su estado de conservación.



Principio general de la fotogrametría: reconstrucción en el espacio (3D) de las posiciones y orientaciones imágenes (2D). Fuente: Close Range Photogrammetry

Para llevar a cabo este proceso, será necesario realizar dos orientaciones o transformación. Una intrínseca a la imagen (orientación interna) y otra que relaciona las imágenes con la realidad (orientación externa)



Fases del proceso fotogramétrico. Elaborado por J.A. Benavides

En esencia, **la orientación interna** consiste en la determinación de un sistema de coordenadas bidimensional sobre cada una de las imágenes a partir de los parámetros internos de la cámara (distancia focal, centro de proyección, distorsiones, etc.). **La orientación externa** consiste en determinar la posición y orientación espacial del sistema de coordenadas de cada cámara, respecto al sistema de coordenadas global del objeto.

En el proceso fotogramétrico se pueden distinguir tres configuraciones o métodos distintos de acuerdo al número, posición y orientación de las cámaras en la captura fotográfica:

- Rectificación fotogramétrica: adquisición de una sola imagen
- Restitución estereoscópica: adquisición de pares de imágenes estéreo, casi paralelas.
- Restitución por intersección múltiple: adquisición de múltiples imágenes convergentes

La rectificación de una sola imagen permite transformar la proyección cónica en una ortogonal siempre que se aplique sobre superficies planas.

La fotogrametría estereoscópica requiere un proceso de compilación de imágenes que permitan su visión estereoscópica a través de los dos ojos. Este proceso requiere que las direcciones de observación sean casi paralelas para que a través de cada ojo sea capaz de acomodar una visión similar de cada imagen. Ángulos de convergencia elevados o imágenes a diferente escala impiden la fusión de las dos imágenes en nuestro cerebro. Mediante un proceso de orientación relativa las imágenes digitales se deforman o cambian de escala para adaptarse a la visión estereoscópica.

En la actualidad, la fotogrametría de imágenes múltiples, también denominada SFM (estructura desde el movimiento) no tiene ningún tipo de restricción respecto del número, posición u orientación de las cámaras, permitiendo la restitución de objetos complejos

sin oclusiones. El elemento a restituir es fotografiado desde múltiples posiciones con la única condición de que exista cierto solape entre ellas. La intersección de haces proyectivos de puntos homólogos determinará por triangulación múltiple las coordenadas tridimensionales del objeto. La facilidad de uso y el automatismo del procesamiento hacen que en la actualidad todos los programas de fotogrametría incorporen algoritmos propios de este procedimiento, liberando al usuario de las tediosas tareas de localizar manualmente los puntos homólogos y permitiendo el uso de grandes cantidades de imágenes para describir con el mayor detalle y precisión la geometría de los objetos. La planificación y realización de las fases de campo queda descrita ampliamente en el apartado específico en esta tesis *Fotogrametría de imágenes múltiples*

3.4.2.4.4 FASES DEL PROCESAMIENTO INFORMÁTICO

Orientación interna

Esta etapa consiste en determinar para cada imagen los datos necesarios para reconstruir su geometría interna, es decir, definir la situación del centro de proyección y corregir las posibles deformaciones de la imagen.

La calibración o determinación de la orientación interna de una cámara es un proceso analítico que mediante ajuste de haces determina la correcta reconstrucción del haz proyectivo. Se hace necesario determinar la posición exacta del centro de proyección (distancia focal exacta y posición del punto principal) y los

efectos de distorsión de la lente sobre la imagen (fundamentalmente radial y tangencial). En la actualidad se siguen procesos de auto calibración mediante correlación de imágenes digitales que tienen en cuenta no solo la geometría de la cámara sino sus modificaciones por cambios ambientales durante las captura (cambio de temperatura). Los procesos analíticos actuales permiten la utilización de cámaras convencionales siempre que no varíen las condiciones internas de la cámara durante todo el proceso de captura. Se recomienda el uso de lentes de distancia focal fija y el bloqueo del enfoque.

La distorsión radial es la que más afecta en la deformación de la imagen y se debe a la refracción sufrida por los rayos de luz al atravesar el sistema óptico, pudiendo producir dos tipos de deformación llamadas de barril y de corsé.

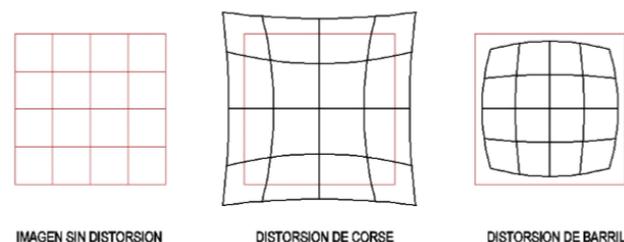
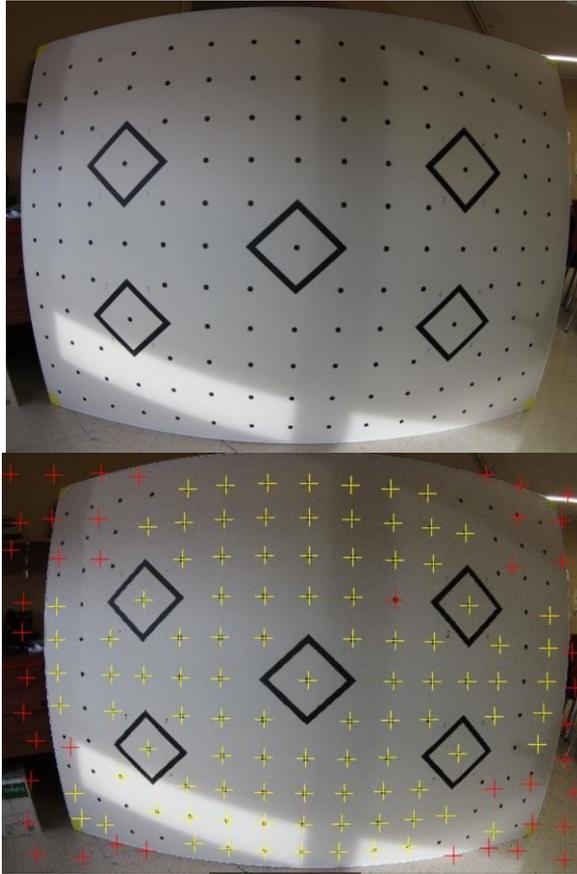


Imagen con los diferentes tipos de distorsión.

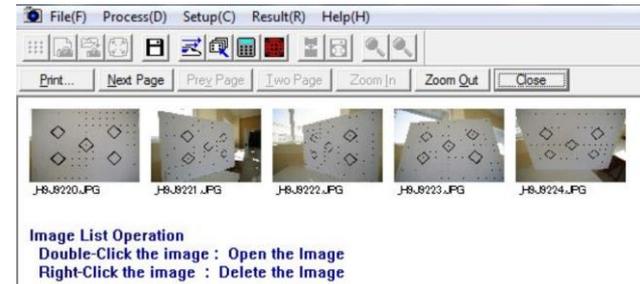
La distorsión tangencial se debe a la incorrecta alineación de los ejes ópticos de las lentes que integran el sistema objetivo y el plano del sensor.

El proceso de calibración es una tarea compleja que necesita realizarse en estrictas condiciones de laboratorio para que el resultado pueda ser óptimo



F(izquierda) Imagen sobre el panel de calibración muestra la distorsión radial tipo barrilete. Cámara Fc -200. (derecha) En imágenes tan deformadas es imposible realizar la calibración siendo necesario eliminar, en parte, estas distorsiones.

El proceso de calibrado consiste en capturar un patrón desde diferentes posiciones (frontal, laterales, esquinas, etc.) para una vez leídos los puntos de control, establecer las diferentes deformaciones de la imagen en base al ajuste de los haces proyectivos.



Imágenes para el calibrado de lente a partir del patrón facilitado por la aplicación Camera Calibration de Topcom Image Master [186]. Realizado por J.A.Benavides



Resultado y esquema de las deformaciones de la imagen a partir del proceso de calibración. Indicación de los parámetros de orientación interna. En color blanco se muestra los valores ideales y en rojo las deformación de la imagen.

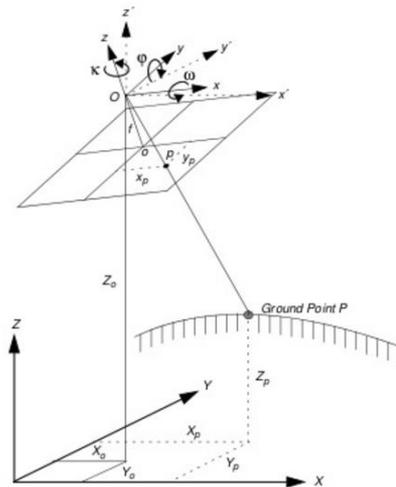
Una de las grandes ventajas que aporta la fotogrametría multimagen convergente (SfM) es la calibración automática de la lente a partir de la correlación automática de miles de puntos homólogos detectados en las imágenes. La importancia y versatilidad de este sistema hace que merezca un apartado especial en esta tesis. En el apartado SFM (Structure from Motion) se explicará el procedimiento seguido para el cálculo de la orientación interna (calibración de las imágenes).

186 Topcom Image Master.

<https://www.topconpositioning.com/software/mass-data-collection/imagemaster>

Orientación externa

La orientación externa consiste en determinar la posición y orientación exacta de las cámaras cuando se tomaron cada una de las fotografías con respecto a un sistema de referencia local o universal.



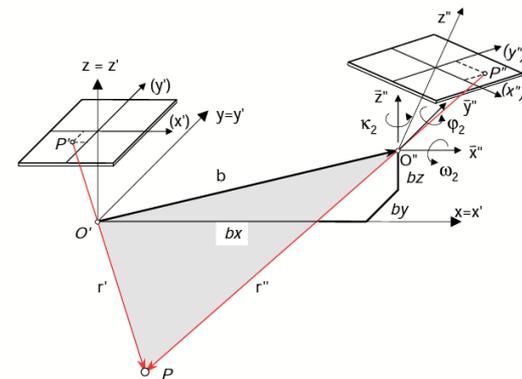
Esquema de la orientación externa de una imagen mediante la determinación del sistema de coordenadas imagen respecto del sistema de referencia local o universal.

La orientación externa de un par estéreo puede realizarse de dos formas: La tradicional que consiste en realizar el ajuste en dos fases (una orientación relativa y una orientación absoluta), o la actual, en la que los dos procesos de orientación se realizan simultáneamente.

Orientación relativa de dos imágenes estéreo

Este proceso permite determinar cuál es la posición y orientación de la cámara derecha respecto de la izquierda, que se toma como referencia. Para ello, se necesita ajustar los haces proyectivos de al menos seis

puntos homólogos de las dos fotografías, estableciendo una correspondencia entre ellas. La selección de puntos homólogos permite situar ambas imágenes en un sistema de coordenadas relativo (x, y, z) , definido por el sistema de coordenadas inicial de la imagen izquierda, permitiendo la generación de un modelo estereoscópico, es decir, una modelo tridimensional virtual pero que no dispone de dimensión ni orientación definida.



Orientación relativa: Se genera una correlación de imágenes a partir de puntos homólogos. Fuente Close Range Photogrammetry [187]

Los puntos homólogos representan el mismo punto de objeto en ambas fotografías, no necesitando ser puntos de referencia de coordenadas conocidos. Estos puntos, deben ser seleccionados para cubrir un área suficiente en el espacio de la imagen y objeto, de forma que proporcionen una conexión robusta entre las imágenes.

La solución computacional consiste en la orientación de la imagen derecha respecto de la izquierda, a partir de las restricciones que establecen las ecuaciones de coplanariedad [188] definidas por los puntos homólogos y los centros de proyección de cada imagen (planos

187 Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S., & Harley, I. (2007). *Close range photogrammetry*. Wiley.

188 La condición de coplanariedad establece que los dos centros de proyección, izquierdo y derecho, del par

epipolares). Esta orientación consigue eliminar la paralaje vertical en la imagen derecha respecto de la imagen izquierda o lo que es lo mismo, la escala. La determinación de los giros de la imagen derecha respecto de la izquierda se hace por aproximaciones sucesivas mediante cálculo iterativo.

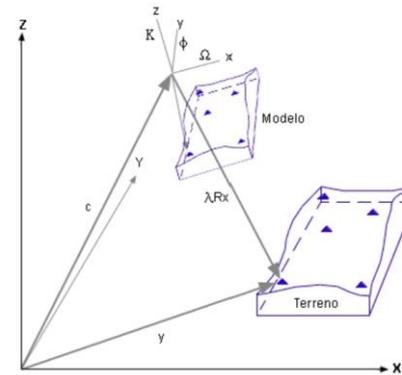
Para que este par de imágenes permita una visión estereoscópica válida, se requiere que la captura de las imágenes cumpla los siguientes requisitos:

- Las fotografías deben tener un área común (zona de visión estéreo).
- Los ejes de toma deben estar en el mismo plano.
- La relación base-altura debe estar comprendida entre: 1: 5 y 1:15.
- Las fotografías deben estar a la misma escala. En todo caso, la escala entre dos fotografías sucesivas no debe diferir en más del 5%

Orientación absoluta de dos imágenes estereo

La orientación absoluta consiste en poner en escala y orientar en el espacio el modelo tridimensional anteriormente definido. Desde el punto de vista analítico, esto se consigue transformando el sistema de coordenadas relativo en un sistema de coordenadas global, a partir de las coordenadas conocidas de puntos de apoyo (X, Y, Z). Estos puntos estarán referidos a un sistema local definido por el usuario o mejor al sistema universal (UTM-ETRS-89). En conclusión, la orientación absoluta consiste en la rotación, traslación y escalado del modelo estereoscópico con respecto al sistema determinado por los puntos de apoyo en el terreno.

estereoscópico, un punto cualquiera del modelo y sus puntos homólogos correspondientes en la imagen fotográfica izquierda y derecha se encuentran en el mismo plano.



Esquema de orientación absoluta a partir de la orientación relativa del modelo estereoscópico.

Mediante la orientación directa, se realiza un ajuste simultáneo de los haces proyectivos de puntos homólogos que son a su vez puntos de control o puntos con coordenadas conocidas. De esta forma, se consigue realizar los dos pasos anteriores en un solo paso, transformando coordenadas de imagen (x_i, y_i) en el sistema global de coordenadas del objeto (X, Y, Z). Este método requiere la relación de al menos seis puntos homólogos de los que, al menos cuatro deben conocerse sus coordenadas globales de terreno.

METODOS FOTOGRAMÉTRICOS

3.4.2.4.5 RECTIFICACIÓN FOTOGRAMÉTRICA

La reconstrucción tridimensional de un objeto a partir de una sola imagen sólo es posible si se dispone de información geométrica adicional sobre el objeto. El tratamiento de imágenes individuales se aplica habitualmente para las rectificaciones de superficies de los objetos planos (principalmente fachadas, suelos y techos decorativos) y su posterior tratamiento sobre programas de CAD. La exactitud de la medición sobre la imagen depende principalmente de su escala, de la calidad de la imagen y de las deformaciones debidas a las lentes. En la mayoría de los casos es necesario una calibración previa para eliminar las distorsiones radiales de la imagen.

La rectificación consiste en una transformación proyectiva que se resuelve geoméricamente, hoy día de forma matemática, y que transforma o deforma una imagen en otra similar pero que cumpla determinadas relaciones geométricas. Esta rectificación permite pasar de un plano existente en la realidad a un plano proyectado por el proceso fotográfico y viceversa, relacionando las coordenadas existentes con sus coordenadas fotográficas correspondientes [189]

La utilización de una sola fotografía hace que dispongamos de una información plana del objeto y por tanto los elementos tridimensionales no pueden ser medidos ni representados.

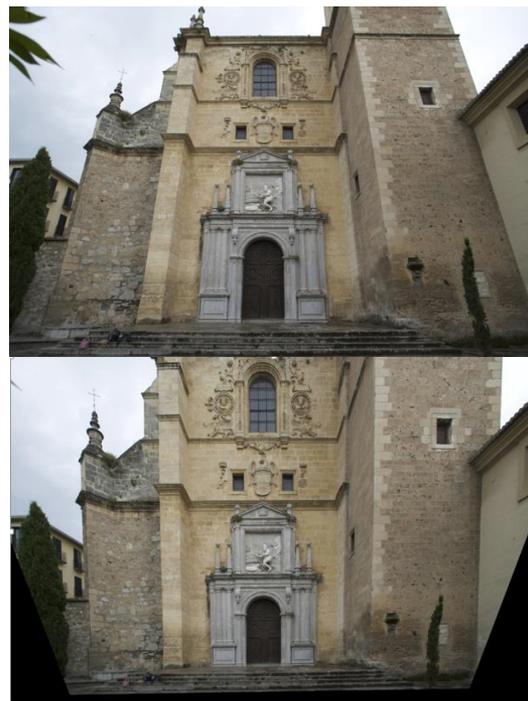


Imagen original (arriba), imagen rectificada (abajo). Los elementos tridimensionales no sufren la transformación proyectiva por lo que no pueden ser medidos ni representados. (J.A.Benavides)

El hecho de deformar la imagen para adaptarse a un plano de trabajo, hace que los elementos con volumen también se deformen produciendo un efecto exagerado sobre las formas. Las cornisas, huecos, o elementos salientes conservan, de manera exagerada, las zonas vistas capturadas por la imagen. Este inconveniente se compensa con la facilidad y bajo coste del proceso. Solo es necesario el uso de una cámara digital convencional, un instrumento de medición laser y un *software* de fácil manejo y de muy bajo coste (o incluso de *software* libre).

¹⁸⁹ PEREZ GARCÍA, J. L., MOZAS CALVACHE, A. T., CARDENAS ESCARCENA, F. J. , & LOPEZ ARENAS, A. (2011). Fotogrametría de bajo coste para la modelización

de edificios históricos. *Virtual Archaeology Review*, 2(3), 121-125.

Con este tipo de imágenes es posible representar de manera métrica y a una escala determinada, definida por la resolución y calidad de la imagen, los diferentes elementos o características integradas en el plano de referencia, de una manera global y objetiva.

La complejidad presentan los edificios históricos o los yacimientos requiere una correcta planificación de los trabajos, para que con este tipo de imágenes quede completa la documentación. En este tipo de trabajos se necesita la medición de unos puntos de referencia sobre los paramentos que deberán estar perfectamente apoyados sobre las redes topográficas de tal forma que todos los puntos estén situados sobre un mismo sistema de referencia para todo el proyecto.

La utilización de imágenes rectificadas está especialmente indicada cuando el elemento a documentar es plano ya que no existe pérdida de información radiométrica o cuando la falta de cambio de textura impide determinar la matriz de puntos singulares necesaria para el procesado SFM.

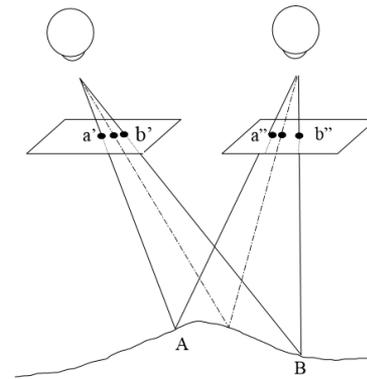
3.4.2.4.6 RESTITUCIÓN ESTEREOSCÓPICA

Podemos definir la restitución como el proceso de registro mediante vectores de los elementos que interesan medir y representar. Para ello, la fotogrametría ha venido haciendo uso de la visión estereoscópica mediante la observación de pares estereoscópicos.

La observación independiente de cada ojo sobre su respectiva fotografía da origen entonces a un modelo tridimensional del objeto capturado en la mente del observador. El poder trabajar con la visión estereoscópica

permite observar y medir de una forma exacta las diferentes profundidades, superficies y volúmenes del elemento a levantar.

Para realizar este proceso debemos mover la marca flotante hasta posarla sobre el modelo estereoscópico virtual, es decir, eliminado la paralaje [190] entre el punto del modelo virtual y la marca del cursor (marca flotante). Esta operación, nada fácil, requiere cierta experiencia por parte del operador.



Esquema de la marca flotante sobre dos fotografías estereoscópicas.

La vectorización 3D permite el trazado y la generación del modelo alámbrico digital, con procedimientos más o menos semiautomáticos dependiendo de los sistemas. La superposición de imágenes y líneas permite la supervisión permanente del registro. Todos estos sistemas pueden conectarse en línea con *software* de CAD para completar el registro y documentación.

190 Definimos paralaje como la diferencia, sobre la retina, de los dos ángulos de convergencia de dos objetos. La diferencia en paralaje entre dos haces proyectivos sobre el ojo es el factor más importante para la percepción del relieve. En fotogrametría estereoscópica, se deter-

mina la paralaje como el cambio de posición de la imagen de un punto en dos fotografías sucesivas, debido al cambio de posición de la cámara en el momento de la toma.

3.4.2.4.7 FOTOGAMTRIA DE IMÁGENES MULTIPLES: SFM (STRUCTURE FROM MOTION) ESTRUCTURA DESDE EL MOVIMIENTO

En muchos casos el uso de uno o varios pares estéreo no será suficiente para reconstruir por completo un edificio o yacimiento. El proceso de orientación y ajuste para cada uno de los pares complica enormemente la labor de documentación haciendo el trabajo tedioso. Para lograr una solución homogénea para todo el edificio sin la necesidad de medir y orientar cientos de modelos estereoscópicos, se hace necesario un procedimiento capaz de orientar simultáneamente todas las fotografías.

La riqueza y precisión de la información obtenida mediante las nuevas herramientas basadas en fotogrametría multimagen, nos aportan un excelente medio para la documentación gráfica y el registro del patrimonio arquitectónico [191] y arqueológico [192], mejorando significativamente su comprensión actual y en el futuro. Los avances en visión artificial y la mayor potencia de procesamiento de los equipos informáticos han permitido la generación de una nueva metodología basada en técnicas fotogramétricas pero mejorada y automatizada a través de la visión computacional. Este sistema se conoce con las siglas SFM, "Estructura desde el movimiento", permite obtener un modelo 3D a partir de múltiples fotografías no estructuradas de un

objeto capturadas con una cámara que se desplaza. El aspecto más ventajoso de esta técnica consiste en el alto grado de automatización del proceso productivo y de la gran precisión que se obtiene.

Por su accesibilidad desde el punto de vista económico así como facilidad de implementación o manejo constituye la mejor alternativa a métodos de modelado 3D basados en tecnología láser [193]. El uso de estas técnicas fotogramétricas se ha extendido en diferentes campos como la arqueología o la documentación del

191 STANCO, F; BATTIATO, S; GALLO, G. (2011) Digital imaging for cultural heritage preservation: Analysis, restoration, and reconstruction of ancient artworks. CRC Press.

- RODRIGUEZ NAVARO, P. (2012). Fotogrametría digital automatizada (SFM) con apoyo aéreo de proximidad. In *XI Congreso Internacional de Expresión Gráfica aplicada a la Edificación, Valencia. 29, 30 de noviembre y 1 de diciembre de 2012* (pp. 783-789).

192 WULFF, R; KOCH, R, (2011) Image-Based 3D Documentation of Archaeological Trenches Considering Spatial, Temporal and Semantic Aspects.

193 PEREIRA, J M. (2016) 3D modelling in cultural heritage using structure from motion techniques. PH Investigación: revista del IAPH para la investigación del patrimonio cultural, no 6, p. 49-60.

patrimonio [194] [195] [196] [197] [198] [199], también han encontrado aplicabilidad en la arquitectura [200] [201] [202], y en la topografía al generar modelos digitales de elevación del terreno a partir de imágenes capturadas por UAV (Vehículos aéreos no tripulados), [203] [204] [205] [206].

Las nuevas tecnologías aplicadas a la documentación gráfica están transformando los protocolos de documentación en los levantamientos arquitectónicos y arqueológicos [207], generando sistemas cada vez más precisos de representación y análisis de la información, mejorando tres aspectos clave en la práctica actual: la

rapidez, la precisión y la mejora de los resultados finales. Acortar tiempos para el registro permite ser más eficientes y competitivos sin contar aquellas intervenciones en las que el inminente riesgo para el bien patrimonial hacen peligrar su existencia y es necesario un rápido registro y toma de decisiones. Esta mayor rapidez redundante en un menor coste permitiendo a la administración incrementar sus actuaciones, pero sin duda, la innovación más relevante es la mayor calidad y precisión de la documentación gráfica obtenida. (Benavides et al, 2016) [208].

194 VERHOEVEN, G. (2011) Taking computer vision aloft—archaeological three-dimensional reconstructions from aerial photographs with photoscan. *Archaeological Prospection*, vol. 18, no 1, p. 67-73.

195 DONEUS, M, et al. (2011) From deposit to point cloud—a study of low-cost computer vision approaches for the straightforward documentation of archaeological excavations. *Geoinformatics FCE CTU*, 2011, vol. 6, p. 81-88.

196 KERSTEN, T.; LINDSTAEDT, M. (2012) Automatic 3D object reconstruction from multiple images for architectural, cultural heritage and archaeological applications using open-source software and web services. *Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation*, vol. 2012, no 6, p. 727-740.

197 FORTE, M, et al. (2012) 3D archaeology at Çatalhöyük. *International Journal of Heritage in the Digital Era*, 2012, vol. 1, no 3, p. 351-378.

¹⁹⁸ CORSINI, M, et al. (2013) Fully automatic registration of image sets on approximate geometry. *International journal of computer vision*, vol. 102, no 1-3, p. 91-111.

199 BENAVIDES, J.A., et al. (2016) 3D modelling in archaeology: The application of Structure from Motion methods to the study of the megalithic necropolis of Panoria (Granada, Spain). *Journal of Archaeological Science: Reports*, 2016, vol. 10, p. 495-506.

200 FURUKAWA, Y, et al. (2009) Reconstructing building interiors from images. En 2009 IEEE 12th International Conference on Computer Vision. IEEE, p. 80-87.

201 AGARWAL, S, et al. (2011) Building rome in a day. *Communications of the ACM*, vol. 54, no 10, p. 105-112.

202 RODRÍGUEZ-NAVARRO, P., PIQUERAS, T. G., & VERDIANI, G. (2016) Drones for architectural surveying. Their use in documenting Towers of the Valencian Coast.

203 ROSNELL, T; HONKAVAARA, E. (2012) Point cloud generation from aerial image data acquired by a quadcopter type micro unmanned aerial vehicle and a digital still camera. *Sensors*, vol. 12, no 1, p. 453-480.

204 FONSTAD, M, et al. (2013) Topographic structure from motion: a new development in photogrammetric measurement. *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 38, no 4, p. 421-430.

205 STUMPF, A, et al. (2015) Ground-based multi-view photogrammetry for the monitoring of landslide deformation and erosion. *Geomorphology*, 2015, vol. 231, p. 130-145.

206 CLAPUYT, F et al. (2016) Reproducibility of UAV-based earth topography reconstructions based on Structure-from-Motion algorithms. *Geomorphology*, 2016, vol. 260, p. 4-15.

207 RODRÍGUEZ-NAVARRO, P., VERDIANI, G., & PIQUERAS, T. G. (2015). Comprehensive Methodology for Documenting the Defense Towers of the Valencian Coast (Spain). *DEFENSIVE ARCHITECTURE OF THE MEDITERRANEAN*, 321.

208 BENAVIDES, J., ARANDA, G., SANCHEZ, M., ALARCON, E., FERNANDEZ, S. LOZANO, A., & ESQUIVEL, J. (2016). 3D modelling in archaeology: The application of

Existe en el mercado herramientas comerciales como Pix4D, PhotoscanPro y PhotoModeler así otras de *software* libre como VisualSFM, Recap-360(Autodesk), Photosynth, etc, pero todas ellas se basan en la utilización de algoritmos para extraer de forma automatizada las características relevantes de las imágenes, para posteriormente reconstruir la posición y orientación relativa de las fotografías a partir del algoritmo de ajuste del alineado de imágenes denominado “Bundler” [209]. Conocida la geometría interna y externa de las imágenes se consigue la reconstrucción del modelo 3D del objeto mediante triangulación múltiple. Todo este proceso se explicará detalladamente en el apartado procesado de imágenes por SfM.

La generación de modelos 3D con estas herramientas necesita un mínimo de tres fotogramas solapadas de un mismo elemento, si bien lo normal es utilizar decenas, cientos o incluso de miles de fotografías para obtener un modelo tridimensional complejo del objetivo de estudio, y mientras que la fotogrametría clásica o estéreo-fotogrametría exige cierta rigurosidad en cuanto a la cámara y planificación de las tomas, en el método mediante SfM no es necesario ningún tipo de planificación estricta ni calibración previa de cámaras [210]

El registro espacial de diferentes modelos de un mismo objeto lo convierte en la herramienta ideal para cuantificar sus modificaciones. De igual forma, es posible la superposición de diferentes modelos temporales de

una excavación lo que permite una contextualización de los diferentes estratos o artefactos registrados [211]

FLUJO DE TRABAJO EN SFM.

La correcta documentación de patrimonio mediante esta tecnología requiera la utilización simultánea de diferentes instrumentos y metodología. En síntesis los pasos a desarrollar son:

Trabajos de campo

- Planificación
- Establecimiento de una red de puntos de apoyo fotogramétrico.
- Captura de imágenes.
- Medición y georreferenciación de los puntos de apoyo en coordenadas locales o aún mejor, universales.

Trabajos de oficina

- Procesado de imágenes por SfM para obtención del modelo 3D.
- Obtención de los documentos gráficos: planos de planta, alzado, secciones, curvas de nivel y ortofotogramas, necesarios para el estudio de bien.
- Exportación de datos a programas específicos para la gestión y el desarrollo de la investigación o difusión.

Structure from Motion methods to the study of the megalithic necropolis of Panoria (Granada, Spain). *Journal of Archaeological Science: Reports*, 10, 495-506.

209 WU, C, et al. (2011) Multicore bundle adjustment. *Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2011 IEEE Conference on. IEEE, 2011. p. 3057-3064.

210 PEREIRA UZAL, J. M. (2013). Modelado 3D en patrimonio por técnicas de structure from motion. *ph investigación*, 79

211 CHARQUERO, A. M., & LOPEZ, J. A. (2012). Registro tridimensional acumulativo de la secuencia estratigráfica. Fotogrametría y SIG en la intervención arqueológica de lo Boligni (Alacant). *Virtual Archaeology Review*, 3(5), 81-88.

Trabajos de campo

a.- Planificación

La captura de imágenes para el registro completo de un Bien Patrimonial requiere un proceso de planificación previo que optimice la captura y evite zonas sin cobertura. En este sentido, es preferible disponer de fotografías en exceso, que detectar la falta de registro al final de todo el procesado, siendo preferible en estos casos empezar desde el principio.

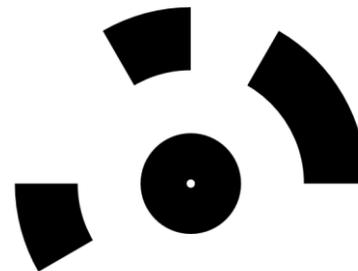
Se deberá controlar la problemática específica del método a desarrollar (terrestre o aéreo), el equipo disponible, las características de entorno (accesibilidad, espacio para la captura, obstáculos, circulación de personas o coches, etc.), aspectos ambientales (iluminación, hora del día), situación de puntos de apoyo, etc.

En el caso de la fotografía aérea se realizará una programación del vuelo teniendo en cuenta los requisitos de solape, altura de vuelo, velocidad, iluminación, condiciones ambientales u otras de tipo legislativo.

b.- Establecimiento de una red de puntos de apoyo

Previa a la captura de imágenes se deberán colocar los puntos de referencia distribuidos geométricamente por el objeto de estudio, situando sobre el terreno y los paramentos dianas de papel adheridas mediante cinta doble cara. Estos puntos serán medidos por métodos topográficos para dar dimensión y exactitud al modelo. El tamaño de las dianas debe ser inversamente proporcional a la escala de la imagen y a la calidad radiométrica de las mismas. Si bien, las diferentes posiciones

de captura hacen que no se puede establecer un criterio exacto en cuanto al tamaño que deben tener respecto del GSD para que puedan ser reconocidas automáticamente



Puntos de apoyo fotogramétrico situados sobre los paramentos previa a la captura fotográfica.

Los diferentes programas de procesamiento por SFM son capaces de generar de forma casi automática un modelo 3D a partir del análisis de multitud de imágenes, pero necesitan obligatoriamente disponer de las coordenadas de puntos de apoyo que permitan reajustar la dimensión y orientación del modelo de acuerdo a un sistema de coordenadas local o universal. Las coordenadas de los puntos de apoyo son obtenidas por radiación topográfica a partir de las bases de estación previamente georreferenciadas mediante GPS o itinerario orientado. Los puntos de apoyo realizan tres funciones muy importantes:

- Escalar el modelo 3D a partir de las dimensiones aportadas por estos puntos.
- Orientar el modelo respecto de un sistema de referencia global, tanto en posición, dirección como horizontalidad.
- Calibración de interna de las imágenes. Si bien los algoritmos de inteligencia artificial son capaces de detectar y relacionar decenas de miles de puntos homólogos en diferentes imágenes, estos producen cierto grado de error debido, fundamentalmente, a la deformación interna de las imágenes causada por las imperfecciones o ajustes de la lente o conjunto de lentes. El proceso de calibración de las deformaciones de la lente necesita apoyarse en determinados puntos (puntos de control) para poder, a partir de los valores reales, calcular los errores cometidos y calibrar los parámetros internos para eliminarlos.

c.- Captura de imágenes

Las imágenes digitales constituyen la fuente imprescindible para la generación de modelos virtuales y su posterior documentación gráfica, por ello proponemos las siguientes recomendaciones:

- Usar imágenes con la máxima resolución, siendo preferible el uso de formato RAW para el posterior ajuste de revelado.
- Ajustar el valor ISO al más bajo posible de acuerdo a la condiciones de iluminación. Valores de ISO altos inducen ruido adicional a las imágenes.
- Es muy importante capturar fotos nítidas y no borrosas, para ello se requiere una buena iluminación para lograr una mejor calidad de los resultados así como el uso de trípode.
- El valor de la apertura de diafragma debe ser lo suficientemente alto como para disponer de la profundidad de campo apta para que todos los planos

presentes en la imagen estén enfocados. Valores muy altos ($f/22$) no son recomendables pues producen difracción en la imagen.

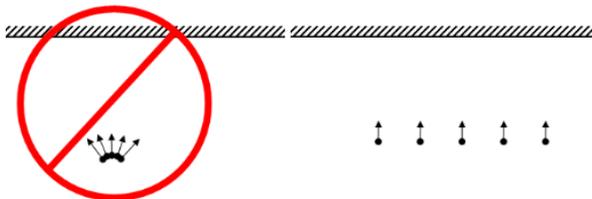
- La velocidad de obturación no debe ser demasiado lenta, de lo contrario se producirá desenfoque debido a movimientos de la cámara.



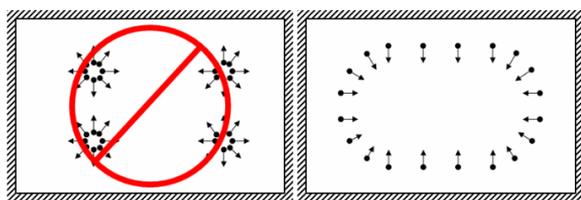
La calidad de la fotografía condiciona, en gran medida, la calidad del trabajo

- Evitar la captura de objetos sin textura o que emitan brillo. En esos casos se recomienda ampliar el campo de visión o colocar pequeños adhesivos de diferentes colores sobre el objeto.
- Evitar capturar elementos que no desean formar parte del objeto a documentar (personas, farolas, árboles, etc.). Se recomienda eliminar las fuentes de luz o el contraluz en el campo de visión de la cámara.
- Se recomienda aprovechar al máximo el área de captura de la imagen, aumentando de esta forma la resolución del objeto de interés. En algunos casos se debe rotar verticalmente la cámara 90° para la captura de objetos en los que predomine la dimensión vertical. No es necesario capturar el objeto completo en el marco de la imagen siempre que este pueda dividirse en diferentes imágenes capturadas desde diferentes posiciones.

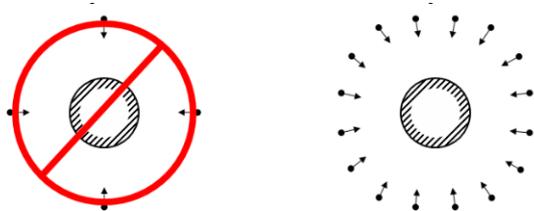
En los siguientes gráficos [212] se muestra el esquema, en planta, del modo de captura de imágenes horizontales de acuerdo al objeto a documentar:



Esquema del modo de captura para fachadas. Obtenidas de la guía de ayuda de Agisoft Photoscan



Esquema del modo de captura de una estancia interior. Obtenidas de la guía de ayuda de Agisoft Photoscan [212]



Esquema del modo de captura exterior de un objeto. Obtenidas de la guía de ayuda de Agisoft Photoscan

En este mismo sentido, en la planificación del vuelo, cuando existan elementos estructurales, se reco-

mienda un solapamiento de al menos el 80% en el sentido longitudinal y del 50% de superposición en el transversal.

El correcto procesamiento de las imágenes requiere la utilización de los metadatos adscritos a una imagen. Esta informa sobre el tipo de cámara, resolución de imagen, tipo de lente, distancia focal, velocidad de disparo, etc. quedando recogidos en los datos EXIF contenidos en la imagen digital. De acuerdo a esto, no pueden usarse imágenes digitales que no dispongan de esta información (por ejemplo, imágenes escaneadas) o imágenes que hayan sido modificadas geométricamente en programas de edición fotográfica (p. eje.- recortadas, deformadas) por no coincidir sus datos geométricos con los datos EXIF guardados.

Propiedades: DSC_0268.JPG		Propiedades: DJI02078.JPG	
General Seguridad Detalles Versiones anteriores		General Seguridad Detalles Versiones anteriores	
Propiedad	Valor	Propiedad	Valor
Dimensiones	7360 x 4912	Dimensiones	4384 x 3288
Ancho	7360 píxeles	Ancho	4384 píxeles
Alto	4912 píxeles	Alto	3288 píxeles
Resolución horizontal	300 ppp	Resolución horizontal	72 ppp
Resolución vertical	300 ppp	Resolución vertical	72 ppp
Profundidad en bits	24	Profundidad en bits	24
Compresión		Compresión	
Unidad de resolución	2	Unidad de resolución	2
Representación del color	sRGB	Representación del color	sRGB
Bits comprimidos/píxel	4	Bits comprimidos/píxel	2.5177370264798338
Cámara		Cámara	
Fabricante de cámara	NIKON CORPORATION	Fabricante de cámara	DJI
Modelo de cámara	NIKON D800	Modelo de cámara	PHANTOM VISION FC...
Punto F	f/5	Punto F	f/2.8
Tiempo de exposición	1/320 s	Tiempo de exposición	1/426 s
Velocidad ISO	ISO-100	Velocidad ISO	ISO-100
Compensación de exposición	-1 paso	Compensación de exposición	0 paso
Distancia focal	14 mm	Distancia focal	5 mm

Detalles de los datos EXIF de una imagen capturada con cámara réflex Nikon D800 (izquierda) e imagen capturada con cámara FC 200 del *Drone Phantom 2 Visión +* (derecha)

Por otro lado, lentes gran angulares o las denominadas ojo de pez producen deformaciones en las imágenes que no se adaptan al modelo de distorsión de Brown [213] por lo que es necesario corregirlas antes de poder utilizarlas en el proceso de alineado y calibrado.



(izq.) Imagen distorsionada por la deformación de una lente gran angular; (der) Misma imagen corregida la deformación por *software* (Lightroom, photoshop, ptlens...).

²¹³ AGUIRRE DE MATA, J. (2016). *Calibración geométrica de cámaras no métricas. Estudio de metodologías y modelos matemáticos de distorsión* (Doctoral dissertation, Topografía).

Una de las aportaciones más importantes a la fotogrametría digital mediante el ajuste de haces ha sido la posibilidad de utilizar imágenes capturadas con cámaras no métricas permitiendo de este modo una democratización de la fotogrametría, de forma que cualquier persona pueda contribuir aportando fotografías que sirvan para una posterior documentación patrimonial, sobre todo en caso de emergencia o pérdida de algunos Bienes.

En los casos de estudio se describe en profundidad el proceso de captura de imágenes y la posible problemática que en ella se plantea.

Se considera que sólo un pequeño porcentaje de la arquitectura de valor en el mundo ha sido documentado con cámaras métricas por lo que el uso de este tipo de tecnología puede permitir el registro completo de todo tipo de arquitecturas, por ello, el CIPA ha considerado conveniente el desarrollar metodologías para que cualquier aficionado pueda registrar de una forma útil los elementos que considere de interés disponiendo en todo momento de registros históricos y actualizados de estos vienen. Durante el Symposium del CIPA celebrado en Sinaia (Rumanía) [214] en 1993 se decidió adoptar la siguiente resolución:

Considerando el lento progreso de la documentación del Patrimonio arquitectónico y arqueológico mundial, se recomienda: - el uso extensivo de la documentación fotogramétrica usando tanto cámaras métricas como

no-métricas de un modo adecuado, y - el uso y divulgación de un conjunto de reglas sencillas y adecuadas que garanticen restituciones y rectificaciones satisfactorias con vistas a asegurar una alta calidad profesional de los resultados

Como prueba de la efectividad de este sistema cabe destacar la reconstrucción de monumentos perdidos como el caso de los Budas de Bāmiyān [215] a partir de tres grupos de imágenes: un grupo de 12 imágenes obtenidas por turistas y capturadas de internet, otro grupo de diapositivas fueron proporcionadas por Harald Baumgartner en un viaje turístico y otras imágenes métricas que fueron tomadas por el profesor Kostka, Universidad Técnica de Graz en 1970 [216].

Con este fin, Peter Waldhäusl profesor de la Universidad Técnica de Viena ha descrito de forma simple unas recomendaciones en la captura de imágenes con cámaras no métricas, a que ha denominado “la Regla del 3x3”. [217]

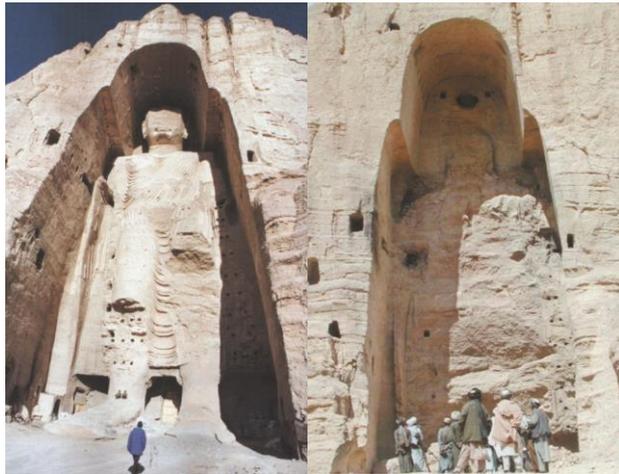
214 WALDHAEUSL, Peter.(1993) The 4th International Symposium for Architectural Photogrammetry of CIPA: 22–25 September, Bucharest and Sinaia, Romania. *IS-PRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1994, vol. 49, no 2, p. 38-40.

215 En marzo de 2001, la milicia del gobierno de los talibanes demolió las dos grandes estatuas de Buda que habían sido talladas hace aproximadamente 1700 años en el valle de Bamiyan, Afganistán. Tenían 53 y 38 m de

altura y el más grande figuraba como la representación más alta de un Buda erguido en el mundo.

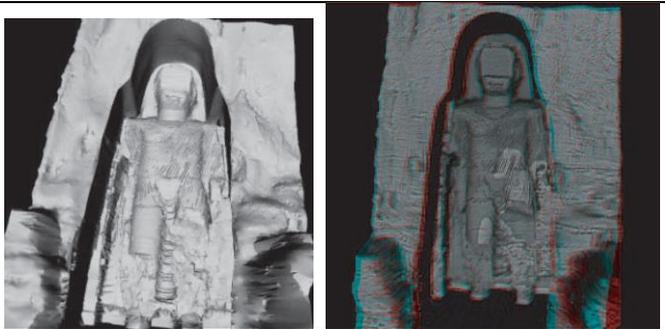
216 GRÜN, A; REMONDINO, F; ZHANG, L. (2004) Photogrammetric reconstruction of the great Buddha of Bamiyan, Afghanistan. *The Photogrammetric Record*, vol. 19, no 107, p. 177-199.

217 WALDHÄUSL-OUGLEBY; CIPA-ICOMOS. (1994) 3X3 RULES



Budas de Bāmiyān antes y después de su destrucción.

Después de la destrucción en marzo de 2001, se inició una intensa discusión a nivel internacional sobre la necesidad de una reconstrucción física de las estatuas. En agosto de 2003 se iniciaron las campañas de campo fotogramétricas.



Modelo 3d digital reconstruido a partir de múltiples imágenes capturadas de internet. Modelo de visión estereoscópica

REGLAS PRÁCTICA PARA LA DOCUMENTACION DEL PATRIMONIO CON CÁMARAS NO MÉTRICAS propuestas por el CIPA.

Se redactaron unas sencillas reglas para el uso de cámaras convencionales llamadas las "reglas 3x3", debido a que están estructuradas en tres temas (aspectos geométricos, aspectos fotográficos y aspectos organizativos) con tres sub-temas cada uno. Estas reglas aún vigentes 24 años después deben adaptarse a las nuevas tecnologías, eliminando, entre otras, aquellas referencias a cámara analógicas, hoy en día prácticamente en desuso.

1 Las tres reglas geométricas.

1.1 Control

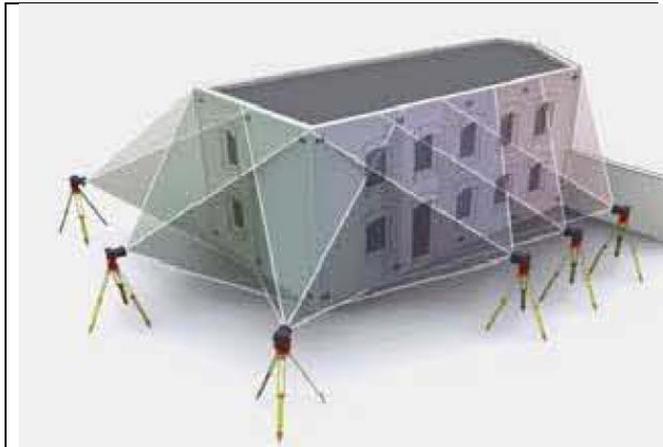
Medir algunas distancias largas entre puntos bien definidos.

Definir alineaciones verticales., mediante plomadas. Realizar esto en varios lados del edificio para comprobación.

1.2 Recubrimiento fotográfico múltiple en rededor

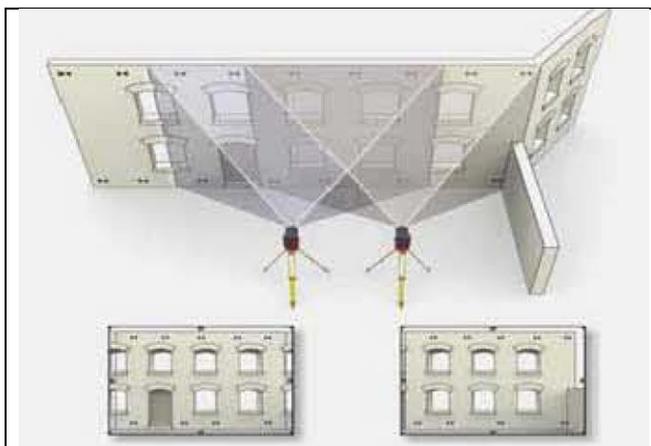
-Tomar un "círculo" de fotografías alrededor del objeto, solapadas al menos un 50%. -Tomar las fotografías desde una altura igual a la mitad de la altura del objeto, si es posible. -Incluir parte del entorno. -Añadir tomas diagonales que cubran dos caras del objeto. -Añadir tomas oblicuas que cubran fotografías adyacentes.

-Incluir también el tejado, si tiene interés. -Comprobar la cobertura múltiple cuidadosamente. -Añadir tomas ortogonales de las fachadas completas para sobrevuelos y rectificación.



Sistematización de captura de imágenes propuesta por Waldhäusl-Ougleby

1.3 Tomar pares estereoscópicos para restitución estereoscópica: (Fig. 2) -Los pares estereoscópicos se tomarán como: caso normal (relación base-distancia entre 1:4 y 1:15), o caso convergente (relación base-distancia entre 1:10 y 1:15). -Evitar capturas divergentes. -Añadir pares estereoscópicos cercanos para detalles de interés y medir distancias adicionales o incluir un jalón junto al objeto. -Comprobar la cobertura estereoscópica cuidadosamente. -En caso de duda, añadir más fotografías y tomar medidas manualmente sobre objetos que aparezca en las fotos.



Captura estereoscópica de imágenes. La zona común entre ambas fotografías podrá observarse y restituirse tridimensionalmente.

2 Las tres reglas fotográficas.

2.1 La geometría interna de la cámara debe mantenerse constante:

-Fijar la distancia focal del objetivo colocando cinta adhesiva. -No usar objetivos con desplazamiento vertical.

2.2 Elegir una iluminación homogénea:

-Buscar la mejor hora del día. -Usar trípode y disparo con temporizador para no producir desplazamientos y así obtener imágenes nítidas.

2.3 Elegir la cámara más estable y la de mayor formato disponible.

-El gran angular es preferible al teleobjetivo para las tomas fotográficas en rededor del objeto.

-Se recomiendan formatos de cámara amplios. Mejor full frame (24x36mm) que un formato medio (1/1.7")

3 Las tres reglas de organización.

Es necesario advertir que esta tercera regla es exclusiva para aquellos técnicos o profesionales dedicados a la documentación del patrimonio.

3.1 Hacer croquis apropiados. -Planta y -Alzado de cada lado (1:100-1:500) -Anotar el nombre del objeto, propietario, dirección. -Indicar la dirección norte y -Puntos de toma de las fotos (con el número del rollo y del negativo) y direcciones de las tomas. -Indicar los recubrimientos de las fotos sueltas y de los pares estereoscópicos. -Indicar las distancias de control y las verticales.

3.2 Rellenar unos formularios adecuados.

-Objeto, propietario, dirección.

-Fecha. -Cámara, objetivo, posiciones fijas del enfoque usadas.

-Datos de calibración, si se tienen.

-Descripción del lugar, objeto, historia.

-Bibliografía. -Detalles, artistas, arquitectos, permisos, obligaciones, etc.

3.3 No olvidar la comprobación final:

-Anotar todo inmediatamente.

-Comprobar la exactitud y la integridad de los datos antes de dejar el lugar.

-Concluir el informe mientras se recuerdan todos los detalles.

-Revisar los resultados en casa junto a un experto en monumentos y lugares históricos.

-Planificar el siguiente proyecto teniendo en cuenta cualquier error cometido anteriormente. Aprender de todo ello.

Con las herramientas informáticas disponibles en la actualidad (incluso de *software* libre como Recap-360 [218] o VisualFM [219], es posible completar el proceso de obtención del modelo tridimensional, facilitando entre otros, la libre disposición de estos datos. La propuesta, pasa por sugerir a Autodesk, la obligatoriedad de que los modelos generados deban estar geolocalizados sobre google-maps, herramienta ya disponible

en Autodesk Revit, de forma que se puedan localizar fácilmente los ya realizados y utilizarlos como elemento para su estudio.

d. Medición y georreferenciación de puntos de referencia

Como ya hemos indicado, los puntos de referencia o puntos de apoyo constituyen los elementos básicos para el cálculo de los parámetros de orientación interna (calibración de la imágenes) y de orientación externa del modelo, es decir las coordenadas X, Y, Z georreferenciadas y los ángulos de orientación Ω , Φ y K , respecto del sistema referencia elegido.

Estos puntos deben tener una alta precisión pues van a condicionar de manera decisiva la bondad del modelo. Por ello, se recomienda medirlos con instrumentos topográficos de la máxima precisión, en concreto, *Estaciones Totales topográficas con distanciometría láser para la captura de puntos accesibles o inaccesibles o distanciometría infrarroja para puntos del terreno*. Se miden utilizando el método de radiación apoyado en las bases de una poligonal cerrada o en las bases georreferenciadas medidas mediante un sistema de posicionamiento global por satélites (GPS o GNSS). Lo ideal es que este sistema realice correcciones en tiempo real mediante conexión GPRS a la red de red oficial de referencia pues facilita las coordenadas de los puntos respecto del sistema europeo (UTM-ETRS-89). En el caso de Andalucía debemos conectarnos a la RAP (Red Andaluza de Posicionamiento) o el IGN (Instituto Geográfico Nacional)

218 Recap 360 pro. Autodesk. <https://www.autodesk.com/products/recap/overview>

219 Wu, C. (2011). VisualSFM: A visual structure from motion system. <http://ccwu.me/vsfm/>



Medición de los puntos de apoyo sobre los paramentos mediante estación total Leica TS06 (izquierda). Georreferenciación de las bases a partir de equipo GPS-RTK (derecha)

En los casos de estudio se describe en profundidad la captura de puntos de apoyo y su problemática específica.

Procesado de imágenes por SFM y obtención del modelo 3d

El procesamiento de imágenes no estructuradas mediante SFM incluye los siguientes pasos principales:

- Selección y filtrado de imágenes.
- Alineación de fotografías. Obtención de la nube de puntos discreta;
- Construcción de nube de puntos densa;
- Construcción de la malla 3D;
- Aplicación de textura;
- Construcción de modelo de elevación digital;
- Construcción de ortomosaico. Ortofotografías;
- Exportando de resultados;

Las fotografías constituyen la fuente para la reconstrucción del modelo 3D del objeto a documentar, por tanto, antes de procesarlas es necesario realizar una selección y filtrado, eliminando aquellas que no reúnan los requisitos de calidad adecuados. La reconstrucción del modelo 3D requerirá al menos tres fotografías con imágenes superpuestas de un mismo objeto, siendo habitual utilizar decenas, cientos o incluso miles de fotografías simultáneamente.

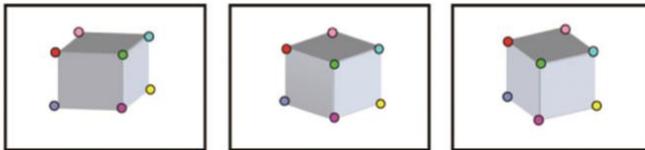
f. Alineación de fotografías

El primer y más importante paso del proceso fotogramétrico consiste en la recolocación de las imágenes en la misma posición relativa en la que se capturaron. Este proceso se conoce con el nombre de ajuste Bundler y consiste en correlacionar pares de imágenes a partir de los puntos homólogos detectados entre ellas, determinando de esta forma la posición y orientación relativa de cada una de las cámaras con respecto a las demás. Este proceso que se realizaba manualmente seleccionando los puntos homólogos por el operador se ha sustituido por algoritmos de detección automática que permite detectar miles de puntos por imagen de forma

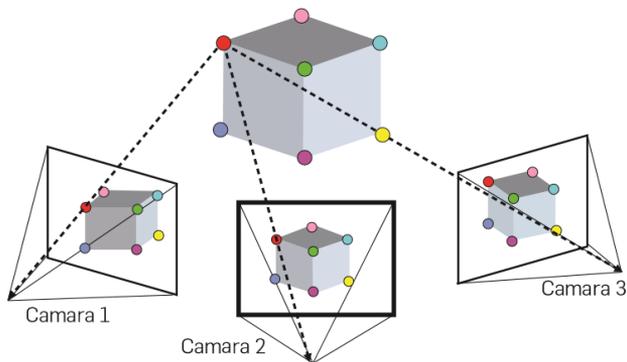
rápida y precisa. El algoritmo más utilizado para este proceso es el Scale-Invariant Feature Transform (SIFT) [220]

Mediante el algoritmo SIFT se crea una descripción de las características relevantes de cada imagen de forma independiente a la escala de las mismas y a los aspectos técnicos de la propia imagen tales como luminosidad, color, contraste, etc.

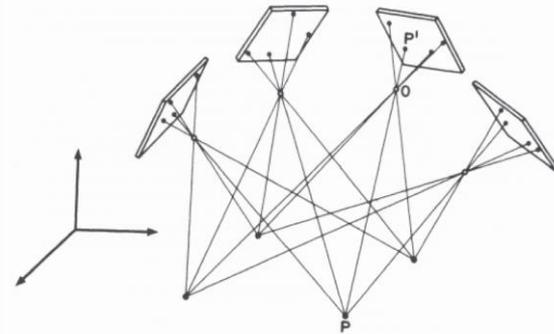
La situación de todos estos puntos en el espacio una vez realizado el ajuste Bundler constituye lo que se denomina “nube de puntos discreta”. La densidad de esta nube dependerá de la cantidad de puntos homólogos detectados en las imágenes.



Imágenes 2D de un cubo desde puntos de vista desconocidos. Podemos establecer su correlación a partir de puntos homólogos como las esquinas del mismo color.



A partir de la correspondencia de puntos homólogos es posible reconstruir la geometría de las cámaras (posición y orientación) en el espacio mediante el “ajuste de haces por mínimos cuadrados”.



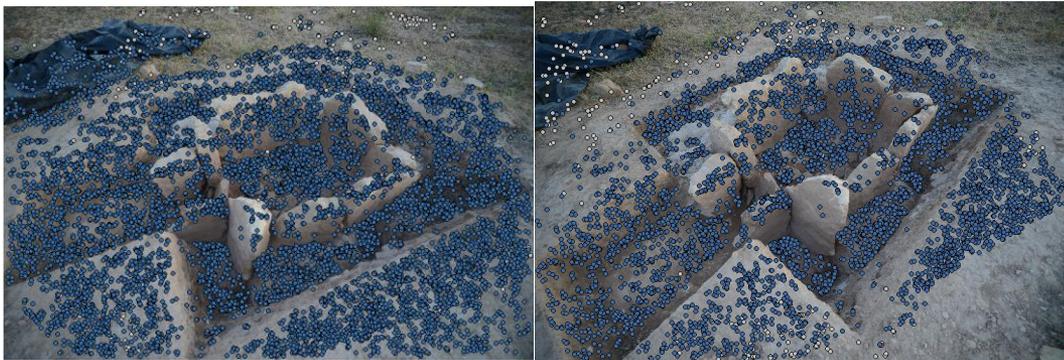
Reconstrucción espacial de la posición y orientación de las cámaras a partir de ajuste de haces de puntos homólogos. Grafico realizado por Almagro, 2004, 77.

El ajuste multimagen se realiza a partir de una triangulación múltiple por ajuste de haces mediante cálculo por mínimos cuadrados. La combinación de imágenes a partir de los puntos SIFT detectados en cada una de las imágenes permite el ajuste general de todas ellas. Este método ha demostrado ser el más rápido y preciso en la determinación del ajuste de imágenes, habiendo sustituido por completo a los métodos tradicionales.

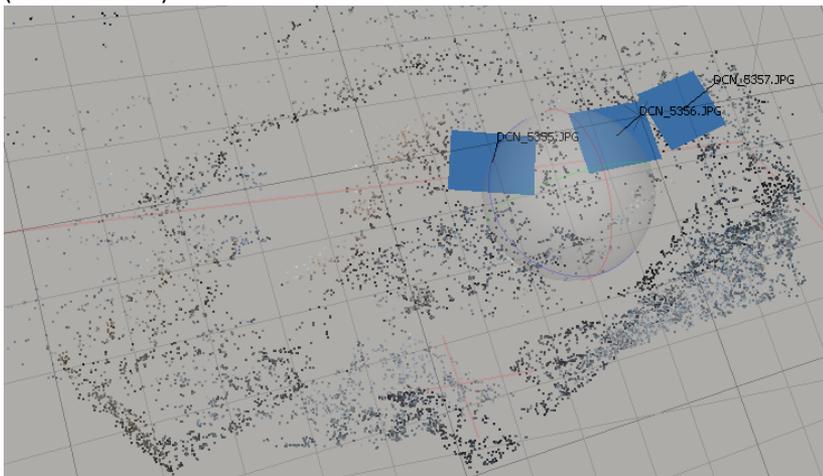
220 LOWE, D. (1999). Object recognition from local scale-invariant features. *Computer Vision, The Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on*, (págs. 1150-1157 vol.2).



Secuencia de tres imágenes no estructuradas de un mismo objeto capturadas con la misma cámara. A partir de los valores radiométricos de sus píxeles, el *software* detecta de forma automática los puntos con características invariables comunes detectados en varias fotografías, relacionándolos entre sí. (J.A.Benavides)



Puntos homólogos detectados en ambas imágenes: para una precisión alta se ha detectado 7687 puntos válidos (azul) y 343 no válidos (blancos). Para una precisión baja se han detectado 3389 puntos válidos y 121 no válidos. (J.A.Benavides)



Reconstrucción 3D de la posición y orientación de las cámaras a partir del ajuste Bundler de los puntos homólogos detectados en las tres imágenes. Estos puntos constituyen lo que se denomina nube discreta. (J.A.Benavides)

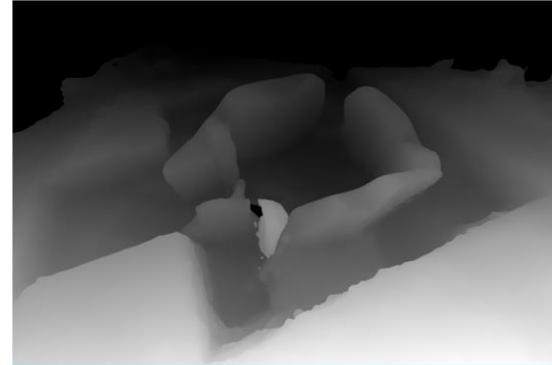
La conexión a un sistema global de coordenadas se realiza a partir de las coordenadas conocidas, de al menos, tres puntos de referencia terreno, siendo habitual la definición de muchos más para un ajuste más robusto del conjunto. De igual forma, la comparación de coordenadas modelo respecto de las coordenadas medidas en campo, determinará los errores de ajuste debido a la falta de calibración de las imágenes. Por tanto, el ajuste preciso de dimensión, posición y orientación pasa por un calibrado previo de las imágenes a partir de los puntos de apoyo.

g. Construcción de nube de puntos densa

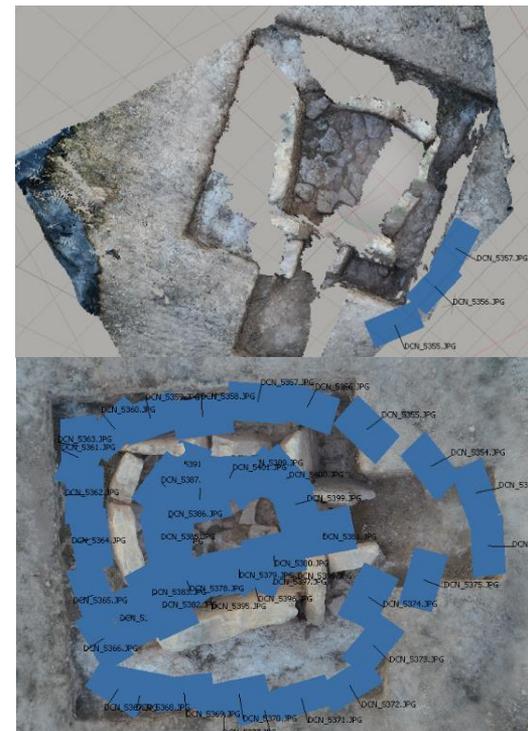
Por lo general, existen diferentes niveles de ajuste de densidad de la nube densa. Las experimentaciones llevadas a cabo demuestran un aumento exponencial del tiempo de procesamiento del número de datos obtenido, llegando a ser en algunos casos inmanejables.



Modelo 3D de la nube densa a partir de 3 imágenes. Para un ajuste de densidad baja se han generado 494542 puntos (arriba). Para un ajuste alto se han generado 6984125 puntos (abajo). (J.A.Benavides)



Mapa de profundidad correspondiente a la imagen central. El mapa de profundidad depende directamente de la nitidez de la imagen, de forma que las zonas o imágenes poco nítidas, borrosas o movidas no son consideradas en la generación de la nube de puntos. (J.A.Benavides)



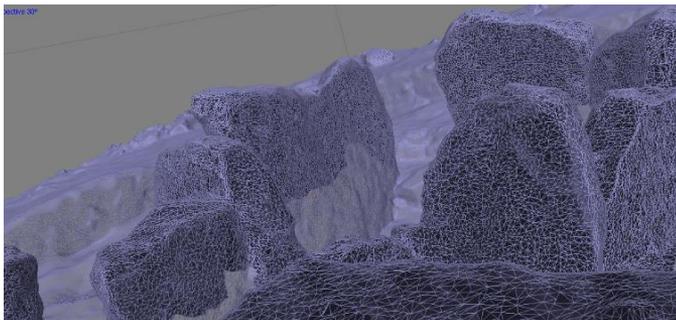
Las zonas no visibles en las imágenes quedan huecas (arriba). Se necesitan capturar mayor número de imágenes desde diferentes puntos de vista para reconstruir el modelo completo (abajo). (J.A.Benavides)

h.- Construcción de modelos de superficie

La indefinición de formas que produce la nube de puntos al acercarnos hace que necesitemos generar superficies que se adapten a estas formas y que constituyan un soporte “físico” sobre el que poder trabajar. A esta estructura de datos se denomina TIN (triangulated irregular network). [221]

Los triángulos se construyen relacionando ternas de puntos cercanos no colineales, formando una red irregular de triángulos que puede adaptarse a la superficie. La dimensión y forma de los triángulos va a depender fundamentalmente de la densidad de puntos de la nube y de la complejidad de formas a representar.

La cualidad adaptativa de los modelos de malla unida a la posibilidad de aplicación de textura los hace el medio ideal para la representación de las formas irregulares de la arquitectura histórica y de los restos arqueológicos. Pero estas entidades solo recubren la superficie de los elementos, estando carentes de materialidad.



Superficie formada por malla irregular de triángulos (TIN) generada a partir de la nube de puntos. (J.A.Benavides)

En la realización de los casos de estudio se profundiza más sobre la construcción de los modelos de superficie, con o sin textura.

j.- Modelos digitales de elevaciones (DEM)

Un archivo DEM (Modelo Digital del Elevaciones), constituye una superficie matemática continua y simplificada que reproduce las formas del terreno. A diferencia de las superficies de malla de triángulos, las DEM quedan representadas mediante una cuadrícula regular en la que la altura de cada uno sus vértices se corresponde con la altura del terreno o del objeto en esos puntos. Se trata de un formato simplificado del TIN que facilita la gestión y exportación a otros programas de CAD, donde permite obtener documentos técnicos como planos con curvas de nivel o los cálculos de volúmenes. La resolución espacial constante permite la fácil realización de ortofotografías, pues las imágenes se proyectan de forma paralela al plano de proyección de la cuadrícula de la malla.



Superficie DEM generada a partir de la malla irregular. Es una malla regular continua que determina la elevación del modelo en cada uno de sus vértices. (J.A.Benavides)

221 PEUCKER, T. K., FOWLER, R. J., LITTLE, J. J., & MARK, D. M. (1978). The triangulated irregular network. In *Amer. Soc. Photogrammetry Proc. Digital Terrain Models Symposium* (Vol. 516, p. 532).

Por su estructura, las superficies DEM se adaptan muy bien a elementos sin discontinuidad, como es el caso del terreno, pero presentan muchos inconvenientes en la representación de elementos arquitectónicos y arqueológicos, donde los cambios bruscos de altura o de profundidades dan lugar a proyecciones erróneas de las imágenes sobre el modelo. En estos casos es muy recomendable trabajar directamente sobre modelos de malla irregular (TIN) aunque el proceso de texturizado es mucho más complejo.

k.- Ortofotografías

Una ortofotografía es un documento fotogramétrico, generado a partir de la proyección paralela de las imágenes fotográficas sobre el modelo tridimensional, consiguiendo que la imagen disponga de las características geométricas equivalentes al modelo. De este modo, se eliminan las deformaciones de las fotografías debidas a la perspectiva cónica de la imagen y a los efectos de inclinación de la cámara respecto del elemento a documentar.

Las ortofotografías digitales han supuesto un importante avance para la documentación del patrimonio pues une, en un mismo documento, aspectos dimensionales y cualitativos. Disponen de una geometría equivalente a un plano donde las medidas lineales, angulares y superficiales a escala, se corresponden con las del elemento a documentar. A la facilidad de interpretación, incluso por usuarios no expertos, se une el poder de transmisión de las cualidades de los materiales y de su estado de conservación o de deterioro. De igual manera, las ortofotografías proporcionan información sobre el entorno donde se encuentra el bien a documentar.



Ortoimagen en planta generada a partir de la proyección selectiva de los píxeles de las imágenes sobre la malla TIN (Triangular Irregular Network) (J.A.Benavides)

3.5 DOCUMENTACIÓN GRÁFICA APLICADA AL PATRIMONIO ARQUITECTÓNICO Y ARQUEOLÓGICO

La documentación gráfica constituye una de las herramientas más potentes para la preservación de los valores culturales materiales de los yacimientos arqueológicos y de los edificios históricos y constituye la base para su investigación, conservación y difusión. En ella es posible reflejar los valores arquitectónicos (formas, espacios, tecnología constructiva, etc....), los arqueológicos (secuencias constructivas, tipologías, artefactos) y los artísticos. En algunos casos, la existencia de estos bienes tan sólo perdura a través de la documentación gráfica generada por la propia investigación.

Tal y como ya indicamos, una de las premisas en cuanto a los criterios de intervención para la conservación de patrimonio arquitectónico y arqueológico, es **la realización levantamientos de planos del estado actual, donde poder recoger la información necesaria para una mejor interpretación.** Se representara su geometría con los diferentes tipos de materiales, consignando su deterioro, irregularidades y daños, poniendo especial atención en las fisuras y en las deformaciones. Estas irregularidades geométricas pueden ser resultado de deformaciones previas, pero también pueden indicar la conexión entre distintas fases constructivas o modificaciones de las fábricas.

Tradicionalmente, la representación de edificios históricos ha venido motivada por intervenciones de restauración o rehabilitación, pero no ha sido hasta hace pocos años cuando se ha tomado conciencia de la importancia de una documentación gráfica rigurosa como

elemento clave para el conocimiento y difusión de este patrimonio cultural. De este modo, todos los trabajos de investigación, conservación o difusión tendrán como base fundamental una adecuada documentación gráfica, acorde a las necesidades de intervención. Sobre ella se podrá representar, coordinar o analizar las diferentes disciplinas de estudio, estableciendo las correspondientes relaciones entre ellas. En este sentido, Antonio Almagro indica que:

el levantamiento gráfico es un medio de análisis que suministra información en los procesos de conocimiento, proporcionándonos en unos casos datos fundamentales y en otros, facilitándonos un soporte gráfico en el que representar y codificar las otras informaciones. [222]

En el ámbito arqueológico, el registro de datos viene siempre precedido de una importante documentación gráfica donde plasmar, de forma objetiva, la mayor cantidad de información posible de forma que esté geolocalizada y contextualizada.

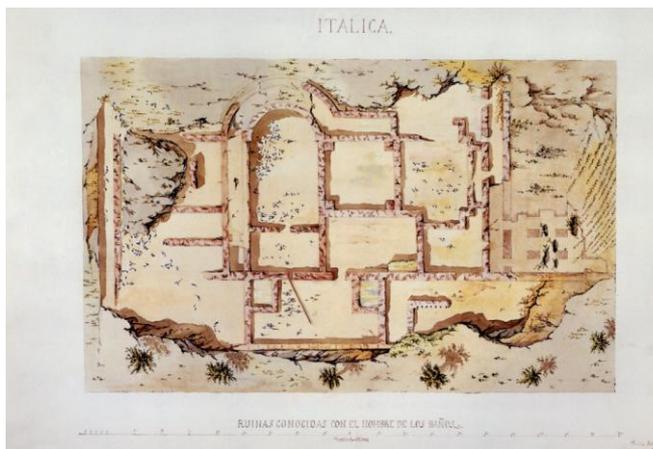
A lo largo de la historia, cada una de las representaciones realizadas sobre el patrimonio, independientemente de su rigor métrico, han constituido un documento único que ha permitido conocer y analizar la visión de los monumentos patrimoniales, incluso los ya perdidos. La representación gráfica del patrimonio arquitectónico y arqueológico debe ser, ante todo, una vía para registrar y documentar sus valores culturales materiales, asegurando su preservación. En este sentido, Martín Talaverano [223] indica que, *una completa documentación gráfica permite preservar los valores culturales de un edificio histórico incluso aunque este haya desaparecido.*

²²² ALMAGRO GORBEA, A. (2004). *Levantamiento arquitectónico*. Universidad de Granada.

²²³ MARTIN TALAVERANO, R. (2014). Documentación gráfica de edificios históricos: principios, aplicaciones y perspectivas. *Arqueología de la Arquitectura*, (11), 011.

El método por excelencia de representación de la arquitectura y la arqueología ha sido y sigue siendo el dibujo de planos de planta, alzados y secciones [224], completada con vistas en perspectiva cónica o axonométrica [225]. De este modo Ortega Vidal nos indica:

El uso coordinado del sistema planta-sección-alzado es así un logro cultural sofisticado, cuyo objetivo prioritario no es otro que el control y el conocimiento de lo tridimensional; es por tanto un método de análisis en el sentido de separar y estructurar en aspectos parciales la complejidad de los hechos arquitectónicos. A partir de este enfoque, conviene investigar las posibilidades de interacción entre las dos y tres dimensiones, esto es, los procesos de ida y vuelta entre ambos tipos de construcciones gráficas, ya sea en relación con la captura de datos, ya sea en las elaboraciones dibujadas.



224 ORTEGA VIDAL, J. (2011). El dibujo del patrimonio y su vida gráfica. *Documentación gráfica del Patrimonio, (Publicación digital)*. Ministerio de Cultura, 46-63.

225 SAINZ, J., & AVIA, J. S. (2005). *El dibujo de arquitectura: teoría e historia de un lenguaje gráfico* (Vol. 6). Reverté.

226 Demetrio de los Ríos fue impulsor de las primeras excavaciones en el yacimiento de Itálica y autor de los levantamientos gráficos que la documentaron.

Documentación gráfica de las ruinas conocidas con el nombre de los baños. Demetrio de los Ríos²²⁶. Sevilla, febrero de 1858. (Fernández Gómez, 1998: Lámina 7. Página 139)

Pero, como ha venido ocurriendo en muchas ocasiones, la compleja elaboración gráfica de los edificios históricos y yacimientos, se ha limitado a la sola representación de la planta, lo que imposibilita la compleja comprensión espacial de las estructuras, los desniveles o su adaptación al terreno, datos esenciales para un correcto conocimiento.

La incorporación de nuevas tecnologías digitales ha puesto a nuestro alcance una amplia gama de equipos y programas que generan nuevos modos de representación, fundamentalmente modelos [227] tridimensionales, que complementan a las ya clásicas planimetrías. Estos sistemas permiten un considerable aumento de la precisión gráfica y métrica, reduciendo la subjetividad y facilitando la obtención de una documentación cada vez más completa y exhaustiva. Pero, por el contrario, están causando bastante desconcierto en cuanto al tipo de documentación que se debe generar, sus formas de transferencia y comunicación o la forma de almacenamiento.

En la actualidad, los métodos de documentación del patrimonio evolucionan tan rápidamente, que no permiten, en la mayoría de los casos, una reflexión clara

227 Según Joly "un modelo es una representación simplificada de la realidad en la que aparecen algunas de sus propiedades" (Joly, 1988). Ríos amplía este concepto indicando "un modelo es un objeto, concepto o conjunto de relaciones que se utiliza para representar y estudiar de forma simple y comprensible una porción de la realidad empírica" (Ríos, 1995)

sobre cómo administrar y con qué finalidad gestionar la cantidad de información adquirida [228]

El primer problema viene motivando la elección más adecuada, por parte de los profesionales e investigadores, respecto a que tecnología utilizar y sobre todo a la constante actualización que esta requiere. Cada día aparecen nuevas aplicaciones o instrumentos con nuevas características que deben ser evaluadas y aplicadas, requiriendo en ocasiones más tiempo en el aprendizaje y manejo de estos sistemas que en la verdadera tarea de documentación del patrimonio.

En segundo lugar y más importante, la gestión de estos nuevos sistemas producen unos resultados gráficos que aún están carentes de toda sistematización y normalización. Nuevos conceptos como “modelo tridimensional de nube de puntos”, “modelo digitales de superficie formados por mallas de triángulos texturizadas”, “modelo digitales de elevaciones con curvas de nivel”, etc. producen unos resultados espectaculares pero hasta ahora carentes de una sistematización respecto a los productos finales que se deben generar. Hoy día se emplea más tiempo en la generación y gestión de la información, que en el verdadero objetivo de nuestro trabajo. Archivos de intercambio tipo LAS, WRL, OBJ, RCS, RCP, etc. entran a formar parte de la nueva dialéctica entre los encargados de la documentación de patrimonio, generando no menos problemas en su gestión y transferencia.

Por este motivo, uno de los objetivos que nos debemos plantear es establecer los modos de representación de manera que el espacio quede representado de forma

ordenada y comprensible. Para ello siempre se ha recurrido a representaciones en planta, alzado y sección con un adecuado grafismo. Esta intención por cuantificar y normalizar el método de registro de la arquitectura, ya quedó recogido en el libro de Vitrubio *De architectura* siglo I AC., donde se intenta sistematizar el método de representación con respecto a los monumentos romanos [229]:

Se han de tomar geoméricamente las plantas y alzados de todos los edificios antiguos [...] enteros o en ruinas

En otros casos, las modas han ido variando del clásico modo de representación arquitectónico (planta, alzado, sección) a sistemas perspectivas, isométricos o cónicos, mejor adaptadas a la visualización, pero con un punto de vista más romántico que técnico.



Perspectiva de la muralla y alcazaba de Antequera. Málaga. Anton Van den Wyngaerde 1567

En la actualidad el cambio ha sido más profundo pues no solo se ha modificado los modos de registro sino que también se han modificado todos los soportes de representación (del documento papel se ha pasado a

228 URIBE, P., ANGÁS, J., MAGALLÓN, M. Á., & MIRANDA, J. V. (2012). Documentación, valorización y difusión del patrimonio hidráulico romano en el Valle medio del Ebro. *Virtual Archaeology Review*, 3(6), 98-102.

229 DIAZ MORENO, F. (2014) Los diez libros de arquitectura de Vitruvio, en la traducción de José Ortiz y Sanz.

la representación digital en sistemas CAD). Así, el registro de modelos tridimensionales con calidad realista nos permiten obtener cualquier tipo de vista 2D: plantas, alzados, secciones o perspectivas desde cualquier posición de manera inmediata. Nuestro objetivo será por tanto, elegir y extraer aquellas representaciones que aporten un mayor conocimiento.

La complejidad geométrica y morfológica de un edificio o yacimiento hacen que su análisis no pueda realizarse en su conjunto, por lo que se necesita una simplificación y sistematización. Las representaciones bidimensionales han demostrado ser un medio eficaz para su estudio, si bien, después, pueden ser gestionadas a nivel global mediante modelos tridimensionales selectivos. Hasta tanto no surjan otros sistemas, proponemos el siguiente modo de trabajo

- Obtención del modelo tridimensional completo a partir de las nuevas tecnologías (nubes de puntos o mallas texturizadas).
- Obtención de planos 2D geolocalizados a partir de modelo 3D;
- Análisis, dibujo y extracción de datos relevantes sobre los documentos 2D.
- Integración de los datos en su referencia tridimensional para un análisis en conjunto.

En este sentido, si bien compartimos la idea de Álvarez González respecto de la necesidad de tener un registro completo del edificio o yacimiento a partir del modelo tridimensional, no compartimos el procedimiento de llevarlo a cabo: *La forma más simple de representación*

230 ÁLVAREZ GONZÁLEZ, I., E LOPETEGI GALARRAGA, A., MESANZA MORAZA, A., MIRANDA, Á. R., VALLE MELÓN, J. M., & ESPINA, I. V. (2003). Diferentes propuestas para la representación geométrica de edificios históricos. *Arqueología de la Arquitectura*, (2), 9-12.

231 Carta de Londres.

es mediante la realización de un modelo volumétrico consistente en la extracción de las líneas definitorias más importantes del edificio

Este sistema de trabajo permite simplificar y normalizar el objeto de estudio, objetivo fundamental para su comprensión y transferencia de información. La enorme producción gráfica que se realiza de cualquier organismo arquitectónico requiere que cumpla unos mínimos requisitos de organización y por supuesto de simplificación.

Según Álvarez [230] *el estudio histórico o arquitectónico de un edificio se concibe como un elemento único y tridimensional, por lo tanto, el modelo gráfico que lo represente deberá cumplir estas dos características: unicidad y tridimensionalidad, frente a las representaciones como conjuntos de alzados independientes entre sí y con los cuales es difícil relacionar las diferentes partes de un mismo edificio.*

Esta idea, tan idílica, choca frontalmente con la capacitación en el manejo de estas herramientas gráficas por parte de los investigadores y profesionales que intervienen en el conocimiento y estudio del elemento patrimonial, así como la falta de normalización respecto de este tipo de documentación. Cartas como la de Londres [231] (www.londoncharter.org) o la de Sevilla [232] intentan establecer los procesos de normalización para este tipo de representaciones.

El mayor problema actual para cualquier administración es poder gestionar de forma efectiva y ordenada la infinidad sus documentos, incluidos los gráficos, que esta acumula. En este sentido, la falta de una normali-

http://www.londoncharter.org/fileadmin/templates/main/docs/london_charter_2_1_es.pdf

232 Principios de Sevilla para la documentación de patrimonio.

<http://smartheritage.com/wp-content/uploads/2016/06/PRINCIPIOS-DE-SEVILLA.pdf>

zación por parte de las administraciones está provocando un verdadero caos respecto de cuál es el documento más reciente o el más adecuado. Cada profesional presenta los documentos con el nombre que se le antoja, con localización y orientaciones distintas, con datos distintos, capas distintas, etc., etc. Esta falta de organización ha motivado que en muchos casos se dupliquen o tripliquen los trabajos de documentación sobre un mismo bien, limitando de esta manera los recursos. En este sentido, merece la pena destacar la ley 13/2015 de Catastro inmobiliario, en la que se ha conseguido normalizar el registro gráfico y la entrega de los documentos respecto de parcelas y edificios a partir de la generación de los archivos GML. Esto debería ser una exigencia de todas las administraciones para normalizar y registrar la información patrimonial, pero hasta tanto esto no sucede, entendemos que a todo documento gráfico se le debe exigir:

- Estar georreferenciado y orientado en un sistema universal.
- Realización de un modelo tridimensional actualizado mediante nube de puntos o mallas texturizadas, y exportado en formato ASCII, WRL y PDF-3D
- Representaciones en documentos 2D mediante formatos de intercambio seguros (DXF, PDF) que incluyan todas las plantas, alzados y secciones necesarios para la perfecta definición de un bien
- Organización de capas normalizadas. Proponemos la normalización utilizada por el National CAD Standards (NCS) [233]

233 LOYOLA VERGARA, M. (2008). La normalización del dibujo CAD en la producción de documentación técnica de arquitectura y construcción en Chile.

GARCÍA TERUEL, M. (2012). Propuesta metodológica y aplicaciones en el marco del Espacio Europeo de Edu-

- Normalización del nombre de archivos y fecha de realización. Proponemos (aaaa-mm-dd-nºprovincia_nºmunicipio-ref catastral -signatura bien patrimonial-vista nºplano): ejemplo para el plano de planta número 2 correspondiente a la alcazaba de Guadix (Granada) realizado el día 20 de abril de 2017:(**20170420-18500-7983401VG8278D0001KZ-ALC-PLANTA02**). Permite un orden estricto por Bien patrimonial y Fecha.
- La incorporación de documentos guía que indiquen la organización seguida o las modificaciones no normalizadas.

Este proceso de normalización requerirá un tiempo de adaptación, pero sin duda permitirá una mejor gestión de la información en el futuro. En este sentido, Angás y Serreta [234] nos indican que los procesos de adaptación de las nuevas tecnologías son lentos y requiere que los intervinientes se vayan adaptando a estas nuevas formas de trabajo.

“en cualquier cambio que se produzca en las nuevas reglas que gestionan una mutación, prácticamente nunca es posible lograr una ruptura total. Resulta necesario reproducir una documentación igual que la anterior, integrando, eso sí, pequeños avances y modos de representar el patrimonio que con el tiempo puedan cobrar fuerza y finalmente constituir un verdadero cambio”.

En cualquiera de los casos, en la documentación del patrimonio arquitectónico o arqueológico sigue habiendo fases que son insustituibles por las nuevas tecnologías.

cación Superior para la enseñanza de materias tecnológicas basada en normas y aplicada a los estudios de Grado en ingenierías de la rama industrial.

234 ANGÁS PAJAS, J A; SERRETA OLIVÁN, A.(2012) Métodos, técnicas y estándares para la documentación geométrica del patrimonio cultural. *Virtual Archaeology Review*, 2012, vol. 3, no 5, p. 38-42.

Así, la representación de un edificio histórico o un yacimiento deben ir siempre precedida de un conocimiento integral del mismo, puesto que el dibujo de arquitectura o de arqueología se basa en una interpretación de la realidad construida. Este proceso interpretativo, requiere de un análisis geométrico y constructivo, convirtiéndose en un auténtico proceso de investigación [235]. De hecho, la realización de un croquis a mano alzada constituye una parte importantísima en el proceso de pensamiento e interpretación constructiva del edificio. Poder observar, analizar o incluso tocar los elementos en el propio edificio es un hecho que no puede ser sustituido por las mejores imágenes sobre una pantalla.

No debemos olvidar que el estudio, conservación y difusión del patrimonio requiere algo más que su reproducción exacta, mediante imágenes o modelos tridimensionales. Como en cualquier otra investigación, es necesario ofrecer una lectura técnica que facilite la identificación de sus elementos significativos que ayude a su comprensión. En este sentido, es necesario advertir que los levantamientos realizados con escáner laser, con fotogrametría o con cualquier otra técnica de medición no constituyen un fin en sí mismo, sino que son el soporte donde plasmar los distintos análisis que deben realizarse sobre el objeto de estudio. Los profesionales o investigadores deben ser conocedores de estas técnicas de registro y representación gráfica para, de este modo, poder plasmar sus estudios, siendo además una herramienta de interrelación de datos y de transmisión de conocimiento.

Las características en un documento gráfico varían mucho según la utilización para la que se efectúa el levantamiento. De igual modo, la escala de trabajo condiciona el detalle mínimo a representar y por tanto los objetos representados.

Sin lugar a dudas, la incorporación de nuevos sistemas informáticos de gestión gráfica están cambiando los paradigmas en la documentación del patrimonio. Los planos en 2D de plantas, alzados y secciones se están sustituyendo por otros modos de representación, nubes de puntos densas o mallas texturizadas en 3D, que permiten una mejor visualización y comprensión del bien patrimonial.

Consideramos que las técnicas 3D de captura constituyen, indiscutiblemente, el mejor modo el registro de datos, pero no son, necesariamente, la alternativa a las técnicas de representación y comunicación 2D, sino que deben ser complementarias. La combinación de ambas lecturas, volumétrica y bidimensional constituye el medio más eficaz para comprensión y difusión del conocimiento.

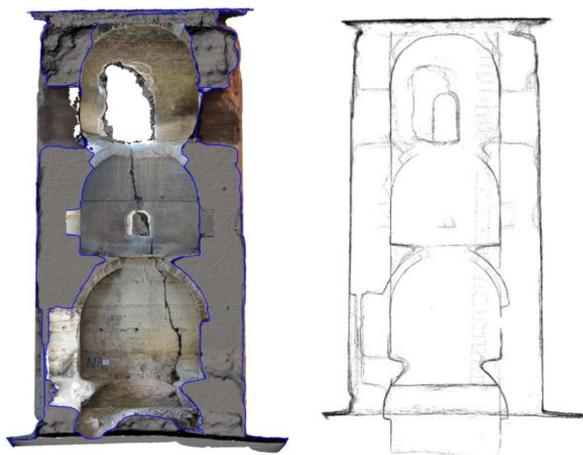
En esta tesis se proponen diferentes sistemas de representación 2D y 3D de acuerdo a las necesidades de documentación y análisis:

La documentación gráfica bidimensional permite el análisis y comprensión estructuras de forma individualizada y simplificada. La representación bidimensional deberá realizarse en base a imágenes rectificadas, o mejor, mediante la obtención de ortoimágenes a partir del modelo general en 3D. Este tipo de imágenes son comúnmente utilizadas para el análisis arqueológico

235 ORTEGA VIDAL, J, MARTINEZ DIAZ, Á., & MUÑOZ DE PABLO, M. J. (2011). El dibujo y las vidas de los edificios. Revista EGA

de paramentos [236] o como documentos previos en los proyectos de investigación o intervención.

La reproducción bidimensional del espacio tridimensional nos obliga a seleccionar que planos son necesarios para la comprensión del objeto de estudio [237]. La determinación de las formas reales a partir de secciones horizontales o verticales al modelo tridimensional obliga a realizar una visualización ortogonal al plano de sección.



Documentación gráfica bidimensional a partir de la ortofotogrametría del modelo 3D seccionado. Dibujo y ortofotogrametría de la torre de Romilla. (J.A.Benavides)

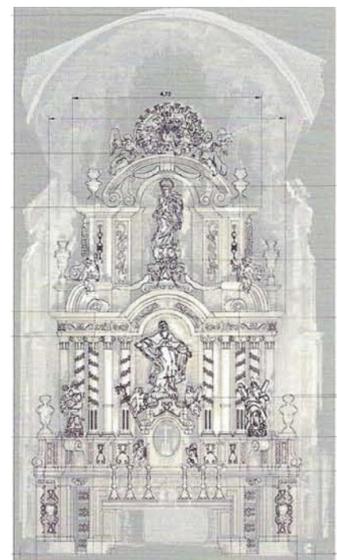
Este tipo de documentación, fácilmente compatible mediante archivos tipo: JPG, TIFF, DWG-2D o PDF, nos permiten analizar objetivamente el estado actual del

236 PÉREZ GARCÍA, J. L., MOZAS CALVACHE, A. T., BARBA COLMENERO, V., & FEMÁNDEZ ORDÓÑEZ, A. (2009). Fotogrametría de bajo coste para estudios arqueológicos de la arquitectura: aplicación a la muralla este de la fortaleza de la mota. Alcalá la Real (Jaén). *Mapping: Map and Sig consulting*, (138), 6-12.

237 DOMINGUEZ I., VILLAVERDE, V., LOPEZ, E., LERMA, J. L., & CABRELLES M. (2013). Reflexiones sobre las técnicas de documentación digital del arte rupestre: la restitución bidimensional (2D) versus la tridimensional

bien, así como comparar de forma simultánea documentos actuales y antiguos (normalmente planos en papel digitalizados), siendo además fácilmente transferidos y almacenados.

La complejidad tridimensional de algunas estructuras hace que deban ser estudiadas de forma simplificada y estructurada a partir de documentos bidimensionales, preferiblemente sobre ortoimágenes escaladas.



Ortoimagen del retablo de la iglesia de Sant Sever [238].

Documentación gráfica tridimensional.

La capacidad de representar y analizar yacimientos y edificios históricos a través de modelos 3D permite un

(3D). In *Cuadernos de arte rupestre* (Vol. 6, pp. 21-32). Dirección General de Bienes Culturales de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia.

238 MESA, M., REGOT, J. M., NÚÑEZ M. A., & BUILL F. (2009). Métodos y procesos para el levantamiento de reconstrucción tridimensional gráfica de elementos del patrimonio cultural. La iglesia de Sant Sever de Barcelona. *EGA: revista de expresión gráfica arquitectónica*, (14), 82-89.

mejor registro y gestión del Patrimonio Histórico, convirtiéndose en la herramienta ideal en el proceso de documentación y diseño.

La multiplicidad de planos necesarios para definir por completo un edificio o yacimiento, hace que se pierda el contexto general, siendo preferible en estas ocasiones, realizar una documentación tridimensional directa que supla las deficiencias de una falta de visión general de los modelos bidimensionales. Por tanto, la propuesta no consiste en la obtención de vistas 2D en perspectiva del modelo 3D, sino en un verdadero registro tridimensional en base al modelo digital previamente obtenido, permitiendo que los objetos de estudio pueda ser evaluados en su conjunto.

La necesidad de un modo de registro tridimensional que se adapte al método de excavación arqueológica (que obliga a la destrucción del objeto de análisis) exige un tipo de representación tridimensional que recoja la complejidad espacial de los estratos y artefactos [239], aun cuando este haya desaparecido.

Por el contrario, la complejidad de formas y deformaciones que presentan la arquitectura histórica y los yacimientos arqueológicos hacen que la documentación directa sea una tarea complicada incluso sobre las aplicaciones más sofisticadas. En algunas ocasiones, como en el caso de formas escultóricas o estructuras erosionadas, sin formas definidas, la vectorización arbitraria

239 CABALLERO ZOREDA, L. (2006). El dibujo arqueológico1.

240 MOLERO, B., BARRERA, J., & CABRERA, E. (2013). Capiteles sevillanos. Técnicas avanzadas para su documentación gráfica. *Virtual Archaeology Review*, 4(8), 117-124.

BENAVIDES LOPEZ, J. A., ESQUIVEL JIMENEZ, F., & ESQUIVEL GUERRERO, J. A. (2015). Nuevas aportaciones

de objetos es sustituida por la realización de secciones técnicas equidistantes superpuestas sobre ortoimágenes a escala, describiendo con mayor precisión el relieve del modelo [240].



Representación mediante curvas de nivel con equidistancia 5 cm. del relieve, deformaciones o erosiones del alzado Este de la torre de Romilla. (J.A.Benavides)

La mayor parte de los trabajos de investigación relacionados con el registro tridimensional, tratan de comparar las precisiones obtenidas mediante diferentes tecnologías, fundamentalmente la comparación entre escáner laser y fotogrametría multimagen [241], pero en

al estudio métrico y geométrico del dolmen de Viera (Antequera, Andalucía). *Menga: Revista de prehistoria de Andalucía*, (6), 201-208.

241 - BALTSAVIAS, E. P. (1999). A comparison between photogrammetry and laser scanning. *ISPRS Journal of photogrammetry and Remote Sensing*, 54(2), 83-94.
BIOSCA TARONGER, J. M., NAVARRO TARIN, S., & LERMA GARCIA, J. L. (2007). Modelado tridimensional

contadas ocasiones se trata sobre que documentación gráfica es la más adecuada a partir de este tipo de registro [242]

En el apartado 3.5.2-*Digitalización tridimensional sobre modelos 3d*, se expone el método de representación directo, indicando sus ventajas e inconvenientes. Mientras los modelos 3D proporcionan una información más detallada sobre las formas, dimensiones y localización de las estructuras y su entorno, los documentos 2D son necesarios para una mejor estructuración de la información, facilitando su interpretación y comunicación entre los diferentes agentes que forman parte de la investigación.

Pero independientemente del método de registro utilizado, este tipo de representaciones, ortofotografías 2D o modelos tridimensionales texturizados, nos van a permitir una documentación completa, permanente y verificable, incluso después de realizada la excavación o intervención.

En conclusión, las técnicas de documentación del patrimonio mediante modelos tridimensionales 3D son,

sin duda, la solución más efectiva y precisa para los trabajos de investigación y difusión y permiten, a su vez, la obtención de los documentos bidimensionales que sean necesarios. La complejidad del manejo y tratamiento estos modelos constituyen un obstáculo para la libre disposición de la información. Entendemos que para una mejor gestión de los recursos, la documentación realizada con dinero público debe estar disponible, de forma obligatoria, proponiendo, como mínimo y por ahora, la utilización de PDF-3D como la herramienta más versátil de comunicación.

A continuación exponemos los diferentes modos de registro gráfico de acuerdo a las necesidades de documentación y a la disponibilidad de equipos y conocimientos gráficos de los investigadores o profesionales implicados.

3.5.1 DIGITALIZACIÓN SOBRE ORTOFOTOGRAFÍAS 2D

de una bóveda barroca mediante la combinación de láser escáner y fotogrametría. *7 Setmana Geomàtica*, 20-23.

RODRIGUEZ NAVARRO, P. (2012). La fotogrametría digital automatizada frente a los sistemas basados en sensores 3d activos. *EGA. Revista de expresión gráfica arquitectónica*, 17(20), 100-111.

CABRELLES, M., & LERMA GARCÍA, J. L. (2013). Documentación 3D de abrigos rupestres a partir de láser escáner y de procesos fotogramétricos automatizados. *Virtual Archaeology Review*, 4(8), 64-68.

242 BENAVIDES LOPEZ, J. A., BARRERA VERA, J. A., & MARTÍN CIVANTOS, J. M. (2012). Documentación gráfica del patrimonio: Un paso adelante. In *XI Congreso Internacional de Expresión Gráfica aplicada a la*

Edificación, Valencia. 29, 30 de noviembre y 1 de diciembre de 2012 (pp. 590-594).

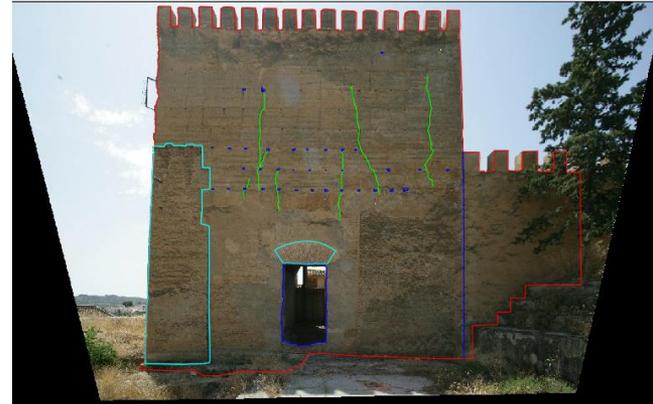
DOMINGUEZ I., VILLAVERDE, V., LOPEZ, E., LERMA, J. L., & CABRELLES M. (2013). Reflexiones sobre las técnicas de documentación digital del arte rupestre: la restitución bidimensional (2D) versus la tridimensional (3D). In *Cuadernos de arte rupestre* (Vol. 6, pp. 21-32). Dirección General de Bienes Culturales de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia.

LILLO GINER, S; RODRÍGUEZ-NAVARRO, P; GIL PIQUERAS, T; SOLER ESTRELA, A. (2016) Avances en el registro automático y gestión de las nubes de puntos/ Leica Cyclone 9.1. Libro DIBUJAR, CONSTRUIR, SONAR Investigaciones en torno a la expresión gráfica aplicada a la edificación

Las ortofotografías son imágenes *raster* (imágenes en mapa de bits formadas por un conjunto de puntos, denominados píxeles que contienen información de color). Estas imágenes se pueden obtener bien mediante rectificación de una sola imagen (deformación de la imagen para adaptarse a un plano de referencia) o mediante la proyección paralela de diferentes imágenes sobre un modelo tridimensional de mallas previamente generado.

Las ortofotografías aportan gran cantidad de información de tipo cualitativo (tipo de material, estado de conservación, patologías, proporciones, etc...), lo que permite ampliar la diversidad de lecturas posibles de un mismo documento en función de la finalidad de la investigación. Por tanto, es labor de los especialistas analizar e interpretar la información que la propia imagen nos suministra. Mediante la digitalización, los especialistas plasman en un documento gráfico mediante dibujo vectorial a escala, la información analizada e interpretada que suministra la imagen (geometría, materiales, patología, etc.)

La combinación de ambas representaciones –imagen y dibujo– constituye el medio más eficaz de conocimiento del patrimonio. Son el instrumento técnico, descriptivo y analítico, que facilita la visualización, estudio e interpretación científica del objeto de estudio y de los procesos de alteración y degradación que le afectan, son además, herramienta fundamental para la transmisión del conocimiento.



Interpretación y dibujo sobre la imagen rectificada del alzado norte de la torre puerta de la alcazaba de Guadix.(J.A.Benavides)

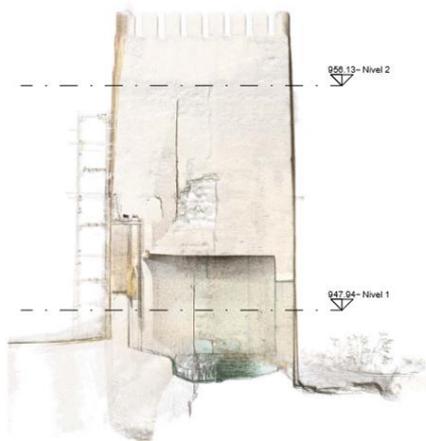
Las características volumétricas de la arquitectura hace que en la mayoría de las ocasiones el método de rectificación no pueda ser utilizado, siendo necesario obtener las ortoimágenes a partir del texturizado del modelo 3D de malla.

La mejora gráfica que aportan los modelos tridimensionales los convierte en una excelente herramienta para la comprensión y difusión del patrimonio histórico. La facilidad de obtención automática de vistas u ortoimágenes proyectadas sobre planos de planta, alzado o sección, enriquece enormemente la capacidad de análisis de los edificios o restos arqueológicos.



Ortoimagen realizada a partir del texturizado del modelo 3D de malla de la alcazaba de Guadix (J.A.Benavides).

La obtención de ortoimágenes a partir de nubes de puntos no aporta gran calidad gráfica en cuanto a textura, pero resultan muy útiles para el análisis volumétrico y estructural del elemento de estudio. La cualidad de transparencia de las nubes de puntos hace que se observe sobre un mismo plano elementos pertenecientes a otros cuerpos o volúmenes.



Ortoimagen del alzado Este de la torre Puerta de la alcazaba de Guadix mediante la proyección de modelo de nube de puntos. La distancia entre puntos confiere al modelo cierta transparencia lo que permite observar los diferentes volúmenes proyectados sobre un único plano. (Alzado, bóveda interior, apertura de huecos, etc.) (J.A.Benavides)

En general, se recomienda que las ortofotografías se generen en formato imagen JPG ya que ofrece una buena resolución y un tamaño de fichero admisible. La precisión es un requisito importante en la documentación del patrimonio y por tanto, habrá que tener en cuenta la calidad gráfica de la imagen en relación a la escala de los elementos a representar. En general, la tolerancia gráfica de una representación viene motivada por la agudeza visual de los humanos (0.2 mm)

por el denominador de escala. La precisión y detalle del dibujo vectorial sobre programas CAD a partir de las imágenes digitales viene determinado por el tamaño del pixel en unidades reales (variando desde algún milímetro hasta algún centímetro)

La facilidad de producir ortofotografías (proyecciones paralelas) a partir del modelo digital de superficie facilita enormemente las tareas de interpretación y digitalización gráfica siendo además un testigo permanente de la información registrada.



Imagen del detalle obtenido mediante ortofotografía del modelo 3D del castillo de Piñar. Resolución del pixel 3mm. (J.A.Benavides)

La completa información geométrica y cualitativa que nos aportan ortoimágenes hace que, en algunas ocasiones, nos planteemos la necesidad de un registro completo de todos los elementos que lo forman. Esta representación vendrá motivada por las necesidades del objeto de estudio. Entendemos que en los casos de intervención o de peligro inminente es necesario un registro lo más completo y exhaustivo, en otros casos, como investigación o conservación, solo será necesario recoger la información necesaria para el estudio (geometrías y fases o tipologías constructivas), quedando recogido en la imagen la información no representada.



Digitalización de fases constructivas y detallada “pieza a pieza” del lateral oeste de la torre 6 del castillo de Piñar.(J.A.Benavides)

3.5.2 DIGITALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL SOBRE MODELOS 3D

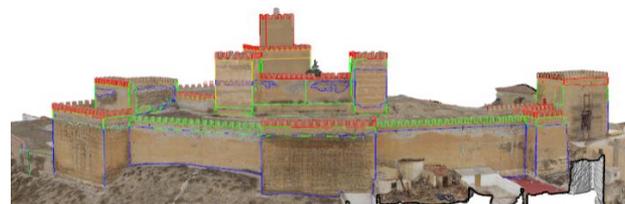
La digitalización vectorial directa sobre modelos digitales tridimensionales difiere respecto de las digitalizaciones 2D sobre ortoimágenes. Esta operación, aparentemente sencilla, resulta bastante compleja en la realidad, pues la irregularidad de las superficies hace que el punto de vista desde el que se digitaliza sobre el modelo condicione la exactitud del posicionamiento, necesitando constantes cambios de puntos de vista. Al igual que le ocurre a la digitalización vectorial de pares estereoscópicos, se requiere destreza y práctica por parte del operador.



Digitalización tridimensional alámbrica de una misma torre, desde dos puntos de vista distintos. El punto de vista de la primera imagen hace que la digitalización parezca correcta. Con el giro del modelo se observa la falta de precisión. (J.A.Benavides)

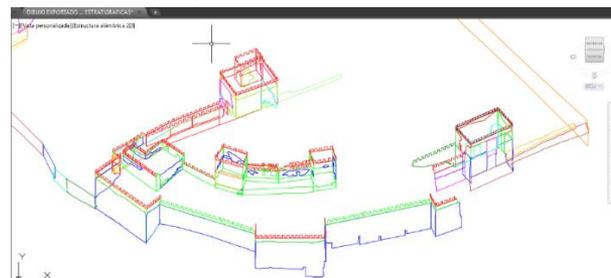
En la actualidad empiezan a existir herramientas que permiten estas digitalizaciones de una forma más precisa. Este tipo de digitalizaciones resulta muy atractiva y útil para el fin previsto, pero la complejidad de las formas y su posado tridimensional hace que solo puedan ser gestionadas por expertos operadores. La versatilidad de los documentos 2D hace que en la mayoría

de los casos renunciemos al modelado alámbrico tridimensional y nos inclinemos por la digitalización 2D.



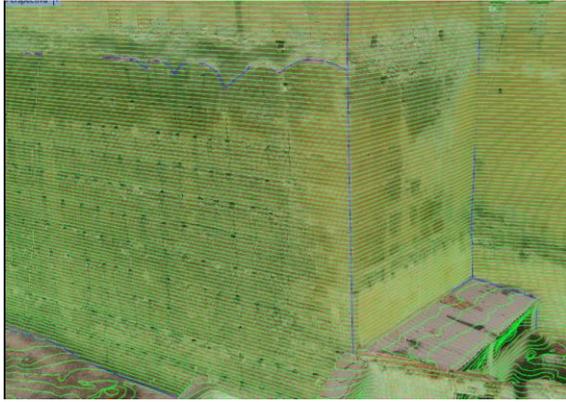
Dibujo vectorial tridimensional sobre modelos tridimensionales. El dibujo de estas entidades se ha realizado sobre la aplicación Rhinoceros 5.0 mediante la generación de planos de trabajo coincidentes con los planos de la estructuras. En realidad no es una representación 3D exacta pues se han utilizado planos de referencia no siempre coincidentes con la complejidad de formas de la realidad. (J.A.Benavides)

Por otro lado, la sola visualización de las estructuras alámbricas dificulta la interpretación de las formas, lo que obliga a colocarlas sobre modelos 3D con textura, que, de igual forma, dificulta la visualización completa de estas entidades al quedar ocultas por las irregularidades de las propias estructuras.



La visión transparente de la vectorización alámbrica complica la interpretación de las formas, independientemente del punto de vista. (J.A.Benavides)

La dificultad en la digitalización tridimensional hace que en muchos casos se recurra a otro tipo de documentos técnicos formados por secciones a diferente equidistancia, o a la digitalización de los elementos de interés a partir de la definición de planos de trabajo superpuestos a los paramentos.



Modelo tridimensional con secciones a 10 cm. Vista del modelo dibujado en 3D realizado sobre Rhinoceros 5.0. (J.A.Benavides)

3.5.3 MODELIZADO SOLIDO TRIDIMENSIONAL: BIM APLICADO A LA DOCUMENTACIÓN DEL PATRIMONIO

La generación de modelos tridimensionales del Patrimonio cultural se ha convertido un tema de gran interés en los últimos años debido al uso extendido del escaneo láser y la fotogrametría multimagén. La capacidad de representar y analizar yacimientos y edificios históricos a través de modelos 3D permite un mejor registro y gestión del Patrimonio Histórico, convirtiéndose en la herramienta ideal en el proceso de documentación y diseño.

La falta de materialidad de los modelos de malla queda solucionado mediante un modelado sólido adaptativo con herramientas BIM.

El BIM (*Building Information Modeling*) es un nuevo sistema de diseño tridimensional asistido por ordenador que se basa en la construcción paramétrica de elementos constructivos (estructuras, muros, carpintería, etc) o incluso terrenos y que por combinación permiten crear un edificio completo dentro de un ambiente virtual.

El BIM es una técnica de modelado sólido en tres dimensiones basado en elementos constructivos capaces de integrar información de diverso tipo (características de los materiales, imágenes, datos administrativos, intervenciones, suministradores, etc. etc.) y que lo convierten en un gran contenedor y organizador de la información, o lo que es lo mismo un SIG [243] o base de datos gráfica tridimensional. Su campo de aplicación original ha sido el diseño y gestión de proyectos de nueva planta de edificación o ingeniería civil ya que la modelización de edificios históricos presenta considerables complicaciones [244] debido a la naturaleza irregular y deformada que estos presentan. Diversos trabajos de investigación se están llevando a cabo con la intención de facilitar la integración de esta técnica en la modelización de los edificios históricos [245]

Otras investigaciones han puesto de manifiesto las capacidades y limitaciones del BIM en la resolución de problemas específicos de los contextos arqueológicos [246] [247], como son: la descripción de las estructuras antiguas caracterizada por geometrías irregulares; la representación sincrónica y diacrónica o la consulta de las diferentes fases cronológicas. Las aplicaciones BIM pueden ser una interesante solución a los principales

243 SIG (acrónimo) Sistema de Información Geográfica (GIS en inglés): es un conjunto de herramientas que integra y relaciona diversos componentes que permiten la organización, almacenamiento, manipulación, análisis y modelización de grandes cantidades de datos procedentes del mundo real y que están vinculados a una referencia espacial

244 MARTÍN TALAVERANO, R. (2014). Documentación gráfica de edificios históricos: principios, aplicaciones y perspectivas. *Arqueología de la Arquitectura*, (11), 011.

245 DORE, C., & MURPHY, M. (2012, September). Integration of Historic Building Information Modeling

(HBIM) and 3D GIS for recording and managing cultural heritage sites. In *Virtual Systems and Multimedia (VSMM), 2012 18th International Conference on* (pp. 369-376). IEEE.

246 ANGULO FORNOS, R. (2012). Construcción de la base gráfica para un sistema de información y gestión del patrimonio arquitectónico: Casa de Hylas. *Arqueología de la Arquitectura*, (9), 11-25.

247 SCIANNA, A., GRISTINA, S., & PALIAGA, S. (2014). Experimental BIM applications in archaeology: a workflow. In *Euro-Mediterranean Conference* (pp. 490-498). Springer International Publishing.

problemas en este campo ya que se necesita un registro y visualización tridimensional conjuntamente con una identificación de datos asociados al objeto y relacionados con el resto del yacimiento o edificio, permitiendo su interacción (por ejemplo: filtrado selectivo de objetos correspondientes a un determinado periodo y con una características específicas).

La vinculación de bases de datos a las entidades gráficas permite la realización de consultas en ambas direcciones, de forma que se pueden realizar búsquedas de registros en la base de datos a partir de la selección de entidades gráficas o viceversa, permitiendo catalogar y documentar cualquier tipo de información, ya sea gráfica o alfanumérica, a partir de estos modelos, razón por lo que también se les denomina “*modelos semánticos*”

La representación de todas las irregularidades que presentan las estructuras en la realidad (deformaciones, desprendimientos, grietas, etc.) mediante modelos tridimensionales sólidos no han sido solucionada en la actualidad, debiéndose sustituir por modelos paramétricos ideales que se adapten lo más posible a sus formas reales. En este sentido hay que tener presente que la sustitución del modelo real por otro formado por objetos paramétricos que tiene como finalidad un mejor conocimiento del Bien y organización de la información, más que un dibujo preciso de sus formas reales. Por tanto, el primer paso consiste en integrar sobre estas plataformas los datos capturados del levantamiento, fundamentalmente nubes de puntos procedentes de escaneados laser o fotogrametría multimagén. También es factible incluir archivos de dibujo 2D procedentes de CAD o fotografías rectificadas, siendo

determinante la correcta georreferenciación de estos documentos para una correcta integración con otras plataformas u organismos de gestión.

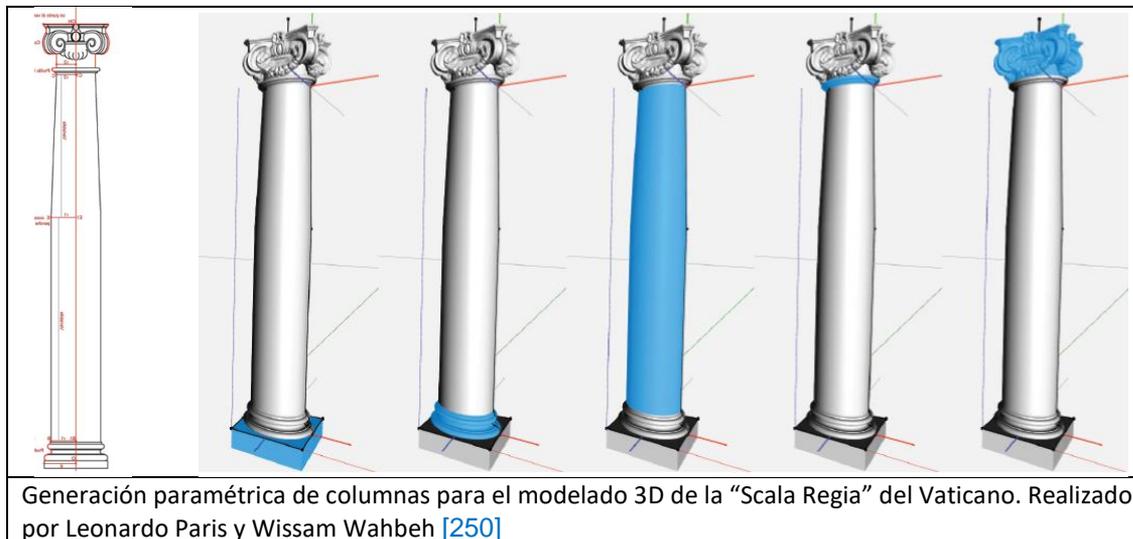
Herramientas como el CityGML permiten integrar objetos en relación con su geometría, topología, propiedades semánticas y apariencia [248], convirtiéndose en una plataforma de bastante utilidad para la gestión del patrimonio.

Un segundo paso, consiste en modelar las superficies descomponiendo el modelo en diferentes elementos (constructivos). Para ello, los nuevos sistemas BIM específicos para edificios históricos (HBIM) utilizan bibliotecas de elementos constructivos históricos que se definen paramétricamente [249], utilizando como soporte las nubes de puntos previamente generadas, de forma similar al modelado de objetos de ingeniería inversa. Para la creación de estas bibliotecas de objetos paramétricos se han utilizado incluso tratados del siglo XVIII o los libros de arquitectura de Vitrubio.

Para la creación y/o modificación de los objetos paramétricos se utiliza el lenguaje GDL (lenguaje descriptivo geométrico), ya que presenta gran compatibilidad con otros sistemas o plataformas.

248 GRÖGER, G., & PLÜMER, L. (2012). CityGML–Interoperable semantic 3D city models. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 71, 12-33.

249 MURPHY, M., MCGOVERN, E., & PAVIA, S. (2009). Historic building information modelling (HBIM). *Structural Survey*, 27(4), 311-327.



La complejidad de situar la posición exacta de un objeto de la biblioteca HBIM sobre la nube de puntos 3D hace que la solución propuesta pase por simplificar el modelo en base a secciones de espesor definido o a ortofotografías en 2D para posteriormente editarlos y ajustarlos sobre el modelo 3D.

La disponibilidad de los modelos sólidos tridimensionales posibilita la generación automática de planos a escala a partir de las distintas vistas, secciones y proyecciones de acuerdo a los criterios normalizados para la representación gráfica de la arquitectura, consistentes en la proyección de los elementos sobre un plano mediante líneas con diferente traza o grosor o incluso mediante tramado normalizado o sombreado de color.

La facilidad de manejo de esta herramienta, unida a la posibilidad de trabajo colaborativo, facilita las relaciones de transversalidad entre los diferentes agentes im-

plicados en el conocimiento integral del objeto de estudio y no solo desde el punto de vista de la investigación o intervención, sino también como herramienta importante para su gestión.

3.5.4 RECONSTRUCCIONES VIRTUALES

Las reconstrucciones virtuales se desarrollan como una herramienta eficaz que permite recrear un Bien cultural ayudando significativamente a su interpretación. Su evolución ha ido asociada a la mejora los sistemas de registro y representación digital. En palabras de Caballero Zoreda, *La labor de reconstrucción "virtual" supone en sí misma una labor de análisis que permite plantear problemas y ayuda a resolverlos con la práctica del dibujo* [251]

Sin lugar a dudas, este método de reconstrucción constituye un medio muy intuitivo para la divulgación del patrimonio, tanto del existente como del desaparecido

²⁵⁰ PARIS, L., & WAHBEH, W. (2016). R*o e rappresentazione delle geometrie parametriche per l'HBIM. *DISEGNARECON*, 9(16), 12-1.

²⁵¹ CABALLERO ZOREDA, L. (2006). El dibujo arqueológico1.

o alterado. Estas reconstrucciones virtuales deben generarse para representar un contexto histórico concreto, en base a una serie de hipótesis científicas bien contrastadas. Por el contrario, son muchas las ocasiones donde se dejan llevar por el virtuosismo gráfico para producir invenciones, muy impactantes visualmente, pero carentes del más mínimo rigor científico. En este sentido, son numerosos los profesionales que reclaman el establecimiento de unas normas que regulen este tipo de producciones.

Lucia Gómez y Victoria Quirosa realizan un análisis de la evolución de los sistemas de representación de modelos de recreación virtual para la interpretación y difusión del patrimonio poniendo de manifiesto el poco rigor científico de muchas de estas representaciones y exigiendo una normalización que regule este tipo de producciones [252].

Todo este conjunto de tecnologías abre nuevas posibilidades para conservar, proteger, representar, investigar, transferir, difundir y sensibilizar sobre el patrimonio cultural, creando modelos útiles tanto para los investigadores como para la ciudadanía en general.



Reconstrucción virtual de la torre de Romilla. Realizada por el alumno German García a partir de la documentación gráfica de la torre realizada por J.A.Benavides y el análisis histórico constructivo realizado por Antonio Almagro [253].

²⁵² GOMEZ ROBLES, L; QUIROSA GARCÍA, V. (2015) Nuevas tecnologías para difundir el Patrimonio Cultural: las reconstrucciones virtuales en España. *e-rph-Revista electrónica de Patrimonio Histórico*, no 4, p. 150-173.

²⁵³ ALMAGRO GORBEA, A. (1991). La torre de Romilla. Una torre nazarí en la Vega de Granada. *Al-Qantara*, 12(1), 225.

4 CAPITULO IV. EXPERIMENTACIÓN

4.1 EXPERIMENTACIÓN EN RECTIFICACIÓN FOTOGRAMÉTRICA Y CALIBRACIÓN DE LALENTE

Como ya indicamos, la rectificación consiste en una transformación proyectiva de una imagen que la convierte en otra similar pero que cumple determinadas relaciones geométricas. La aplicación de la rectificación fotogramétrica de una sola imagen solo es factible cuando se trabaja con elementos planos, fundamentalmente fachadas o suelos. Las experimentaciones llevadas a cabo en este campo nos han permitido demostrar la importancia de la calibración previa de la lente. Rectificaciones de imágenes que a simple vista parecen geoméricamente rigurosas han sido examinadas con detenimiento a partir de la medición de puntos de control topográfico, detectando importantes irregularidades en el caso de utilizar cámaras convencionales sin calibrar.



Las características geométricas de las estructuras de la alcazaba (planos verticales) han permitido realizar rectificaciones de imágenes de los diferentes alzados. (J.A.Benavides)

Para muchos proyectos, los resultados de rectificación de imágenes tomadas con una cámara no calibrada proporcionarán resultados adecuados, especialmente si la longitud focal no es demasiado corta y/o si sólo se utiliza la parte central de la imagen, pero hay situaciones en las que la distorsión causada por la lente, fundamentalmente gran angular, producirá imágenes distorsionadas. Para eliminar estos errores se hace necesario realizar un proceso previo de calibración *cámara-lente*.

Para la calibración de lentes de cámaras convencionales hemos utilizado el algoritmo desarrollado por George Karras y Dionyssia Mavrommati [254] y que consisten en determinar los parámetros de distorsión a partir de la rectificación de una imagen de cuadrículas de magnitudes previamente conocidas. Esos parámetros son guardados y susceptibles de ser aplicados en cualquier otra imagen capturada con la misma lente.



Digitalización de los puntos de cuadrícula de calibración con indicación de sus valores digitales y reales. La variación entre el valor digitalizado y el valor numérico exacto determina la distorsión (radial) sufrida por cada uno de los puntos. (J.A.Benavides)

La rectificación de imágenes capturadas de la realidad exige que las fotografías se capturen en las mismas condiciones que en el proceso de calibrado, esto es:

254 KARRAS, G. E., & MAVROMMATI, D. (2002). Simple calibration techniques for non-metric cameras. *International archives of photogrammetry remote sensing and spatial information sciences*, 34(5/C7), 39-46.

- Distancia focal: debe estar situada y bloqueada en la misma posición, normalmente en la focal más pequeña, por ser esta la que más se utiliza.
- Enfoque: si bien es recomendable fijar el foco manualmente en la misma posición para evitar que la cámara lo modifique mediante el enfoque automático, las experimentaciones realizadas, no justifican esta propuesta. Fijar el foco en infinito provoca en la mayoría de los casos imágenes desenfocadas que no satisfacen las necesidades de documentación.
- Abertura: tiene un efecto limitado en la geometría de la lente, si bien, se recomienda utilizar aberturas pequeñas ya que aumenta la nitidez del foco y tiende a usar la parte central de la lente que normalmente tiene menos distorsión que en los extremos.

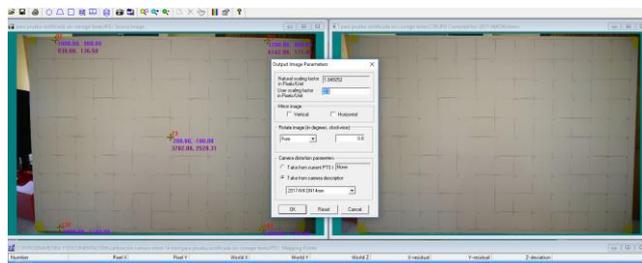
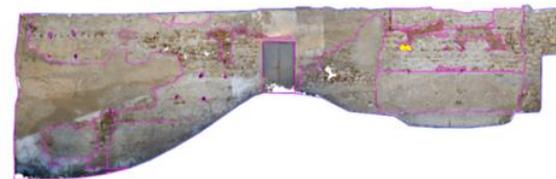


Imagen con la comprobación geométrica de la rectificación. Trasladada la imagen a un programa de CAD se observa la bondad del proceso de calibrado (derecha). (J.A.Benavides)



Ortofotografía con el detalle del aparejo de mampostería y ladrillo en calle Amezcua (arriba) y esquina norte de calle Muralla (abajo). Alcazaba de Guadix. (J.A.Benavides)

Realizada la experimentación con una cámara Nikon D-800 con objetivo Nikkor 14 mm se han comparado los resultados entre imágenes calibradas y no calibradas, detectando una deformación radial de 26 cm en longitudes de 50 metros. Magnitud nada despreciable en un proceso de documentación geométrica.

En los casos en lo que el elemento a documentar es de grandes dimensiones o existen obstáculos que impiden la captura en una sola imagen, es preferible generar el modelo tridimensional y obtener la ortofotografía del conjunto, evitando de este modo el excesivo número de puntos de apoyo topográfico (4 puntos mínimo por imagen).

La buena resolución geométrica y radiométrica de la imagen resultante permite un registro muy preciso de los materiales o fases de ejecución.

4.2 EXPERIMENTACIÓN EN MODELIZADO TRIDIMENSIONAL MEDIANTE SFM

La potencialidad, facilidad y bajo coste que aportan las herramientas de modelado mediante SFM están transformando los protocolos de actuación en la documentación del patrimonio. En esta experimentación hemos tratado de determinar los parámetros óptimos de procesamiento de imágenes con el fin de generar modelos tridimensionales de nubes de puntos que dispongan de suficiente resolución geométrica en un tiempo que podamos considerar “razonable”.

La captura masiva de imágenes digitales (centenas o miles) necesaria para el desarrollo de estos procesos hace que debamos analizar y cuantificar tanto el volumen de datos obtenido como el tiempo de procesamiento.

Para la experimentación se han utilizado tres grupos de imágenes de la misma zona capturadas con cámara FC-200 (resolución 14 Mgpix), correspondientes al vuelo de la alcazaba:

- Primer grupo: formado por 6 imágenes.
- Segundo grupo: formado por 12 imágenes.
- Tercer grupo: formado por 24 imágenes

En la siguiente tabla aparecen las características de las imágenes capturadas.

Frame 1	
Path	F:/0 TESIS/0000 DOC ALCAZABA/0000-PLANOS 20...
Resolution	4384x3288
Date & time	2015:10:24 11:18:58
Make	DJI
Model	PHANTOM VISION FC200
Focal length	5
F-stop	F/2.8
ISO	100
Shutter	1/620
35mm focal	28

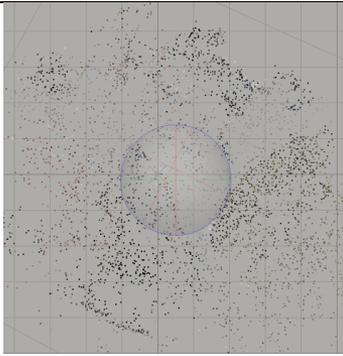
Características de la imagen. resolución 14.414.592 pixeles

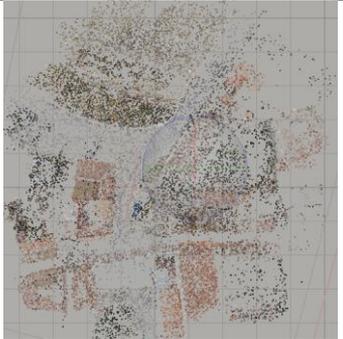
4.2.1 ANÁLISIS COMPARADO EN LA DETECCIÓN DE PUNTOS “SHIF” y PUNTOS DE AJUSTE BUNDER DE ACUERDO AL NÚMERO DE IMÁGENES Y AL NIVEL DE AJUSTE DE PROCESAMIENTO

En los siguientes cuadros se muestra el análisis de puntos detectados por imagen de acuerdo a los tres niveles de ajuste: Nivel bajo, nivel medio o nivel alto, comparando el tiempo de procesamiento de acuerdo al número de imágenes suministradas en cada uno de los grupos. De igual manera se ha computado el número total de puntos unitivos detectados (puntos SHIF) para las 12 imágenes de acuerdo a los distintos niveles de resolución.

Como conclusión de esta experimentación observamos que:

- El tiempo de procesamiento aumenta exponencialmente al número de imágenes suministradas.
- La utilización de valores máximos aumenta considerablemente el tiempo de procesamiento llegando a considerarse inviable para levantamientos con gran número de imágenes.
- Valores altos de procesamiento apenas aumenta el número de puntos unitivos detectados.

Análisis del ajuste “Bundler” para 12 imágenes de acuerdo a un nivel de lectura bajo.		Tiempo de procesamiento en función del nº imágenes.
nº puntos detectados/img.	Nº Total de puntos ajustados:	
photo 1: 3596 points photo 2: 3911 points photo 3: 3746 points photo 4: 3531 points photo 5: 3299 points photo 6: 3293 points photo 7: 3636 points photo 8: 3550 points photo 9: 3496 points photo 10: 3757 points photo 11: 3716 points photo 12: 3681 points	 <p>4815 puntos</p>	Tiempo de procesamiento para 6 imágenes es 3,08 seg Tiempo de procesamiento para 12 imágenes 8,90 seg Tiempo de procesamiento para 24 imágenes 21,18
Análisis de ajuste RESOLUCION BAJA : Puntos SHIF detectados por imagen y puntos comunes para 12 imágenes 4815. (J.A.Benavides)		

Análisis de ajuste de 12 imágenes de acuerdo a una resolución media de lectura.		Tiempo de procesamiento en función del nº imágenes.
nº puntos detectados/img.	Nº Total de puntos ajustados:	
photo 1: 15952 points photo 2: 18213 points photo 3: 20029 points photo 4: 19730 points photo 5: 20023 points photo 6: 20679 points photo 7: 19671 points photo 8: 19887 points photo 9: 19337 points photo 10: 20126 points photo 11: 19373 points photo 12: 18000 points	 <p>22148 puntos</p>	Tiempo de procesamiento para 6 imágenes es 8,29 seg Tiempo de procesamiento para 12 imágenes 27,45 seg Tiempo de procesamiento para 24 imágenes 93,41 seg.
Análisis de ajuste RESOLUCION MEDIA : Puntos SHIF detectados por imagen y puntos comunes ajustados para 12 imágenes 22148. (J.A.Benavides)		

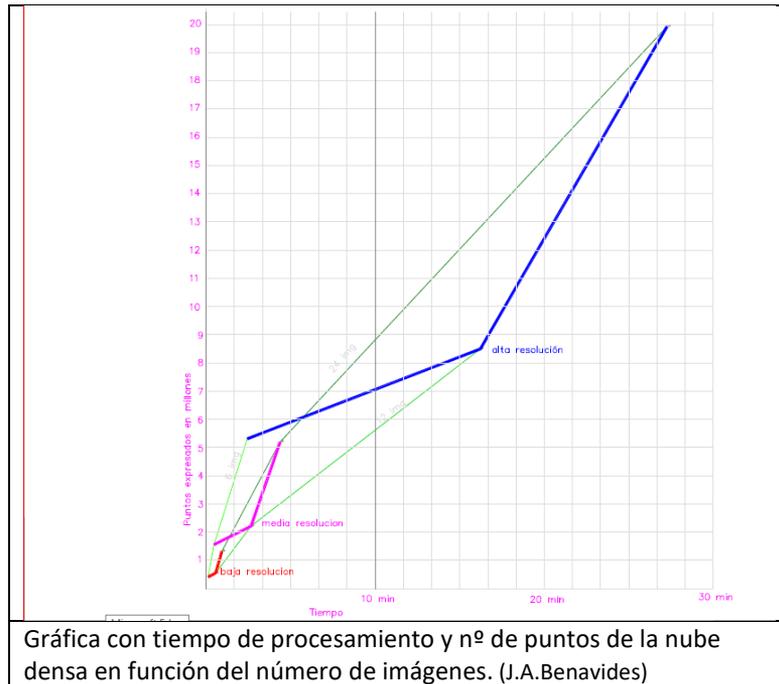
Análisis de ajuste de 12 imágenes de acuerdo a una resolución Alta de lectura.		Tiempo de procesamiento en función del nº imágenes.
nº puntos detectados/img.	Nº Total de puntos ajustados:	
photo 1: 39922 points photo 2: 39800 points photo 3: 39955 points photo 4: 39956 points photo 5: 39796 points photo 6: 39970 points photo 7: 39825 points photo 8: 39906 points photo 9: 39795 points photo 10: 39825 points photo 11: 39875 points photo 12: 39858 points	 <p>24201 puntos</p>	Tiempo de procesamiento para 6 imágenes 17,47 seg
		Tiempo de procesamiento para 12 imágenes 54,66 seg
		Tiempo de procesamiento para 24 imágenes 191,40 seg.
Análisis de ajuste RESOLUCION ALTA : Puntos SHIF detectados por imagen y puntos comunes ajustados para 12 imágenes 24201 puntos. (J.A.Benavides)		

Tras esta experimentación concluimos que el nivel de ajuste medio es el idóneo para la mejor calidad del modelo de acuerdo a los tiempos de procesamiento. Un nivel de ajuste alto aumenta solo un 9 % la densidad de los puntos de ajuste, aumentando el tiempo de procesamiento al doble. Un nivel de ajuste bajo restringe significativamente los puntos de SHIF (77% menos), lo que provoca orientaciones fallidas de algunas imágenes.

4.2.2 ANALISIS COMPARATIVO DE NUMERO DE PUNTOS Y TIEMPO DE PROCESAMIENTO PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA NUBE DE PUNTOS DENSA.

Estudio comparativo de la construcción de la Nube de Puntos Densa en función del número de imágenes a procesar: Datos obtenidos y tiempo de procesamiento	
Volumen de nube densa para 6 imágenes.	Tiempo
Resolución baja 408.626 puntos	7,63 seg
Resolución media 1.555.265 puntos	28,27 seg
Resolución alta 5.308.425 puntos	146,10 seg
Volumen de nube densa para 12 imágenes.	
Resolución baja 555.328 puntos	34,58 seg
Resolución media 2.213.447 puntos	159,93 seg
Resolución alta 8.496.683 puntos tiempo	973,00 seg
Volumen de nube densa para 24 imágenes.	
Resolución baja 1.320.207 puntos	56,28 seg
Resolución media 5.195.569 puntos	262,87 seg
Resolución alta 19.928.577 puntos	1635.43 seg





Gráfica con tiempo de procesamiento y nº de puntos de la nube densa en función del número de imágenes. (J.A.Benavides)

Tras este análisis concluimos que en función del número de imágenes y el nivel de procesamiento el tiempo y el densidad de puntos aumenta de manera exponencial.

4.3 EXPERIMENTACIÓN EN EL ANÁLISIS COMPARADO DE MODELOS GENERADOS CON ESCÁNER LASER Y FOTOGRAMETRÍA MULTIMAGEN

El objetivo de esta experimentación es realizar un análisis comparado de los modelos geométricos de la torre nazarí de Romilla [255] realizados con escáner laser y con fotogrametría multimagen, de forma que nos permita cuantificar los parámetros que condicionan cada método: precisión, complejidad, tiempo de realización y calidad final del modelo.

Para la captura de la nube de puntos se ha utilizado el escáner de tiempo de vuelo Riegl VZ400 que ofrece una alta velocidad en adquisición de datos (122.000 puntos por segundo) y alta precisión 3mm /100 m. La cámara fotográfica utilizada ha sido la cámara digital Nikon D-700, con un objetivo 20 mm de distancia focal fija, que situada en un adaptador sobre el escáner relaciona cada pixel de la imagen sobre sus correspondientes puntos del modelo que previamente han sido capturados por el escáner. El apoyo topográfico se ha realizado mediante estación total *Leica TCR 805 ultra*, que proporciona una precisión milimétrica en la captura de puntos de apoyo tanto en el exterior como en el interior de la torre.

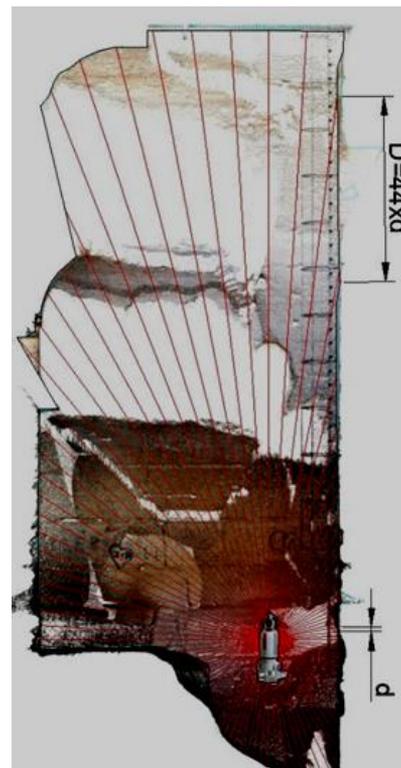


Imágenes capturadas de la torre de Romilla (J.A.Benavides). (J.A.Benavides)

255 La torre de Romilla es una edificación de tipo militar de época nazarí, situada en la vega de Granada a escasos metros de la población de Romilla, perteneciente al municipio de Chauchina.

El tiempo de trabajo de campo mediante escáner laser fue de tres horas. Este tiempo estuvo condicionado por la posición del sol en la captura fotográfica. En el exterior de la torre se realizaron cuatro escaneados esquinados para la captura de dos paramentos simultáneamente. El registro interior de la torre con el escáner laser, planteo algunos problemas debido a la estrechez interior y a la falta de accesibilidad a las plantas superiores, pudiéndose realizar sólo tres tomas, con mala geometría, una sobre el muro perimetral junto al umbral de la puerta acceso y dos más desde diferentes niveles de la escombrera que colmata parcialmente el aljibe. Esta mala geometría interior en las posiciones del escáner ha provocado:

- Mala resolución y distribución de la nube de puntos en la zona superior e intermedia de la torre. Ángulos de incidencia bastante oblicuos y a la importante variación de distancia entre las zonas inferiores y superiores, obligó a establecer resoluciones altísimas en la zona inferior (3 mm) para alcanzar una media razonable en la zona superior (35 mm)
- La existencia de restos de bóvedas en las plantas superiores provoca gran cantidad de oclusiones sobre los paramentos.
- Imágenes con diferente resolución: Al igual que le ocurre al escáner, la diferente resolución de los píxeles entre zonas bajas y altas ha provocado un inadecuado texturizado del modelo. De igual modo, el paralaje entre el eje de captura del escáner y el eje óptico de la cámara provoca importantes errores de texturizado en puntos tan cercanos [256]



Diferente distribución de la nube de puntos mediante la captura con escáner debido al ángulo de incidencia y a la distancia al objeto. (J.A.Benavides)

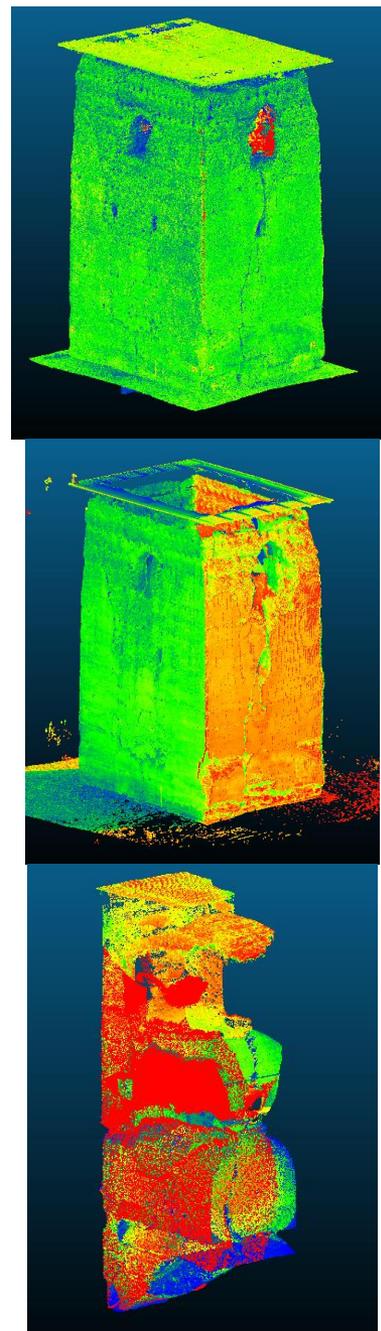
Por otro lado, el registro fotogramétrico se ha realizado mediante *drone* en el exterior y cámara compacta sobre jalón en el interior. El equipo UAV es un cuadricoptero DJI Phantom 2 visión plus que incorpora una cámara FC200 con resolución de 4384 x 3288 píxel (14 megapíxeles) y un campo de visión (FOV) de 110º para una distancia focal de 5 mm. Dispone de un sensor CMOS de 1/2,3 pulgadas. Se capturaron 411 imágenes en un tiempo no superior a 30 min. La medición topográfica de los puntos de control interior y exterior ascendió a 20 min.

256 BENAVIDES LOPEZ, J. A., ESQUIVEL JIMENEZ, F., & ESQUIVEL GUERRERO, J. A. (2015). Nuevas aportaciones al estudio métrico y geométrico del dolmen de

Viera (Antequera, Andalucía). Menga: Revista de prehistoria de Andalucía, (6), 201-208.

El registro interior de la torre se ha realizado mediante cámara compacta Sony RX-100 (20,2 Mpx y una distancia focal $f=9$ mm) que situada sobre un jalón telescópico de 8 m permite la captura de imágenes controladas indirectamente, mediante el teléfono móvil por bluetooth. En el interior se capturaron un total de 395 imágenes con diferentes puntos de vista y orientación. La orientación de este modelo respecto del exterior se realizó a partir de los puntos de control con apoyo topográfico.

Obtenido cada uno de los modelos se procedió al registro y posterior comparación del ajuste entre las diferentes nubes de puntos.



Análisis comparado del modelo 3D (nube de puntos) obtenido con fotogrametría multimagén (izquierda) y los modelos exterior (centro) e interior (derecha) obtenido con escáner laser. (J.A.Benavides)

El número de puntos registrado por el modelo fotogramétrico (interior más exterior) ha sido de 24.722.283 frente a los 14.698.264 mediante escáner laser en la exterior y los 20.112.520 puntos en el interior. Este excesivo número de puntos en el interior se debe a la alta resolución fijada en la zona inferior. A pesar de este excesivo número de puntos, el registro interior mediante escáner presenta mayor número de huecos que el modelo obtenido mediante fotogrametría.

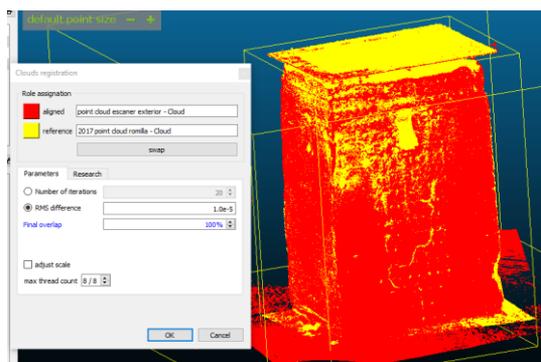
La posibilidad de desplazar la cámara a lo largo del interior de la torre ha permitido una captura completa de sus paramentos.

En la experimentación se ha comprobado que la Fotogrametría multimagen muestra mejores resultados, en cuanto a precisión, uniformidad y registro completo que la medición mediante escáner laser. La captura tangencial de los paramentos desde el suelo provoca una distribución no uniforme de las nubes de puntos. Por otro lado, el necesario registro de elementos de solape obliga a levantar más de una vez el mismo elemento, provocando incertidumbre entre dos nubes de puntos registradas desde posiciones diferentes.

La precisión del ajuste fotogramétrico depende fundamentalmente de la presión y el número de los puntos de control. El RMS obtenido en la comparación de estas ha sido de 7 mm. no superando en ningún caso una desviación mayor de 13 mm

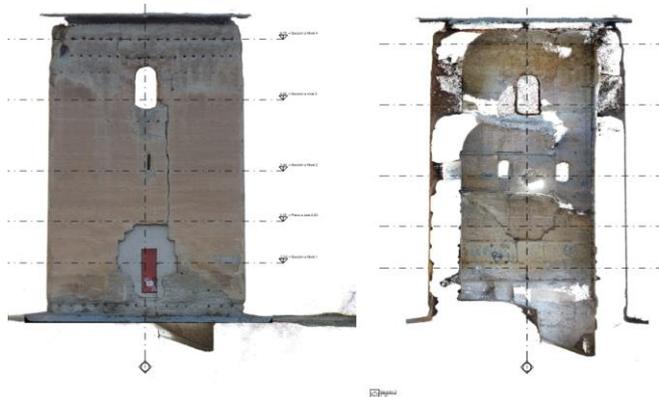


Nube de puntos interior y exterior de la torre de Romilla capturadas con fotogrametría multimagen. (J.A.Benavides)



Análisis del ajuste de las nubes de puntos mediante la herramienta Cloud Compare [257]. Las zonas amarillas muestran la falta de registro por parte del escáner o que la desviación respecto a la nube realizada con fotogrametría es mayor de 7 mm. (J.A.Benavides)

La mejor gestión de las imágenes por los programas de fotogrametría digital (elemento fuente para la generación del modelo), hace que el mapeado de las texturas sea más eficiente y presente mejores resultados que los obtenidos con escáner laser.



Estado actual de la Torre Nazarí de Romilla mediante fotogrametría multimagen. Alzado este y sección longitudinal por el centro. (J.A.Benavides)



ALZADO SUR



ALZADO OESTE

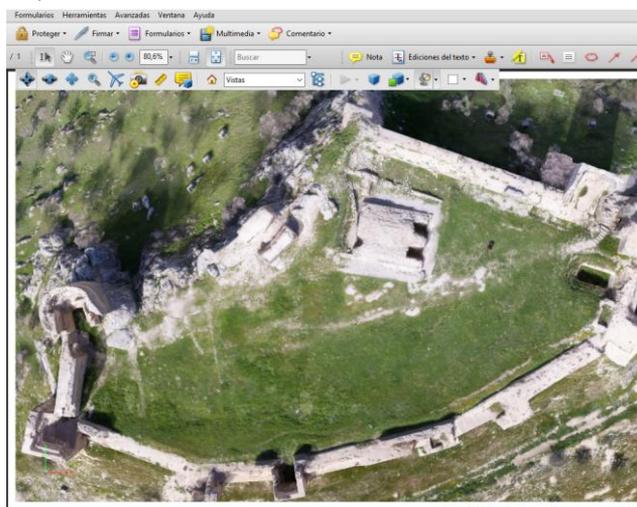
Ortofotografías de alzados sur y oeste de la torre de Romilla. (J.A.Benavides).

²⁵⁷ GIRARDEAU-MONTAUT, D. (2015). Cloud compare—3d point cloud and mesh processing software. *Open Source Project*.

4.4 EXPERIMENTACIÓN CON MODELOS TRIDIMENSIONALES EN PDF

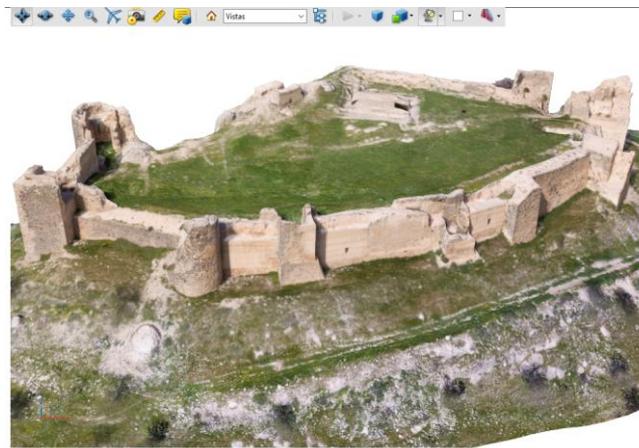
Las nuevas posibilidades que nos ofrece la gestión de modelos tridimensionales mediante la herramienta PDF-3D, permiten la obtención de documentos gráficos sin la necesidad de disponer de complejos y costosos programas informáticos.

La obtención de ortoimágenes y perspectivas se realiza de una forma intuitiva permitiendo que usuarios sin conocimientos de programas de gestión de modelos tridimensionales puedan desarrollar su trabajo, siendo también una importante herramienta para la difusión del patrimonio.



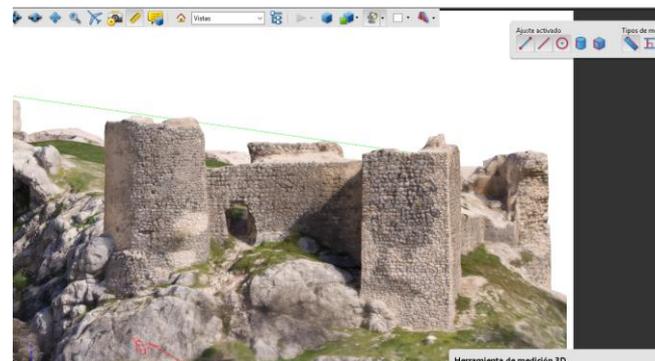
Visualización en planta del modelo tridimensional del castillo de Píñar. La gestión de las herramientas de visualización de Acrobat Reader [258] incorpora aplicación de fácil utilización. (J.A.Benavides)

La gestión de los datos permite la obtención de las coordenadas georreferenciadas de todo del modelo.



Vista en perspectiva del modelo 3D gestionado por la herramienta de giro. (J.A.Benavides)

La herramienta de distancia permite calcular la distancia en entre los puntos del modelo, lo que además conseguimos dar escala a la imagen.



Herramienta para el cálculo de distancias y superficies. El acotado de una distancia facilita escala a la imagen. (J.A.Benavides)



Jose Antonio Benavides - marzo 2017

Alzado ortogonal al lienzo 7 realizado mediante la definición de 3 puntos sobre el plano dentro de la herramienta cámara.
(J.A.Benavides)

De igual manera, mediante la herramienta de sección es posible la generación de ortoimágenes seccionadas del modelo 3D



Sección en planta y transversal (J.A.Benavides)

Concluimos que los modelos generados en PDF debe ser uno de los requisitos mínimos exigidos por las administraciones para la gestión actual y futura de los bienes patrimoniales. La facilidad de manejo y operatividad de esta herramienta la convierte en un instrumento ideal para la visualizar y obtener la documentación gráfica realizada sobre un bien, permitiendo a otros profesionales, investigadores y administraciones utilizarlos como fuente de información para futuras intervenciones o investigaciones. Este tipo de modelos cumplen además el requisito de estar georreferenciados en coordenadas universales.

4.5 EXPERIMENTACIONES EN LA OBTENCIÓN DE DOCUMENTOS GRÁFICOS A PARTIR DEL MODELO 3D DE ESCANER

La complejidad de procesos en la generación de modelos tridimensionales mediante escáner laser nos ha planteado realizar un análisis comparativo en la realización de documentos gráficos a partir de la elaboración de secciones directamente sobre la nube de puntos y la obtenida a partir de los modelos de superficie generados por triangulación

Para nuestra experimentación hemos utilizado un escáner laser Leica Scan Station2 con una resolución sobre el paramento objeto de estudio de 1cm, estando el escáner situado a unos 10 m de distancia a 10 m. de distancia del objeto (portada ubicada la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación de Granada)



A escalas pequeñas la distancia entre los puntos de la nube es lo suficientemente baja como para que, de acuerdo al límite de percepción visual, la observemos como una superficie continua. Al aumentar la escala la distancia entre los puntos empieza a hacerse patente, quedando huecos entre ellos, lo que provoca que el modelo se vuelva transparente, perdiendo cualquier definición de las formas. (J.A.Benavides)

Para el análisis comparativo se ha exportado una misma nube de puntos en dos formatos diferentes: "PTS" y "PTX". El archivo PTS está formado por el listado de puntos medidos en formato ascii con indicación de las coordenadas X,Y,Z de cada punto, el índice de reflectividad y los tres ND (niveles digitales) correspondientes a los niveles RGB de cada punto. El archivo PTX es igual al anterior pero dispone de la posición desde la que se han capturado los puntos, lo que permite que los programas de modelado puedan realizar una triangulación plana de los puntos de la nube.

Para nuestra experiencia se han exportado un total de 528.425 puntos en los ficheros "Portada frente color. pts" y "Portada frente color. ptx".

Se hace conveniente utilizar *software* específico que permita generar secciones o alineaciones automáticamente sobre la nube de puntos o sobre mallas de superficies obtenidas a partir de estos. Para ello, en primer lugar, se ha importado el archivo PTX sobre el programa *Meshlab* [259], obteniendo de forma automática el modelo de superficie.



Modelo de superficie generado a partir del formato PTX en meshlab (J.A.Benavides)

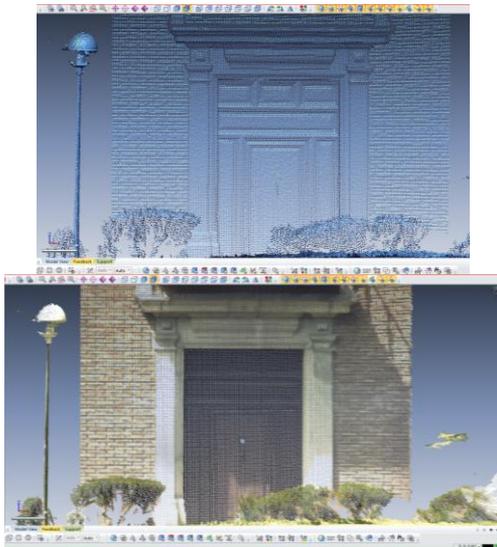
259 CIGNONI, P., CORSINI, M., & RANZUGLIA, G. (2008). Meshlab: an open-source 3d mesh processing system. *Ercim news*, 73(45-46), 6.

El método de triangulación plana respecto del punto de vista establecido como referencia, presenta grandes ventajas cuando las superficies de rebote son perpendiculares respecto de la posición del escáner, no siendo adecuada cuando las superficie a triangular presentan ángulos agudos respecto de nuestra posición y los triángulos se disponen de forma muy oblicua, no adaptándose bien a las formas reales.

Posteriormente, exportamos el modelo en formato OBJ, PLY 3DS o WRL para su utilización en programas específicos de gestión de modelos de escáner, como son *Rapidform XOS*, *Cyclone* o *Riscan-pro*.

De igual modo, se hace necesario simplificar el modelo eliminando los elementos que no son necesarios en nuestro estudio (arbolado, farolas, vegetación, etc.)

Dependiendo de la finalidad del trabajo es posible realizar diferentes visualizaciones del modelo 3D: Visualización en nube de puntos con o sin textura o visualización en malla con o sin textura.



Visualización de nube de puntos con (arriba) y sin textura (abajo)
(J.A.Benavides)



Modelo de malla sin textura (arriba) y con textura (abajo)
(J.A.Benavides)

Para nuestra experimentación se han realizado diferentes tipos de secciones “automáticas” o manuales atendiendo a los siguientes criterios:

Sobre el tipo de dato.

- Sección directa sobre la nube de puntos
- Sección sobre la superficie de malla 3D

Sobre el método de realizarlo:

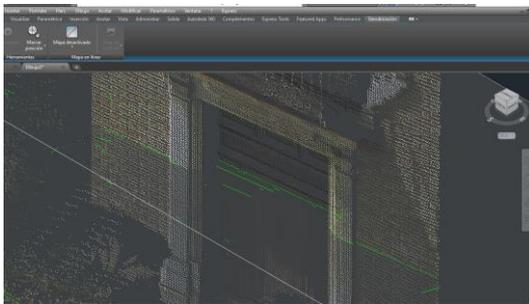
- Sección mediante polilínea
- Sección mediante utilidad 3D Mesh (3D malla)
- Secciones manuales a partir de filtrado de vistas de sección

Experimentación y análisis de los resultados a partir de la gestión directa de nube de puntos

Mediante la orden “*Measure section*” se genera una polilínea de sección automática sobre la nube de puntos, pudiendo ser exportada a formatos de intercambio de dibujo tipo DXF



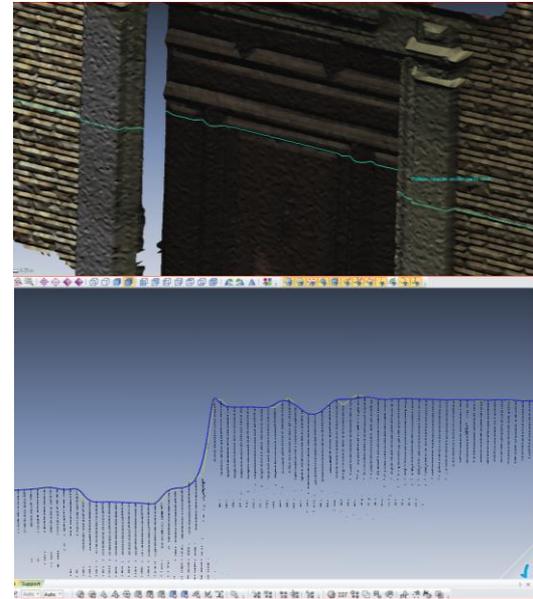
Generación de secciones automáticas a partir de la nube de puntos. (J.A.Benavides)



Sección automática de nube de puntos mediante las herramientas de AutoCAD. (J.A.Benavides)

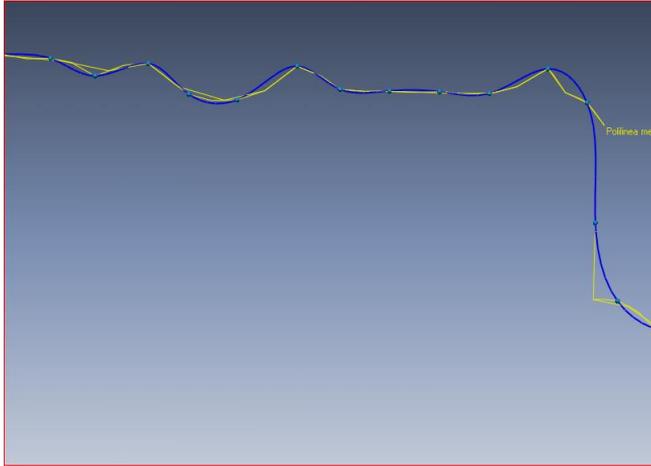
Experimentación y análisis de los resultados a partir de superficies (Mesh)

Para la sección de la malla 3D se ha utilizado la orden “*Sección-Mesh*”. De igual modo, la sección generada es exportable a formatos estándares de dibujo.



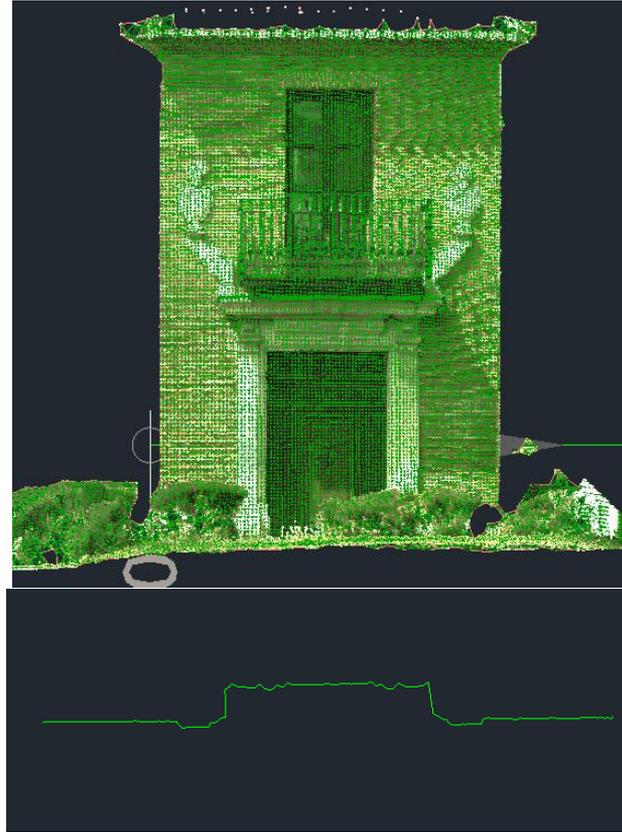
Secciones automáticas generadas a partir del modelo triangulado. La rugosidad que presenta el modelo se debe a los errores milimétricos de medición provocados por rayo láser al chocar contra la superficie(J.A.Benavides)

La sección producida mediante esta herramienta es una Spline suavizada (trazo azul oscuro) que se genera a partir de la distribución de puntos sobre el perfil. De este estudio obtenemos como conclusión que es más precisa la sección generada desde el modelo “orden *Measure Sección*” que la generada a partir de la sección de la malla “sección mesh”.



Superposición de las secciones realizadas a partir de la nube de puntos (amarillo) y la sección generada a partir de la superficie 3D (azul). (J.A.Benavides)

La sección realizada mediante la herramienta 3dSkech se obtiene una *Spline* que se adapta al modelo en los tramos sin quiebros importantes, generando curvas en los quiebro agresivos, como esquinas. Es tipo de sección puede ser muy eficaz cuando el modelo a seccionar es suave y continuo como terrenos o esculturas. La fiabilidad de las secciones va a depender de la resolución de la nube de puntos. El hecho de generar un sección con infinitos quiebros, correspondiente a cada una de las caras de la superficie, reproducen las irregularidades de los paramentos, lo que, en muchos casos, produce sorpresa para los técnicos que la reciben, acostumbrados a la simplificación de las líneas del proyecto, renegando de su uso por salirse del método habitual.



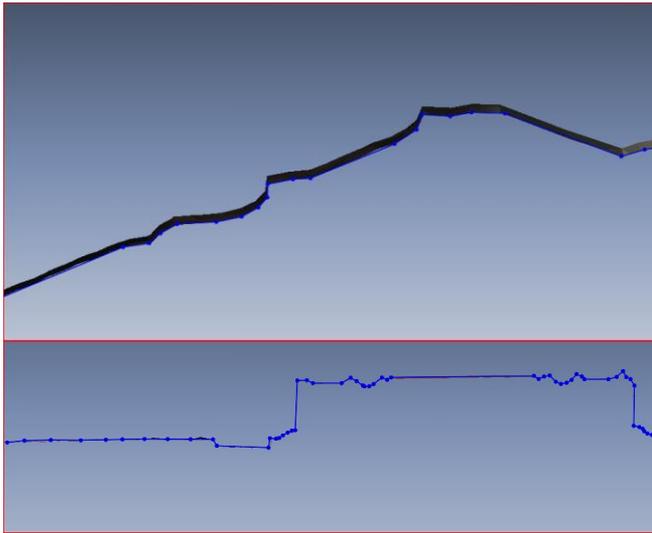
Triangulación plana de una superficie realizada mediante Auto-Cad y sección del modelo con una resolución inferior a 1 cm. (J.A.Benavides)

Aunque el resultado de la experimentación para realización de secciones automáticas sobre el modelo triangulados en AutoCad ha sido muy satisfactoria. La superficie generada por la herramienta de triangulación plana, solo es óptima cuando la superficie a generar se coloca paralela al plano de triangulación, lo que nos obligaría a ir girando las superficies. De lo contrario, los resultados no son aceptable.

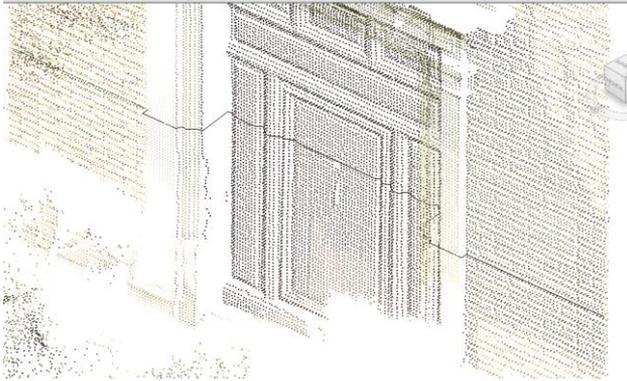
Realización de sección manual a partir de la selección vista selectivas de nube de puntos o mallas

En ocasiones la solución idónea consiste en generar manualmente la sección a partir de vistas selectivas de las nubes de puntos o mallas.

Sobre el modelo de nube de puntos o sobre malla es posible realizar una rebanada definida mediante la delimitación, de pequeño espesor (1 o 2 cm), de dos planos de corte.



Sección manual mediante interpretación de las formas a partir de la delimitación selectiva del modelo. (J.A.Benavides)



Sección manual selectiva mediante la aplicación Revit AutoDesk (J.A.Benavides)

5 CAPÍTULO V: CASOS DE ESTUDIO.

LA ALCAZABA DE GUADIX Y EL CASTILLO DE PÍÑAR.

Esta tesis es el resultado de un proceso de investigación que consiste en analizar los métodos y sistemas de registro tridimensional de la arquitectura histórica y los yacimientos arqueológicos. El análisis histórico-constructivo y el registro gráfico de la Alcazaba de Guadix y el Castillo de Píñar, pretende demostrar su efectividad, aportando mayor y mejor conocimiento sobre ellos, instrumento fundamental para su protección y conservación.

Nos enfrentamos a un problema amplio y complejo no solo por el registro riguroso del estado actual de estas estructuras, sino por el análisis y registro gráfico de las diferentes fases e intervenciones que sobre ellos se han producido.

El levantamiento arquitectónico de la Alcazaba de Guadix y el Castillo de Píñar nos van a permitir, por un lado, un conocimiento integral de ambos monumentos y por otro, la ocasión de verificar las potencialidades de los sistemas empleados para su documentación y registro. El uso de las nuevas tecnologías expuestas en el capítulo anterior y en concreto el escáner laser y la fotogrametría multimagen nos han permitido la generación de modelos gráficos de alta calidad necesarios para un mejor conocimiento, investigación y difusión de los elementos patrimoniales. Por otro lado, la nueva generación de herramientas gráficas de gestión inteligente de la información sobre modelos semánticos en 3D se plantea como una alternativa interesante respecto de las representaciones bidimensionales clásicas.

Los nuevos sistemas permiten una mayor fiabilidad y rapidez en el levantamiento y gestión de los datos res-

pecto de los métodos directos, aún vigentes. La necesidad de experimentar diferentes instrumentos, condiciones ambientales, precisiones, metodologías y programas de gestión de los datos obtenidos, unido a la aparición continua de nuevos *software* que mejoraba o modificaba la forma de actuar de las versiones anteriores ha provocado que este trabajo de investigación que se inició en el año 2009 vea ahora la luz.

En este apartado se describen las actuaciones llevadas en la Alcazaba de Guadix y el Castillo de Píñar para aplicar técnicas, procedimientos y herramientas descritas anteriormente, con la finalidad de documentar y gestionar la información procedente de los diferentes agentes intervinientes en los procesos de estudio e investigación. Su utilización debe servir para la mejora de la comunicación y difusión de este patrimonio.

La gestión e integración bajo un mismo programa o entorno de los datos provenientes de los diferentes sistemas de captura (escáner láser y fotogrametría multimagen) y su posterior documentación gráfica mediante modelado tridimensional o secciones tipo nos posibilitan el análisis contrastado de los distintos sistemas, comparando la calidad gráfica y la precisión de los resultados.

En este apartado analizaremos también un nuevo concepto geométrico de representación, “nubes de puntos” [260] que aparentemente parecen reproducir fielmente la realidad, manteniendo las irregularidades propias del objeto construido. Su análisis mediante la obtención de imágenes fotorrealistas de plantas, alzados y secciones constituye una herramienta fundamental el estudio del Patrimonio. Posteriormente mediante programas de CAD u otros más complejos de

260 VALLE MELÓN, J.M. (2006) *La medida y representación del patrimonio: alternativas y criterios de selección*. Berceo, no 151, p. 63-85.

modelizados 3D deberemos sintetizar las formas que nos interesan extraer y representar.

La reconstrucción geométrica de modelos conceptuales teóricos a partir de los modelos 3D de nubes de puntos contribuye a la comprensión del objeto de estudio, detectando y cuantificando las irregularidades y deformaciones. En cualquier caso, la presencia en el edificio construido de zonas que no se ajustan al modelo geométrico ideal no indica en absoluto que pueda existir un problema estructural pues como indica Antonio Almagro [261] puede deberse a muchos factores (problemas de ejecución durante la obra o a diferentes añadidos producto de intervenciones o reparaciones). El estudio comparado, bajo un mismo sistema de referencia, de diferentes modelos de nubes de puntos capturados en el tiempo (años) nos puede permitir averiguar el comportamiento estructural del edificio y detectar patologías que a simple vista no son observables.

El estudio de las técnicas constructivas y la recopilación de documentación histórica y actual contribuyen una fuente fundamental para la interpretación de los edificios seleccionados.

En esta investigación se entrelazan, por tanto, diferentes factores como condiciones determinantes del trabajo: el levantamiento arquitectónico como comprensión global del objeto de estudio, el modelo geométrico como herramienta de análisis comparado y el estudio crítico del material gráfico y bibliográfico como fuente de información y medio de contraste con los resultados obtenidos. De acuerdo a esto, nos proponemos tres niveles de aproximación:

El primero de ellos lo hemos dedicado a la determinación de las estructuras que conforman el conjunto.

Para tal fin hemos elaborado una documentación gráfica georreferenciada del conjunto, donde poder recoger toda la información que íbamos extrayendo.

En un segundo paso, la observación minuciosa in situ, de los paramentos y las plantas, analizando los materiales y técnicas constructivas, nos ha permitido identificar diferentes intervenciones a nivel general. Para ello hemos realizado una amplia documentación fotográfica y realizado croquis sobre el terreno.

En tercer lugar, hemos registrado cada una de las unidades estratigráficas muráreas, analizando sus componentes constructivos, las huellas de su ejecución, el acabado de sus superficies, etc. y poniendo en relación unas con otras de acuerdo a las relaciones de superposición, apoyo, cubrición, corte, etc., estableciendo una secuencia de fases constructivas, de acuerdo a relaciones de anterioridad o posterioridad.

La aparición de determinadas unidades estratigráficas, nos permite de actuaciones puntuales, asociados a reparaciones o, por lo contrario, procesos edilicios más extensos.

En la primera etapa debemos tener en cuenta los siguientes criterios:

- Las representaciones deberán realizarse en escalas variables, de acuerdo con la dimensión del objeto, sus características y los objetivos del levantamiento.
- Garantizar que las medidas tengan una precisión general compatible, por un lado, con el error del grafismo y con la finalidad del levantamiento y, por otro, con las posibilidades que ofrecen los instrumentos informáticos.

261 ALMAGRO, ANTONIO.(2004) *Levantamiento arquitectónico*. Universidad de Granada

- Adoptar todas las prevenciones necesarias para garantizar la estabilidad métrica de las representaciones gráficas.
- Realizar una documentación fotográfica exhaustiva y científicamente adecuada, además de las investigaciones de tipo bibliográfico, archivístico e iconográfico que resulten adecuadas al fin buscado.
- La conservación digital de los datos obtenidos representa un importante reto para la sociedad actual. La cuantiosa información generada mediante modelos tridimensionales de nube de puntos; modelo tridimensional de superficie formado por una malla de triángulos texturizadas; modelo tridimensional de elevaciones con curvas de nivel u ortofotografías digitales de los diferentes alzados o plantas requieren se guardados y exportados a formatos compatibles que permitan para intercambio de información y difusión de resultados ahora y en el futuro. (WRML, ASCII, TIF, JPG, LAS, PDF-3D)

LA ALCAZABA DE GUADIX



5.1 HISTORIOGRAFIA DE GUADIX y DE LA ALCAZABA

Historiográficamente, el origen de la ciudad Guadix se remonta a la creación de la colonia *Iullia Gemella Acci*, cuya fundación ordenó Julio César en el siglo I a.C. sobre el *oppidum* ibérico de *Acci* [262], 1972, 210-212). No obstante, se han documentado mediante arqueología ocupaciones anteriores en el solar accitano, tanto la mencionada presencia ibérica como de la Edad del Bronce. [263]

La colonia romana sería fundada sobre el *oppidum* por la ubicación estratégica en el que se situaba, alcanzando cierta entidad, ya que como se ha descubierto en recientes excavaciones (2008), esta contaba un un importante teatro romano. [264]

El declive de la *Acci* romana comenzará a partir del siglo III d.C., abandonándose ya los espacios públicos como el teatro, siendo posible que el centro político de la región se trasladara paulatinamente hacia Elvira, donde se celebra el primer concilio cristiano de Hispania [265].

Con el fin del imperio romano y la instauración del reino visigodo de Toledo, Guadix mantiene su papel como sede episcopal, pero los escasos restos arqueológicos documentados siguen dando prueba su poca importancia como urbe. [266].

Sobre la conquista musulmana de la ciudad no tenemos noticia directa por las fuentes escritas, siendo probable que fuese tomada en los primeros momentos de la invasión, en torno al año 712, teniendo Abd-al-Aziz, hijo de Musa bin Nusayr, que reprimir una rebelión en el 713. 267.

A partir de este momento, la ciudad pasará a ser conocida como *Wadi As* [268], un topónimo compuesto por el vocablo árabe “río” y su transformación en esta lengua del topónimo original, *Acci* (Martínez Ruiz, 1990). En la crónica de Jiménez de Rada ya aparecerá mencionada como *Guadiex* y para el siglo XV ya será llamada *Wadis* [269] en las fuentes árabes.

La llegada de los nuevos pobladores no produjo ningún cambio significativo en la estructura de la ciudad, perviviendo la comunidad mozárabe e instalándose según la interpretación de diversos autores [270] una guarnición musulmana en la zona de la actual alcazaba. Según

262 SANTERO SANTURINO, J. M. (1972). Colonia Iulia Gemella Acci. *Habis*, (3), 203-222.

263 CARRASCO, J., PACHÓN, J. A., ADROHER, A., & LÓPEZ, A. (2002). Taller metalúrgico de fines del bronce en Guadix (Granada): contribución a la contextualización de las fíbulas de codo tipo Huelva en Andalucía Oriental. *Florentia Iliberritana*, (13), 357-385.

264 LÓPEZ MARCOS, A. (2015). *El teatro romano de Guadix*. Guadix: Ayuntamiento de Guadix.

265 MARTIN CIVANTOS, J.M. 2010b. «La formación de la tierra de Guadix (Granada)». En *Historia de Andalucía. VII Coloquio*, editado por Antonio Malpica, Rafael Peinado, y Adela Fábregas, 49-64. Granada: Universidad de Granada.

266 SALVADOR VENTURA, F.(1988). El poblamiento en la provincia de Granada durante los siglos VI y VII. *Antigüedad y Cristianismo*, (5).

267 SARR, B., & MATTEI, L. (2011). De hisn a madina: la evolución del urbanismo en el surco intrabético: Guadix, Loja y otros espacios menores. Un estado de la cuestión.

268 MARTINEZ RUIZ, J. (1989). *Toponimia mayor y menor de Guadix y su tierra en los siglos XV y XVI: balance y perspectivas*. Universidad de Granada.

269 SARR MARROCO, B. (2010) Algunas consideraciones sobre la evolución del Guadix islámico a la luz de las fuentes árabes y del registro arqueológico.

270 MALPICA CUELLO, A. (2008). La ciudad medieval de Guadix a la luz de la arqueología. Reflexiones a partir

la hipótesis de Sarr Marroco, para los primeros siglos de ocupación islámica, Guadix sería solo el pequeño *hisn* con un poblamiento disperso y que irá alcanzando con el paso del tiempo mayor importancia. [267]

HISTORIOGRAFIA DE LA ALCAZABA DE GUADIX

Las alcazabas son componentes habituales de las ciudades islámicas, casi siempre presentes en la cumbre urbana y residencias del delegado estatal junto con su guarnición, una muestra permanente del poder del Estado presente en la vida diaria de las medinas. [271]

La alcazaba de Guadix se levanta en el corazón de la ciudad, en el punto más alto de su casco histórico, siendo por tanto uno de los hitos fundamentales de su paisaje urbano y recuerdo del pasado medieval en la ciudad. Se halla, no obstante, cerrada al público y en un estado de abandono que repercute negativamente sobre su conservación, encontrándose algunas partes apuntaladas por amenaza de ruina, como su torrepuerta. Sin embargo, pese a sus condiciones y a la gran intervención de restauración que se realizó tras la Guerra Civil—sin aplicar criterios científicos—, la alcazaba es un yacimiento con una potencialidad arqueológica e histórica considerable, como han demostrado las intervenciones realizadas en el interior de sus muros.

La alcazaba medieval de Guadix, fue nombrada Monumento Nacional en 1931, se encuentra en la parte sur del antiguo sector amurallado, a una altura de unos

952 metros sobre el nivel del mar [272]. Las coordenadas en el sistema universal para la torre del homenaje son: 487.823, 4.128.028 (UTM- ETRS-89).

La fortificación ha ido evolucionando con el resto del conjunto urbano, experimentando todo tipo de vicisitudes. La ocupación humana del cerro se remonta a época ibérica, aunque solo se han hallado cerámicas descontextualizadas de este periodo y también de época romana. [273].

Según las fuentes, la primera edificación militar realizada en la alcazaba sería un castillo mandado edificar por Sawwar cuando concede el control de la medina al clan yemení de los Banu Sami. Se trataría del lugar de asentamiento de una pequeña guarnición militar mientras que la mayor parte de la población musulmana recién llegada se asentaría en los alrededores de la ciudad. La fortificación se convertiría en la rectora de otros *husun* secundarios.

Los primeros restos documentados de época medieval en la Alcazaba, son del siglo X—según la primera intervención arqueológica de la alcazaba [274], pero no será hasta época *Zirí* cuando las fuentes mencionan a la alcazaba, hecho corroborado también por las intervenciones arqueológicas (Martín Civantos *et al.*, inédito). Las fuentes afirmarán que la fortaleza será reformada en época de las segundas taifas y después en la fase

de la intervención arqueológica en su muralla y en el torreón del Ferro. In Homenaje a Antonio Domínguez Ortiz (pp. 599-620). Universidad de Granada.

271 MALPICA CUELLO, A; RODRIGUEZ MORENO, M. (1996). *Poblamiento y castillos en Granada*. Fundación El legado andalusí.

-MAZZOLI-GUINTARD, C; DE LA TORRE, P. (2000) *Ciudades de al-Ándalus: España y Portugal en la época musulmana (siglos VIII-XV)*.

272 SARR MARROCCO, B; REYES MARTÍNEZ, E. (2014) Intervención arqueológica de apoyo a la restauración del torreón sureste de la Alcazaba de Guadix (Granada, 2005). *Arqueología y Territorio Medieval*, 2014, vol. 13, no 2.

273 RAYA DE CÁRDENAS, M A. (1987) Excavación arqueológica en la Alcazaba de Guadix: Granada.

274 RAYA DE CÁRDENAS, M A. (1987). Excavación arqueológica en la Alcazaba de Guadix: Granada.

almohade, mientras que la arqueología solo ha documentado un cambio estructural para época almohade-nazarí.

Habría que destacar por último la mención que hace al-Jatib a la existencia de una mezquita dentro de este recinto, donde fue enterrado el sultán Nasr, de la que no se ha encontrado ningún resto. Para Mazzoli-Guintard [275] la fortificación accitana respondería a un tipo muy poco común de alcazaba, combinando un hábitat permanente con la ausencia de *albacar* y la proximidad a la mezquita aljama. Destaca por su encastillamiento al concentrarse la población debido al avance castellano (Mazzoli, De la Torre, 2000). Otros autores como Pavón Maldonado [276] y Malpica Cuello [277] afirman que la alcazaba sí tendría un *albacar*.

En época nazarí la fortaleza de Guadix sería la representación del poder real en la ciudad, afirmando Ibn al-Jatib que era propiedad de la corona, un hecho de suma importancia dado el protagonismo que adquiere Guadix en esta última etapa de su historia musulmana. La alcazaba era cabecera del territorio, teniendo constancia documental por un pleito entre Guadix y el Cene de 1543, en el que el alcaide de la fortaleza era el encargado de nombrar al resto de los alcaides de las fortificaciones menores de su jurisdicción, además de

ser el lugar desde el que se cobraban todos los tributos a través de la citada red.

La alcazaba era en época medieval, sobre todo en la fase nazarí, un centro de poder político y económico de gran importancia. Con la conquista cristiana esta función desaparecerá y tras un primer momento de ocupación de la fortaleza por parte de la guarnición militar necesaria para garantizar la conquista, caerá en desuso hasta el siglo XVIII [278], empezando a construirse casas adosadas a su recinto.

Según Asenjo Sedano [279] y Raya Praena [280], en esta nueva etapa, entre los cambios introducidos por los nuevos pobladores estaría la reducción de la superficie de la alcazaba a la actual, basándose en una petición realizada a la reina Juana por la ciudad para demoler la parte norte. Así, el recinto original incluiría el espacio en el que actualmente se encuentran el Seminario Menor y el palacio de Peñaflor.

Sin embargo, la última intervención en la alcazaba reveló que la cerca exterior que se conserva hoy en día es la misma desde época nazarí, lo que unido al gran desnivel en cota existente entre la alcazaba y la zona del palacio, junto al hecho de que no se ha encontrado constancia documental de una respuesta afirmativa por parte de la Corona a la petición de derribo, lleva a

275 MAZZOLI-GUINTARD, C; DE LA TORRE, P. (2000) *Ciudades de al-Ándalus: España y Portugal en la época musulmana (siglos VIII-XV)*.

276 PAVON MALDONADO, B. (1992) *Ciudades hispanomusulmanas*. Fundación MAPFRE, 1992.

277 MALPICA CUELLO, A. (2008) La ciudad medieval de Guadix a la luz de la arqueología. Reflexiones a partir de la intervención arqueológica en su muralla y en el torreón del Ferro. En *Homenaje a Antonio Domínguez Ortiz*. Universidad de Granada.

278 MARTIN CIVANTOS, J M. (2009) "La alcazaba de Guadix: de fortaleza andalusí a cuartel militar Napoleónico". *Boletín del Centro de Estudios Pedro Suárez: Estudios sobre las comarcas de Guadix, Baza y Huéscar*. nº 22, p. 283-296.

279 ASEÑO SEDANO, C. (1983). *Guadix la ciudad musulmana del siglo XV y su transformación en la ciudad neocristiana del siglo XVI*. Granada: Diputación Provincial.

280 RAYA PRAENA, I. et alii (2003). *Carta Arqueológica Municipal de Guadix, Colección Arqueología, Monografías Ciudad y Territorio*.

plantear que probablemente esta nunca se ejecutase y la alcazaba mantenga su superficie original [281].

La fortificación volverá a tener uso durante la Guerra de Independencia, siendo ocupada como cuartel militar por parte de las tropas napoleónicas [282], que realizan una intensiva reforma para adecuarla a sus necesidades. De este modo, se engrosa el paño de las murallas exteriores para eliminar el retranqueo del lienzo frente a las torres, utilizando para ello el propio material constructivo desmantelado de las estructuras internas de la alcazaba. También allanarán el desnivel interior utilizando los escombros de los derrumbes interiores de la fortificación. Por último, cegarán las dos puertas de entrada a la cerca exterior y abrirán una nueva junto a la torre puerta del lienzo sureste.

Tras esta etapa, parte del recinto de la explanada interior de la alcazaba será utilizada como cementerio [283], como aparece reflejado en un plano de 1874. Con la Guerra Civil, la ciudad sufrirá duros bombardeos por parte del bando sublevado, que afectan de forma directa a la alcazaba.

Tras el conflicto, el monumento será restaurado por la Dirección General de Regiones Devastadas, con materiales contemporáneos y unos criterios nefastos en cuanto a conservación, levantando el volumen todos los paramentos y rematándolos con una merlatura en ladrillo. La diferencia se puede observar en las fotografías antiguas que se conservan de la fortificación.



Imagen de la Alcazaba de Guadix en el siglo XIX. Vista desde el sur. Fuente desconocida



Imagen de la Alcazaba antes de la restauración de Regiones Devastadas. Vista desde el sur. Fuente desconocida

281 BRAVO DEL FRESNO, I. (2010). Transformaciones urbanas y arquitectónicas en una ciudad andalusí tras la conquista cristiana: El caso de Guadix. *Arqueología y Territorio*, (7), 119-133.

282 MARTIN CIVANTOS, J. M. (2009) "La alcazaba de Guadix: de fortaleza andalusí a cuartel militar Napoleónico".

Boletín del Centro de Estudios Pedro Suárez: Estudios sobre las comarcas de Guadix, Baza y Huéscar. nº 22, p. 283-296.

283 ASENJO SEDANO, C. (2000). Arquitectura religiosa y civil de la ciudad de Guadix. *Siglo XVI*.



Imagen de la Alcazaba antes de la restauración de Regiones Devastadas. Vista desde el norte. Raya Garcia, 2009

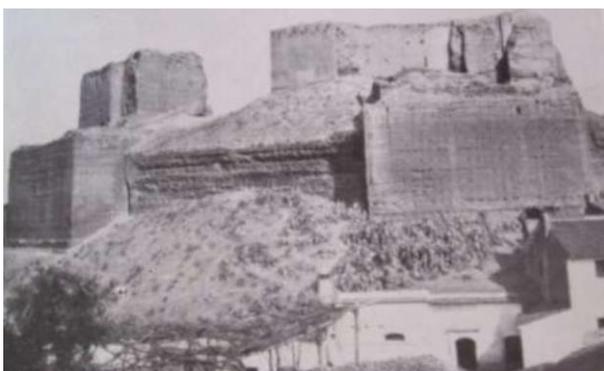


Imagen de la Alcazaba antes de la restauración de Regiones Devastadas. Vista desde el sur. Fuente desconocida



Imagen de la Alcazaba antes de la restauración de Regiones Devastadas. Vista desde el sur. Fuente desconocida

Finalmente, la alcazaba pasará a ser propiedad del Seminario Menor de Guadix. Se construirá un aulario y

unos vestuarios y pistas de fútbol, tenis y baloncesto. En algún momento se creó una zona ajardinada que permitiera el acceso a lo que quedaba del recinto interior y se abre una nueva puerta con escaleras en la cara norte de la cerca exterior, junto con el puente que comunica la alcazaba directamente con el seminario [284].



Vista aérea de la alcazaba desde el sur en los años 60. Bravo del Fresno

En la intervención arqueológica, del año 1986, realizada en la explanada superior situada junto a la torre del Homenaje se descubren las estructuras que se muestran en la siguiente imagen, y de las que no se dispone de documentación gráfica. En las hipótesis de reconstrucción virtual, se incluye una aproximación de lo observado en esta imagen.

284 MARTIN CIVANTOS, J.M., & RAYA GARCÍA, S. La alcazaba de Guadix: de fortaleza andalusí a cuartel militar napoleónico.

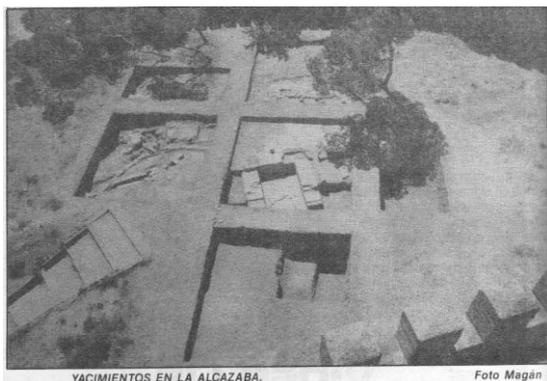


Imagen de la excavación arqueológica de 1986

En el año 2010 se derriba el muro y puerta realizados durante la ocupación napoleónica, habiéndose perdido una parte importante de la historia de la Alcazaba



Muro de aparejo de ladrillo realizado durante la ocupación de las tropas napoleónica en la Alcazaba.(J.A.Benavides)

Actualmente la alcazaba es propiedad municipal y se encuentra en un estado de abandono y deterioro manifiesto, siendo necesario una urgente actuación integral de restauración que impida que la fortificación termine por arruinarse, algo preocupante en algunos puntos, como la torre-puerta, apuntalada desde el año 2005 para evitar su derrumbe.



Estado de la Torre Puerta tras el derrumbe del año 2004 (izquierda). Estado actual tras 12 años de apuntalamiento. En la última visita en marzo de 2017, el cerramiento central ha cedido varios centímetros. (J.A.Benavides)

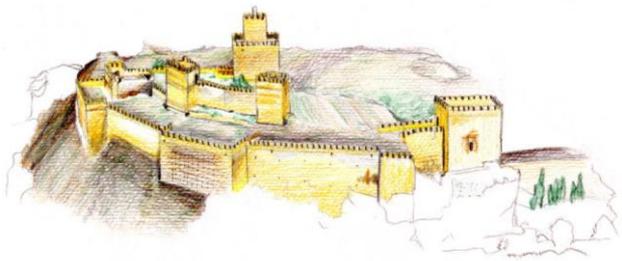


Durante las actuaciones llevadas a cabo por Regiones Devastadas tras la Guerra Civil, se construyó una doble merlatura con materiales modernos coronando las torres. (J.A.Benavides)

5.2 SITUACIÓN ADMINISTRATIVA de ALCAZABA DE GUADIX.

En el año 1931 la alcazaba de Guadix fue declarada Monumento Artístico Nacional. Posteriormente, de acuerdo a la *Ley 16/1985, de 25 de junio, del Patrimonio Histórico Español* y a la *Ley 14/2007, de 26 de noviembre, del Patrimonio Histórico de Andalucía* (BOJA nº 248, de 19 de diciembre de 2007), tiene la condición de Bien de Interés Cultural. Sus datos pueden ser consultados en la ficha de inventario disponible en la web de la Junta de Andalucía. (<http://www.juntadeandalucia.es/cultura/iaph/bdi/>). En el anexo 10.3 se incluye la ficha completa de este BIC.

De acuerdo a la LPHE en los elementos del patrimonio declarados BIC, los propietarios adquieren ciertas obligaciones compensatorias a los beneficios que le otorga el Estado en función de la posesión del bien, como sería la de permitir la inspección del bien por parte de los organismos competentes, encargados de consentir cualquier tipo de modificación u obra, el estudio a los investigadores, así como la visita pública en las condiciones de gratuidad, por lo menos, 4 días al mes. Esta situación no se está produciendo, estando el monumento en total abandono por parte del Ayuntamiento de Guadix y de la Junta de Andalucía.



Patrimonio Inmueble de Andalucía

IDENTIFICACIÓN

Denominación: Alcazaba
Otras denominaciones: Casa de Barradas o Palacio de los Marqueses de Cortes y Graena
Código: 01180890003
Caracterización: Arqueológica, Arquitectónica
Provincia: Granada
Municipio: Guadix
Códigos relacionados

Pertenece a:

Código	Denominación
01180890023	Sitio arqueológico de Guadix

DESCRIPCIÓN

Tipologías

Tipologías	Actividades	P.Históricos/Etnias	Cronología	Estilos
Alcazabas	Actividad militar		Edad Media - Arabes	
Infraestructuras hidráulicas			Edad Media - Arabes	

Descripción

Esta alcazaba tiene una planta ligeramente rectangular, redondeada en su ángulo sur. Todas las murallas del conjunto están construidas con tapial, levantadas sobre muros de nivelación de mampostería que disponen de zarpas.

De los tres recintos que la formaban, el tercero tenía su acceso desde la medina o Monasterio. El resto de un recinto más alto se conserva. Su zona más...

Base de datos inmuebles junta de Andalucía- <http://www.juntadeandalucia.es/cultura/iaph/bdi/>

De acuerdo al artículo 29 de la citada LPHA, *los instrumentos de ordenación territorial o urbanística, que incidan sobre bienes integrantes del Patrimonio Histórico identificarán, en función de sus determinaciones y a la escala que corresponda, los elementos patrimoniales y establecerán una ordenación compatible con la protección de sus valores y su disfrute colectivo. En el caso de planes urbanísticos, los elementos patrimoniales se integrarán en el catálogo urbanístico.*

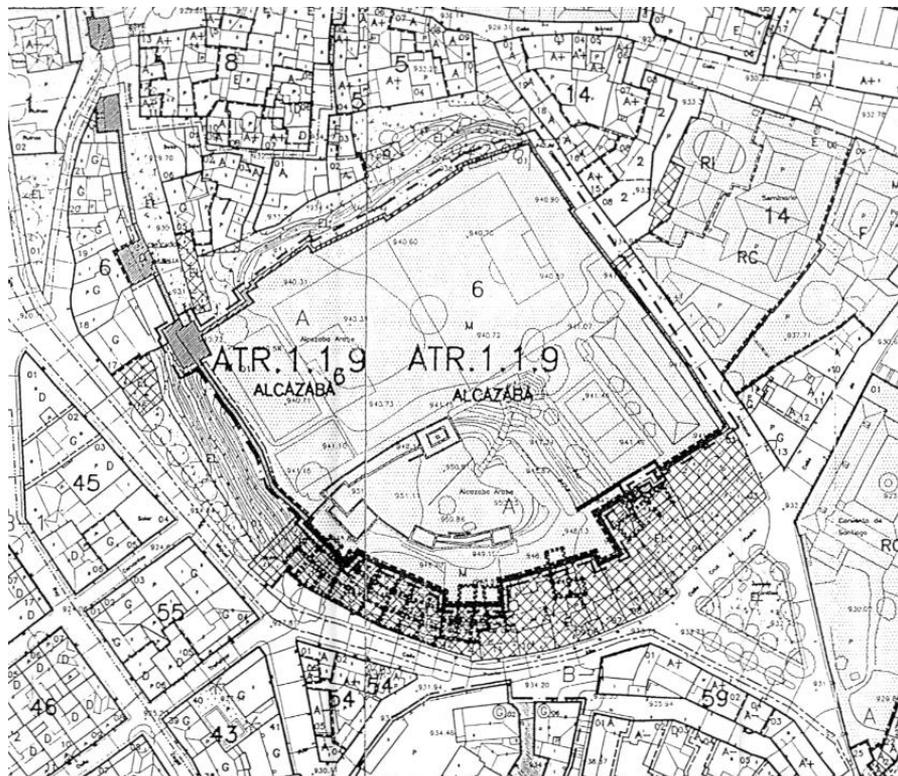
A nivel urbanístico, la alcazaba se enmarca dentro de un suelo urbano no consolidado. La manzana cerrada dispone de una Plan Especial de Protección de la Alcazaba, en el que, de acuerdo a la Delegación de Cultura, cualquier intervención sobre ella exige un desarrollo pormenorizado de actuaciones, donde contemple, entre otros, usos, intensidades, accesos, edificabilidades. En la actualidad se está desarrollando una plan urbanístico (aún sin terminar), si bien el plan vigente es del año 2002.

Entre las actuaciones significativas figura la de expropiación de las viviendas y cuevas anexas, lo que redundaría en una mejor puesta en valor. En la actualidad

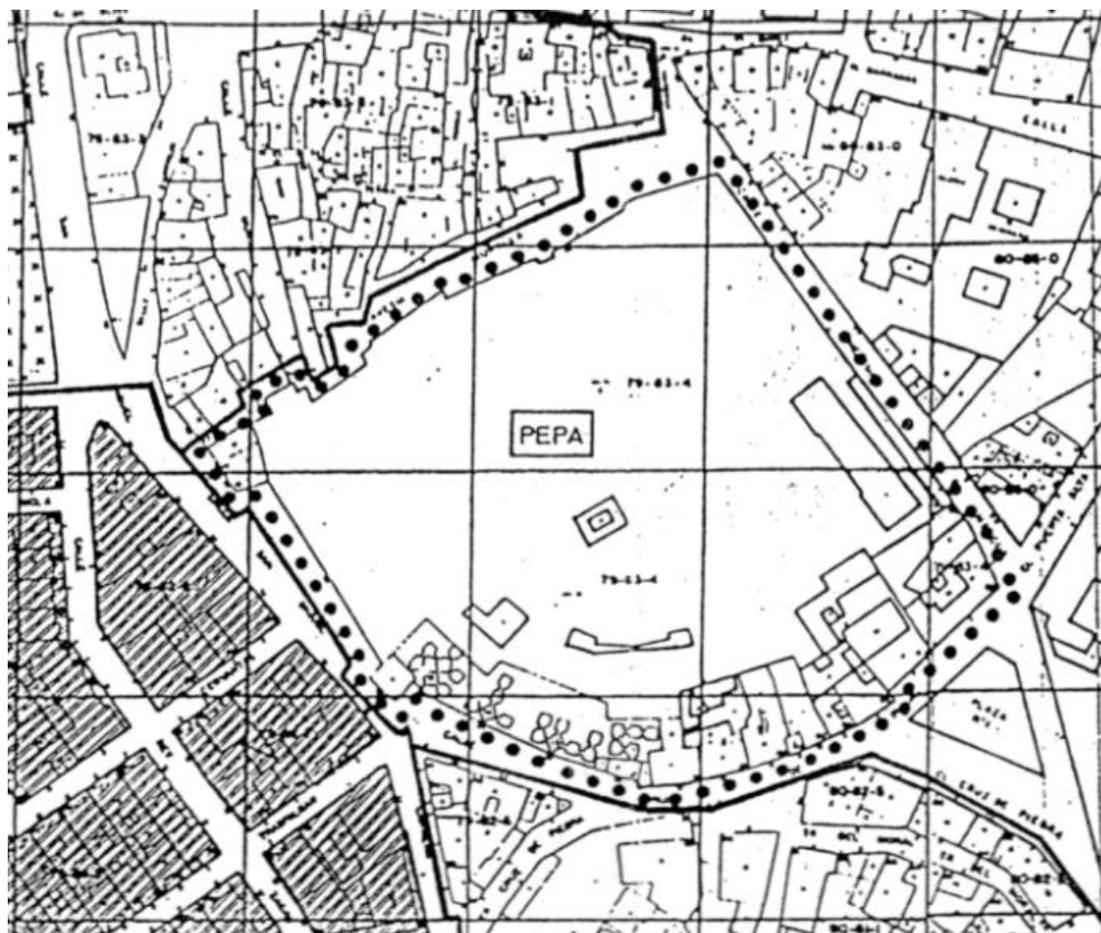
determinados edificios circundantes impiden la visión del monumento.



Las viviendas anexas a la alcazaba impiden su visualización desde el exterior. En la actualidad los edificios situados a la derecha han sido expropiados y demolidos por el Ayuntamiento. (J.A.Benavides)



El Plan Especial de Protección de la Alcazaba, delimita la parcela y prevé la expropiación de los edificios colindantes que impiden la visión desde el exterior.



Delimitación de Plan Especial de Protección del conjunto Arqueológico Alcazaba de Guadix correspondiente al año 2002, actualmente vigente.

5.3 EL ESCANER LASER TERRESTRE EN EL LEVANTAMIENTO DE LA ALCAZABA DE GUADIX

Como se ha indicado en el capítulo anterior, el proceso de escaneado de un elemento patrimonial se divide en dos fases: tareas de campo y tareas de laboratorio. Las primeras consisten en una planificación previa y en la captura metódica de las nubes de puntos y de los puntos de control topográfico. En las segundas se realizan diferentes procesos informáticos de preparación de datos, registro y procesamiento de diferentes tomas y por último la obtención de los datos necesarios para documentar el bien objeto de estudio. (Planos 2D, ortofotografías, modelos 3D, descripción de fases constructivas, etc.).

En resumen, el levantamiento con escáner láser se divide en:

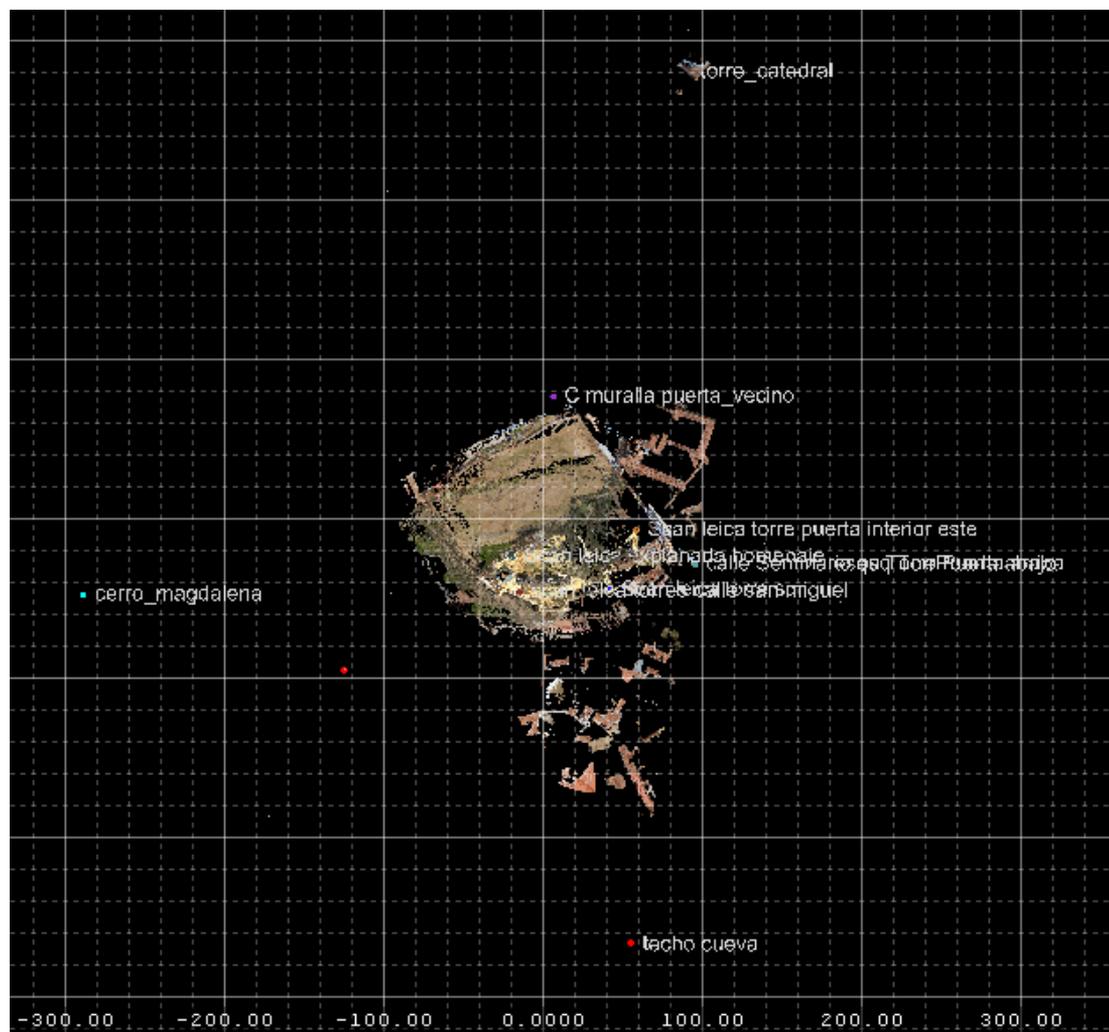
- Tareas de Campo:
 - Planificación
 - Captura de datos de escáner
 - Captura de puntos de control geométrico y georreferenciación.
- Tareas de laboratorio:
 - Filtrado, registro, alineación y modelado de datos bajo un mismo sistema de referencia
 - Elaboración de documentos gráficos necesarios para la extracción de datos relevantes para los estudios específicos o modelos 3D susceptibles de ser exportados a otras plataformas de gestión

5.3.1 TRABAJOS DE CAMPO

5.3.1.1 PLANIFICACIÓN PREVIA

Planteado el caso de estudio “Alcazaba de Guadix” se procedió a un análisis del conjunto de estructuras que la forman, tanto desde el exterior como desde el interior planteando la problemática particular respecto de su geometría, entorno, accesibilidad, visibilidad, posiciones de escaneado, posiciones de dianas reflectantes, resolución mínima requerida, horarios, etc.

En el caso de la Alcazaba de Guadix, la complejidad del entorno (calles estrechas o edificios próximos al monumento) propició que el escáner se situara en zonas elevadas con visibilidad adecuada pero situadas a cierta distancia (cerro Magdalena, Torre de la Catedral, Techo cueva). En estos casos la precisión del escáner disminuye debido a la distancia, pero ha permitido generar una geometría completa y compacta del conjunto desde tres posiciones distintas y que ha servido para apoyar el registro de otras posiciones de escáner situadas en el interior del monumento. Un dato muy importante a la hora de elegir los puntos de estacionamiento es controlar el suficiente solape entre las diferentes nubes de puntos de manera que se puedan alinear con precisión.



Localización de la posición de los escáneres en planta. Los situados en Cerro Magdalena, Torre de la Catedral y Techo cueva forman una geometría adecuada para el ajuste global y permiten la georreferenciación de otras posiciones interiores en base a ellas.



La captura desde la torre campanario de la Catedral ha requerido una compleja planificación de permisos, horarios [285] y accesibilidad de equipos

285 Cabe mencionar que el levantamiento desde la torre campanario de la Catedral estaba condicionado por los horarios del repique de las campanas.

La elección del modelo de escáner ha venido condicionado por su disponibilidad. Los instrumentos escáner laser, independientemente de la complejidad que supone su manejo, son instrumentos de un elevado coste tanto en la compra (entre 30.000 € y 90.000 €) como en el alquiler (300 €/día). Su utilización requiere una experimentación, tanto para controlar los innumerables parámetros de captura, como la cuantificación de los datos brutos obtenidos.

Para realizar el levantamiento de la Alcazaba de Guadix se han utilizado dos tipos de escáner pertenecientes a la Universidad de Granada -*Riegl Z420i*- y a la Universidad de Sevilla -*Scan Station2* [286]



Equipos de escáner utilizados: Riegl Z420i (izq) y Scan Station2 de Leica (der). La utilización conjunta en determinadas zonas nos permitió realizar análisis comparativos.

En un primer momento (año 2009) se realizó un levantamiento completo utilizando el escáner láser Riegl

286 Este instrumento perteneciente al Dpto. de Expresión Gráfica en la Ingeniería de la Universidad de Sevilla fue gestionado por el profesor José Antonio Barrera Vera.

Z420i [287], que con un alcance del rayo de hasta 700 metros dispone de una precisión de 10mm a 50m, (Riegl 2008). El campo visual es de 360° en barrido horizontal cuando el eje de giro es vertical, estando limitada a 80° en barrido vertical.

En una segunda fase (julio de 2010) se realizaron mediciones adicionales que completaran el modelo inicial y que nos permitieran establecer un análisis comparativo de precisión, rendimiento y calidad del modelo obtenido a partir de mediciones simultáneas con los dos instrumentos, realizándose además un levantamiento completo de la excavación arqueológica de la esquina noreste, donde se situaba la torre-puerta de acceso desde la medina.

En una tercera fase (año 2011), el Dpto. de Expresión Gráfica Arquitectónica y en la Ingeniería de la Universidad de Granada adquiere el escáner laser Leica Scan Station2, realizando levantamientos complementarios de zonas complejas que no habían sido registradas anteriormente: pasillo interior y buhedera de Torre puerta, interior cubierta de torre puerta y medición completa de las murallas de las calles Amezcua y Muralla, entre otros.

En la planificación del levantamiento con escáner es necesario tener en cuenta: La elección de las posiciones del escáner de acuerdo al elemento a documentar y el alcance del láser; campo de acción y resolución angular requerida; elección del objetivo fotográfico para la captura de la imagen; localización y posicionado de los puntos de apoyo (reflectores) necesarios para la georreferenciación y enlace de los diferentes escaneados.

287 Instrumento Riegl Z420i propiedad de la Universidad de Granada y gestionado por el Centro de Instrumentación Científica a través del Laboratorio de Análisis de Imagen (LAI-UGR)

5.3.1.2 DEFINICIÓN DEL AREA DE ESCANEO

Aunque todos los escáneres del mercado disponen de la opción de escaneo completo 360º, lo lógico es poder definir un área de escaneo que evite pérdidas de tiempo y la grabación de datos innecesarios. Esta área

se puede definir gráficamente a partir de un panorama desplegado de imágenes capturadas por la cámara o a través de la imagen 2D obtenida de un escaneo ultrarápido (apenas tarda 10 segundos) de todo el entorno.

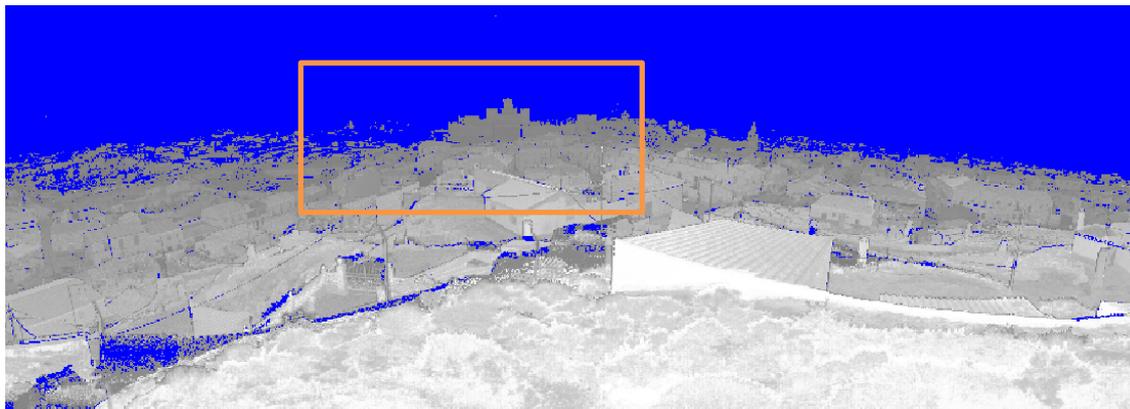
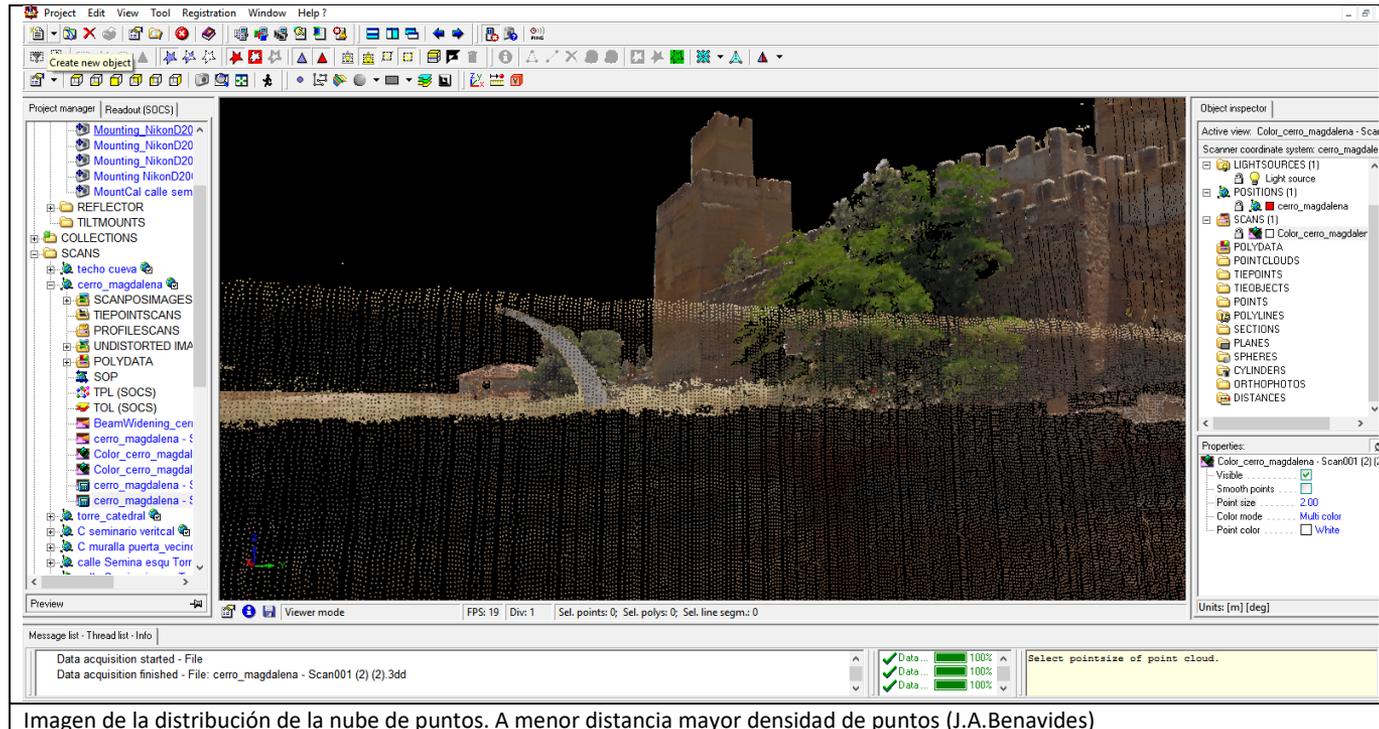


Imagen 2d del escaneo 360º a baja resolución mediante ensanchamiento del haz. (Tiempo aprox. 10 seg.). Sobre esta imagen se define el área de escaneo pudiendo medir sobre ella de forma aproximada la distancia escáner-objetos definiendo la resolución angular deseada. (J.A.Benavides)

5.3.1.3 APTURA DE DATOS CON ESCANER

De acuerdo a las dimensiones y complejidad del entorno de la Alcazaba de Guadix se han planificado, en cada caso, diferentes posiciones de escaneo al objeto de disponer de toda la información relevante para el estudio.

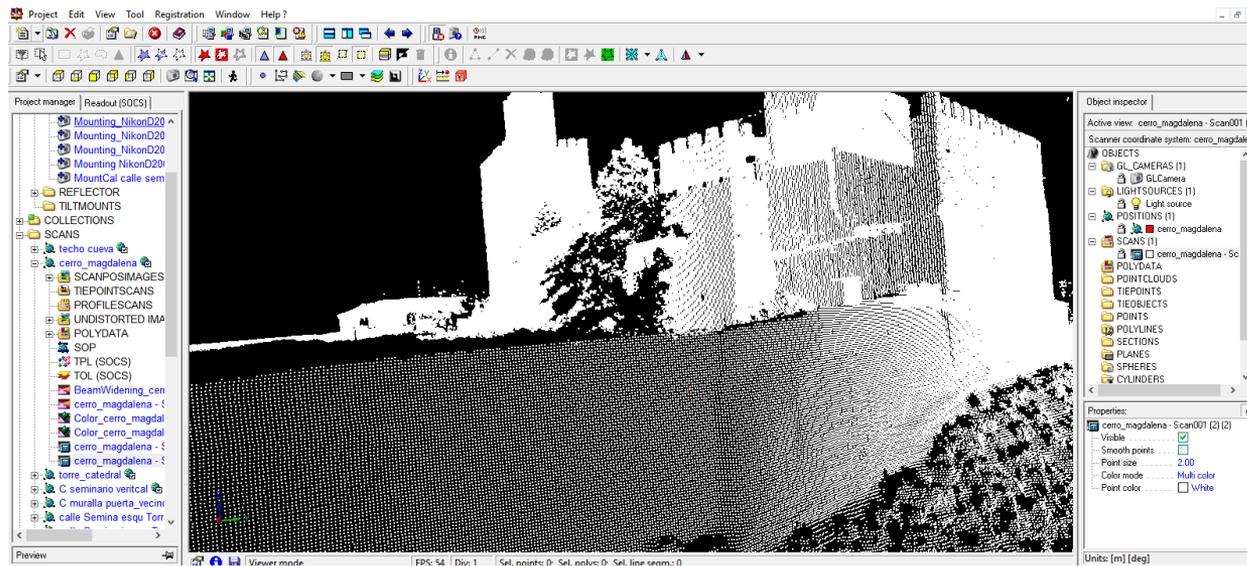
Tras diversas experimentaciones sobre edificios patrimoniales proponemos un método que consiste en realizar varios escaneados desde la misma posición del escáner: uno general a una resolución óptima para el conjunto (entre 2 a 5 cm dependiendo del tamaño del objeto) y otros de detalle en aquellas zonas donde así lo requiera con resoluciones entre 5mm y 10 mm, consiguiendo de esta forma una nube de puntos multi-resolución en zonas determinadas. La morfología simple de los paramentos y la ausencia de elementos decorativos propicio la realización de capturas únicas sin multiresolución.



La resolución de la nube de puntos para las tomas generales exteriores se fijó en 4 cm para las zonas más lejanas siendo de 2'5 cm en las más próximas. Esta resolución resulta excesiva para un monumento de estas magnitudes teniendo en cuenta además que las zonas

con solape dispondrán del doble o triple de información. Para solucionar este problema se procede a un filtrado mediante *software*, depurando el número de puntos por centímetro cuadrado, mediante algoritmos para construcción de *Octree* [288]

288 Octree: Estructuras para dividir el espacio tridimensional.



Visualización del filtrado de puntos para homogeneizar su densidad. (J.A.Benavides)

Determinados los parámetros en relación al área a registrar y resolución óptima, se procede al escaneado o captura de puntos. El control del escáner y el registro de los puntos se realiza sobre un ordenador portátil de alta capacidad conectado al equipo TLS a través de un cable de red que permite la visualización en tiempo real del modelo 3D. Este proceso es totalmente automático sin que se pueda interrumpir momentáneamente para el paso de personas o vehículos. Cualquier objeto que en ese momento se interponga entre el escáner y el objeto quedará registrado, produciendo puntos intermedios y una sombra sobre el modelo. Los dos equipos de escáners empleados utilizan la tecnología de “tiempo de vuelo” por lo que, en cada estacionamiento realiza dos pasadas: una primera para capturar la nube de puntos y una segunda para capturar a mayor resolución de las dianas o puntos de control. La duración aproximada en cada posición de escaneo fue de 40 minutos sin contar el tiempo de desplazamientos y montaje.



Imagen de dianas utilizadas en la Alcazaba de Guadix. (J.A.Benavides)

La especial reflectividad de las dianas permite al escáner detectarlas y proceder de forma manual o automática a un nuevo escaneado con mayor resolución. La posición geométrica detectada permite identificarlas automáticamente respecto de los registros de otras posiciones de escáner. En el trabajo de campo, este proceso suele plantear problemas a detectar el escáner puntos de parecida reflectividad pero que no son

puntos de control (matrículas de vehículos, señales de tráfico, carpinterías de aluminio, etc.) obligándonos a revisar todos los elementos detectados y anular los no válidos.



Escaneado desde *cerro Magdalena* mediante equipo Riegl LMS-Z420i. Escáner de “Tiempo de Vuelo” con un alcance efectivo de 700 m.

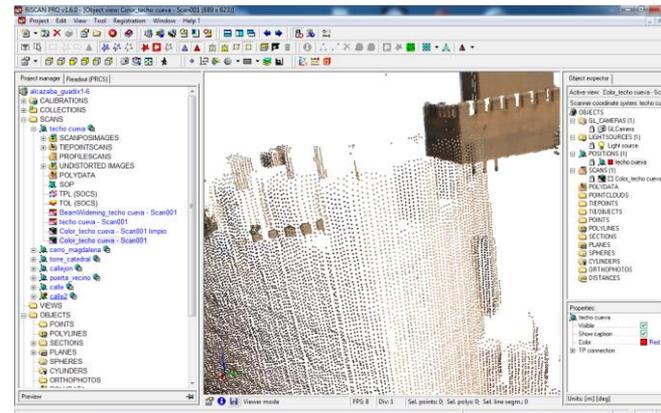


Captura general realizada desde el exterior con el equipo de escáner Riegl LMS-Z420i. *Scan 1 Cerro techo Cueva*

En la captura desde la posición de escaneo 1 “*Techo Cueva*” se obtuvieron un total de 2.759.428 puntos de acuerdo a la resolución angular de paso de banda de 0,012 g, tanto en vertical como en horizontal, es decir

se ha generado una retícula de 973 puntos en vertical por 2836 puntos en horizontal. Teniendo en cuenta que la distancia media entre esta posición de escáner y los elementos medidos de la Alcazaba es de 230 metros y con una resolución angular del paso de banda de 0,012 g, obtenemos una distribución superficial media de los puntos sobre las estructuras de las torres de unos 4 centímetros.

Esta distribución superficial media de aproximadamente 4 o 5 centímetros es válida para obtener una visión general del monumento a escala pequeña, pero no es útil para una documentación métrica de precisión. En la imagen siguiente observamos que al acercarse al modelo es imposible deducir con una mínima precisión la geometría de las estructuras.



El aumento de escala al acercarnos al modelo provoca la separación de los puntos impidiendo la definición de su geometría.

En el caso de que deseemos aumentar la resolución angular para obtener una malla más densa de puntos nos encontramos con el doble inconveniente de:

- El tiempo de captura aumenta aproximadamente de forma proporcional al aumento de la resolución, es decir una resolución doble de la anterior

(2'5 cm) implicaría un tiempo de captura doble, aproximadamente 24 minutos y que en el caso de que deseáramos una precisión centimétrica el tiempo estaría en torno a los 50 minutos.

- El tamaño del fichero aumenta exponencialmente a su resolución. Es decir, para el mismo campo de captura y una resolución angular doble, (de 0,006 g), se obtiene una resolución aproximada de 2 centímetros sobre las superficies de las estructuras a esta distancia, lo que provocaría una nube de puntos del orden de once millones de puntos (1946

puntos de barrido vertical por 5672 puntos de barrido horizontal). En el caso de que la resolución fuera centimétrica el tamaño aumentaría hasta aproximadamente cuarenta y cuatro millones de puntos (3892 vertical x 11344 horizontal= 44.150.848 puntos).

Por tanto, uno de los procesos más importantes a analizar en la captura de datos con escáner será elegir la resolución media adecuada de la nube de puntos de acuerdo a las necesidades de la investigación, compaginando precisión-tiempo y tamaño de los ficheros de datos.



Captura general realizada desde el exterior con el equipo de escáner Riegl LMS-Z420i. Scan 2 Cerro Magdalena



Captura general realizada desde el exterior con el equipo de escáner Riegl LMS-Z420i. Posición *Scan3 Torre Catedral*. (J.A.Benavides)



Scan 4, 5 y 6. Diferentes posiciones de escaner en la calle Amezcuea.(J.A.Benavides).

5.3.1.4 GEORREFERENCIACIÓN Y AJUSTE DEL MODELO A PARTIR DEL APOYO TOPOGRÁFICO CON ESTACIÓN TOTAL

La georreferenciación, orientación y ajuste fino de los modelos de escáner necesitan obligatoriamente de la medición precisa de los puntos de apoyo mediante Estaciones totales topográficas (precisión milimétrica), apoyadas en bases pertenecientes a una poligonal cerrada o puntos georreferenciados medidos mediante el sistema de posicionamiento global.



Medición de los puntos de control (dianas) mediante apoyo topográfico con Estación Total.

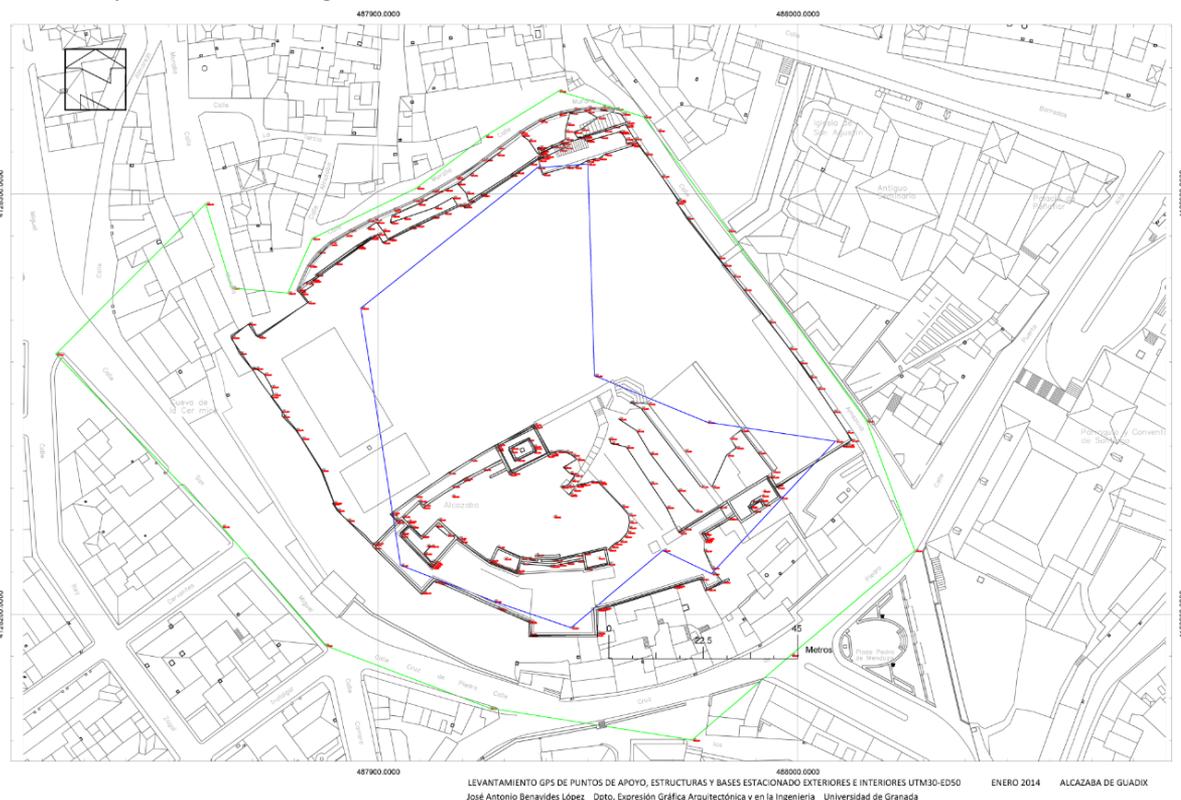


Imagen de los puntos base y puntos de apoyo y levantamiento de la Alcazaba de Guadix realizados con instrumento GPS e Estación Total. La línea azul se corresponde con el itinerario interior cerrado. La línea verde se corresponde con el itinerario cerrado exterior. (J.A.Benavides)

5.3.3 TRABAJOS DE LABORATORIO

Para poder procesar tan enorme cantidad de datos se realiza una copia a un equipo de sobremesa más potente y con mayor capacidad de almacenamiento. Se aconseja mantener los originales como copias de seguridad. El formato de descarga varía de unos equipos a otros pero básicamente cada punto medido contiene sus coordenadas cartesianas, el valor de reflectividad y los valores de textura RGB. La experiencia nos recomienda que este proceso se realice el mismo día que se han tomado los datos pues la memoria a corto plazo nos ayuda reordenar los ficheros capturados, eliminando los que son erróneos.

El primer trabajo de procesamiento consiste en importar la nube de puntos y revisar sus datos eliminando aquellos debido al ruido de la señal o mala reflectividad.

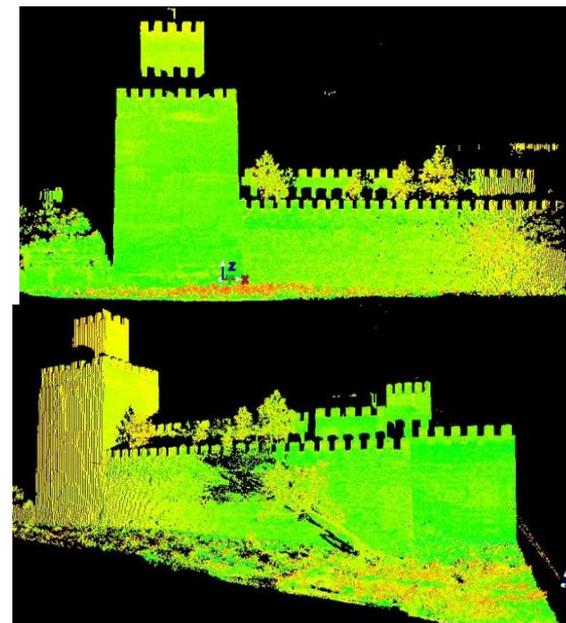
X	Y	Z	REF	R	G	B
1.666153	10.151901	2.828812	-174	134	114	83
1.665421	10.147263	2.840378	-455	128	109	79
1.681839	10.161484	2.841415	-571	123	106	77
1.667130	10.157883	2.817490	-220	147	124	87
1.683182	10.169907	2.819809	-387	137	117	80
1.684219	10.175827	2.834518	-327	129	108	76

Ejemplo de estructura de datos de la nube de puntos capturada por el escáner. Coordenadas x,y,z, referidas al sistema de referencia del escáner, el valor reflectividad o intensidad de retorno y color de textura de pixel definido por los niveles R (red) G (Green) B (blue). (J.A.Benavides)

Las nubes de puntos pueden ser mostradas mediante diferentes visualizaciones para un mejor filtrado de datos: Reflectividad en intensidad de grises; reflectividad coloreada; texturizado en color (RGB) a partir de imagen.



Imagen de la nube de puntos capturada por el escaner. Las intensidades de gris se corresponden con la intensidad de la reflectividad del rayo laser. (J.A.Benavides)



Imágenes de la nube de puntos coloreada de acuerdo a los niveles de reflectividad del rayo laser. Las dos imágenes se corresponden con la misma estructura escaneada desde posiciones diferentes. La diferente reflectividad, en una misma zona, nos indica que este parámetro está condicionado por varios factores: ángulo de incidencia, distancia al objeto, tipo de material, textura, color, etc. (J.A.Benavides)

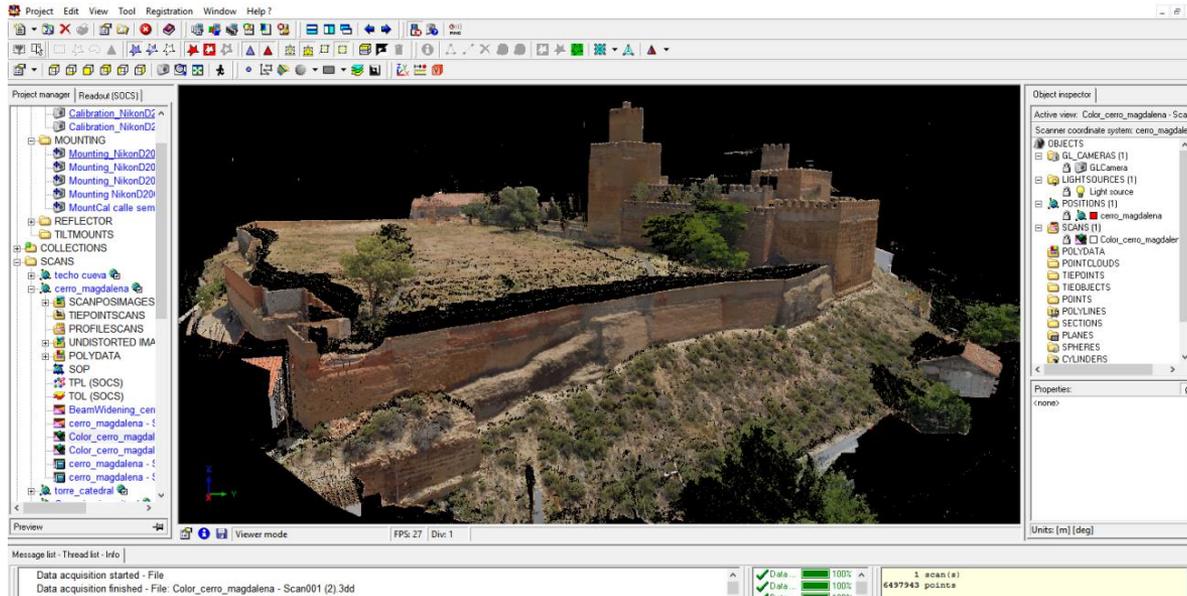
La aplicación de la textura real (RGB) sobre el modelo de puntos de la nube requiere la captura de imágenes mediante cámara fotográfica interna o externa. Determinados modelos de escaner como el Scan Station-2 de Leica utilizado en la Alcazaba de Guadix incorporan una cámara interna calibrada que permite

aplicar la textura sobre las nubes de puntos. Estas cámaras tienen la ventaja de estar calibradas y coaxiales con el eje óptico del escáner por lo que no se produce paralaje, pero presentan ciertos inconvenientes que hacen que deban ser sustituidas por cámaras externas situadas sobre el escáner o en lugar de él. La captura automática de las imágenes, sin control por parte del operador, hace que cada imagen aparezca con una exposición diferente provocando importantes contrastes entre imágenes consecutivas o incluso que no sean visibles por estar sub o sobreexpuestas. Por otro lado, al objeto de evitar las deformaciones radiales, realiza una captura de multitud de pequeñas imágenes con muy poca resolución (1 Mgb) formando un mosaico esférico que se corresponde con la nube de puntos capturada. Por este motivo, en el apartado *Texturizado de la nube de puntos* se detalla un nuevo proceso para la captura de imágenes que mejoran considerablemente los resultados.



Visualización de nube de puntos texturizada a partir de las imágenes capturadas por la cámara interna. Escáner Scan Station2-Leica. (J.A.Benavides)

La importante mejora del texturizado del modelo que aporta la captura controlada con cámara reflex situada sobre el escáner o en sustitución de este, hace que el proceso metodológico se complique, necesitando entre otros, la calibración previa de la cámara. Estos datos de calibración incluyen: modelo de la cámara, dimensiones de las imágenes en píxeles, longitud focal de la lente y determinación del punto principal o centro de proyección de la imagen sobre el sensor CCD y el cálculo de las distorsiones radiales y tangenciales. Además, se necesita información sobre la posición y la orientación de la cámara respecto del escáner, de forma que se pueda aplicar correctamente el color del píxel sobre el punto homólogo de la nube de puntos o superficie 3D. Los sistemas calibrados de montaje superior de la cámara proporcionan información sobre la posición y orientación de esta respecto del escáner, sin embargo, en la práctica, la distorsión de la lente y errores de ajuste en el sistema de montaje provocan pequeños desplazamientos imagen-modelo, que son necesarios corregir. El proceso de calibración interna y externa se ha explicado más adelante en el apartado *Calibrado de cámara y alineación de imágenes respecto del modelo*



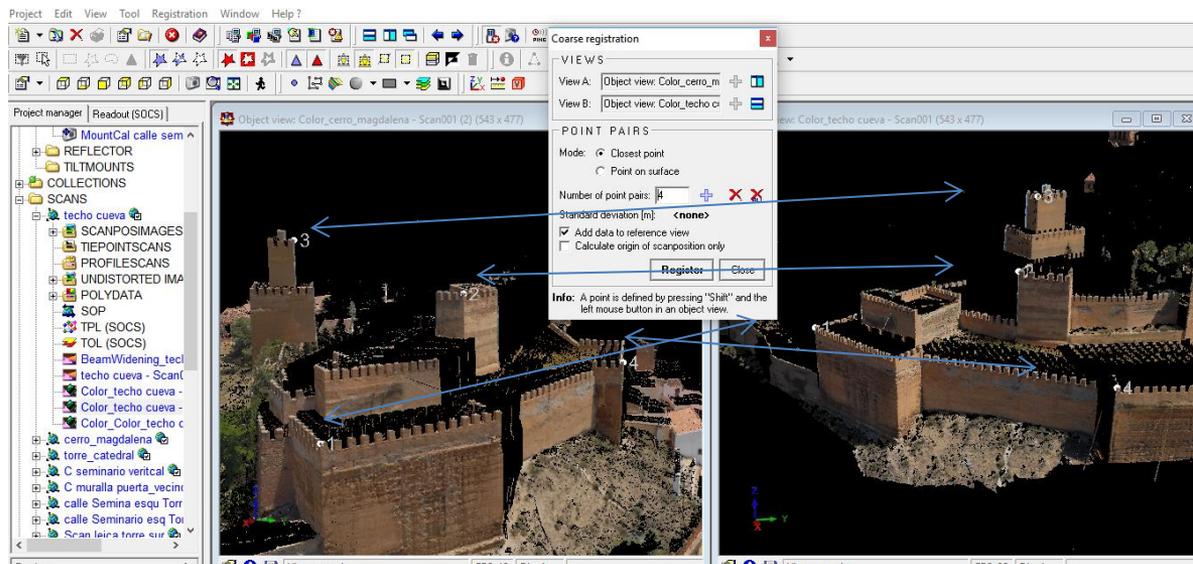
Nube de puntos texturizada a partir de las imágenes capturadas con cámara externa fijada y alineada al escaner. Al existir control por parte del operador, las imágenes son de buena calidad. Suelen presentar problemas de alineaciones del eje de colimación de la cámara con el eje de captura del escaner que son necesarios corregir en post-proceso. (J.A.Benavides)

5.3.3.1 ALINEACIÓN O REGISTRO DE NUBES DE PUNTOS

Cada posición de escáner posee su propio sistema de referencia. Para poder georreferenciar y unificar todos los escáneres bajo un mismo sistema de referencia (personal o universal) se requiere su alineación y registro. Este proceso se puede llevar a cabo a través de métodos indirectos (alineación de nubes de puntos entre sí o a partir de puntos de control) o mediante métodos directos consistentes en la alineación de las nubes de puntos a partir de los puntos de apoyo topográfico. La experimentación realizada nos ha demostrado que un ajuste múltiple formado por ambos métodos mejora considerablemente la precisión.

Debido a la enorme cantidad de datos que deben analizar para el ajuste preciso de las nubes de puntos se recomienda seguir el siguiente proceso:

- Alineación o registro bruto *Coarse registration* de dos capturas diferentes a partir de 4 puntos de geometría clara. Si bien, tres puntos son suficientes para el ajuste, un cuarto punto nos proporcionará los valores estadísticos de desviación. Este ajuste se realiza mediante la técnica llamada "ICP" (*Iterative Closest Point*) siempre que haya solape suficiente entre ambas nubes de puntos
- De igual modo se podría realizar este ajuste mediante el método "*Diana-Diana*", consiguiendo mejores resultados debido a la mayor precisión con la que estos puntos son medidos, pero siempre y cuando se disponga de una buena geometría en los diferentes planos para su correcto ajuste mediante ICP. En las imágenes siguientes se muestran los puntos de control detectados en dos nubes de puntos a registrar



Alineación o ajuste bruto de dos nubes de puntos mediante emparejamiento de puntos homólogos de geometrías claras con suficiente solape. Se han utilizado 4 puntos de ajuste en diferentes planos y alturas.



Imagen resultado del ajuste bruto ICP entre las nubes de puntos "Cerro Magdalena" y "Techo cueva" de la alcazaba de Guadix.



Vista desde el oeste del modelo 3D de la Alcazaba con aplicación de textura con cámara externa. (J.A.Benavides)

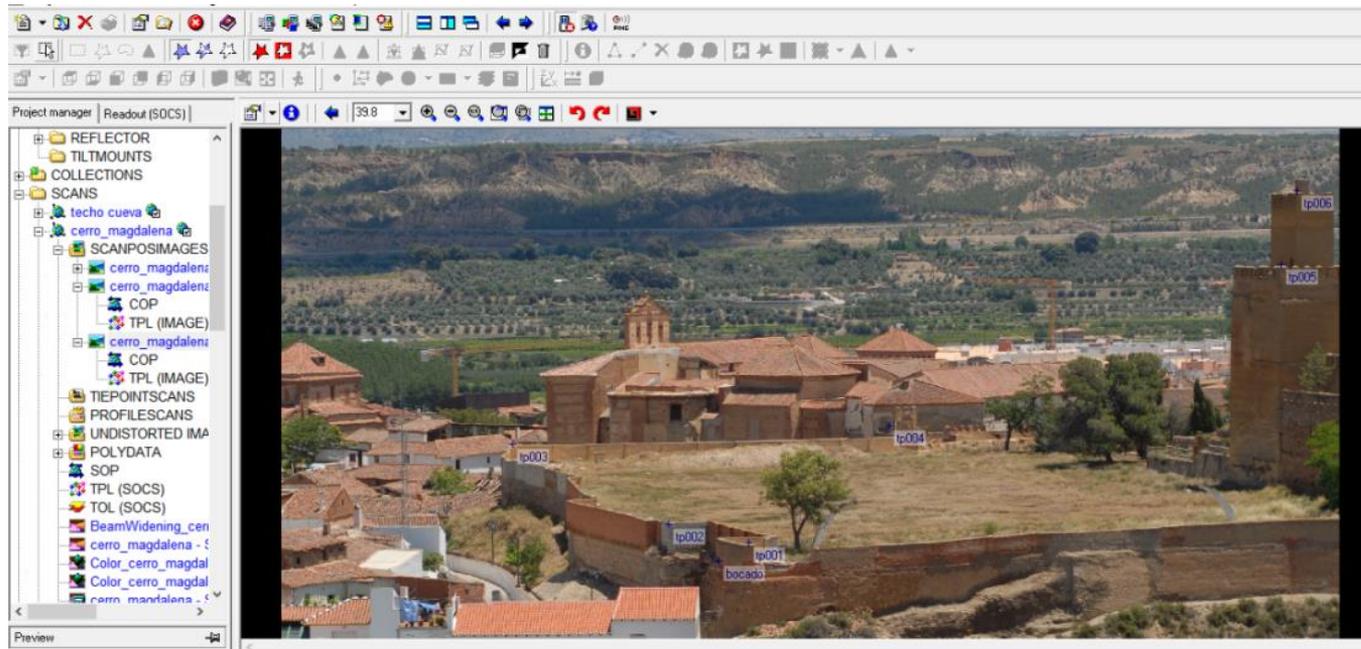


Imagen de los puntos de control (dianas) capturadas desde la posición de escáner Cerro Magdalena. (J.A.Benavides)

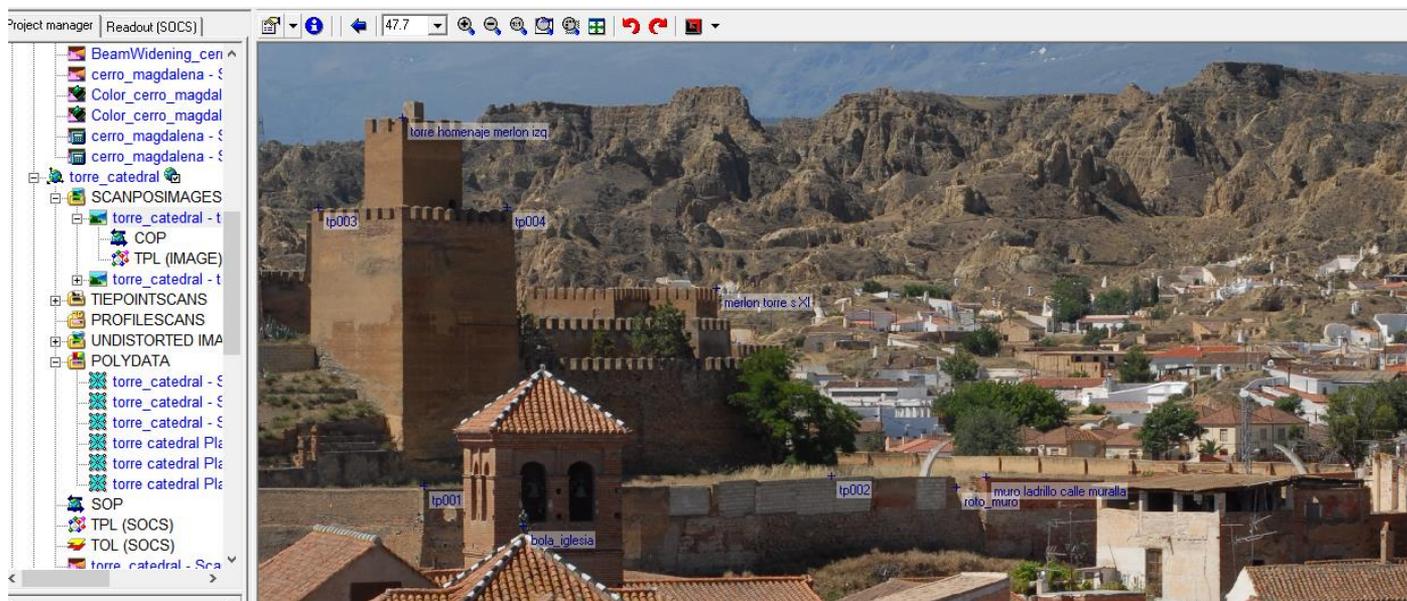
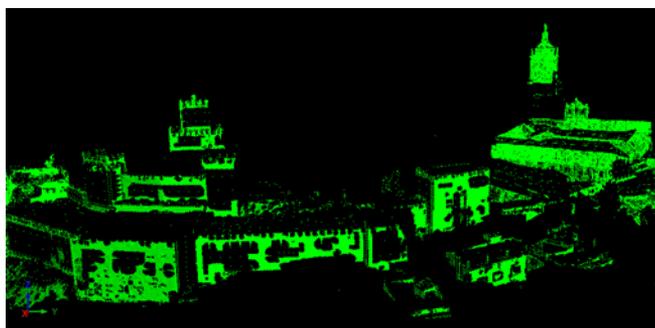


Imagen de los puntos de control (dianas) capturadas desde la posición de escáner Torre de Catedral. (J.A.Benavides)

Otro método de registro llevado a cabo consiste en un ajuste por mínimos cuadrados a partir de las zonas comunes capturadas desde al menos dos nubes de puntos. Para realizar este proceso, el *software* analiza y ajusta las superficies trianguladas generadas a partir de las nubes de puntos.



Polydata generado por filtrado plano (5 mm) de la nube de puntos correspondiente al escáner "techo cueva" formado por 31430 puntos y 9097 polígonos. (J.A.Benavides)



Polydata generado por filtrado plano (2 cm) de la nube de puntos correspondiente al escáner "techo cueva" formado por 54079 puntos y 23483 polígonos. (J.A.Benavides)

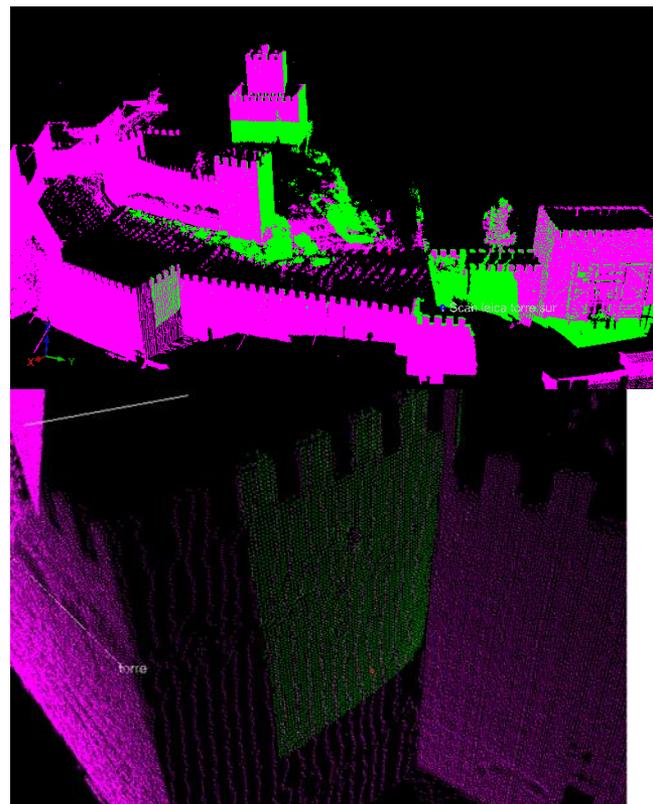


Imagen de solape de dos nubes de puntos a partir del ajuste por mínimos cuadrados de sus superficies (izq). En la imagen derecha se muestra la diferente densidad de puntos sobre las superficies debido a la distancia escáner-objeto y al ángulo de incidencia del rayo. (J.A.Benavides)

Como ya he indicado el mejor proceso de ajuste se ha conseguido al combinar todos estos sistemas a través de una misma orden "Multi-ajuste". Esta, permite procesar y alinear 2 o más escaneados simultáneamente. Para un mejor control del proceso, recomendamos hacer los ajustes encadenados de dos en dos y posteriormente reprocesarlas juntas.

Multi Station Adjustment

Input | Results | Switch to page 'Results' automatically

SCAN POSITIONS TO ADJUST Display mode: Show parameters

Name	X	Y	Z	Roll	Pitch	Yaw
<input type="checkbox"/> C muralla puerta_vecino	944.018	328.596	938.128	-2.216	21.192	85.121
<input type="checkbox"/> C seminario vertical	957.284	323.888	937.155	-165.911	-87.135	-170.094
<input type="checkbox"/> Scan leica explanada homenaje	918.742	228.523	955.397	0.367	-0.186	43.460
<input type="checkbox"/> Scan leica torre homenaje abajo	934.106	294.163	946.188	-0.014	-0.206	151.803
<input type="checkbox"/> Scan leica torre puerta interior e...	995.999	245.161	946.013	-0.075	-0.191	175.508
<input type="checkbox"/> Scan leica torre sur	979.530	209.178	952.455	0.070	0.021	2.012
<input type="checkbox"/> calle Semina esq Torre Puerta...	1032.5...	223.883	936.328	3.478	19.529	-25.552
<input type="checkbox"/> calle Seminario esq TorrPuerta...	1032.4...	223.789	936.342	4.679	10.983	-21.872
<input checked="" type="checkbox"/> cerro_magdalena	650.633	204.846	963.721	-0.303	-3.278	175.363
<input type="checkbox"/> scan leica torres calle san mig...	922.946	206.940	952.494	-0.186	-0.060	-119.469
<input checked="" type="checkbox"/> techo cueva	993.304	-12.443	962.371	0.589	-8.586	-87.814
<input type="checkbox"/> torre_catedral	1028.8...	531.208	950.974	0.603	-1.728	48.015

O B J E C T S of cerro_magdalena

Name	Type	Weight	Remarks
<input type="checkbox"/> PRC5_001	tiepoint	1.0	Deactivated
<input checked="" type="checkbox"/> PRC5_002	tiepoint	1.0	No link
<input type="checkbox"/> PRC5_003	tiepoint	1.0	Deactivated
<input type="checkbox"/> PRC5_004	tiepoint	1.0	Deactivated
<input type="checkbox"/> PRC5_005	tiepoint	1.0	Deactivated
<input checked="" type="checkbox"/> PRC5_010	tiepoint	1.0	Deactivated
<input type="checkbox"/> PRC5_006	tiepoint	1.0	Deactivated
<input checked="" type="checkbox"/> SOCS_008	tiepoint	1.0	No link
<input type="checkbox"/> PRC5_007	tiepoint	1.0	Deactivated
<input type="checkbox"/> PRC5_008	tiepoint	1.0	Deactivated
<input type="checkbox"/> ALMENA	tiepoint	1.0	No link
<input checked="" type="checkbox"/> ESQUINA	tiepoint	1.0	No link
<input checked="" type="checkbox"/> ESQUINA2	tiepoint	1.0	No link
<input type="checkbox"/> bocado	tiepoint	1.0	No link
<input checked="" type="checkbox"/> Cerro Magdalena Plane filter data 2 cm.	polydata ob...	1.0	
<input checked="" type="checkbox"/> Polydata Cerro Magdalena Plane filter d...	polydata ob...	1.0	

Units: [m, [deg]

INPUT DATA

Ignore tiepoints. | 1

Use tieobjects. | 1

Use polydata objects. | 1

Ignore measured scan positions. | 1

PARAMETERS

Nearest point search:

Mode: all nearest points (recommended)

Search radius [m]: 0.500

Max. tilt angle [deg]: 5.000

Adjustment:

Min. change of error 1 [m]: 0.1000

Min. change of error 2 [m]: 0.0050

Outlier threshold [1]: 2

Calculation mode: least square fitting

Update display: seldom (recommended)

ADJUSTMENT

Adjust range offset [m]: 0.000

Adjust theta offset [deg]: 0.000

Tie points: 2D mode (ignore range - EXPERIMENTAL).

Time running: 00:00:04

Current action: Finished.

STATISTICS

Error (StdDev) [m]: 0.0573

Number of observations used for calculation:

Tiepoints:	Tieobjects:	Polydata:	Scan pos.:
0	0	12685	0

Save calculation statistics to file (*.csv)...

Analyse Calculate

>> Minimize Undo last Undo all

Help Close

Alineación o registro de la nube de puntos “Techo cueva” respecto del modelo considerado origen “Cerro magdalena”. En la zona superior del cuadro se muestra la secuencia de multiajuste de 2 o más escaneados a partir de los objetos de referencia (zona inferior del cuadro): puntos de control (dianas, puntos de geometría singular) y polidatos formados por puntos y superficies. (J.A.Benavides)

Este ajuste realiza un análisis previo en el que se indica la desviación estándar entre los dos modelos, indicando la bondad de este. Posteriormente se procederá al ajuste fino a partir del reajuste de las nubes de puntos, mejorando los resultados ostensiblemente.

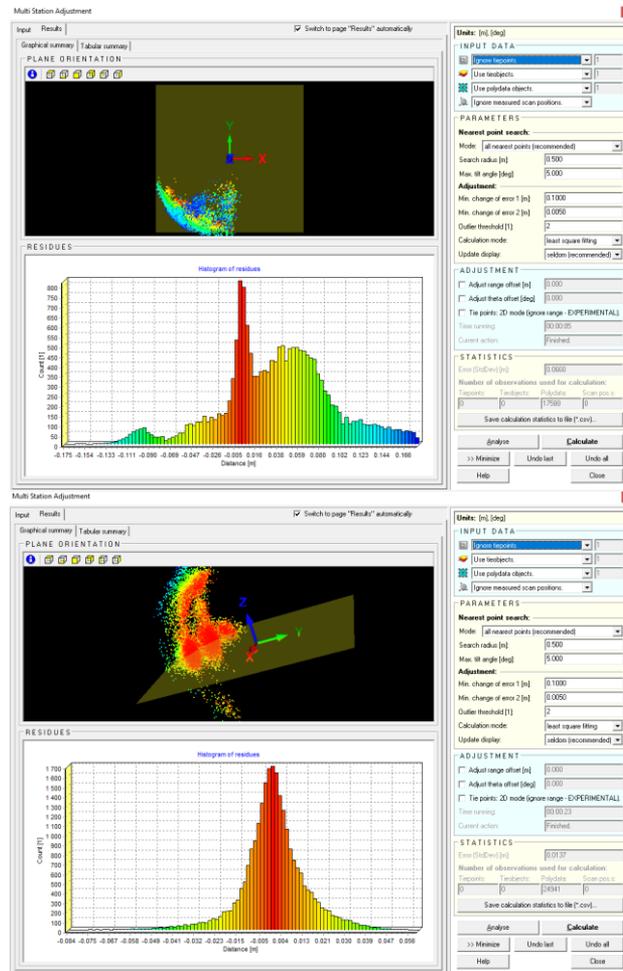


Imagen del análisis previo y final de la desviación estándar entre las nubes de puntos "Cerro Magdalena" y "Techo Cueva". RSD previo 0.066 m (izq). RSD final 0.0137 m (der)



Modelo final registrado: perspectiva noroeste (izq) y sureste (der)

Este primer modelo exterior, perfectamente ajustado, ha servido de base para la alineación de los múltiples modelos capturados desde el interior del recinto, donde su compleja geometría y falta de visibilidad provoca grandes errores en el proceso de registro. En estos casos resulta más preciso y eficiente realizar el ajuste a partir de las coordenadas de los puntos de apoyo topográfico registrados previamente.

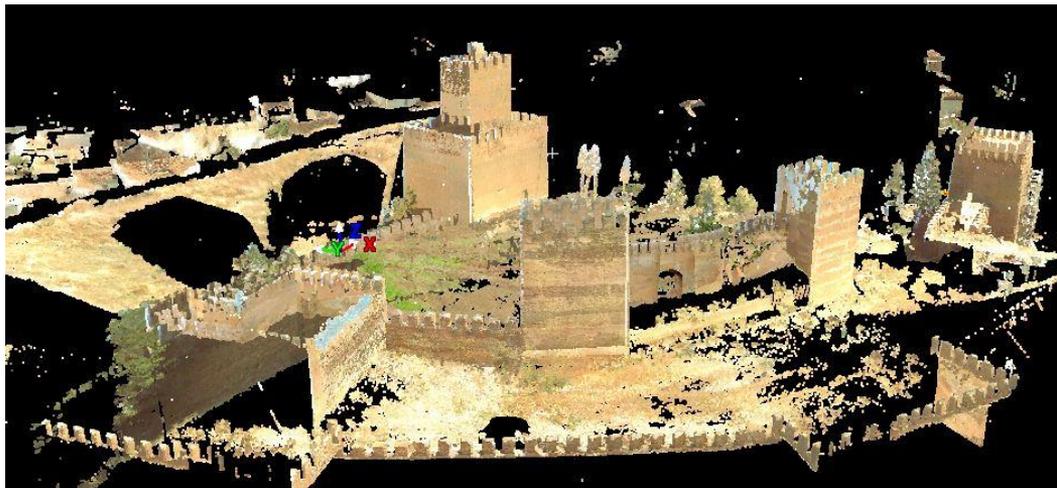


Imagen de los escáneres internos realizados con el equipo Leica Scan Station2. El registro se realizó en base al ajuste de los escáneres exteriores y de los puntos de control topográficos, donde no existe suficiente solape.

PROCESADO DEL MODELO DE ESCANER: OBTENCIÓN DE RESULTADOS

Conseguido el registro de todos los escáneres procedemos al procesado del modelo para obtener datos relevantes para la investigación. Estos resultados se pueden conseguir a partir de la visualización directa de las nubes de puntos, mediante la realización de vistas en planta, alzados, secciones y/o perspectivas) o por el contrario al partir superficie de malla (TIN)



Alzado oeste de la nube de puntos de la Alcazaba de Guadix obtenida a través de Autodesk Revit

Generalmente, las nubes de puntos capturadas por el escáner tienen una resolución suficiente para ser visualizadas a una escala de representación adecuada. La posibilidad de ampliación ilimitada de la imagen que ofrecen los programas de CAD nos muestra las limitaciones del modelo capturado para obtener detalles.

La realización de modelos 3D de superficie mediante mallas implica un trabajo adicional importante que además de lento produce resultados poco gratificantes. Los requerimientos de hardware y los tiempos de proceso aumentan considerablemente, razón por la cual, cada día más se intenta trabajar directamente con las nubes de puntos. Los programas actuales de CAD [289] incorporan ya la utilización de estos datos como elemento de apoyo al diseño gráfico.

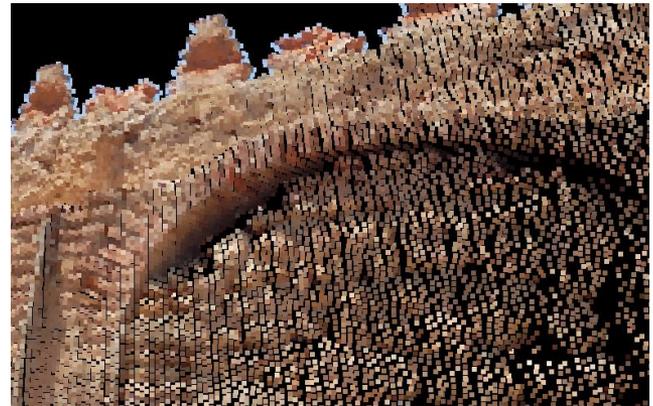
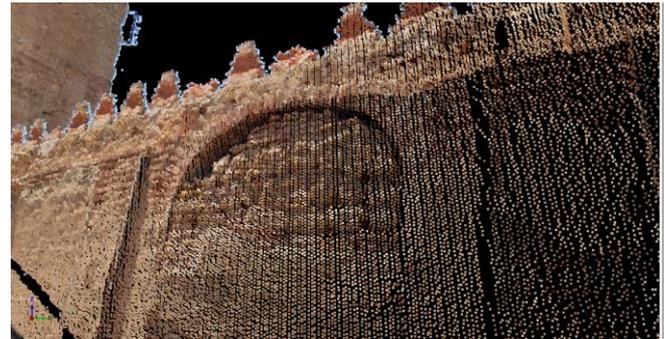
Los puntos, geoméricamente definidos, empiezan a separarse debido al aumento de escala, haciendo que el modelo se vuelva transparente e imposibilitando el trabajo sobre él.

289 CAD. Acrónimo de Diseño Asistido por Ordenador.



Nube de puntos capturada desde la esquina Sureste de la Alcazaba. La vista alejada proporciona una imagen que, aparentemente, dispone resolución fotográfica. En la imagen derecha se observa que al aumentar la escala, los puntos se separan, dejando de tener continuidad e impidiendo observar sus formas.

Una forma de intentar solucionar este problema consiste en aumentar el tamaño del punto consiguiendo que se conecten entre ellos hasta empastar la superficie. Valores demasiado altos producen efectos más artísticos que realísticos.



Una solución intermedia consiste en aumentar el tamaño de los puntos de la nube provocando un mayor relleno.

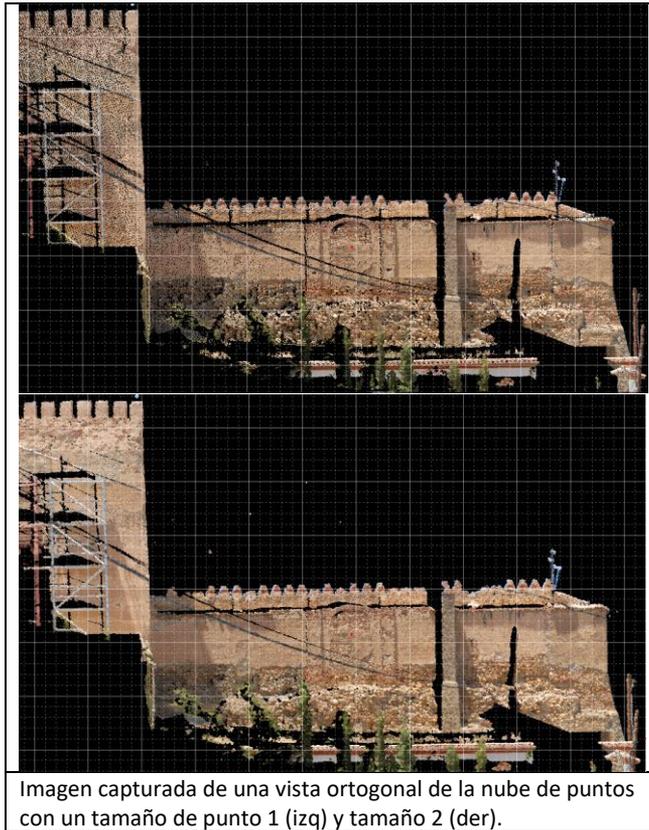


Imagen capturada de una vista ortogonal de la nube de puntos con un tamaño de punto 1 (izq) y tamaño 2 (der).

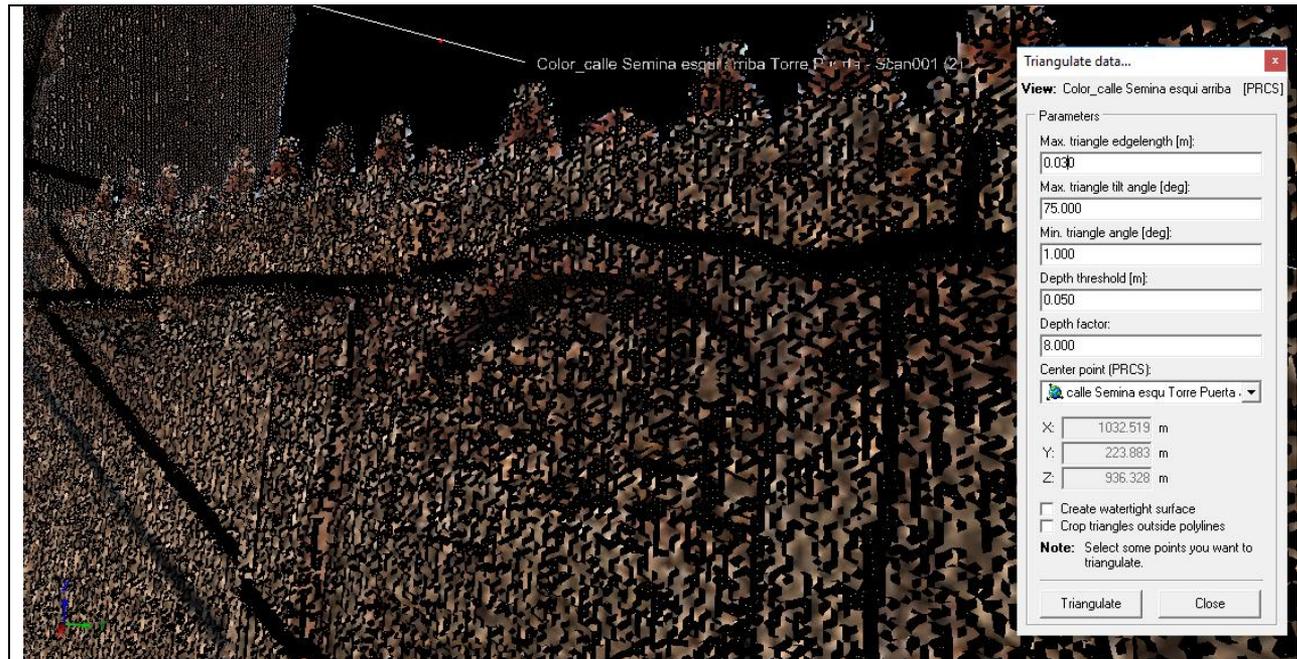
MODELADO 3D

Para evitar que estas estructuras de puntos sean transparentes se realiza una modelización mediante la creación de triángulos entre los puntos de la nube. Este complicado proceso utiliza normalmente los algoritmos de triangulación de Delaunay. La triangulación es el proceso de crear una superficie mediante la unión

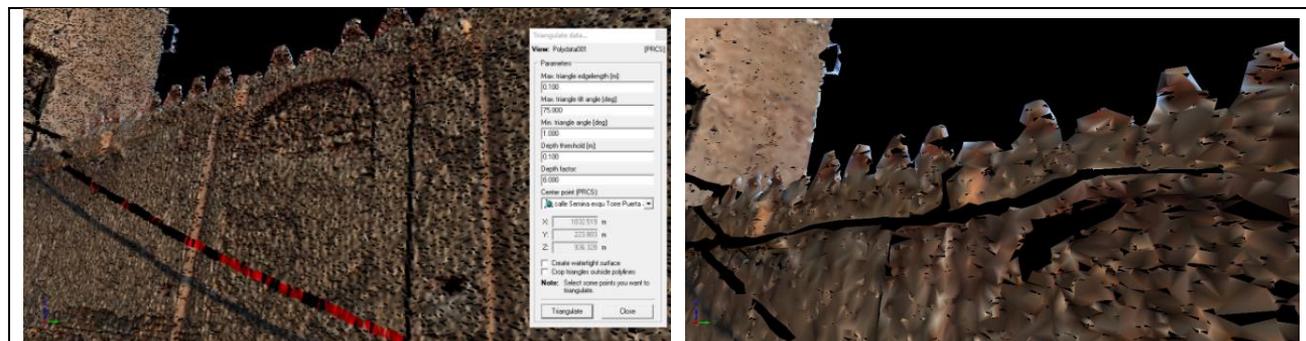
de puntos por triángulos. Los datos triangulados, también denominados "malla", proporcionan una mejor representación del objeto escaneado.

Básicamente existen dos modos diferentes de realizarla: por *Triangulación plana* y por *Triangulación polar*. La triangulación plana se realiza a partir de las coordenadas 2D de los puntos asignados a la vista predefinida en pantalla, resultando muy útil para modelos no agresivos, como puede ser la superficie del terreno, ya que cierra todos los agujeros. La triangulación polar trabaja de manera análoga a la triangulación plana. La única diferencia es que los puntos seleccionados se proyectan en un cilindro cuyo centro es la posición geométrica de escáner respecto del cual han sido capturados.

Un paso previo en el proceso de mallado consiste en eliminar aquellos puntos dispersos producto del ruido que generan el pulso laser o por el paso intermedio de personas u objetos en el proceso de escaneado. Este proceso se realiza analizando el número de puntos vecinos y la proximidad entre ellos. De igual modo debemos eliminar manualmente aquellas partes de la nube recogidas por el escáner y que no forman parte del modelo. Se deberá tener especial cuidado en él borrado de elementos útiles por descuido. Por tanto, se trata de un proceso complejo en el que intervienen múltiples variables, no siempre bien definidas y cuyos resultados no siempre son los óptimos, debiendo invertir mucho tiempo en su procesado.

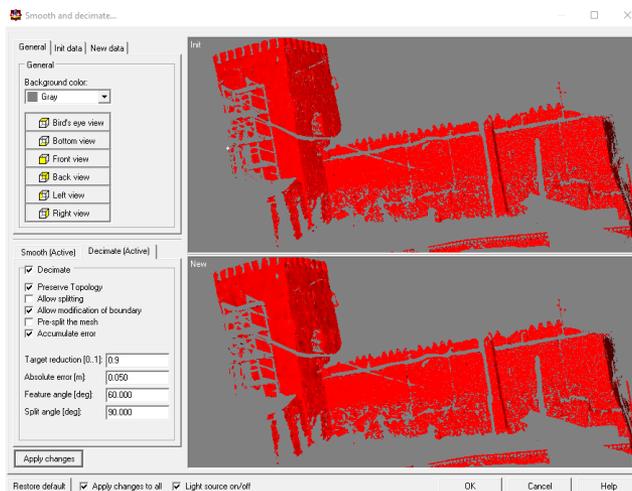


El modelado de las superficies depende de la ejecución simultanea de distintas variables no siempre bien definidas. En la imagen se observa que valores muy finos producen triángulos pequeños que no cubren toda la superficie



Valores de triangulación altos producen triángulos grandes generando indefinición en las formas.

Independientemente de los valores de triangulación óptimos para generar las superficies, los errores en la medición de distancias producida por el rayo láser provocan mallas no homogéneas dando lugar a una superficie de aspecto rugoso. Para dar solución al problema, los programas de escáner disponen de herramientas de suavizado y decimado de la superficie. Al igual que en proceso anterior estas operaciones requieren la aplicación conjunta de distintas variables para que el resultado sea el óptimo, empleándose un importante tiempo en determinar los valores adecuados para cada situación.



Las funciones de suavizado y decimado modifican la estructura superficial del modelo optimizando la superficie y reduciendo la cantidad de triángulos.

Las mallas o superficies trianguladas constituyen un buen soporte para aplicar texturas de imágenes produciendo modelos virtuales seudorealistas.



Suavizado y decimado de la malla correspondiente al escáner “esquina calle Amezcua”. La interpolación entre de los colores de los vértices produce superficies no contrastadas.

Los valores ajustados en modelos triangulados por el método polar producen huecos en aquellas zonas que no han sido visualizadas desde esa posición, pero que deberán ser completados por las capturas realizadas desde otras posiciones.

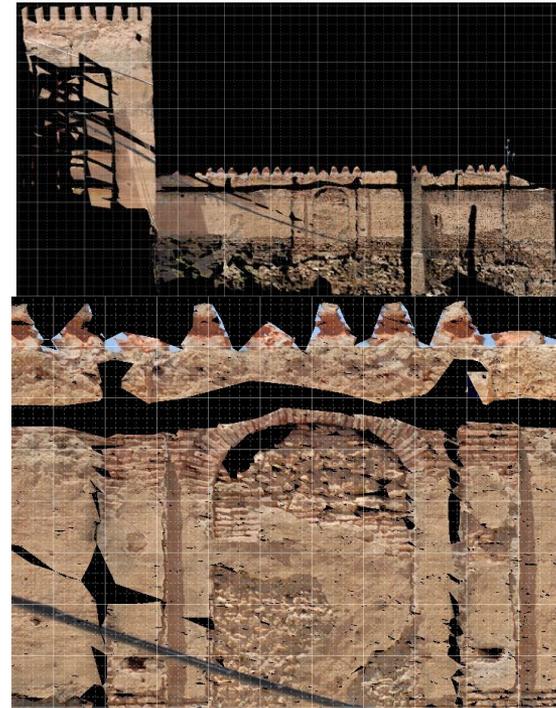


Imagen de modelo 3D texturizado. Los huecos son producto de la no visualización de esa zona desde la posición del escáner.

CREACIÓN DE SECCIONES

La complejidad de formas que presentan estos modelos 3D hacen necesario la extracción de formas simplificadas que ayuden a comprender y analizar el objeto de estudio. En este sentido, la creación de secciones planas, horizontales y verticales, mediante la generación de planos de corte constituye una herramienta fundamental en el proceso.

Por lo general este proceso se realiza sobre el modelo 3D de malla, si bien determinados programas de gestión de nubes de puntos permiten la extracción de estas formas directamente, lo que facilita enormemente el trabajo.

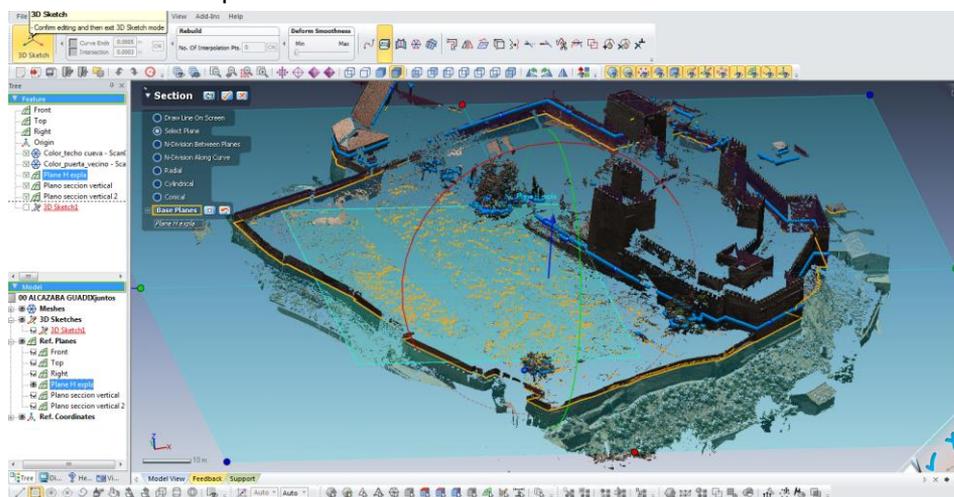
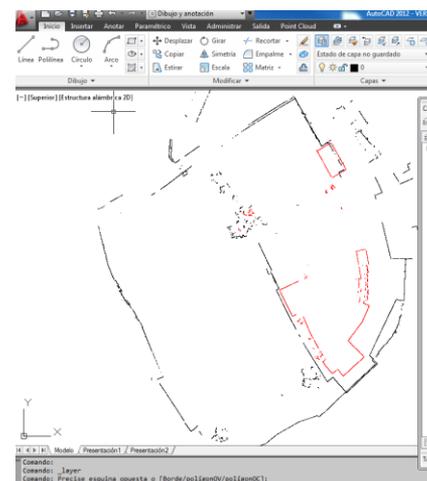
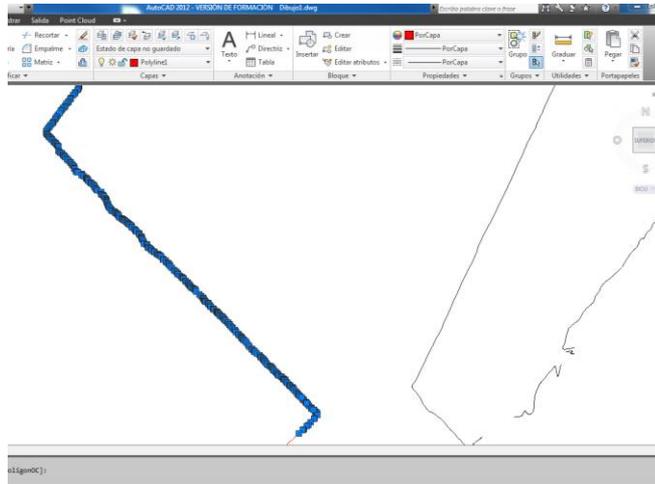


Imagen de la generación de secciones a partir de la nube de puntos, realizadas con el programa XOS de la firma Rapidform.

La posición del plano de corte se puede modificar al objeto de generar varias secciones de un mismo elemento en diferentes posiciones. Las representaciones 2D obtenidas, correspondientes normalmente a plantas, alzados o secciones son exportadas a programas de CAD para más fácil uso y transferencia. Las entidades generadas reproducen todas las irregularidades del modelo real, presentando el inconveniente de la excesiva fragmentación de datos ya que genera tramos de línea de resolución igual a la resolución de la nube de puntos, es decir, polilíneas formadas por tramos de 4 cm lo que hace que su edición sea compleja.





Vista en planta de secciones realizadas a distinta altura. En la imagen derecha se observa un ejemplo de la infinidad de tramos o puntos que constituyen la polilínea de sección.

Por tanto, a la espera de que se desarrollen otras herramientas que permitan una mejor gestión de la nube de puntos (point cloud) o de la malla (mesh), y con el riesgo asumido de parecer retrógrados, por lo general realizaremos un dibujo manual de polilíneas, interpretando las formas que nos interesan representar a partir de la nubes de puntos, simplificando, de esta forma, la información y optimizando el proceso de interpretación. Este proceso consiste en generar planos paralelos de corte del espesor deseado, normalmente 3-4 cm, que delimitan una representación seccionada de la nube de puntos o la malla y que sirven de base para la interpretación y trazado manual. En el apartado herramientas BIM se analiza la forma de trabajo con este tipo de entidades.

5.3.3.2 CALIBRADO Y ALINEADO DE CAMARA

La calibración es un proceso necesario a realizar cada vez que se desmonta y monta el sistema de sujeción cámara-escáner ya que los ajustes de montaje de la cámara diferirán ligeramente de una vez a otra. Esta calibración se realiza definiendo relaciones de puntos homólogos entre puntos del modelo y puntos en una o varias imágenes correspondientes a esa captura. A partir de estos valores se calcula una matriz de transformación para el correcto ajuste eliminando el paralaje horizontal y vertical.

Esta correlación se realiza a través de una matriz de transformación que viene definida en los parámetros correspondientes al acoplamiento o montaje de la plataforma de sujeción donde se sitúa la cámara-objetivo con respecto al escáner y que relaciona el SCOS (Sistema de Coordenadas de Origen del Scanner) con el CMCS (Sistema de Coordenadas de la Cámara).

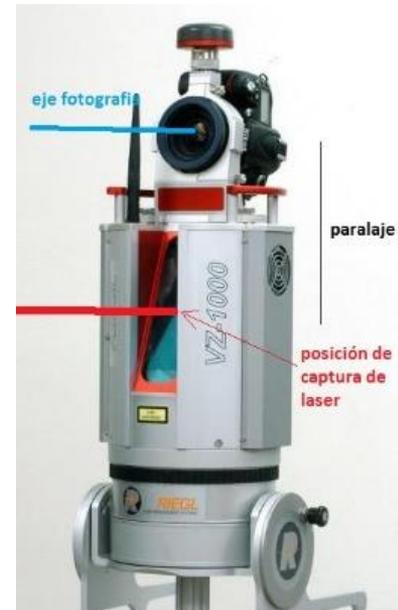
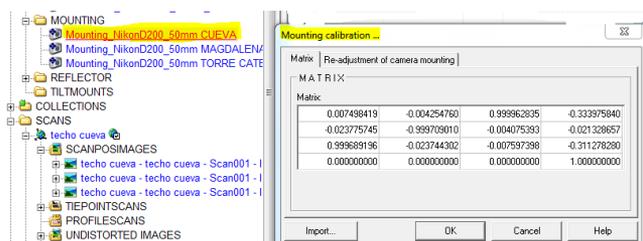
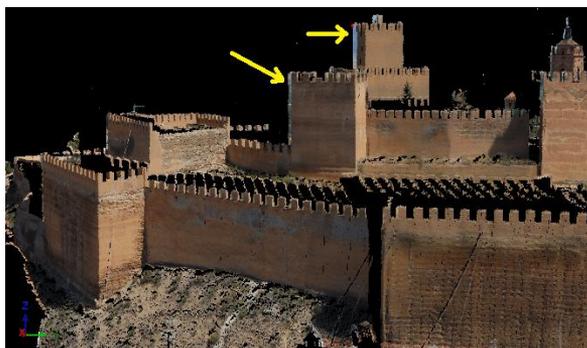


Imagen de la posición y ejes de la cámara respecto del escáner



. El ajuste de calibración del montaje se realiza a través de una matriz de transformación. Se debe realizar cada vez que se acopla la cámara al equipo laser. Equipo Riegl VZ., perteneciente al Dpto. Arqueología de la UGR.

La matriz de transformación debe redefinirse cada vez que se realiza un nuevo montaje de la cámara sobre el escáner ya que las condiciones de posición y orientación varían, produciéndose el típico borde celeste sobre determinados perímetros de las estructuras y que detectan claramente una mala alineación entre el sistema de coordenadas del escáner y el sistema de coordenadas de la cámara.



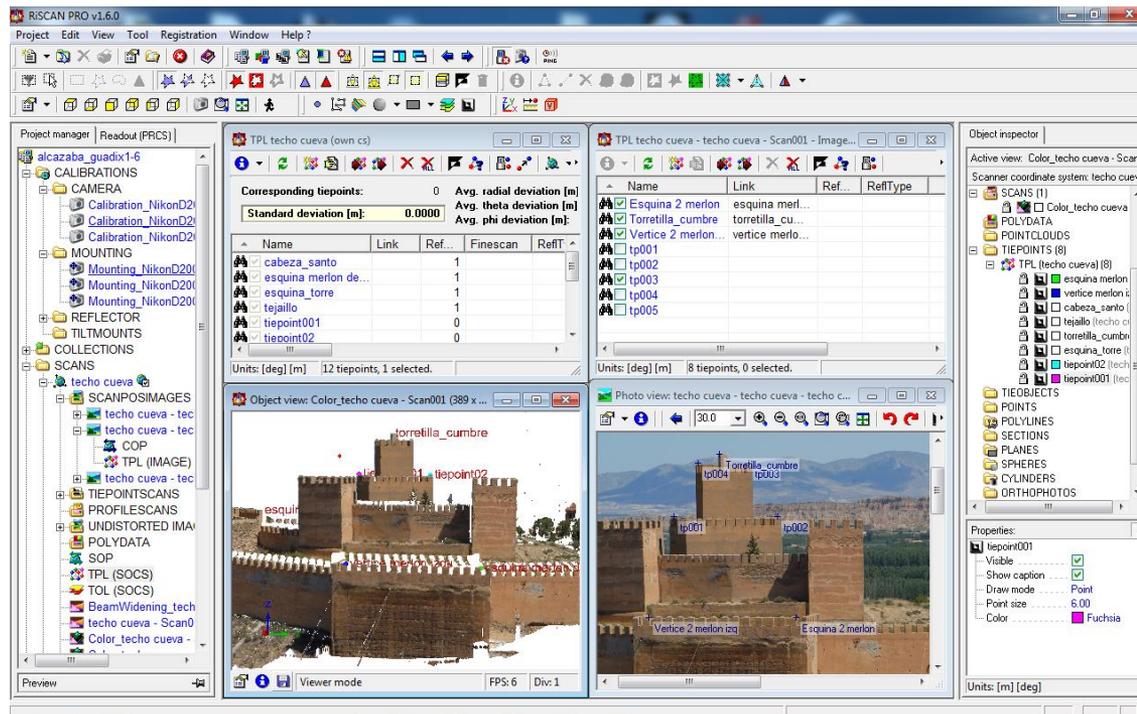
Borde celeste que indica el necesario ajuste de la imagen sobre el modelo, mediante la calibración de la cámara.

Por tanto, cada vez que se desmonta y monta la cámara sobre el escáner es necesario generar una nueva

matriz de transformación (*Mounting*) mediante la alineación manual entre puntos de control de la imagen (TPL IMAGEN) y sus correspondientes puntos en el modelo 3D (TPL SOCS).

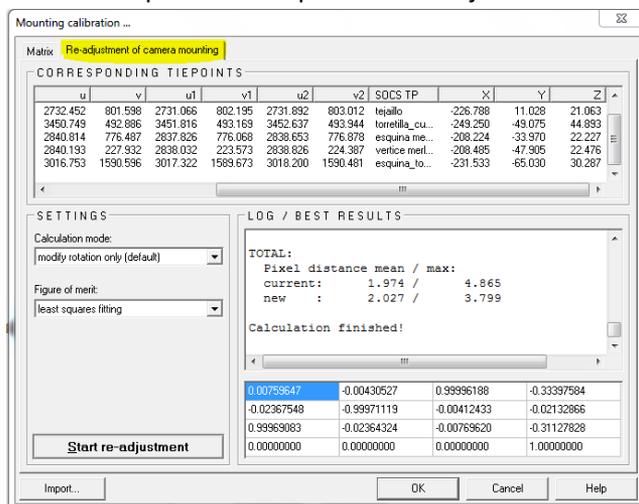


Correlación de puntos sobre imagen TPL y puntos sobre el modelo 3D.



Captura de pantalla del sistema de correlación de puntos de control entre modelo 3D de escáner y la imagen.

Relacionados al menos 3 puntos homólogos en la imagen y en el modelo, se procede al reajuste del sistema de montaje “mounting o lo que es lo mismo, se reajusta la matriz de transformación que los relaciona, indicando la precisión en pixel de este ajuste.



Matriz de transformación para el ajuste preciso de las imágenes “Techo cueva” sobre el modelo 3D del escáner. La precisión media en el ajuste de la imagen respecto del modelo es de 2 pixel.

En cualquier caso, habrá que tener en cuenta que al igual que le ocurre a los puntos de la nube, la resolución de las imágenes está limitada de acuerdo al tamaño del pixel, impidiendo la correcta observación de las formas. En el caso de que se requiera mayor definición de imagen será necesario sustituir el objetivo de la cámara por otra de mayor longitud focal, si bien esta opción también presenta inconvenientes al no cubrir las imágenes el área total registrada por el escáner, quedando parte de modelo sin textura. En el siguiente apartado se recoge un método complementario seguido para la aplicación de texturas completas de alta calidad sobre la nube de puntos.

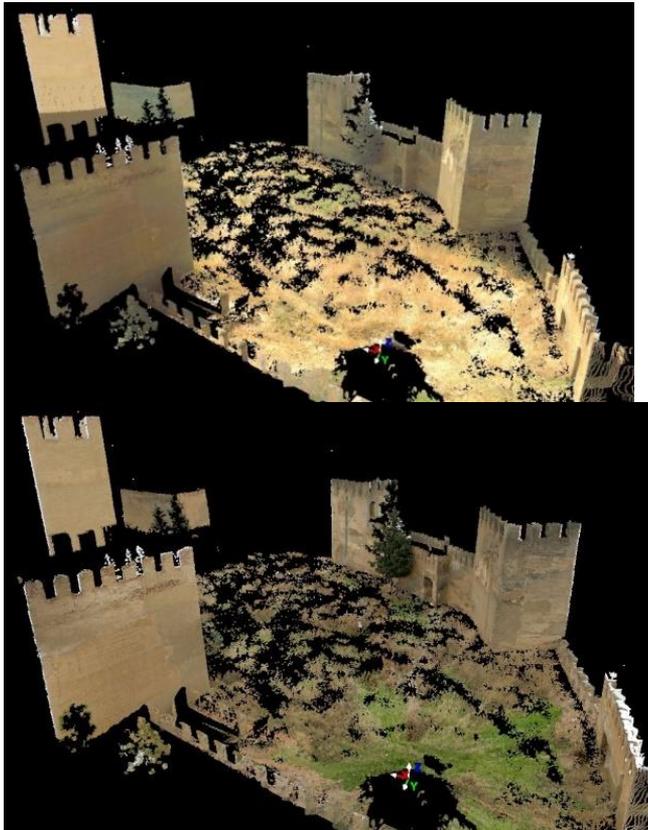


Imagen ampliada de un merlo en Alcazaba de Guadix. La resolución limitada de la imagen impide la correcta definición de las formas arquitectónicas. (J.A.Benavides)

5.3.3.3 TEXTURIZADO DE NUBE DE PUNTOS A PARTIR CAMARAS EXTERNAS

Como ya hemos comentado, los escáneres incorporan cámaras internas o externas acopladas que permiten la captura de la textura para aplicarla al modelo, lo que nos permite plasmar no solo la geometría del elemento, sino sus cualidades visuales (color, tipo de material, patologías, etc.)

Por lo general, los escáneres que incorporan cámara interna suelen presentar problemas de calidad en el texturizado. La mala calidad de la cámara interna (1 Mgb) del escáner laser Leica Scan-Station2 y sobre todo, la falta de control por parte del operador de los parámetros de exposición de la fotografía nos obliga a sustituir la textura original por otra capturada con una cámara externa de mejor calidad.



Comparativa de texturas sobre la misma nube de puntos. texturizado a partir de las imágenes de la cámara interna. (izquierda) texturizado a partir de fotografías con cámara externa Canon DS Mark II (derecha). (J.A.Benavides)

La calidad final del modelo objeto de estudio vendrá determinado por la calidad de la imagen y la situación

de esta respecto del centro óptico del escáner, llegando incluso a resultar inservibles para determinados fines. En la actualidad, el diseño de los escáner se viene modificando al objeto incorporar cámara que completen la documentación geométrica con texturas de alta calidad.

Para solucionar este problema se ha ideado un mecanismo que permite sustituir las imágenes internas por fotografías de alta calidad capturadas con control manual y que cumplan los requisitos necesarios para adaptarse convenientemente al modelo. Este sistema consiste en sustituir el escáner una vez capturada la nube de puntos por un instrumento de sujeción y giro de la cámara tomando como referencia su punto nodal, haciendo coincidir el centro óptico de la cámara y del escáner. De esta forma se consiguen imágenes de calidad sin paralaje ni cambios de contraste en la textura.



Mecanismo de sujeción y giro de una cámara externa en el mismo punto nodal que el osciloscopio que dirige el rayo laser y las imágenes de la cámara interna.

La cámara se monta sobre la base nivelante del propio escáner utilizando un soporte especial que permite realizar panorámicas de cúpula completa, situando el eje óptico de la cámara exactamente en la misma posición que ocupaba previamente el eje óptico del escáner.

Las imágenes se unen utilizando un *software* de generación de panoramas equirectangulares de cúpula completa (ptgui, autopanogiga, etc), que permiten mediante un determinado flujo de trabajo modificar la textura obtenida por el escáner por otra, de mejor calidad, obtenida por la cámara.

El procedimiento consta de tres fases:

- Configuración de la cámara y captura de imágenes
- Generación de panoramas equirectangulares a partir de imágenes multiexposición y creación de cubo de imágenes.
- Importación de imágenes sobre el *software* de gestión de nube de puntos (Cyclone) y aplicación de la textura con las imágenes de cubo previamente generadas.

Configuración de la cámara y captura de imágenes

Es necesario montar la cámara sobre el soporte adaptador al objeto de que el centro focal o punto nodal de la lente esté en el centro exacto del soporte. De esta forma se consigue eliminar el paralaje en el giro panorámico de la cámara. Cada combinación de cámara y lente tiene un punto nodal distinto que debemos averiguar.

El proceso de fotografiado debe realizarse inmediatamente después de la captura de la nube de puntos por el escáner teniendo la precaución de que la base nivelante o el trípode no sufran ningún desplazamiento, pues en caso contrario no coincidiría imagen y modelo.

Dependiendo de la focal de la lente se deben tomar un mayor o menor número de imágenes, ya que se necesita cierto solape entre dos imágenes consecutivas. En nuestro caso hemos utilizado una focal gran angular de 15 mm tomando 6 imágenes horizontales (cada 60°) que han permitido disponer de

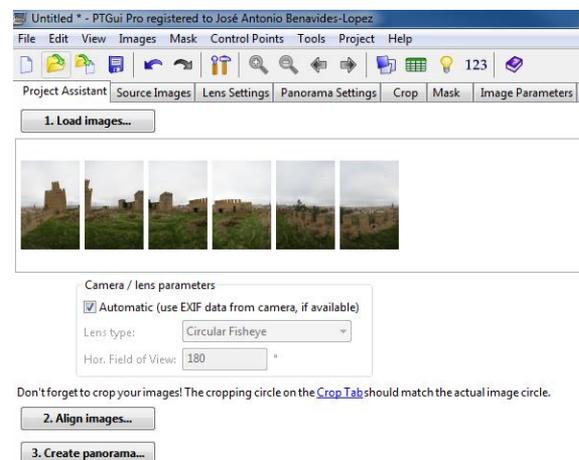
bastante área de solape entre ellas sin producir deformaciones significativas.

Capturadas las imágenes, las descargamos desde la tarjeta o a través de cable USB al equipo informático, para su posterior gestión mediante programas de montaje de panoramas y generación de cubo de imágenes.

Generación de panoramas equirectangulares

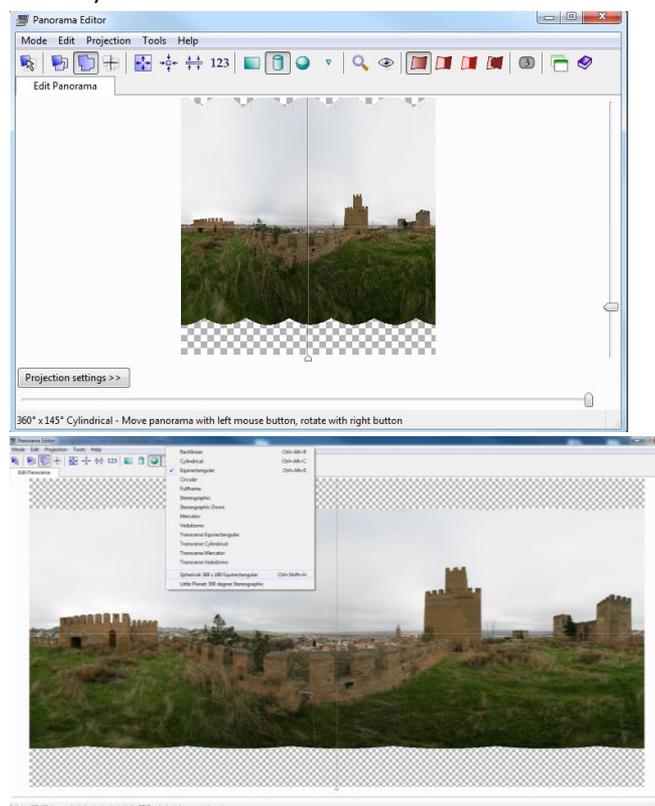
En nuestra investigación hemos utilizado el programa PTgui para generación de panoramas y cubo de imágenes. La gestión adecuada de las imágenes requiere la lectura de sus propiedades internas contenidas en los datos EXIF.

Los datos EXIF consisten en un registro de los ajustes de la propia imagen en el momento de la captura. Incluye información de fecha de la captura, tamaño o resolución de la imagen, distancia focal, apertura de diafragma, tiempo de exposición, tipo de archivo grabado, etc... Lo que permite disponer de ciertos parámetros de calibración interna de la cámara.



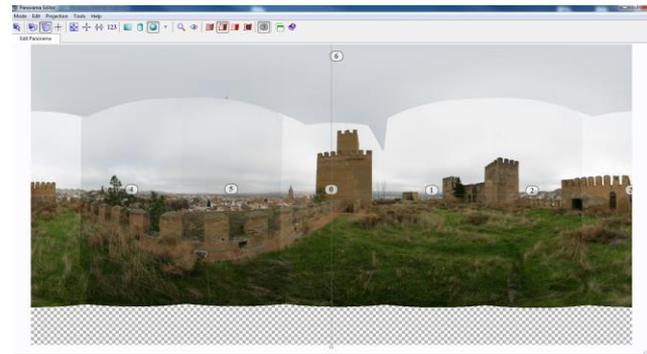
Carga de la secuencia de imágenes que constituyen el panorama. El área de solape entre imágenes consecutivas debe ser lo suficientemente grande para evitar que haya problemas de alineación entre ellas. (J.A.Benavides)

Posteriormente, ejecutaremos la orden *Alinear imágenes* “Align images”, para generar los puntos de control de costura (solape) entre las imágenes consecutivas. Terminado el proceso de alineación, se muestra el “Editor” de panorama permitiendo gestionar el tipo de proyección. En el caso de que el panorama lo constituyan solo imágenes horizontales, se hace necesario modificar el tipo de proyección, sustituyendo la proyección cilíndrica (imagen izquierda) obtenida por defecto, por otra equirectangular esférica 360 x 180 (imagen de la derecha).



Editor de panoramas: (izq) panorama generado en proyección cilíndrica. (der) panorama transformado a proyección equirectangular esférica. (J.A.Benavides)

Una de las cuestiones a destacar en la generación de panoramas es que el propio *software* se encarga de suavizar la diferencia de exposición entre las diferentes imágenes obteniendo un resultado más adecuado, evitando el cambio de contraste entre imágenes consecutivas.



Panorama sin suavizado de contornos (blended), producto de la diferente exposición de la cámara en la captura de los fotogramas. (J.A.Benavides)

La creación del panorama produce siempre una zona de sombra (zona inferior) que se corresponde a la vista nadiral de la cámara que es imposible de capturar por estar situado el trípode y el soporte.



Imagen equirectangular esferica generada a partir de las 6 imágenes panorámicas consecutivas. La transformación que sufre la zona inferior (hueco dejado por el trípode), aparece deformada en esta imagen como una franja.

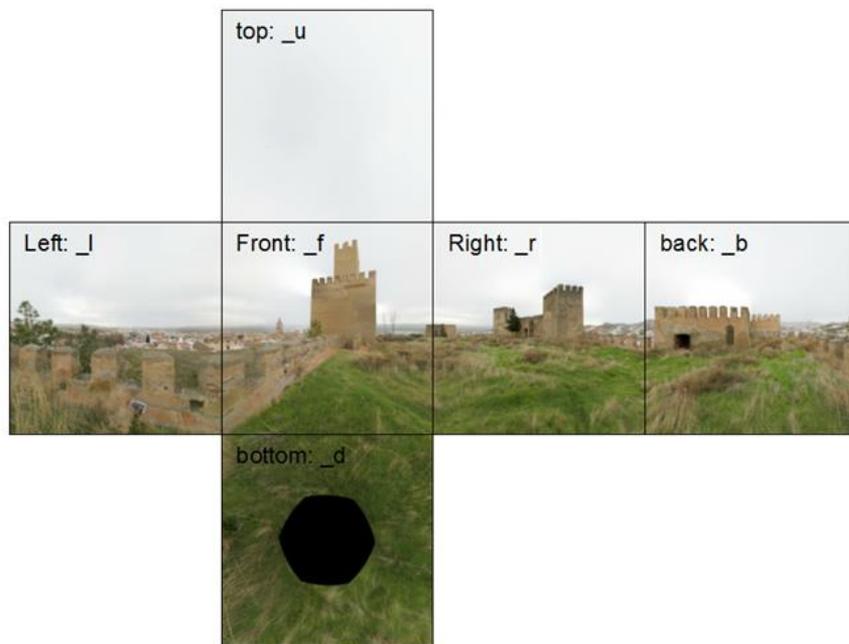
Al ampliar la imagen observamos que la resolución adecuada para distinguir los diferentes materiales o fases constructivas del edificio o yacimiento.



Detalle apliado de la imagen panorámica, donde se distinguen la diferente tipología de materiales y o fases constructivas.

Generación de cubo de imágenes a partir de panoramas equirectangulares

El propio programa PTGui dispone de una herramienta que permite convertir las imágenes panoramas en cubo de imágenes, es decir, convertir una visión esférica en proyecciones paralelas sobre las 6 caras de un cubo. Estas imágenes deben ser nombradas de acuerdo a la siguiente regla para que posteriormente sea reconocida su posición sobre el programa de gestión de escaner Leica "Cyclone"



Cubo de imágenes desplegado, con indicación del nombre y situación. En la imagen inferior *bottom* se observa el hueco dejado por la proyección del trípode. (J.A.Benavides)

En la siguiente tabla, aparece la nomenclatura que se debe asignar a las imágenes para que se reconozca su posición y puedan ser aplicadas sobre el modelo 3D de nube de puntos.

Cubo de imágenes de PTGui	Nombre de las imágenes de cubo para Cyclone
Panorama. back.jpg	Panorama_b.jpg
Panorama. bottom.jpg	Panorama_d.jpg
Panorama. front.jpg	Panorama_f.jpg
Panorama. left.jpg	Panorama_l.jpg
Panorama. right.jpg	Panorama_r.jpg
Panorama. top.jpg	Panorama_u.jpg

Para renombrar las imágenes es necesario hacer clic en el botón “Cube Face Name” y definir los sufijos que se añadirán automáticamente a cada una de las caras del cubo. Esta definición solo debe realizarse una vez, pues se guarda automáticamente como parámetros de configuración para el resto de panoramas.

Proceso de texturizado de nube de puntos a partir de cubo de imágenes mediante el *software* cyclone

En este apartado describimos el flujo de trabajo para aplicar la textura sobre la nube de puntos a partir de las imágenes proyectadas sobre el cubo de imágenes.

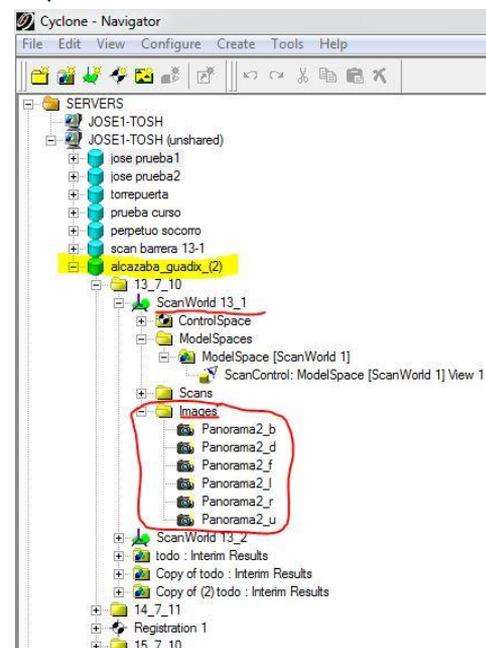
El proceso que se sigue es el siguiente:

- Importación de imágenes a Cyclone.
- Eleccion del modelo de nube de puntos
- Correlación de imágenes - modelo.

Importación de imagines a Cyclone:

Dentro de Cyclone, navegar a la carpeta de imágenes de ScanWorld de la nube de puntos que deseamos

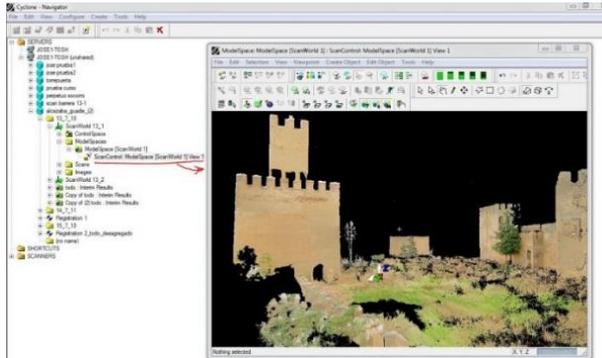
modificar su textura e importar las imágenes de cubo en la carpeta textura.



Menú del navegador del *software* Cyclone, donde aparecen las bases de datos de los diferentes trabajos realizados con el escáner. En el podemos apreciar el modelo ScanWorld 13-1 correspondiente al escáner 1 del día 13 de julio 2010, así como las imágenes correspondientes al “cubo de imágenes”. (J.A.Benavides)

Elección del modelo de nube de puntos (escaneado)

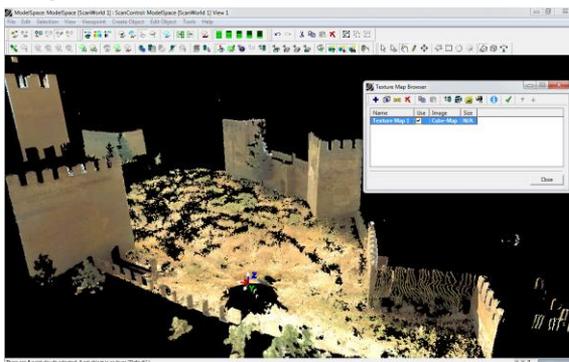
Se debe abrir el espacio del modelo “Modelspace” que contiene la nube de puntos que se desea texturizar. Seleccionar todos los escaneados que puede contener el Modelspace. Unir todas las nubes de puntos bajo un mismo modelo para evitar que puede estar fragmentada en varias nubes.



Menú del navegador con indicación del modelo correspondiente al escáner 1. Al ejecutar con doble clic se abre el modelo 3D en una nueva ventana denominada “ModelSpace” donde se gestiona toda la información de modelo generado: vistas, texturas, mallas, visualizaciones .(J.A.Benavides)

Añadir Cubo de imágenes al modelo

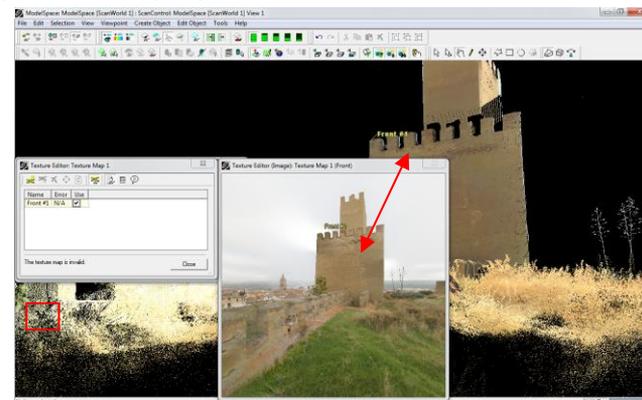
En el editor de apariencia de objetos del menú “editor objetos” (*Edit Object-Appearance-Texture Map Browser.*), añadimos el cubo de imágenes (*add cube map images*)



El menú de dialogo “Texture map browser” nos permite gestionar la inserción de imágenes individuales o Cubos de imágenes sobre la nube de puntos del modelo 3D. El proceso se facilita en gran medida utilizando cubo de imágenes, pues además de cubrir todo el modelo, solo es necesario indicar al menos 3 puntos.

Relacionar mediante correspondencia

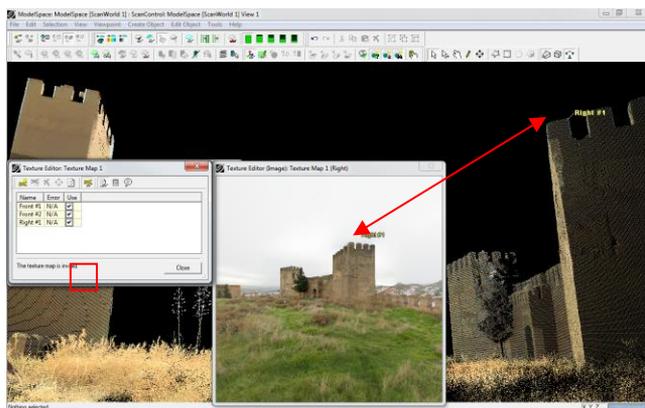
- Se necesitan al menos tres pares de puntos que relacionen el modelo de nube de puntos y las imágenes que deben dar textura al mismo. Se recomienda incluir alguno más para comprobar los errores relacionarlos. Los puntos de correlación pueden estar en una o en varias imágenes tal y como describimos a continuación.
- Para que el texturizado sea lo más adecuado posible es necesario que los puntos estén bien definidos en el modelo y en la imágenes.
- Seleccionar sobre la imagen del cubo y mantener pulsado el botón izquierdo del ratón para ampliar la visualización permitiendo seleccionar con mayor precisión los puntos de correspondencia. Al soltar el botón del ratón la selección quedará definida.
- Seleccionar el punto de correspondencia sobre la nube de puntos. Para ello ampliar zoom de modelo para una mayor precisión en la selección.



Seleccionar una cara del cubo y una visualización parecida sobre el modelo. Elegir los puntos homologos, tal y como aparece en la imagen y restringirlos. .(J.A.Benavides)

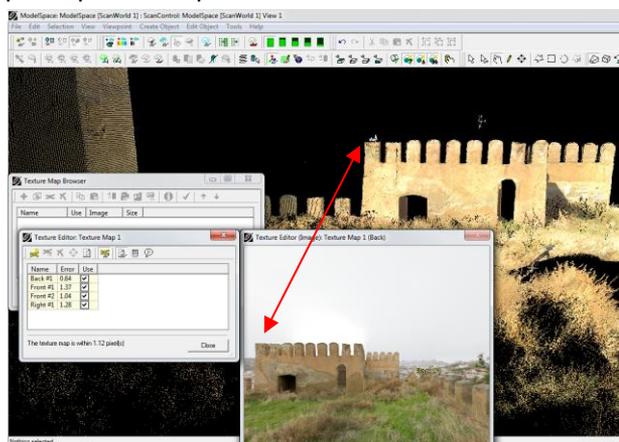
- Sobre el menú de dialogo del editor de texturas añadir la correspondencia entre imagen y modelo.
- Se pueden seleccionar relaciones múltiples para cada cara. Haga clic con el botón derecho del ratón sobre la

imagen para seleccionar cualquier otra cara del cubo (front, back, right, left o up).



Seleccionados al menos tres puntos, picar en el icono marcado para que realice el calculo de los ajustes de la imagen sobre el modelo. (J.A.Benavides)

- Calculo del ajuste. Seleccionadas, al menos, tres correspondencias se puede calcular el ajuste, emitiendo un informe de errores cuya magnitud se expresa en pixel. Si el ajuste es malo se pueden borrar o añadir más restricciones hasta que obtengamos una que sea satisfactoria. Para este modelo se ha obtenido un error máximo de 1.37 pixel que corresponden con 7.4mm



En el menú de dialogo se observa los errores cometidos en la correlación de los puntos homologos, estando los valores expresados en pixel de imagen. Se observa que el mayor error se ha cometido en la digitalización del punto 1 de la imagen front (1.37 pixels)

Sustitución de la textura (color RGB) en la nube de puntos

- Seleccionar la nube de puntos e ir al menú “editor de objetos” y aplicar el color de mapa-textura de las imágenes que hemos relacionado anteriormente (Image texture maps). Si no se modifica la apariencia de la nube después de ejecutar la orden anterior, vuelva al menú de apariencia del editor de objetos y compruebe que la variable “Global color map” está activada.
- Es muy importante que para que todos los campos tengan sus efectos es necesario cerrar el programa Cyclone y volver a ejecutarlo.

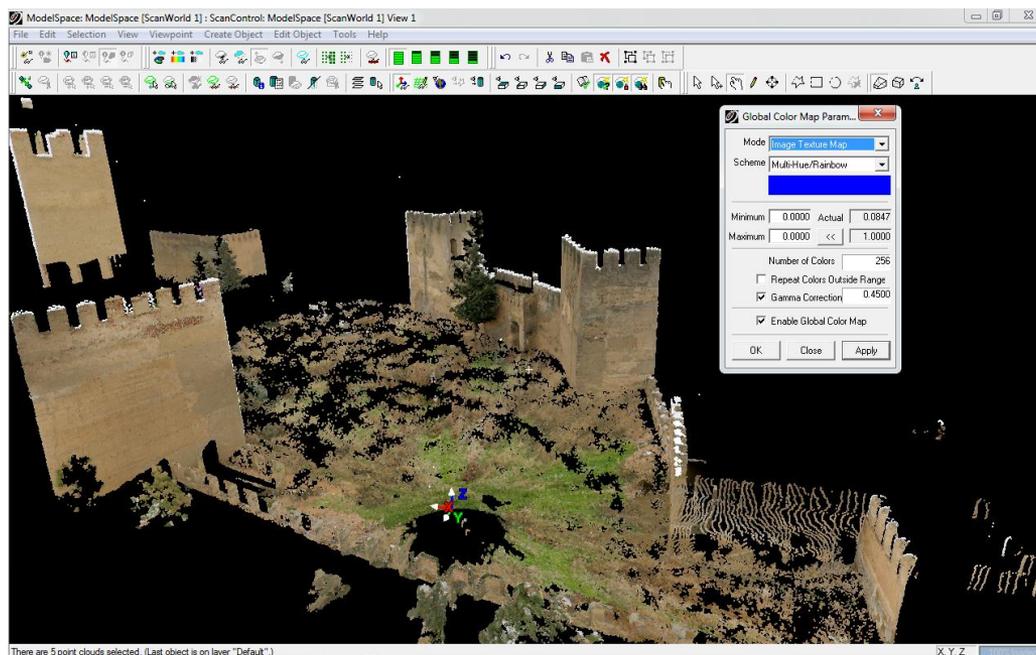


Imagen con el cambio de textura producida sobre la nube de puntos a partir de las imágenes tomadas con cámara externa.



Detalle de cambio de apariencia entre textura con cámara interna (izq) y cámara externa (der)

5.4 APLICACIÓN DE FOTOGRAMETRIA MULTIMAGEN EN LA ALCAZABA DE GUADIX



Las nuevas tecnologías fotogramétricas aportan numerosas ventajas en los levantamientos arquitectónicos y arqueológicos. La fotogrametría multimagén mediante *drone* a baja altura aprovecha la gran resolución de las imágenes de objeto cercano con el nuevo punto de vista desde el aire evitando las oclusiones propias de la fotogrametría terrestre.

Estas nuevas tecnologías están transformando los protocolos de documentación en los levantamientos arquitectónicos y arqueológicos, mejorando tres aspectos clave en la práctica actual: la rapidez, la precisión y la mejora de los resultados.

La documentación de patrimonio mediante las nuevas tecnologías fotogramétricas requiere la utilización simultánea de diferentes instrumentos y metodologías.

En síntesis, el flujo de trabajo es el siguiente:

Trabajos de campo

- A. Planificación.
- B. Establecimiento de una red de puntos de apoyo fotogramétrico. Medición y georreferenciación del elemento a documentar en coordenadas universales.
- C. Captura de imágenes.

Trabajos de oficina

- D. Procesado de imágenes por SFM para obtención del modelo 3D.
- E. Obtención de los documentos gráficos: planos de planta, alzado, secciones, curvas de nivel y ortoimágenes, necesarios para el estudio de bien.
- F. Exportación de datos a programas específicos para la gestión y el desarrollo de la investigación.

5.4.1 TRABAJOS DE CAMPO

5.4.1.1 PLANIFICACIÓN PREVIA

Si bien la alcazaba de Guadix era un bien conocido por los investigadores por haberse realizado la documentación mediante escáner laser, la nueva experimentación con fotogrametría multimagén, mediante captura fotográfica desde tierra o mediante DRON, necesitaba una planificación adecuada en base a: tipo de equipo a utilizar, visibilidad, calidad de imagen, iluminación, recorrido, solape entre fotogramas, posición, número de puntos de apoyo fotogramétrico

Las fotografías capturadas desde tierra aportan, por lo general, mejor calidad de imagen que las capturadas desde un *drone*. Este, por el contrario, aporta significativas ventajas respecto del punto de vista desde el que son tomadas las imágenes. La posición cenital u oblicua de la cámara sobre el monumento evita, en la mayoría de los casos, las oclusiones.

El registro de automático programado de las fotografías en intervalos de segundos hace que se disponga de una información superabundante de imágenes.

Dependiendo de la resolución y calidad de la cámara digital, en cada captura de una imagen se registran millones de píxeles equivalentes a millones de puntos o datos. La cámara digital Nikon D800 utilizada en la investigación dispone de una resolución de imagen de 7360 x 4912 píxeles (36.152.320 píxeles), resolución mayor que la que proporciona el escáner laser terrestre.

En enero de 2014 se contactó con un equipo externo que disponía de un magnífico equipo para realizar las primeras pruebas de funcionamiento. La inexperiencia del operador de vuelo en técnicas fotogramétricas hizo que estas primeras capturas sirvieran solo de ejemplo de utilización, poniendo de manifiesto la necesidad de

ser el propio fotogrametra quien deba planificar, organizar y controlar el equipo (programación del vuelo, focal a utilizar, solape, orientación, correcciones de lente, etc).



Equipo hexacoptero controlado por dos operadores, uno para el vuelo y otro para la captura fotográfica. A efectos prácticos solo sirvió para ver las posibilidades que presentaba la fotogrametría sobre *drone* pues las imágenes obtenidas solo permitieron hacer algunos experimentos.



Imágenes de muy buena calidad realizadas con cámara compacta Sony Nex-5r, pero que no cumplían las necesidades para realizar un trabajo fotogramétrico

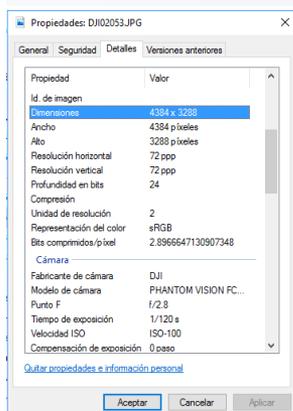
A partir de ese momento se realizaron diferentes experimentaciones, tanto de manejo del equipo de vuelo como de la cámara y la captura de imágenes. En diciembre de 2014 se realizó el primer vuelo sobre la Alcazaba de Guadix utilizando para ello un equipo *drone* DJI *phanton2 visión plus*, en el que un solo operador maneja el equipo de vuelo y programa la captura automática de imágenes.

En el primer vuelo completo de la alcazaba se capturaron 197 fotografías cenitales a diferentes alturas y 48 fotografías oblicuas para los paramentos de la *torre puerta*.

El equipo DJI *phanton2 visión plus* incorpora una cámara FC200 con resolución de 4384 x 3288 pixel (14 megapíxeles) y un campo de visión (FOV) de 110° para una distancia focal de 5 mm. Dispone de un sensor

CMOS de 1/2,3 pulgadas. Las imágenes que proporciona son de buena calidad si bien el pequeño tamaño del sensor hace que aparezca ruido en los píxeles.

realiza la misma rutina de manera secuencial sobre cada una de las imágenes.

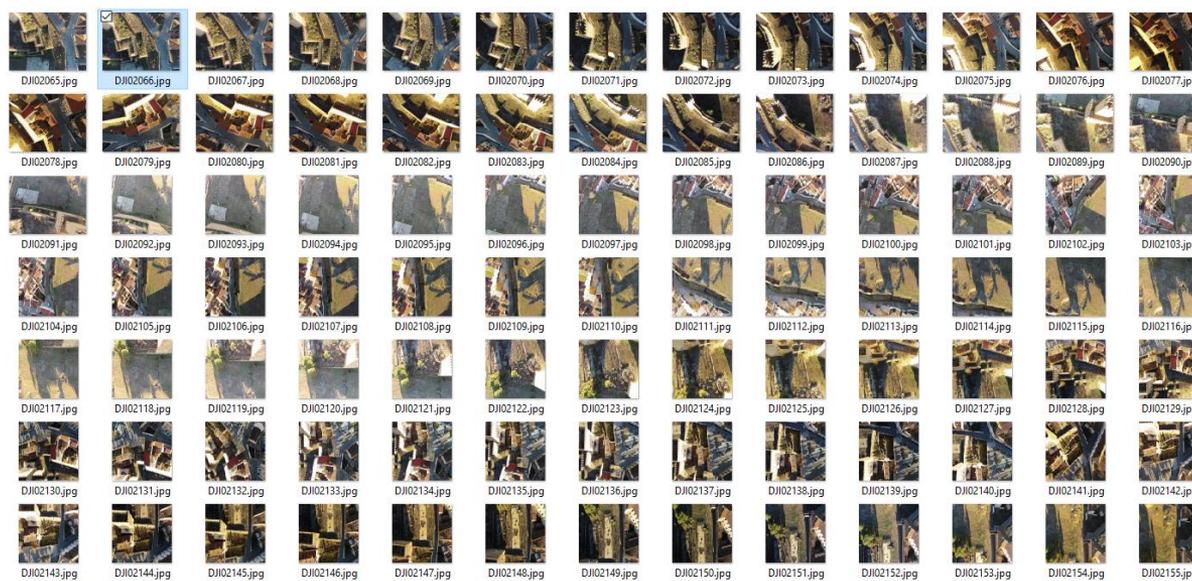


Equipo UAV Phantom2 visión-plus. Datos del fichero EXIF de una de las imágenes: resolución de imagen (4384 x 3288), apertura de diafragma (f/2.8), tiempo de exposición (1/200sg), distancia focal (5mm)

El amplio ángulo de visión de la cámara (110º, ojo de pez) provoca deformaciones de tipo *barrilete* sobre las imágenes que es necesario corregir de forma previa a cualquier otro proceso de calibración de la distorsión interna de la lente. Estas deformaciones son corregidas por programas de tratamiento digital de fotografía como Photoshop, Lighroom, etc. En nuestra investigación se ha realizado mediante el proceso automatizado de corrección de lente sobre Photoshop CS6, en la que



Imagen original con deformación tipo barrilete provocada por la lente ojo pez (izq.); imagen corregida en Photoshop CS6. (der). (J.A.Benavides)



Secuencia de imágenes capturadas por el equipo UAV Phantom 2 visión plus. (J.A.Benavides)

5.4.1.2 GEOLOCALIZACIÓN DEL EDIFICIO O YACIMIENTO

La primera fase del proyecto consiste en la geolocalización del yacimiento y de determinados puntos singulares de las estructuras en un sistema de referencia global (sistema UTM-ETRS89), utilizando para ello un equipo de posicionamiento global en tiempo real DGPS, donde un equipo fijo de referencia, situado junto al yacimiento, proporciona correcciones en tiempo real al receptor móvil que captura las coordenadas de los puntos con una precisión que oscila entre 1 a 2 cm dependiendo del número y la geometría de los satélites. Estas coordenadas deben apoyarse en el sistema universal, realizando para ello mediciones con el equipo GPS-GLOSSNAS conectado a una red de posicionamiento fija. Para Andalucía se utiliza la conexión a la RAP (Red Andaluza de Posicionamiento), que nos proporciona coordenadas absolutas sobre el citado sistema de referencia ETRS89 de forma inmediata. La falta de cobertura de la red móvil en algunas zonas de la Alcazaba de Guadix, hizo que se compatibilizaran ambos sistemas, conexión RAP para determinados puntos con cobertura móvil y conexión en tiempo real (RTK) para la medición del resto del yacimiento. El equipo utilizado ha sido un DGPS Leica Smarth Rovert 1200 que permite la recepción de señales de las constelaciones NAVSTAR-GPS y GLONASS.

La gran precisión absoluta que se logra con la medición DGPS es debido a la posibilidad de medir puntos bajo un mismo sistema de referencia pero sin necesidad de intervisibilidad entre ellos. Esto nos ha permitido geolocalizar, por un lado, los puntos de apoyo en tierra que sirven de referencia al vuelo fotogramétrico realizado con UAV y por otro lado, para la medición de puntos base para el levantamiento de puntos de apoyo en paramentos verticales mediante equipos de topografía

electrónica laser. Ambos tipos de puntos han sido marcados previamente con clavos o dianas de diferentes tamaños y en algunos casos, señalados con spray para evitar su pérdida.



(imagen arriba) Equipo de referencia situado en una de las torres para evitar oclusiones. (imagen abajo) Medición de punto de apoyo exterior en la calle Muralla. Este punto sirvió de base para el posterior estacionado del taquímetro electrónico. En esta ocasión la antena se sitúa sobre un jalón de 2 m. (J.A.Benavides)



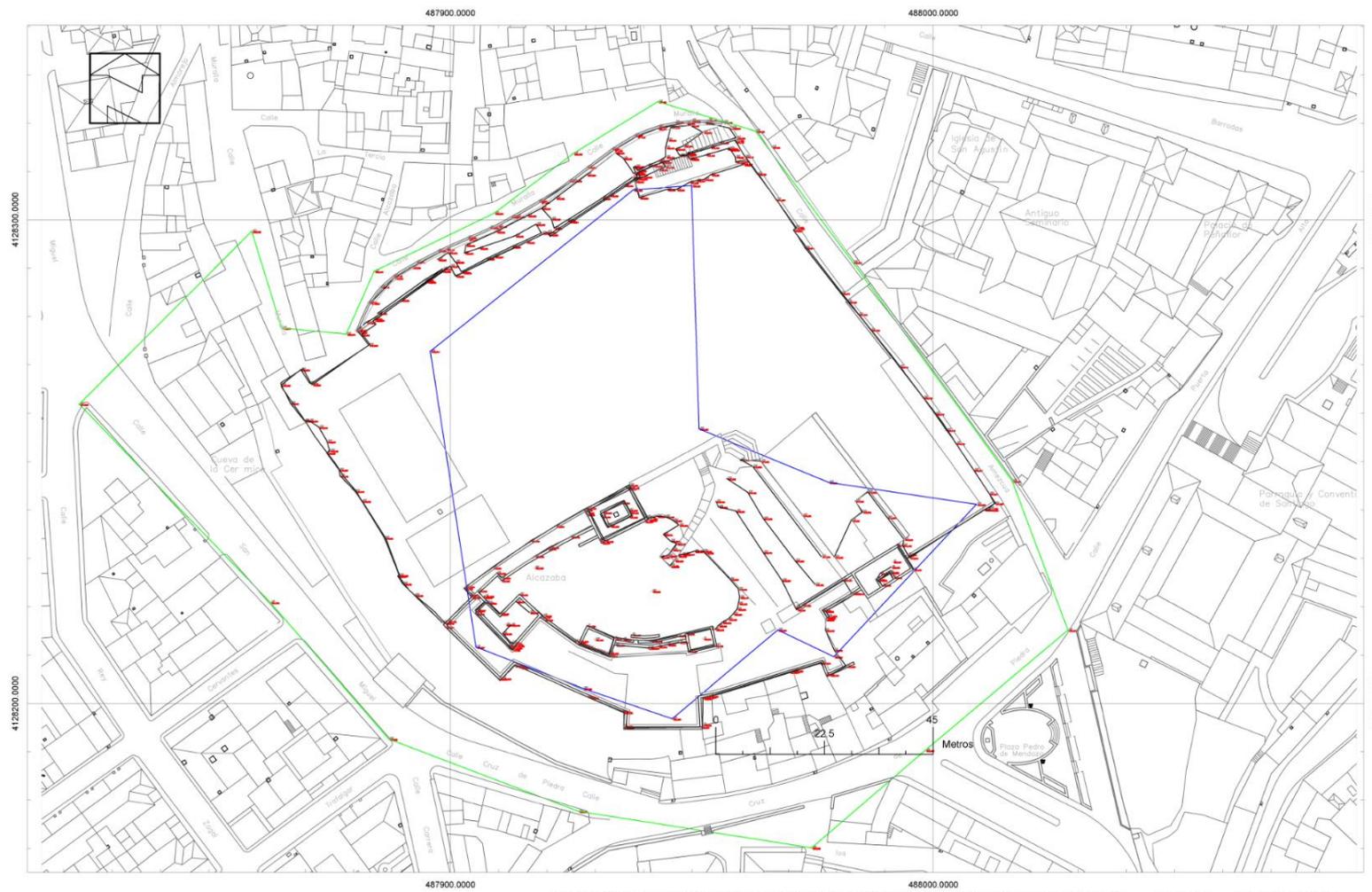
Colocación de pieza de punta de jalón en la base de la antena para medir con precisión elementos accesibles, minimizando el error de verticalidad.

coordenadas GPS-ED50 de levantamiento sistemático...					coordenadas GPS-ETRS89 de levantamiento sistemático de al...				
Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda	Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda
N. pto	X	Y	Z		N. pto	X	Y	Z	
0001	487926.8091	4128212.8938	961.8722		0001	487814.8931	4128005.9819	961.8710	
0002	487926.5854	4128212.3857	961.8336		0002	487814.6694	4128005.4739	961.8325	
0003	487927.1942	4128212.1076	961.8383		0003	487815.2781	4128005.1958	961.8372	
0004	487927.8260	4128211.8321	961.7821		0004	487815.9180	4128004.9283	961.7810	
0005	487928.3887	4128211.6156	961.8101		0005	487816.4727	4128004.7038	961.8889	
0006	487929.1800	4128211.3410	961.4010		0006	487817.1920	4128004.4291	961.3999	
0007	487929.6420	4128211.1435	961.4062		0007	487817.7260	4128004.2316	961.4051	
0008	487930.2688	4128210.9065	961.8224		0008	487818.3527	4128003.9947	961.8213	
0009	487930.7867	4128210.6691	961.8312		0009	487818.8787	4128003.7572	961.8301	
0010	487931.1341	4128210.6205	961.9061		0010	487819.2181	4128003.7086	961.9050	
0011	487931.4037	4128210.4549	961.8232		0011	487819.4876	4128003.5431	961.8221	
0012	487931.9463	4128210.2364	961.8373		0012	487820.0303	4128003.3246	961.8362	
0013	487932.4320	4128210.0158	961.7802		0013	487820.5159	4128003.1040	961.7791	
0014	487932.8806	4128209.8693	961.7741		0014	487820.9646	4128002.9574	961.7730	
0015	487933.1160	4128210.0439	961.8085		0015	487821.1999	4128003.5320	961.8074	
0016	487933.9644	4128213.4916	961.7568		0016	487822.0484	4128006.5797	961.7557	
0017	487928.3253	4128216.0548	961.7349		0017	487816.4093	4128009.1429	961.7338	
0018	487934.2067	4128212.1009	958.0927		0018	487822.2906	4128005.1890	958.0916	
0019	487940.8480	4128211.4430	958.3423		0019	487828.9318	4128004.5310	958.3412	
0020	487941.3988	4128211.4592	958.3556		0020	487829.4827	4128004.5472	958.3545	
0021	487943.0206	4128211.7745	958.3750		0021	487831.1045	4128004.8624	958.3739	
0022	487944.8706	4128212.1724	958.3233		0022	487832.9545	4128005.2603	958.3222	
0023	487947.3508	4128212.6890	958.3378		0023	487835.4347	4128005.7770	958.3367	
0024	487949.3845	4128210.8172	961.8563		0024	487837.4684	4128003.9052	961.8552	
0025	487954.7047	4128211.9589	961.6922		0025	487842.7886	4128005.9469	961.6911	
0026	487953.8881	4128215.5352	961.7639		0026	487841.9721	4128008.6231	961.7628	
0027	487953.8983	4128215.5327	961.7557		0027	487841.9822	4128008.6207	961.7546	
0028	487948.8409	4128214.4461	961.8158		0028	487836.9249	4128007.5341	961.8147	
0029	487948.8279	4128214.4112	961.8449		0029	487836.9118	4128007.4992	961.8438	
0030	487952.3470	4128213.3883	960.0570		0030	487840.4369	4128006.4762	960.0560	
0031	487952.3433	4128213.3911	960.0405		0031	487840.4272	4128006.4790	960.0394	
0032	487947.0574	4128214.0293	958.3446		0032	487835.1413	4128007.1172	958.3435	
0033	487942.0801	4128212.9488	958.3392		0033	487830.1640	4128006.0368	958.3381	

Diferencia de coordenadas UTM en el huso30 referidas al sistema de referencia geodésico ED-50 (listado izquierda) y ETRS-89 (listado derecho). La coordenada Z apenas varía pues el modelo geoidal es muy similar.

Además de la definición precisa de los puntos singulares de las estructuras, se planificaron y midieron otros puntos marcados como referencia sobre el suelo para el posterior estacionado de los taquímetros electrónicos. Se localizaron posiciones idóneas de visualización de las fachadas y a otros puntos de enlace para la correcta orientación acimutal.

En los siguientes gráficos se muestran los puntos medidos de las estructuras (puntos rojos enlazados con líneas color negro), los puntos de estacionado y referencia en el interior del recinto (enlazados por la línea azul) y puntos en las zonas circundantes al monumento (enlazados con línea color verde).



LEVANTAMIENTO GPS DE PUNTOS DE APOYO, ESTRUCTURAS Y BASES ESTACIONADO EXTERIORES E INTERIORES UTM30-ED50 ENERO 2014 ALCAZABA DE GUADIX
 José Antonio Benavides López Dpto. Expresión Gráfica Arquitectónica y en la Ingeniería Universidad de Granada



LEVANTAMIENTO GPS DE PUNTOS DE APOYO, ESTRUCTURAS Y BASES ESTACIONADO EXTERIORES E INTERIORES UTM30-ED50
José Antonio Benavides López Dpto. Expresión Gráfica Arquitectónica y en la Ingeniería Universidad de Granada

ENERO 2014 ALCAZABA DE GUADIX

5.4.1.3 PUNTOS DE APOYO FOTOGRAMÉTRICO

Los puntos de apoyo topográfico son una parte muy importante del proceso de generación de modelos métricos. Los diferentes programas de procesamiento por SFM son capaces de generar de forma casi automática un modelo 3D a partir del análisis de multitud de imágenes, pero necesitan de estos puntos para el calibrado de las imágenes, el ajuste de las dimensiones del objeto y su orientación del mismo sobre el sistema de coordenadas medido en campo, garantizando de esta forma su calidad y utilidad. En resumen, estos puntos permiten ajustar:

- Escala: para que el modelo generado tenga dimensiones reales es necesario escalarlo a partir de las coordenadas conocidas de los puntos de apoyo.
- Posición y orientación: Estas mismas coordenadas confieren al modelo la orientación y nivelación deseada.

- Precisión: si bien los algoritmos de inteligencia artificial son capaces de detectar y relacionar decenas de miles de puntos homólogos en diferentes imágenes, estos producen cierto grado de error debido, fundamentalmente, a la deformación de la imagen causada por las imperfecciones o ajustes de la lente o conjunto de lentes. La determinación de la calibración y eliminación de las deformaciones de la imagen, necesita de los valores medidos de los puntos de apoyo.

La red de puntos de apoyo se realiza colocando dianas adhesivas en el suelo y paramentos verticales de las estructuras y que posteriormente debe quedar recogidas en la secuencia de imágenes capturadas por el vuelo fotogramétrico UAV o por fotografías tomadas desde tierra. Los puntos de fachada deben ser medidos con instrumento topográfico (estación total con distanciómetría laser) a partir de puntos base de coordenadas conocidas.



Dianas adhesivas situadas sobre el paramento y que constituyen los puntos de apoyo fotogramétrico.

La imposibilidad de acceder a determinadas zonas para colocar los puntos de apoyo sobre los paramentos, precisa la medición de determinados puntos singulares (esquinas, marcas, elementos de diferente color, etc.), claramente identificables sobre las fotografías.



Medición de puntos de apoyo fotogramétrico desde diferentes posiciones. En el caso de que sea imposible colocar dianas por no accesibilidad es necesario medir puntos singulares (manchas, puntillas, esquinas bien marcadas, etc.)

La falta de espacio plantea graves problemas en la colocación de los puntos, provocando visuales muy inclinadas en las que es necesario, en algunos casos, utilizar oculares acodados.



Dificultad de medición de los puntos de apoyo por visuales muy inclinadas. A la imposibilidad de visualizar el punto a través del anteojo se suma el error provocado por la trayectoria tangencial del rayo láser respecto del paramento.

Por otro lado, la imposibilidad de medir perpendicular al paramento provoca graves errores por la imprecisión en el ajuste tangencial del el rayo láser. En algunos casos es preferible medir sobre elementos singulares bien definidos donde el spot del rayo láser impacte perpendicularmente.



La medición tangencial del rayo láser pueden provocar errores de varios centímetros.



Captura tangencial de puntos de apoyo sobre el alzado sur de la torre-puerta.



Visuales perpendiculares al paramento constituye la opción ideal para la captura de puntos de apoyo.

La gran precisión en el ajuste que realizan los programas de SFM evita la necesidad de capturar puntos de apoyo en todos los paramentos.



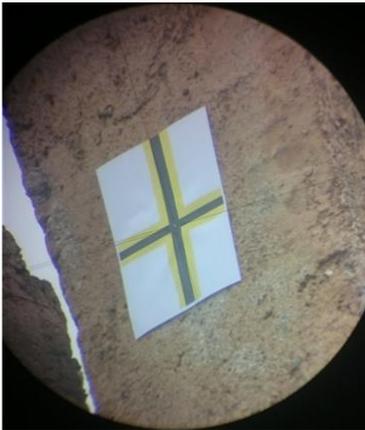
Medición de puntos de apoyo en el alzado este de la torre puerta. El análisis comparado entre los modelos de nubes de puntos con apoyo en todos sus paramentos o solo en dos opuestos nos ha permitido demostrar la validez de los dos modelos. (J.A.Benavides)



En los casos en los que existe extensión suficiente, es preferible distanciarse consiguiendo mejor ángulo de visión y evitando el impacto tangencial del láser sobre los paramentos. Los aumentos que proporcionan los instrumentos actuales (x30) permiten hacer puntería con altísima precisión. (J.A.Benavides)

La obtención de las coordenadas X, Y, Z de las dianas se ha realizado utilizando una Estación Total Leica TCR 805 ultra con medición infrarroja sobre mini-prima a puntos situados sobre el suelo y distanciometría laser

sobre dianas o puntos singulares en paramentos, obteniéndose una precisión milimétrica en la geometría de estos puntos.



Punto de apoyo visto desde el objetivo de la estación



Levantamiento de puntos de apoyo (dianas) situados sobre el suelo mediante distancimetría infrarroja sobre mini-prisma o posicionamiento mediante DGPS (izquierda). La medición de los puntos de apoyo situados sobre paramentos de fachada se ha realizado por distancimetría laser.

5.4.1.4 CAPTURA DE IMÁGENES

Las imágenes digitales constituyen la fuente imprescindible para la generación de modelos virtuales. La captura de imágenes para la documentación de la alcazaba se ha realizado por dos métodos:

- Fotografías estáticas con cámara réflex de alta calidad situada sobre trípode
- Fotografías capturadas desde UAV (Vehículo Aéreo no tripulado). La trayectoria dinámica del Dron provoca desplazamientos en las fotografías que deben ser controlados para que la imagen tenga la nitidez suficiente.

Captura de imágenes desde tierra

La captura secuencial de imágenes desde tierra utilizando cámaras de alta gama aporta numerosas ventajas en cuanto al control de calidad de las imágenes. La utilización de trípode es una condición prioritaria que en ningún caso se debe desestimar. Condiciones de iluminación, profundidad de campo, apertura de diafragma y velocidad de disparo, deben controlarse para una buena calidad de la imagen, pero sobre todo, es necesario tener muy cuenta que la distancia focal no puede cambiar siendo necesario fijar la posición del objetivo mediante cinta adhesiva u otro medio. Por este motivo se recomienda la utilización de lentes con focal fija



Secuencia de imágenes capturadas con cámara Nikon D800 sobre trípode desde diferentes puntos de vista.

La accesibilidad a los puntos de captura óptimos es un factor determinante en los levantamientos fotogramétricos. La captura tangencial de determinadas estructuras dificultan enormemente la restitución de sus elementos, tanto en geometría como en textura.



Captura tangencial del alzado sur de la torre-puerta. La existencia de un edificio abandonado frente a la torre impide su captura frontal desde tierra.

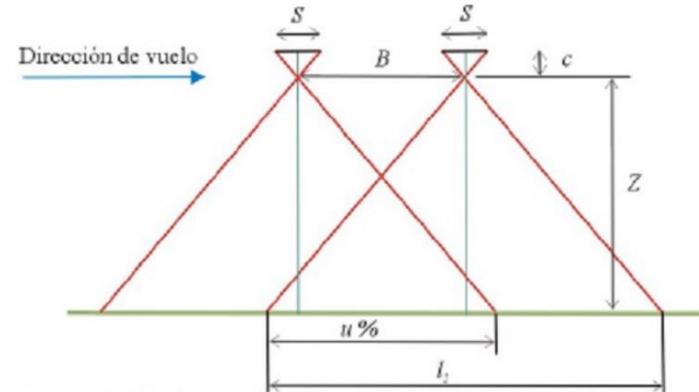
Captura de imágenes aéreas

El vuelo programado mediante UAV de la alcazaba de Guadix requiere la programación previa de los parámetros que determinan la buena calidad radiométrica de las imágenes y un adecuado solapamiento tanto longitudinal como transversalmente.

De acuerdo a la iluminación existente el día de la toma es necesario ajustar la velocidad de disparo para una captura óptima de las imágenes, debiendo regularse la velocidad del equipo UAV para evitar imágenes desenfocadas por desplazamiento. Este último parámetro condiciona igualmente la altura del vuelo (en vuelos a baja altura se producen un desplazamiento relativo mayor provocando imágenes desenfocadas). La situación ideal consiste en una velocidad de disparo alta (1/1000 sg. o mayor) y una velocidad de la aeronave baja (3 m/sg. o menor), para una altura de vuelo de unos 30 m o mayor. Otros condicionantes como la extensión del trabajo, tiempo a emplear en el vuelo, número de baterías disponibles, altura de las estructuras, condiciones meteorológicas, etc. obligan a modificar estos parámetros para adecuarlos a una situación óptima.

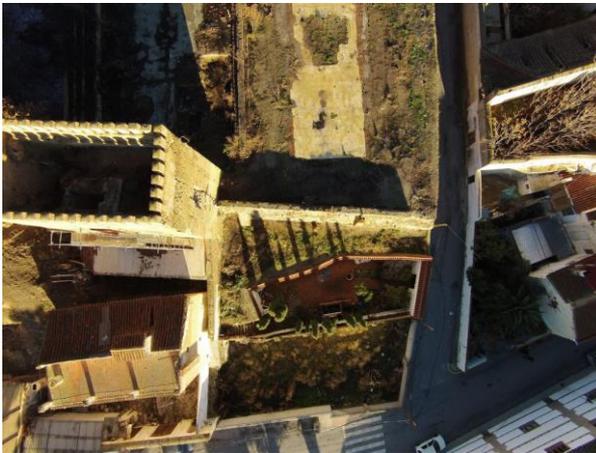


Vuelo programado mediante aplicación Litchi



Vuelo cenital programado mediante la app Litchi. Instalada en el teléfono permite programar el Dron en el campo. La planificación previa se realiza sobre el PC

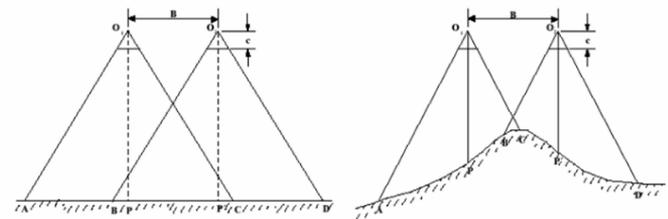
La ubicación de la alcazaba en el casco urbano de Guadix, rodeada de edificios e instalaciones de diferentes altura, con antenas y cableados, ha impedido la realización de un vuelo programado horizontal para la captura de los paramentos verticales. En estos casos, se hace necesario el control manual del equipo, lo que permite acceder, con precaución, a zonas complicadas. Las dificultades del manejo manual hace que se capturen más imágenes de las necesarias, por lo que posteriormente deberán ser filtradas y eliminadas.



Secuencia de 2 imágenes con solape transversal del 20% correspondiente a dos pasadas consecutivas. La mayor altura de las estructuras provoca un menor solape, lo que obliga a realizar tomas adicionales.



Secuencia de 3 imágenes consecutivas donde se observa un área de solape longitudinal mayor del 80%



Problemas de solape de imágenes por cambio de altura del terreno o estructuras. La menor área de recubrimiento en el solape transversal provoca desconexión entre diferentes pasadas.



Captura de imágenes adicionales desde todos los puntos de vista. Evitan la falta de solape necesario para la generación del modelo tridimensional completo. Imagen cenital y oblicua de la torre-puerta de la alcazaba de Guadix.

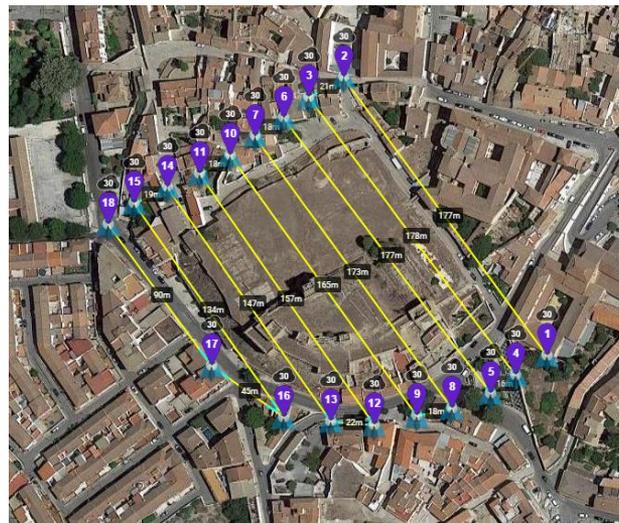


Imágenes oblicuas correspondientes a la torre-puerta de la alcazaba.

La experiencia adquirida durante más de dos años realizando vuelos para la documentación de elementos patrimoniales (castillejo de los Guajares, Torre nazarí de Romilla, Castillo de Bacor, Castillo de Píñar, ciudad fortificada de Castellar de la frontera, Yacimiento dolménico de Darro, Dolmen de Viera, Dolmen del Romeiral, etc.), unido a la adquisición de un nuevo equipo con una mejor óptica motivaron la realización de una nueva captura fotogramétrica que abarcarse por completo el monumento. En esta ocasión se utilizó un dron Phantom3 profesional que incorpora una cámara con las siguientes características:

Sensor	1/2.3" CMOS Píxeles efectivos: 12.4 M (píxeles totales: 12.76 M)
Tamaño Máx. de Imagen	4000×3000 pixel
Lente	FOV 94° 20 mm (35 mm formato equivalente) f/2.8, enfoque a ∞
Rango ISO	100-3200 (vídeo) 100-1600 (foto)
Velocidad Del Obturador	8s -1/8000s
Modos de Fotografía	Disparo único Disparo en ráfaga: 3/5/7 disparos Exposición Automática en Horquillado (AEB): 3/5 Horquilla de Exposición a 0.7EV Bias Time-lapse

Se realizaron 1630 fotografías (650 cenitales y el resto horizontales e inclinadas). Previo al procesamiento se eliminaron 165 imágenes que tenían mala calidad o que por motivo del giro del dron estaban movidas, dejando un total 1465 fotografías.

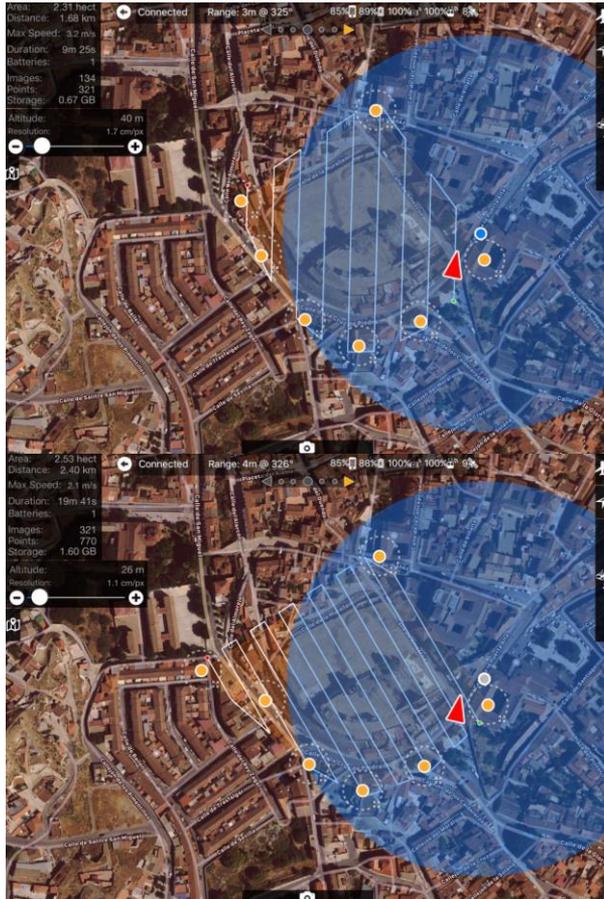


Vuelo cenital programado mediante la app Litchi. Instalada en el teléfono permite programar el Dron en el campo. La planificación previa se realiza sobre el PC

De igual manera, se han probado diferentes configuraciones de vuelo de acuerdo a la resolución final deseada.



Imágenes capturadas con el equipo DJI Phantom 3 profesional.



Diferentes programaciones de vuelo en función del GSD deseado. (izquierda) GSD de 1,7cm para a una altura de 40 m; (derecha) GSD de 1,1 cm. para una altura de vuelo de 26 m. La altura de las estructuras de las torres condicionó un vuelo a mayor altura para evitar las colisiones del UAV.

El diferente punto de vista entre las imágenes cenitales y horizontales para una misma estructura, obliga a realizar capturas oblicuas que permita relacionar unas y otras, obteniendo un modelo completo.



Vista cenital y oblicua de la torre Puerta a baja altura. El necesario solape obliga a realizar tomas oblicuas adicionales.



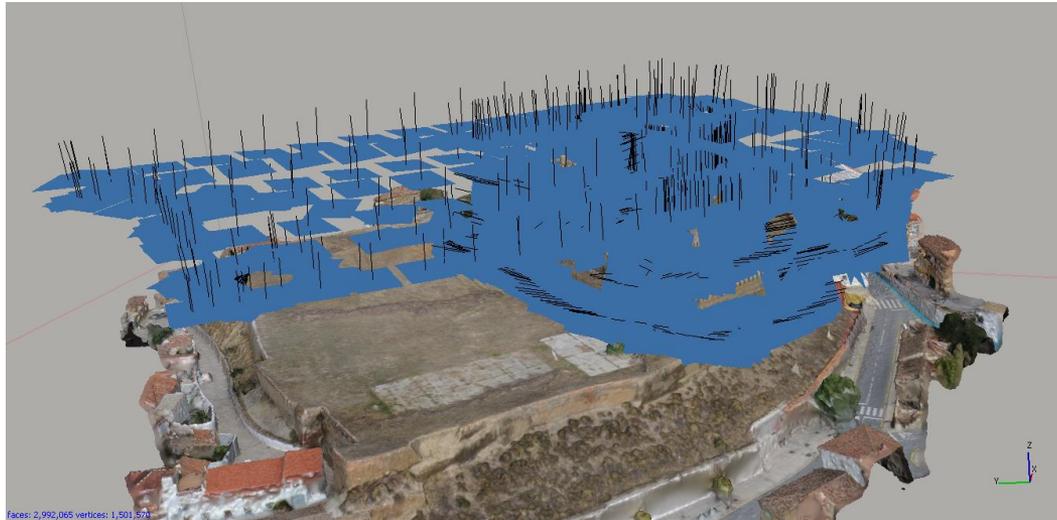
El vuelo con UAV permite la captura de estructuras que son imposible de visualizar con cualquier otro medio.



Vistas horizontales de los paramentos verticales. La mejor distancia de captura nos proporciona imágenes de gran resolución. Debido a la baja altura del vuelo y la presencia de edificios próximos se hace necesario el control manual para evitar choques con objetos.

5.4.2 TRABAJOS DE LABORATORIO EN FOTOGRAMETRÍA

Los UAV incorporan un receptor GPS monofrecuencia que registra, de forma aproximada, sus coordenadas X, Y, Z en el momento de la toma de la imagen. La posición georreferenciada de las imágenes queda registrada en sus datos EXIF, lo que permite una inmediata situación de las mismas al importarlas sobre los programas de procesamiento.



Vista en perspectiva de la situación y orientación de las 1465 fotografías cenitales y horizontales.

Tipo de cámara:		Normal	
Tamaño de píxel en sensor (mm):		0.00140989	x 0.00140989
Distancia focal (mm):		5	
Valores iniciales		Valores ajustados	
GPS/INS offset			
f:	2462.75	b1:	-1.7948
cx:	2.24451	b2:	0.696003
cy:	70.8135	p1:	-0.0028821
k1:	-0.0757304	p2:	0.000838152
k2:	0.0738822	p3:	0
k3:	-0.0227691	p4:	0
k4:	0		

5.4.2.1 PROCESADO SFM PARA OBTENCIÓN DEL MODELO 3D

Como ya hemos indicado, la precisión y resolución del modelo 3D mediante la tecnología SFM va a depender de varios factores relacionados con las imágenes fotográficas. Las variables geométricas y radiométricas que sufren las imágenes deben ser controladas y corregidas para garantizar la calidad del trabajo: la escala (relación métrica entre imagen capturada y realidad), tamaño del GSD (*Ground Sample Distance*, tamaño del píxel en unidades terreno), calidad de la imagen, relación base-altura del vuelo, textura del objeto modelo, visibilidad de puntos de control, etc., van a determinar de forma decisiva la calidad del modelo final.

El proceso de trabajo en oficina se divide en los siguientes pasos:

- Alineación y ajuste preciso de las imágenes. Generación de nube de puntos dispersa.
- Generación de nube de puntos densa.
- Obtención de modelo 3D de superficie.
- Obtención de diferentes documentos gráficos.
- Exportación de documentos gráficos y datos a diferentes formatos de intercambio.

5.4.2.2 ALINEACIÓN DE IMAGENES

Diferentes ajustes de precisión ayudan a obtener estimaciones de la posición relativa de las cámaras en función del número de puntos de control radiométrico detectados. Valores de ajuste bajos (1/16 resolución de la imagen original) permite realizar un ajuste grosero de la posición y orientación de las imágenes para posteriormente reajustarlas aumentando la precisión.

La determinación de la posición y orientación relativa de 1465 imágenes exige establecer un nivel inicial de ajuste bajo (aproximadamente 3500 puntos por imagen). Conocida la posición aproximada de las imágenes, debe realizarse un segundo ajuste de nivel medio. El nivel medio permite detectar un mayor número de puntos de control (aproximadamente 20000 puntos por imagen). Un nivel de ajuste alto (40000 puntos por imagen) ha sido descartado pues exige un importante tiempo de procesamiento informático incluso para un equipo de altas prestaciones.

Detectados los puntos singulares (puntos de enlace radiométrico) en las diferentes imágenes, se procede a la correlación con sus homólogos en otras imágenes obteniendo la posición relativa de los puntos unitivos (56906 puntos para la orientación de 1465 imágenes), determinando de esta forma la localización y orientación relativa de las imágenes entre sí.



Puntos de enlace radiométrico en base al algoritmo SHIF



Vista en perspectiva de los puntos unitivos detectados. Se seleccionaron 56.906 puntos

Realizado este pre-ajuste, en el que no se dispone de escala ni orientación del modelo, procedemos a dos nuevos ajustes: el *primero* consistente en determinar y corregir los parámetros de deformación interna de la cámara (centro óptico, deformación radial y tangencial, etc...) y el *segundo*, en orientar y escalar el modelo

en base a los puntos de apoyo topográfico. Este último se realiza correlacionando las dianas que aparecen en las imágenes con sus correspondientes puntos del levantamiento.

El modelado preciso de las estructuras requiere la localización de los marcadores (puntos de apoyo topográfico) sobre algunas de las imágenes. Este proceso, aunque tedioso pues hay que hacerlo o comprobarlo manualmente, es de suma importancia para optimizar la precisión del modelo y situarlo sobre un sistema de referencia universal.

Por tanto, podemos afirmar que los modelos generados sin los correspondientes puntos de control topográfico carecen de los requisitos de precisión y geocalización que exigen una adecuada documentación del patrimonio.



Puntos de apoyo topográfico. En verde puntos de apoyo visible en esta imagen. En gris, puntos de apoyo del modelo no utilizados para esta imagen.



Estimación de la posición del punto (izquierda). Situación exacta del punto medido (derecha). Si bien aparentemente el desplazamiento del punto de control es pequeño (imagen izquierda), este puede provocar grandes errores en puntos más alejados

En la siguiente tabla se muestran las coordenadas absolutas de los puntos medidos en campo así el número imágenes sobre las que está proyectado y el error medio cuadrático obtenido en la digitalización sobre ellas. Las nuevas aplicaciones permiten utilizar dianas que se detectan automáticamente. Los deficientes resultados obtenidos en las experimentaciones llevadas a cabo nos han hecho desistir de su utilización en pos de otras más simples pero más precisas.

Marcadores	X (m)	Y (m)	Z (m)	Precisión (m)	Error (m)	Proyecciones	Error (pix)
<input checked="" type="checkbox"/> 1	7951.855100	8249.961700	948.087800	0.005000	0.038517	19	0.211
<input checked="" type="checkbox"/> 2	7961.427000	8309.682100	945.182300	0.005000	0.034310	28	0.065
<input checked="" type="checkbox"/> 4	7869.601800	8261.015800	944.629500	0.005000	0.023857	37	0.060
<input checked="" type="checkbox"/> 5	7893.964400	8229.224600	945.042600	0.005000	0.023073	52	0.194
<input checked="" type="checkbox"/> 6	8002.697800	8241.722200	945.572300	0.005000	0.068644	42	0.190
<input checked="" type="checkbox"/> 7	7915.861800	8225.182300	955.283300	0.005000	0.019285	119	0.126
<input checked="" type="checkbox"/> 8	7958.808100	8223.794900	954.110500	0.005000	0.039762	109	0.159
<input checked="" type="checkbox"/> 9	7979.467500	8209.227800	952.117500	0.005000	0.018412	19	0.105
<input checked="" type="checkbox"/> 10	7940.894400	8201.852600	952.963100	0.005000	0.032766	85	0.149
<input checked="" type="checkbox"/> 11	7905.285300	8211.663500	952.798900	0.005000	0.017614	25	0.104
<input checked="" type="checkbox"/> 12	7991.175700	8227.082400	957.175700	0.005000	0.026022	85	0.069

Ejemplo de valores originales correspondientes a los puntos de apoyo fotogramétrico; número de proyecciones sobre fotografías y error medio cuadrático de cada punto tras el ajuste.

De igual manera es posible visualizar los errores cometidos en la digitalización en sus diferentes valores de desplazamiento X,Y, Z y descartar aquellos puntos que se consideren no están dentro de tolerancia.

Marcadores	X err (m)	Y err (m)	Z err (m)	Precisión (m)	Error (m)	Proyecciones	Error (pix)
<input checked="" type="checkbox"/> 1	0.037806	0.004683	-0.005688	0.005000	0.038517	19	0.211
<input checked="" type="checkbox"/> 2	-0.032556	0.006574	-0.008606	0.005000	0.034310	28	0.065
<input checked="" type="checkbox"/> 4	-0.020804	0.009261	-0.007113	0.005000	0.023857	37	0.060
<input checked="" type="checkbox"/> 5	0.000704	0.018488	0.013786	0.005000	0.023073	52	0.194
<input checked="" type="checkbox"/> 6	-0.048087	-0.029775	0.038899	0.005000	0.068644	42	0.190
<input checked="" type="checkbox"/> 7	-0.004321	0.015291	-0.010929	0.005000	0.019285	119	0.126
<input checked="" type="checkbox"/> 8	0.034382	-0.008485	0.018080	0.005000	0.039762	109	0.159
<input checked="" type="checkbox"/> 9	0.016621	-0.007539	-0.002431	0.005000	0.018412	19	0.105
<input checked="" type="checkbox"/> 10	0.017981	-0.003025	-0.027224	0.005000	0.032766	85	0.149
<input checked="" type="checkbox"/> 11	-0.000255	-0.002445	0.017441	0.005000	0.017614	25	0.104
<input checked="" type="checkbox"/> 12	-0.001649	-0.003142	-0.025779	0.005000	0.026022	85	0.069

Ejemplo de valores correspondientes a los errores en cada una de sus coordenadas X, Y, Z

Tras el correspondiente ajuste por mínimos cuadrados es posible determinar las nuevas coordenadas de los marcadores

Marcadores	X est (m)	Y est (m)	Z est (m)	Precisión (m)	Error (m)	Proyecciones	Error (pix)
<input checked="" type="checkbox"/> 1	7951.892906	8249.966383	948.082112	0.005000	0.038517	19	0.211
<input checked="" type="checkbox"/> 2	7961.394444	8309.688674	945.173694	0.005000	0.034310	28	0.065
<input checked="" type="checkbox"/> 4	7869.580996	8261.025061	944.622387	0.005000	0.023857	37	0.060
<input checked="" type="checkbox"/> 5	7893.965104	8229.243088	945.056386	0.005000	0.023073	52	0.194
<input checked="" type="checkbox"/> 6	8002.649713	8241.692425	945.611199	0.005000	0.068644	42	0.190
<input checked="" type="checkbox"/> 7	7915.857479	8225.197591	955.272371	0.005000	0.019285	119	0.126
<input checked="" type="checkbox"/> 8	7958.842482	8223.786415	954.128580	0.005000	0.039762	109	0.159
<input checked="" type="checkbox"/> 9	7979.484121	8209.220261	952.115069	0.005000	0.018412	19	0.105
<input checked="" type="checkbox"/> 10	7940.912381	8201.849575	952.935876	0.005000	0.032766	85	0.149
<input checked="" type="checkbox"/> 11	7905.285045	8211.661055	952.816341	0.005000	0.017614	25	0.104
<input checked="" type="checkbox"/> 12	7991.174051	8227.079258	957.149921	0.005000	0.026022	85	0.069

Nuevos valores estimados de las coordenadas de los puntos tras el ajuste.



Situación de los puntos de apoyo sobre la estructura de la torre puerta.

5.4.2.3 GENERACIÓN DE NUBE DE PUNTOS DENSA

Conocida la posición exacta de las cámaras procedemos a la generación, por ajuste de haces, de una nube de puntos densa por triangulación múltiple. Es decir, se reproducen haces de cada imagen respecto de su centro de proyección, intersecando con los haces correspondientes de los puntos homólogos de otras imágenes, dando lugar a la creación de millones de puntos en 3D que se corresponden fielmente con el modelo real del yacimiento o edificio.

Diferentes grados de resolución de acuerdo a las necesidades del trabajo:

Fijar la resolución del modelo es un factor decisivo a la hora de generar nubes de puntos. Esta resolución vendrá fijada por las necesidades del trabajo. Modelos muy precisos (resolución milimétrica) requieren mayor tiempo de procesamiento, generando archivos que pueden ser inmanejables por el gran volumen de datos, por otro lado, modelos menos precisos (resolución centimétrica) pueden ser insuficientes para la correcta definición del elemento a documentar. La ausencia de elementos de decoración con formas complejas en la alcazaba de Guadix, nos ha permitido establecer una resolución suficiente para el análisis geométrico, morfológico y de las UEs a documentar.



Perspectiva desde oeste de nube de puntos densa. La alta densidad de puntos (44.875.872 puntos) permite su visualización a esta escala como si se tratara de un sólido.(J.A.Benavides)



Perspectiva desde el sur la nube de puntos densa. Modelo completo de la alcazaba y su entorno.(J.A.Benavides)

La alta densidad de los puntos hace que parezca un modelo sólido. El aumento de escala al acercarnos al modelo provoca que los puntos pierdan conexión con sus vecinos dando lugar a un modelo transparente que impide la restitución de las formas que constituyen el modelo.



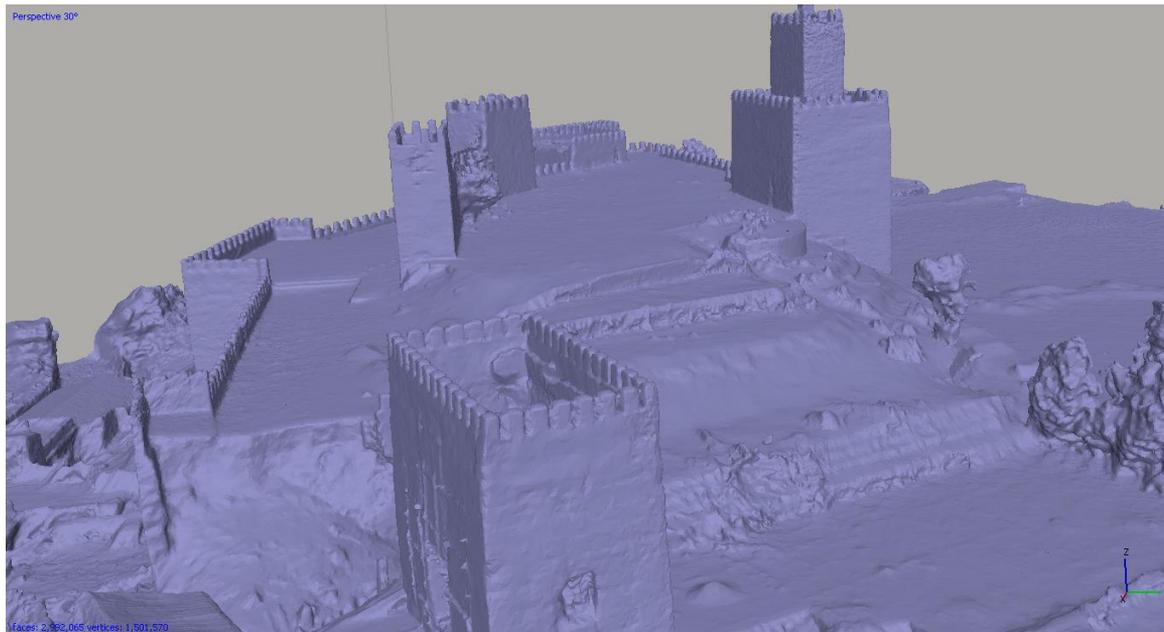
Detalle de diferente apreciación de la nube de puntos en función de la escala de visualización. Al aproximarnos a nube solo apreciamos puntos inconexos sin definición de objetos. Los objetos lejanos, representados a menos escala siguen definiendo formas que parecen compactas.

5.4.2.4 OBTENCIÓN DE MODELO 3D DE SUPERFICIE

La indefinición de formas que genera la nube de puntos nos plantea la necesidad de disponer de un modelo digital de superficie mucho más realista y efectivo. Este proceso consiste en la aplicación de un algoritmo de triangulación extremadamente complejo capaz de determinar la dirección correcta de cada una de las caras de la superficie en función del posicionamiento de las cámaras. La precisión de la superficie TIN (triangular irregular network) generada depende de la resolución de la nube de puntos. En algunos casos será necesario realizar procesos de suavizado y oclusión de huecos para mejorar el modelo.



Vista en perspectiva del modelo triangulado de la Alcazaba, formado por 2.992.065 caras.(J.A.Benavides)



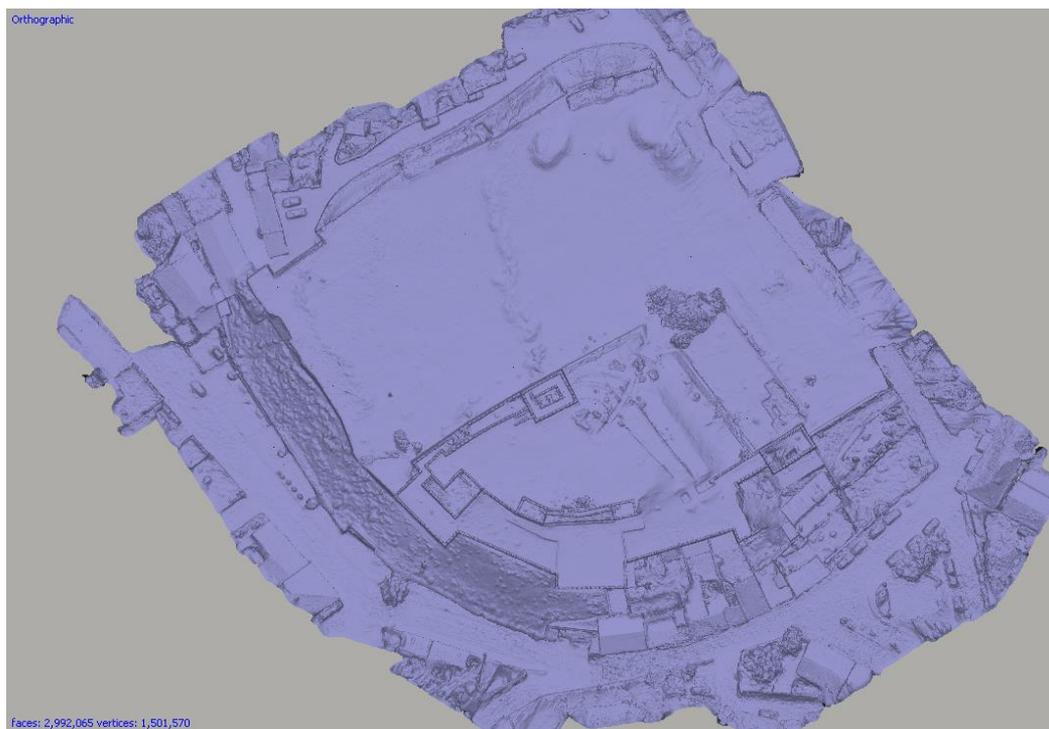
Malla renderizada para mejor visualización de las superficies. .(J.A.Benavides)



Malla renderizada con color. En este caso el color de cada cara de triángulo se corresponde con la media de los colores de los tres vértices que la forman. .(J.A.Benavides)



Vista en perspectiva de la malla con textura realista. La textura aplicada a cada una de las caras del triángulo se realiza mediante la aplicación directa de partes de imágenes sobre la malla. El resultado óptimo se realiza a partir de imágenes ortogonales al elemento a documentar. .(J.A.Benavides)



Vista en planta de la malla 3d generada para la Alcazaba de Guadix .(J.A.Benavides)



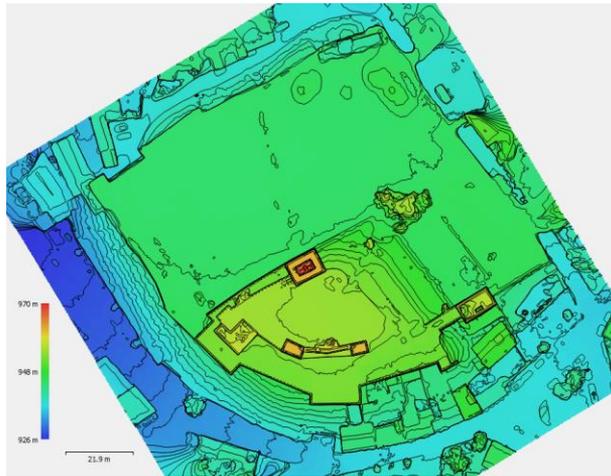
Vista en planta de la Alcazaba de Guadix con textura realista. (J.A.Benavides)

Los modelos obtenidos deben permitir la documentación completa y rigurosa del bien a investigar. La correcta evaluación de las formas y fases constructivas nos exige la resolución de modelo sea lo suficientemente óptima para su análisis e interpretación.

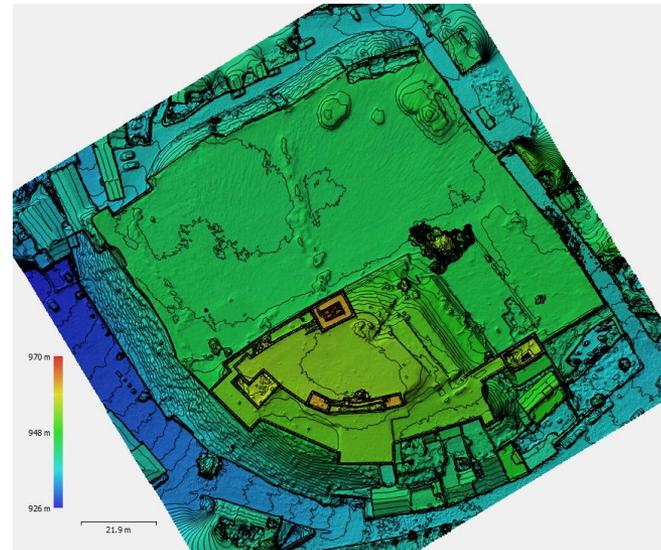


En estas vistas se observa el alto grado de detalle que se obtiene al generar una ortofotografía. La resolución de la imagen se corresponde con el tamaño del GSD (tamaño del pixel sobre la realidad). (J.A.Benavides)

En muchos casos es necesario disponer de documentos de índole técnica para la mejor comprensión de los datos: Modelos Digitales de elevaciones permiten la generación de secciones horizontales dando lugar a los planos con curvas de nivel con la equidistancia deseada



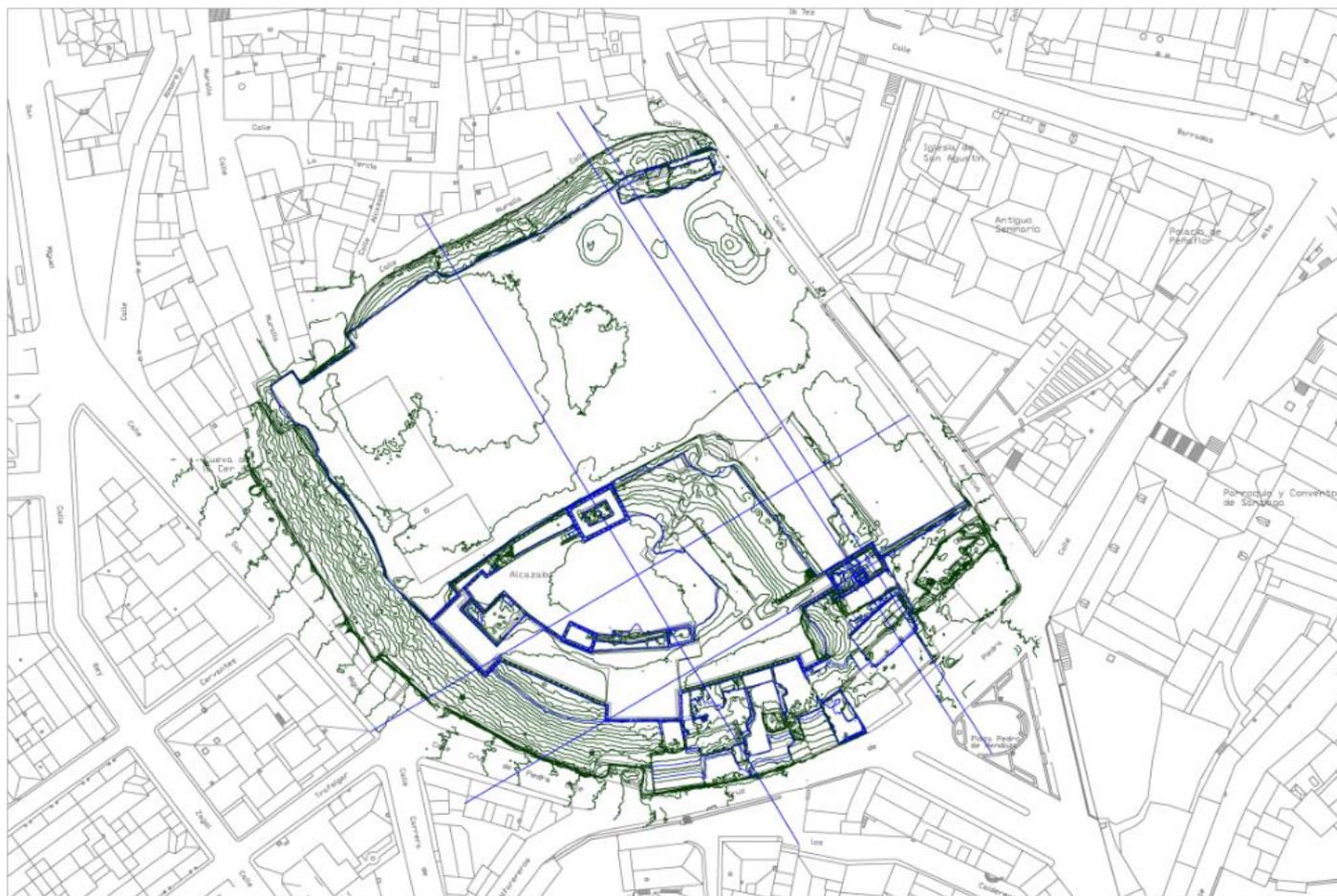
Modelo digital de elevaciones con equidistancia 1 m. .(J.A.Benavides)



Modelo digital de elevaciones con equidistancia 0,5 m.
.(J.A.Benavides)



Superposición del plano con curvas de nivel 0.5m sobre ortofotografía digital de la planta. .(J.A.Benavides)





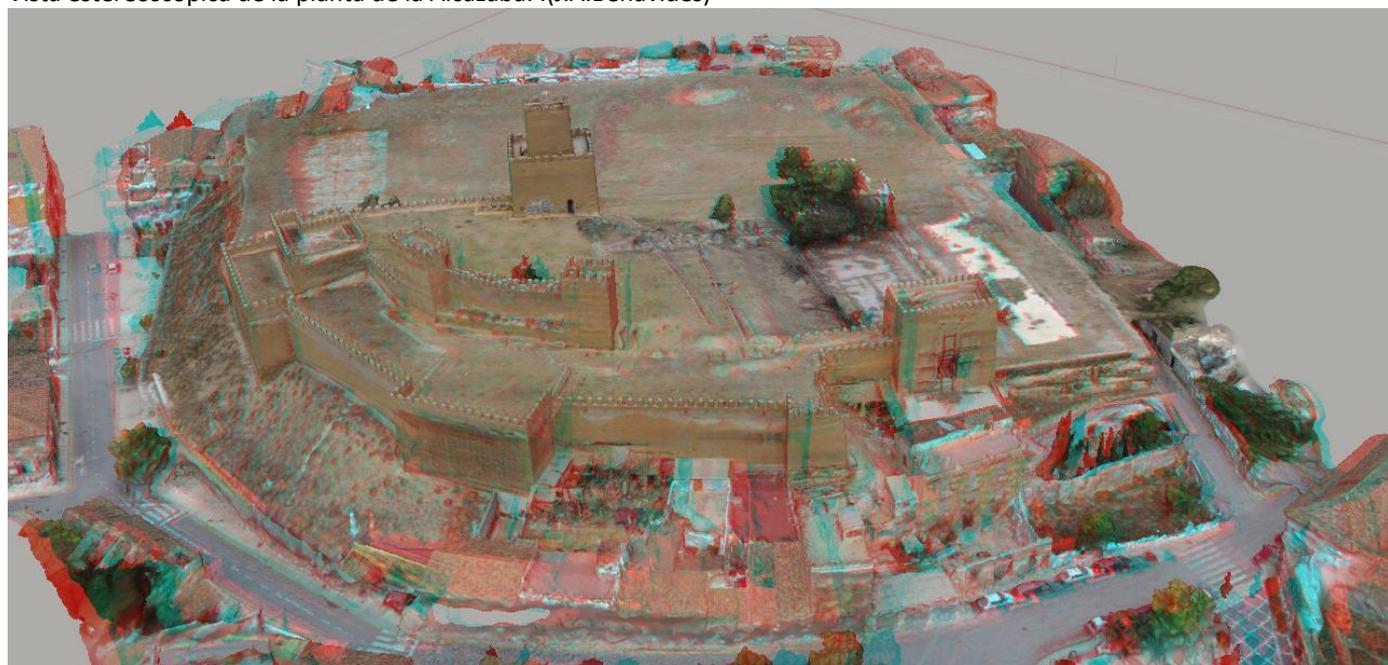
5.4.2.1 VISTAS ESTEREOSCÓPICAS DE LA ALCAZABA DE GUADIX MEDIANTE ANAGLIFOS



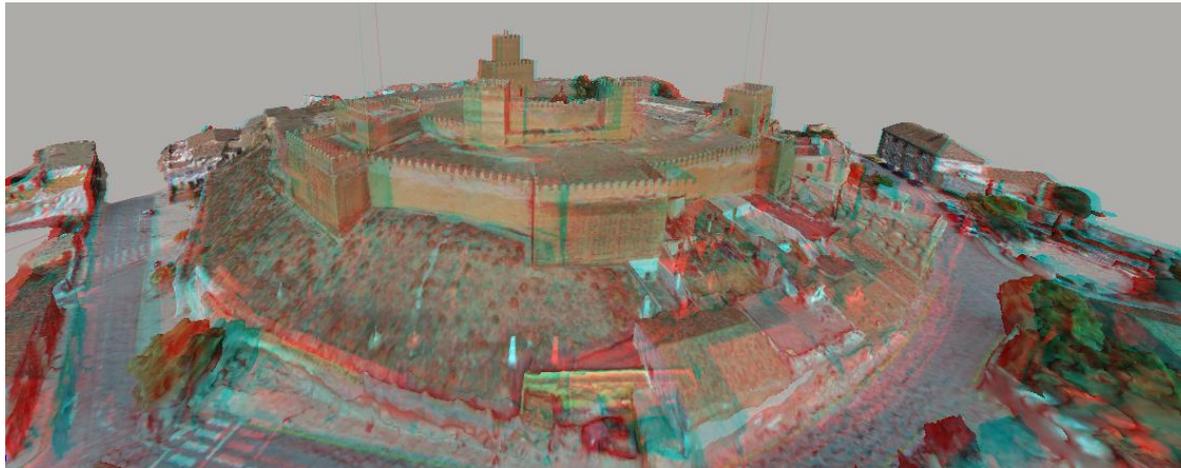
Vista estereoscópica de la planta de la Alcazaba. (J.A.Benavides)



Vista estereoscópica de la planta de la Alcazaba. .(J.A.Benavides)



Modelo estereoscópico desde el sur. .(J.A.Benavides)



Modelo estereoscópico desde el sur.(J.A.Benavides)

Tras el análisis comparado de los modelos tridimensionales obtenidos con fotogrametría de imágenes múltiples y escáner laser concluimos que existe una autentica supremacía de los métodos fotogramétricos. La comparación de las nubes de puntos indica una distribución no homogénea e incompleta de puntos capturados con el escáner (zonas con una densidad enorme de puntos frente a otras no capturadas),

respecto del registro completo realizado con fotogrametría multimagen. Evaluados los resultados obtenidos se comprueba que en todas las situaciones el levantamiento realizado con escáner laser ha sido considerablemente más desfavorable que el realizado con fotogrametría SFM.



Imagen de la distribución no homogénea de puntos de escáner frente al registro completo realizado por fotogrametría SFM. En color cian se muestra el modelo 3D realizado mediante SFM, en tono marrón el realizado mediante escaneado laser. .(J.A.Benavides)

5.4.2.2 INFORME DEL PROCESADO Y GENERACIÓN DE MODELO 3D DE LA ALCAZABA DE GUADIX

Datos del levantamiento

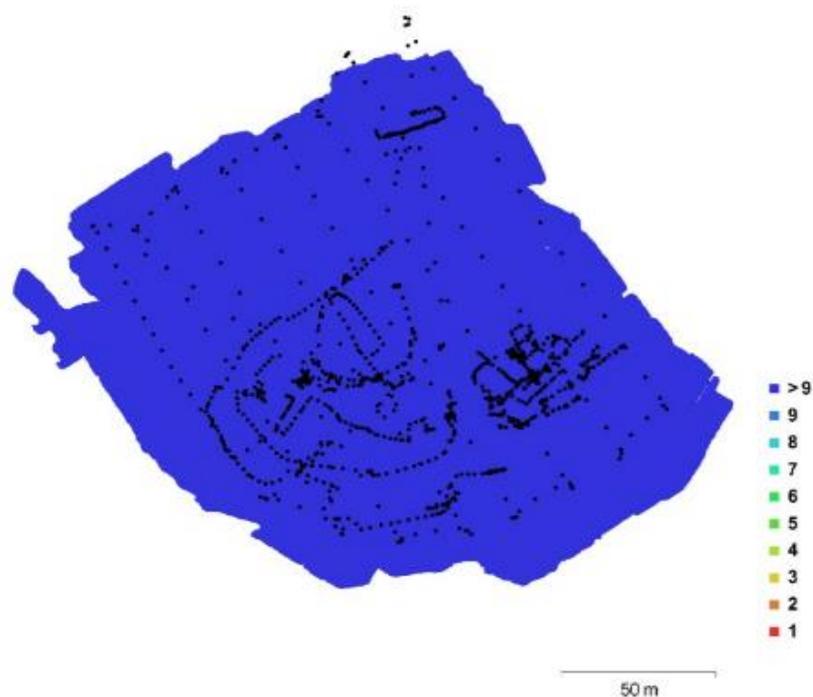


Fig. 1. Posiciones de cámaras y solapamiento de imágenes.

Número de imágenes:	1,465	Posiciones de cámara:	1,465
Altitud media de vuelo:	19.5 m	Puntos de enlace:	56,906
Resolución en terreno:	7.55 mm/pix	Proyecciones:	351,140
Superficie cubierta:	2.47e+04 m ²	Error de reproyección:	2.36 pix

Modelo de cámara	Resolución	Distancia focal	Tamaño de píxel	Precalibrada
PHANTOM VISION FC200 (5 mm)	4384 x 3288	5 mm	1.41 x 1.41 micras	No

Tabla 1. Cámaras utilizadas.

5.4.2.3

Calibración de cámara/s

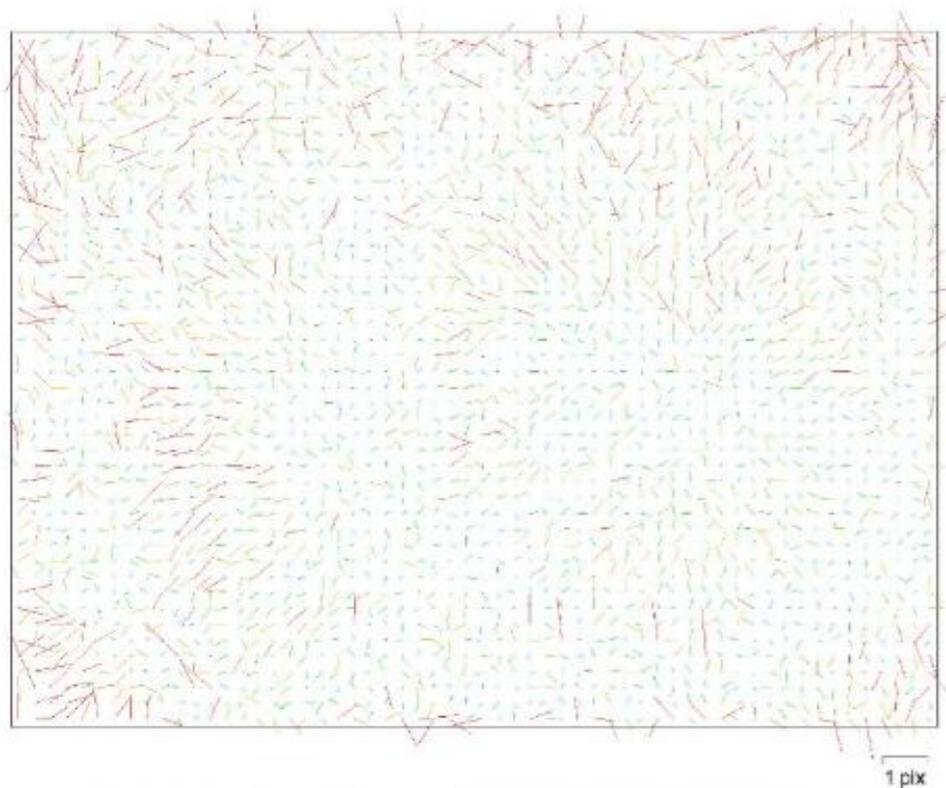


Fig. 2. Gráfico de residuales para PHANTOM VISION FC200 (5 mm).

PHANTOM VISION FC200 (5 mm)

1465 imágenes

Resolución	Distancia focal	Tamaño de píxel	Precalibrada
4384 x 3288	5 mm	1.41 x 1.41 micras	No
Tipo:	Cuadro	Skew:	0.696003
Fx:	2460.95	Cx:	2194.24
Fy:	2462.75	Cy:	1714.81
K1:	-0.0757304	P1:	0.000838152
K2:	0.0738822	P2:	-0.0028821
K3:	-0.0227691	P3:	0
K4:	0	P4:	0

Puntos de control terrestres



Fig. 3. Posiciones de puntos de apoyo.

Nombre	XY error (m)	Error en Z(m)	Error (m)	Proyecciones	Error (pix)
1	0.0380945	-0.00568796	0.0385168	19	0.211
2	0.0332126	-0.00860648	0.0343096	28	0.065
4	0.0227718	-0.00711278	0.0238568	37	0.060
5	0.0185017	0.0137864	0.0230733	52	0.194
6	0.0565588	0.0388993	0.0686444	42	0.190
7	0.0158896	-0.0109285	0.019285	119	0.126
8	0.0354137	0.0180802	0.0397621	109	0.159
9	0.0182506	-0.00243101	0.0184118	19	0.105
10	0.0182338	-0.0272237	0.0327659	85	0.149

5.5 CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES Y TÉCNICAS CONSTRUCTIVAS

El estudio de los materiales y las técnicas constructivas, nos permite indagar sobre determinados códigos relacionados el uso de materiales y la forma de colorarlos, atendiendo tanto a cuestiones puramente arquitectónicas, como de valor cultural, lo que nos permite aproximarnos a su datación histórica [290]

La caracterización de las técnicas constructivas y sus tipologías permite comprender la evolución histórica de los edificios. Los diversos estudios realizados sobre cronotipologías constructivas en la zona de Granada [291] nos ha permitido establecer dataciones aproximadas de los periodos evolutivos. La principal técnica constructiva de época medieval utilizada en la alcazaba de Guadix es el tapial, en sus diferentes modalidades, siendo el aparejo de ladrillo y/o la mampostería, las técnicas utilizadas para las obras de restauraciones de la época. Los sillares solo están presentes en las jambas de la torre puerta y en alguna reparación estructural con material reutilizado.

Las intervenciones arqueológicas realizadas por José María Martín Civantos (codirector de la tesis) y Jorge Rouco Collazo (alumno del Master de arqueología de la UGR) sobre la alcazaba de Guadix han permitido extraer la información necesaria para la documentación rigurosa del conjunto monumental de la alcazaba de Guadix.

La caracterización de técnicas constructivas ha permitido reforzar las diferencias cronológicas apreciadas a

partir de las relaciones estratigráficas, completándolas, al permitir datar una fase frente a otra. Si bien, en la alcazaba de Guadix muchas de estas relaciones se encuentren enmascaradas por las intervenciones posteriores que las ocultan o desvirtúan.

5.5.1 TAPIAL

La principal técnica constructiva utilizada en la alcazaba es el tapial o tapia. Se han documentado tres tipologías: tapias calicostradas, de cal y canto y el hormigonado. Cada uno de estos tipos, presenta a su vez, diversas variantes en factura, que demuestran que han sido realizados en momentos diferentes, o, por lo menos, por cuadrillas de obreros distintas, al emplear técnicas diversas

Tapial de cal y canto

Los estudios realizados por Martín Civantos para la provincia de Granada, permiten fechar el tapial de cal y canto como una técnica constructiva propia del reino *ziri*. De hecho, según su hipótesis, sería parte de un programa realizado para la construcción y el reforzamiento de las fortificaciones de todo el reino en el siglo XI. Lograrían así fortalecer el control territorial sobre el naciente reino y convertir la tipología constructiva en un claro acto de propaganda de la presencia de un nuevo poder, que se diferencia del anterior por el nuevo código constructivo [292].

290 LUQUE MARTÍNEZ, F. D. (2003). El castillo de Píñar: análisis arqueológico de las estructuras de superficie. Granada: José Javier Álvarez García.

291 MARTIN CIVANTOS, J. M. (2009) "La alcazaba de Guadix: de fortaleza andalusí a cuartel militar Napoleó-

nico". Boletín del Centro de Estudios Pedro Suárez: Estudios sobre las comarcas de Guadix, Baza y Huéscar. nº 22, p. 283-296.

292 MARTIN CIVANTOS, J. M., & MARTIN GARCÍA, M. (2012). Analysis parameters for systematization of rammed earth walls in Granada and Almería (Andalucía, Spain). *Rammed Earth Conservation*, 175.

De acuerdo a los datos que se aportaron en la intervención arqueológica del año 2009 [293], podemos establecer que los elementos realizados con el tapial de “cal y canto” se corresponden con estructuras del siglo XI.

El tapial de cal y canto se caracteriza por la gran proporción de piedras de mediano y gran tamaño en el interior del mortero. Las piedras acostumbran a ser cantos de río transportados desde algún lugar cercano o piedra del terreno regularizada. Al ser arrojadas por la parte superior del cajón, hacen la función de apisonado del mortero. Los cantos se distribuyen homogéneamente a lo largo de la tapia, pero los de mayor tamaño acostumbran a situarse en los cajones inferiores aumentando la función resistente y protegiendo a los muros de la humedad del suelo.

En la alcazaba de Guadix se han detectado cinco tipos distintos de tapial de cal y canto, estando utilizados tanto para las cimentaciones como para los muros. Todos ellos se corresponden con las fases más antiguas del monumento (siglo XI). La cantidad de mampuestos constituyentes del núcleo en la base de los muros, lo asemejan a un muro de mampostería.



Detalle de tapial de cal y canto en la torre puerta S-E. Detalle de la gran cantidad de mampuestos en el núcleo de las estructuras. Muralla sur junto a torre puerta.

Tapial calicostrado

El tapial calicostrado se caracteriza por la presencia de una gruesa costra de cal en sus caras externas, que se va adelgazando hacia el interior del cajón formando cuñas entre las diferentes tongadas. [294]

Esta técnica, correspondiente a época almohade o primeros tiempos de la época nazarí sustituye al tapial de

293 MARTÍN CIVANTOS, J.M. (2010) «Informe preliminar de la intervención arqueológica puntual de apoyo a la propuesta de parque arqueológico en la alcazaba de Guadix (Granada)». Informe de excavación. Granada: Junta de Andalucía. Consejería de Cultura.

294 MARTÍN GARCÍA, M. (2009). La construcción del tapial calicostrado en época nazarí. V Convención Técnica de la Arquitectura Técnica (CONTART'09). Albacete.

cal y canto, convirtiéndose en la nueva técnica constructiva monumental del poder recién instaurado [295]. Diversas intervenciones han demostrado su posterioridad estratigráfica directa respecto al tapial de cal y canto [296]. Por tanto, podemos establecer que las ampliaciones realizadas en alcazaba mediante esta técnica de tapial se corresponde con época almohade o nazarí (entre los siglos XII- XV)

En la alcazaba de Guadix se han identifican siete tipos correspondientes a las diferentes fases constructivas de la Alcazaba. En ninguno de los tipos hemos apreciado el apoyo de estos sobres muros de mampostería. Técnica habitual en esta época nazarí para evitar el contacto directo con el terreno. No sabemos si se debe a que están camuflados por una importante costra de cal o por la inexistencia de estos.



Detalle de dos tipos de encofrado de un mismo tapial. (J.A.Benavides)



Imagen de tapial calicostrado con la impronta de las tablas que forman los cajones. (J.A.Benavides)

295 MARTÍN-GARCÍA, M. (2009). *La construcción del tapial calicostrado en época nazarí*. V Convención Técnica de la Arquitectura Técnica (CONTART'09). Albacete.

296 MARTÍN CIVANTOS, J.M. (2010) «Informe preliminar de la intervención arqueológica puntual de apoyo a la

propuesta de parque arqueológico en la alcazaba de Guadix (Granada)». Informe de excavación. Granada: Junta de Andalucía. Consejería de Cultura.



El deterioro del tapial sufrido en aquellas zonas con humedad (muros de contención), ha provocado un importante desprendimiento en la cara exterior. .(J.A.Benavides)



Construcción del lienzo de muralla, mediante tapial hormigonado. .(J.A.Benavides)

Tapial hormigonado

En lo relativo al tapial hormigonado, presente solo en la torre central de la barbacana, resulta imposible precisar una cronología, ya que habitualmente es utilizado para aljibes por su impermeabilidad, teniendo además una amplia cronología en al-Ándalus, correspondiéndose en este caso a periodo nazarí

5.5.2 LADRILLO

El ladrillo es un material muy común en la Edad Media que se utiliza fundamentalmente para realizar reparaciones en los muros.

En la Alcazaba de Guadix se documenta como medio para realizar reparaciones en el tapial. Los ladrillos son macizos y se presentan en seis tipos de fábrica: de aparejo regular (tipo L1), de aparejo mixto con hiladas de mampostería (tipo L2 y L3) y aparejo mixto irregular

con mampuestos (tipo L4), de aparejo regular de época cristiana (L5) y aparejo regular correspondiente a la ocupación napoleónica (L6).

Tipo L1

Se trata de un aparejo regular de ladrillo que se conserva en la UE 49 de la E4 y las UEs 68 y 71 de la E7. Son unidades realizadas de ladrillos regulares unidos con un mortero de cal de color grisáceo. Las dimensiones de los ladrillos son de 25 centímetros de largo por 3 de ancho.



Aparejo irregular de ladrillo en la restauración de una de las torres en la calle muralla.

Tipo L2

Se localiza en las unidades 156 y 174 de la E29, la UE 273 de la E46. Se trata de un aparejo mixto de ladrillos regulares unidos con mortero grisáceo junto a hiladas de cantos de río de mediano tamaño.



Aparejo regular con hiladas de cantos de río, que evitan el traspaso de humedad por capilaridad.

Tipo L3

Unidad 292 de la E48, se corresponde al igual que el tipo 2 con una técnica mixta con cajones de mampostería, encontrándose los ladrillos yagueados con una decoración de cal.



Aparejo irregular de ladrillos y mampuestos tomados con cal.

Tipo L4

Se trata de la unidad 14 de la estructura 2. Es un parche de restauración realizado con hiladas irregulares de ladrillo con mortero de cal grisáceo y una hilada de mampuestos de mediano tamaño calzados con otros ladrillos macizos.



Hilada de mampostería regularizando el apoyo de la fábrica irregular de ladrillo en una obra de restauración o reparación.

Tipo L5

Se trata de un aparejo regular de ladrillo que se conserva en la restauración realizada en época de Reyes Católicos sobre la torre puerta. La dimensión del ladrillo es de 27x12x3 cm tomados con mortero rico en cal. Realiza un aparejo por hiladas, intercambiando de forma irregular sogas y tizones. Los tendeles son de 2 cm.



Aparejo regular de ladrillo de época cristiana. Refuerzo estructura en la esquina septentrional de la torre puerta.

Tipo L6

Se corresponden con las intervenciones realizadas por el ejército napoleónico en su ocupación de la alcazaba. Se han detectado tanto en el nuevo muro y puerta de acceso en la esquina sur-este, junto a la torre puerta, como en los muros de ampliación de la explanada, en este caso formando un aparejo mixto de hiladas de ladrillo y mampuestos de mediano tamaño.



Construcción y restauración de muro con ladrillo macizo de época Napoleónica.

Tipo L7

Se trata la inclusión de hiladas de ladrillo en las bases de los cajones de tapial correspondiente a la fase de ampliación de la torre-puerta correspondiente a los siglos XII y XIII



Hiladas de ladrillo en la base de los cajones de tapial.

Por otro lado, encontramos otro tipo de fábricas de ladrillo realizadas en época contemporánea, en su mayoría ladrillos de tipo hueco doble, encontrándose en muy mal estado de conservación



Restauración del lienzo de muralla en explanada realizada con ladrillo h/d. Su poca resistencia a la humedad hace que se haya perdido.

5.5.3 SILLARES Y SILLAREJOS

Los sillares están formados por elementos de piedra de gran tamaño y peso, que han sido trabajados en todas sus caras, formando paralelepípedos. Estos sillares se utilizan para conformar y reforzar las esquinas de los

muros y como elemento decorativo y resistente en la puertas de fortificadas.

Se entiende por sillarejos como aquellos sillares de menor tamaño, utilizados habitualmente en las zonas bajas. En la alcazaba solo se localiza dos unidades realizadas en sillarejo que utilizan la misma tipología de material: La unidad (S1) correspondiente a la zarpa de cimentación de la torre CE 12. Se trata de sillarejos de arenisca ligeramente escuadrados, seguramente procedentes del teatro romano de la ciudad. Están unidos por un mortero grisáceo con abundantes nódulos de cal. La unidad (S2) se corresponde con los restos de las jambas de puerta, en el interior de la torre sur-este. En este segundo caso, se disponen de acuerdo a soga y tizón como era habitual en las puertas de entrada en los recintos fortificados.



Sillar de piedra caliza reforzando la esquina del CE 12 (izquierda). Restos muy deteriorados de las jambas de la torre puerta mediante sillares colocados a soga y tizón.

5.6 ARQUEOLOGIA DE LA ALCAZABA. NUEVA PROPUESTA DE ANÁLISIS Y REPRESENTACIÓN ARQUEOLÓGICA SOBRE MODELOS TRIDIMENSIONALES

En este apartado nos proponemos desarrollar una nueva propuesta metodológica para la documentación arqueológica de las unidades estratigráficas a partir del dibujo y clasificación de entidades sobre modelos tridimensionales.

Como ya indicamos anteriormente la determinación de la estratigrafía de las estructuras y su secuencia evolutiva requiere gran experiencia por parte del arqueólogo. La caracterización de las técnicas constructivas junto al apoyo bibliográfico ha permitido a los arqueólogos Rouco Collazo y Martín Civantos realizar un exhaustivo análisis que ha sido recogido en el Trabajo Fin de Master de Arqueología de la Universidad de Granada

El análisis arqueológico realizado por los arqueólogos Rouco Collazo y Martín Civantos mediante el estudio de las técnicas constructivas y sus relaciones espaciales, ha permitido ordenar una secuencia evolutiva del mismo, intentando establecer su cronología histórica. La metodología seguida en el análisis estratigráfico consta de tres fases:

- Primera fase o de campo en la que mediante una observación minuciosa del edificio se analizan las diferentes UEs, registrándolas en fichas, dibujos y ortofotografías.
- Segunda fase de dibujo sobre soporte digital
- Tercera fase de análisis e Interpretación de los datos, con la creación de la secuencia estratigráfica e hipótesis interpretativa.

Previamente se realizó una búsqueda exhaustiva de las referencias documentales, gráficas y bibliográficas,

tanto de la propia alcazaba como de la ciudad de Guadix, con el objetivo de tener toda la información posible de cara a las salidas de campo.

La complejidad del análisis estratigráfico de la Alcazaba hizo necesaria la división en conjuntos estructurados de datos, estableciendo la siguiente distribución:

- Complejo Estructural (CE): conjunto de estructuras articuladas entre sí que forman un espacio arquitectónico con una funcionalidad determinada.
- Estructura (E): conjunto de unidades estratigráficas que cumplen una misma funcionalidad estructural.
- Unidad Estratigráfica (UE): elemento menor individualizable a partir de la homogeneidad de su composición y técnica constructiva.

Otro dato a tener en cuenta fue la caracterización de las técnicas constructivas. El material constructivo básico de la Alcazaba de Guadix es el Tapial, por lo que es necesario determinar diferentes parámetros como, dimensión de los cajones, espesor de las tongadas, la distancia entre las agujas y las dimensiones y tipología de estas, grosor de la costra exterior en caso de conservarse y fundamentalmente, sus componentes y proporciones.

El ladrillo es otro de los elementos más comunes en la Alcazaba, sobre todo por las restauraciones acometidas en sus diferentes fases. Debemos tener en cuenta la regularidad de las hiladas, su aparejo y el tipo de ladrillo utilizado –macizo o hueco–, permitiendo diferenciar cronologías.

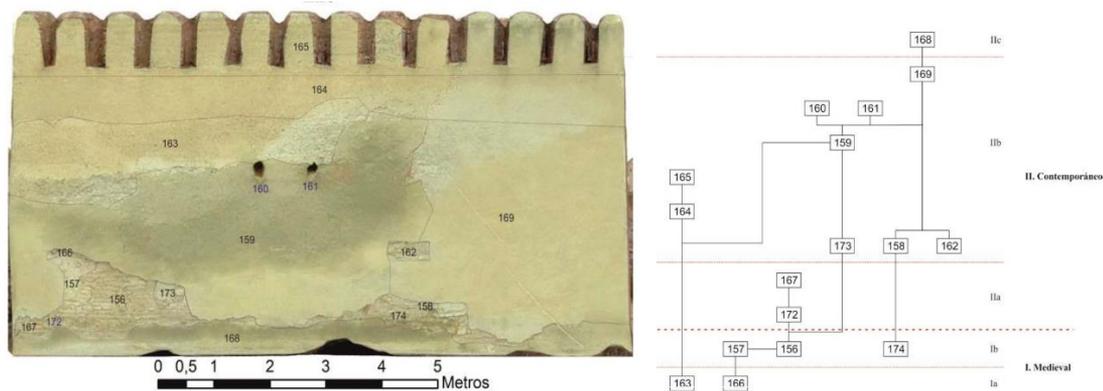
Seguidamente se realizó la representación gráfica en formato digital de cada una de la UEs a partir de las ortofotografías generadas mediante el modelo 3D. Se muestran aquí algunos ejemplos de las ortofotografías de diferentes estructuras correspondientes al complejo estructural interior (CE-14). Se aportan los análisis y la matrix Harris realizados por Rouco Collazo y Martín Civantos para estas estructuras.

Ejemplo del proceso seguido en el Complejo Estructural 14 Estructura 29



Ortofotografía de la estructura 29 generada a partir del modelo 3D de la Alcazaba de Guadix y que ha servido de base para el dibujo de las UEs. Realizada por J.A. Benavides

En el siguiente gráfico se muestra el análisis de las UEs realizadas por Rouco Collazo sobre la estructura 29 así como la matrix Harris con la secuencia histórica (TFM del Master de Arqueología de la Universidad de Granada, 2016)



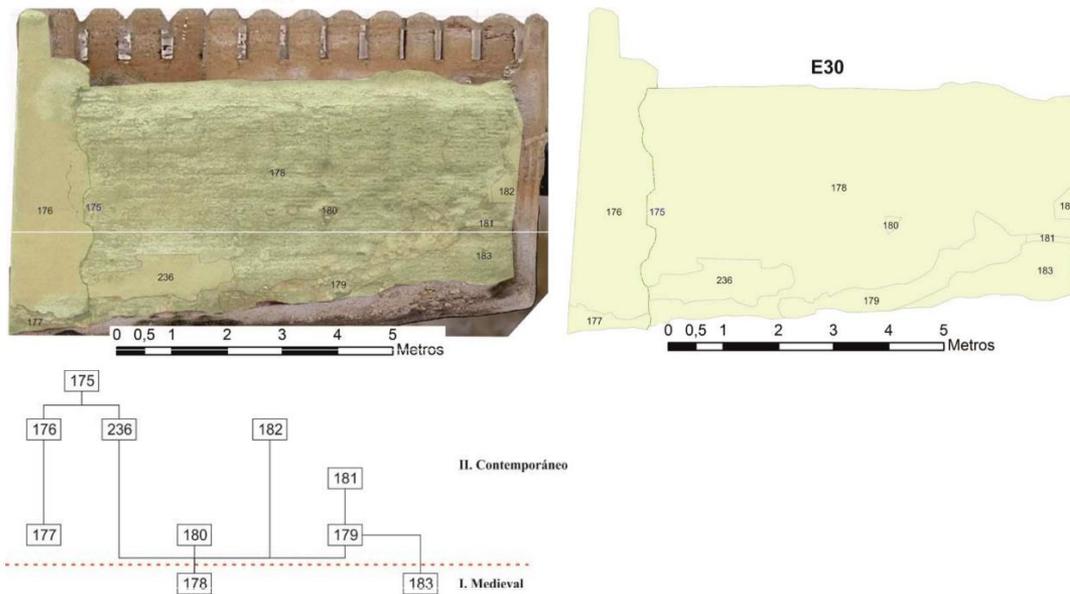
Análisis de las UEs y Matrix Harris correspondiente a la estructura 29. Realizado por Rouco Collazo

Estructura 30



Ortofotografía de la estructura 30 generada a partir del modelo 3D de la Alcazaba de Guadix y que han servido de base para el dibujo de las UEs. Realizada por J.A. Benavides

Análisis de las UEs realizadas por Rouco Collazo sobre E-30 (TFM de Arqueología, UGR 2016)



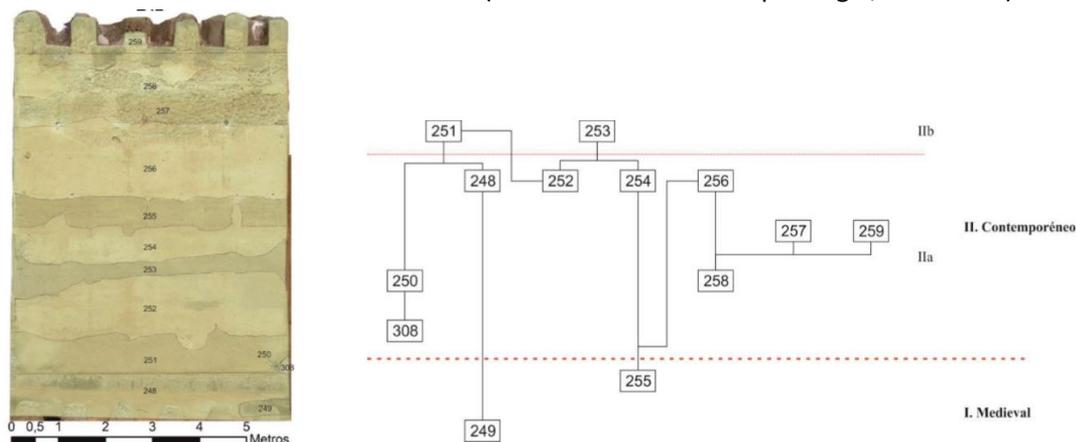
Análisis de las UEs y Matriz Harris correspondiente a la estructura 30. Realizado por Rouco Collazo

Estructura 42



Ortofotografía de la estructura 42 y 45 generadas a partir del modelo 3D de la Alcazaba de Guadix y que han servido de base para el dibujo de las UEs. Realizada por J.A. Benavides

En el siguiente gráfico se muestra el análisis de las UEs realizadas por Rouco Collazo sobre la estructura 42 así como la matriz Harris con la secuencia histórica (TFM del Master de Arqueología, UGR 2016)



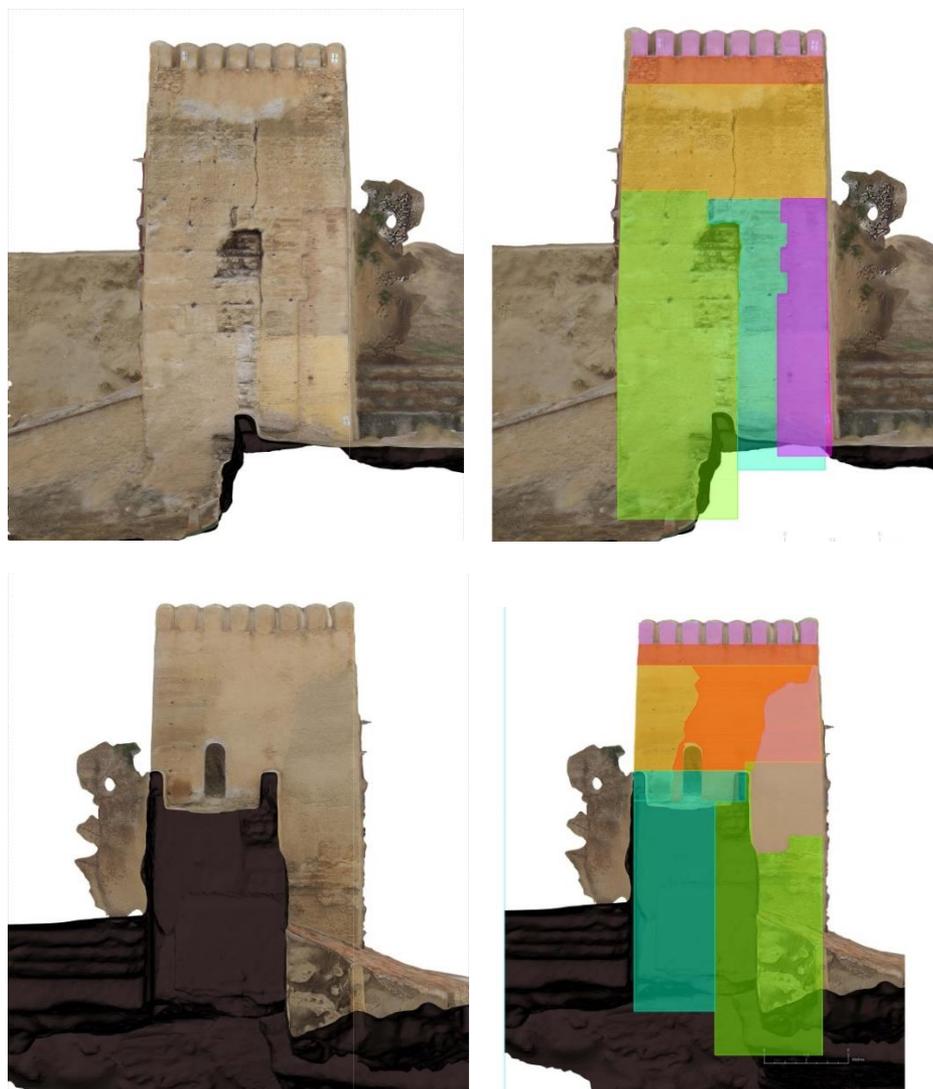
Análisis de las UEs y Matriz Harris correspondiente a la estructura 42. Realizado por Rouco Collazo

Este estudio arqueológico ha servido de base para el desarrollo de una documentación gráfica exhaustiva de la alcazaba para partir de la generando ortofotografías y modelos tridimensionales que permitan un mejor conocimiento, interpretación y difusión de este Bien.

Tras este primer análisis y toma de datos en campo, se ha procedido al dibujo de las diferentes UEs sobre soporte digital (CAD) apoyándose sobre las ortofotografías individuales de cada una de las estructuras.

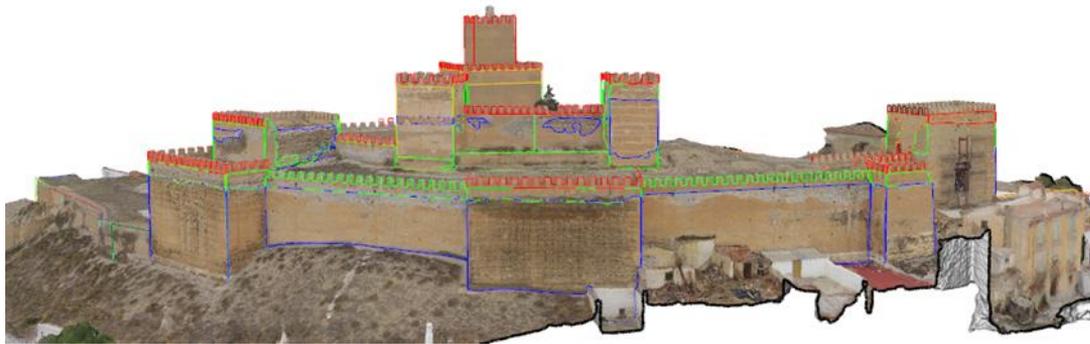


Digitalización de las unidades estratigráficas muráreas correspondientes a la estructura de la torre puerta de la alcazaba de Guadix. Alzado sur (arriba), Alzado norte (abajo). (J.A. Benavides).



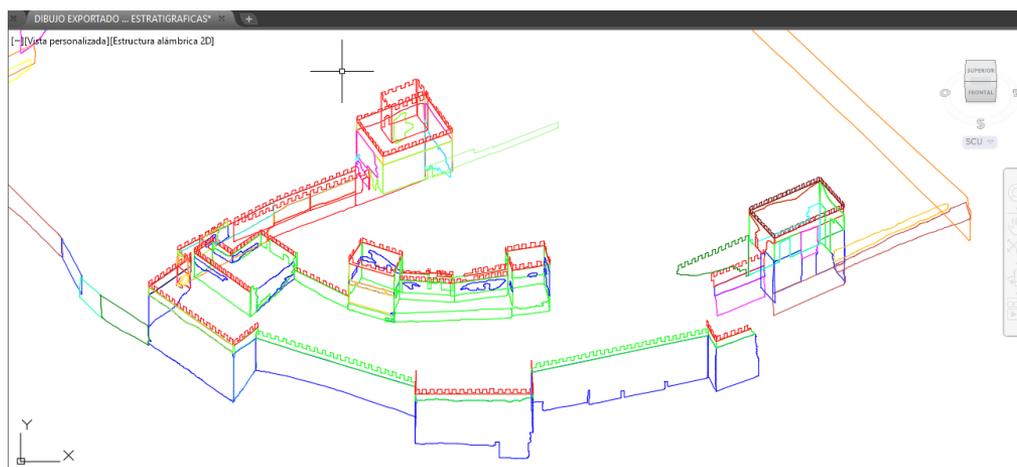
Digitalización de las unidades estratigráficas muráreas correspondientes a la estructura de la torre puerta de la alcazaba de Guadix. Alzado este (arriba), alzado oeste (abajo). (J.A. Benavides).

La imposibilidad de realizar un análisis contextualizado de todo el monumento o incluso de un solo complejo estructural, hizo que a partir de los análisis realizados por los arqueólogos y con objeto de mejorar la comprensión histórica de las fases constructivas, se planteara una digitalización tridimensional de las UEs más relevantes y que facilitara a investigadores y otros agentes sociales un mejor conocimiento y difusión de estos bienes. La digitalización de las UEs se ha realizado de forma directa sobre el modelo 3D renderizado.



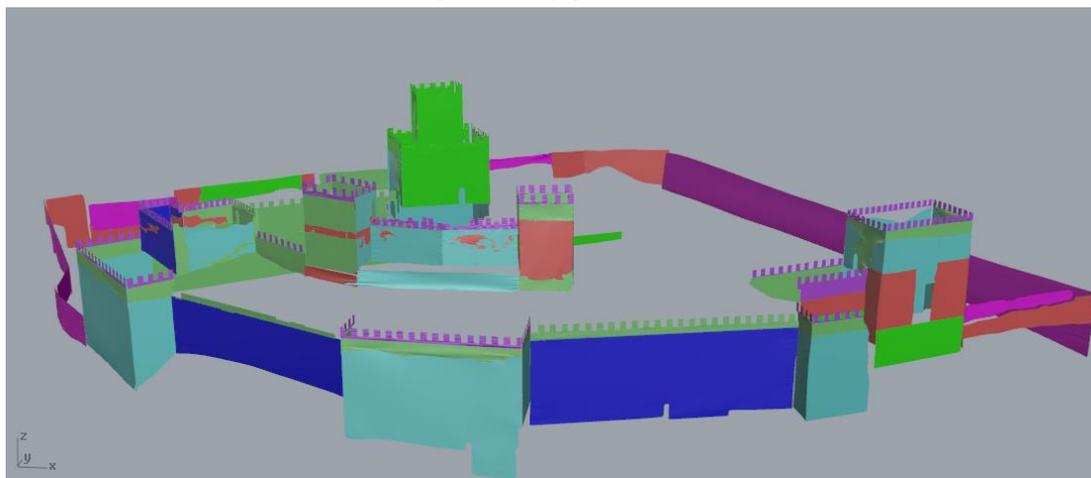
Dibujos de las UEs sobre el modelo 3D renderizado de las estructuras de la alcazaba de Guadix. Perspectivas desde el norte y el sur. (J.A.Benavides)

La definición alámbrica de las UEs, si bien clasificada por capas y colores, impide una visión clara del modelo y sus relaciones estratigráficas, siendo habitual aplicar texturas que faciliten su comprensión.



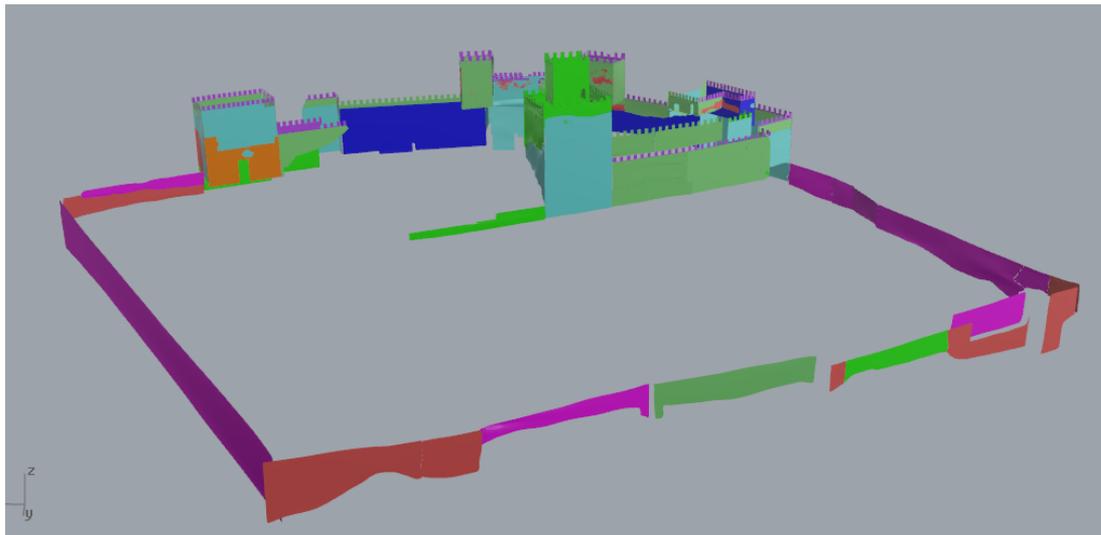
Modelo 3D exportado a AutoCAD con definición de las interfaces correspondientes al análisis estratigráfico simplificado de las estructuras de la Alcazaba de Guadix. (J.A.Benavides)

Con objeto de mejorar esta visualización, se generó un modelo tridimensional de superficies aplicando texturas diferenciadas de acuerdo a la caracterización de los materiales y las fases históricas analizadas en el estudio arqueológico. La clasificación cronológica por capas permite ver la evolución histórica de las estructuras y sus relaciones contextuales, facilitando enormemente su comprensión y gestión.

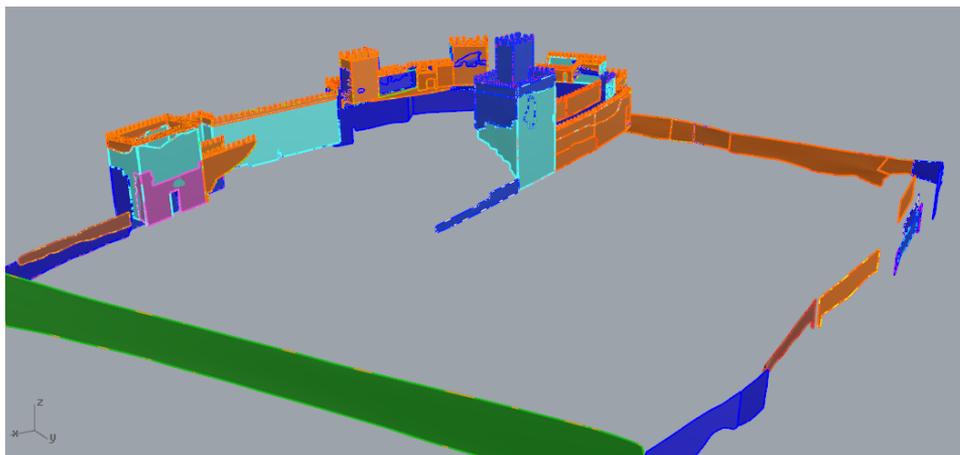


Perspectiva sur del modelo 3D correspondiente al análisis de todas las fases constructivas. El color de la capa indica la fase. (J.A.Benavides) sobre Rhinosceros 5.0

La gestión individualizada de las capas por fases, permite una visión contextualizada entre diferentes estructuras. La visión de conjunto que aportan los modelos tridimensionales permite una mejor comprensión del proceso evolutivo del objeto de estudio.

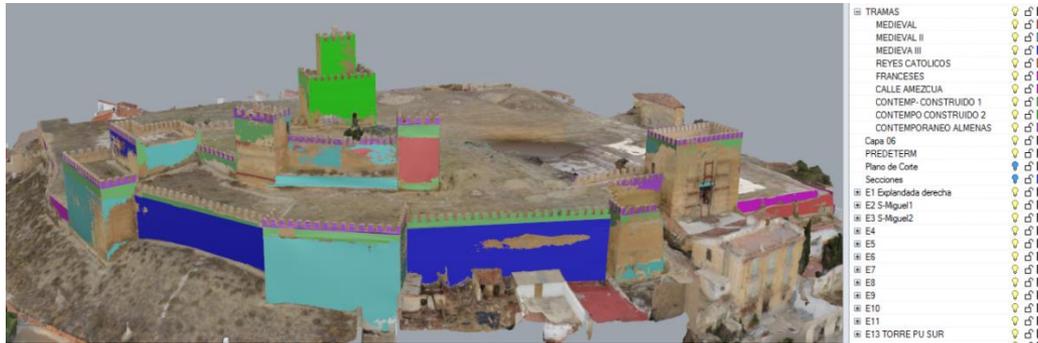


Perspectiva norte del modelo 3D correspondiente al análisis de todas las fases constructivas de la alcazaba. (J.A.Benavides) sobre el *software* Rhinosceros 5.0



Perspectiva este del modelo 3D correspondiente al análisis de todas las fases constructivas. Realizado por J.A.Benavides sobre Rhinosceros 5.0

La superposición de las fases constructivas sobre la visualización realista del modelo constituye una herramienta de gran valor para la difusión del patrimonio.



Vista sur del modelo 3D simplificado de las UEs sobre el modelo de malla texturizado. El impacto visual del modelo dinámico con la superposición de las fases permite la mejor comprensión y difusión de la evolución histórica de los edificios. (J.A.Benavides)

Tras este estudio e independientemente de la complejidad constructiva de cada una de las estructuras de la alcazaba de Guadix podemos determinar seis fases:

Fase I: siglo XI.- Construcción del primer recinto en época taifa.

Fase II: siglo XII- Refuerzo de torres en el flanco sur en época Almohade.

Fase III: siglo XIII-XIV.- Refuerzo y ampliación del flanco sur (extramuros), ampliación y refuerzo de las dos torres de entrada al recinto, construcción del recinto interior y torre del homenaje, en época Nazarí.

Fase IV: siglo XV Reparación de elementos estructurales mediante ladrillo. Época cristiana.

Fase V: siglo XIX. Remodelación general del recinto para adaptarlo a cuartel napoleónico.

Fase VI: siglo XX. Reconstrucción de elementos estructurales tras la guerra civil por Regiones Devastadas y por su adaptación a colegio seminario por parte de la iglesia. Este tipo de intervenciones tendían a falsear esa arquitectura, imponiendo el criterio de reconstrucción, no el de la conservación.

5.1 HIPOTESIS DE RECONSTRUCCIÓN VIRTUAL Y DOCUMENTACIÓN GRÁFICA A PARTIR DE LAS INVESTIGACIONES ARQUEOLÓGICAS

Las reconstrucciones virtuales constituyen una herramienta eficaz para dar a conocer y difundir los procesos de transformación de los edificios históricos. La reconstrucción virtual de la alcazaba de Guadix, llevada a cabo por el alumno German García Soler [297], bajo la dirección de José María Martín Civantos y José Antonio Benavides López, se ha basado en datos objetivos a partir de los estudios arqueológicos previos.

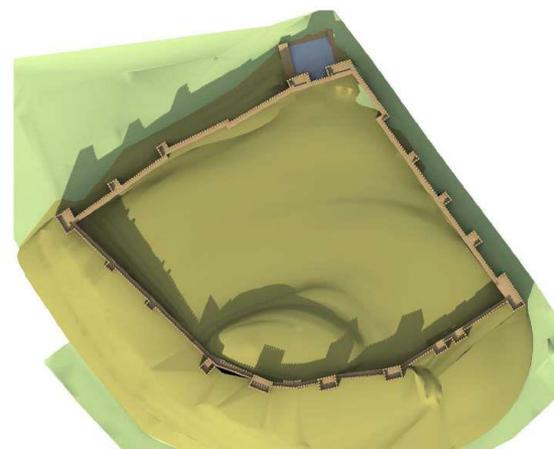
A partir del análisis arqueológico anterior podemos determinar cuatro grandes fases constructivas que se describen en los siguientes gráficos e imágenes y muestran la evolución histórica del monumento.

FASE I. construcción del primer recinto en el siglo XI



Hipótesis de construcción de la alcazaba en el siglo XI. Realizado por el J.A.Benavides en base a los estudios arqueológicos.

Durante el s. XI la fortaleza consistía básicamente en una muralla de tapial de cal y canto en la que se intercalaban, en puntos estratégicos, torres rectangulares que mejoraban su defensa. Disponía de dos entradas. La principal, situada en el lienzo meridional, coincidente con la actual torre-puerta. Estaba formada por una entrada de acceso directo protegida por dos torres de mediana altura. En el flanco septentrional se situaba otra puerta, de similares característica a la ya indicada, que daba acceso a la medina (hoy perdida). Los hallazgos arqueológicos realizados por Martín Civantos y su equipo en el año 2011 han permitido la reconstrucción virtual de esta puerta.



Plano en planta con la hipótesis de reconstrucción virtual en el siglo XI. Vista realizada por García Soler, 2013

Esta documentación gráfica ha sido obtenida a partir de los dibujos en planta realizados sobre el modelo 3D del estado actual y dibujados mediante la herramienta de diseño tridimensional SketchUp. Los efectos gráfi-

²⁹⁷ GARCIA SOLER, G. (2013). Proyecto monográfico de Investigación "Documentación gráfica del Patrimonio mediante el uso de nuevas tecnologías". Universidad de

Granada. Dirigido por José Antonio Benavides López y José María Martín Civantos.

cos de textura, luces y sombras y sobre todo de la visualización tridimensional ayudan enormemente a su comprensión.



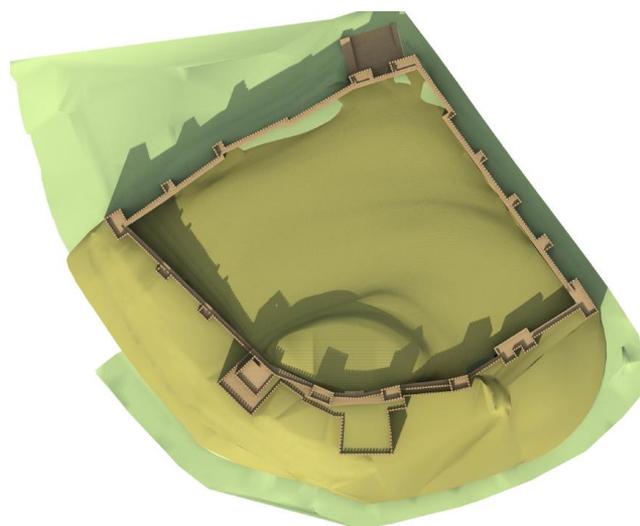
Perspectiva desde el sur de la hipótesis de reconstrucción virtual de la alcazaba de Guadix en el siglo XI. García Soler, 2013

Intervenciones en el SIGLO XII: refuerzo en el flanco meridional. Fase almohade

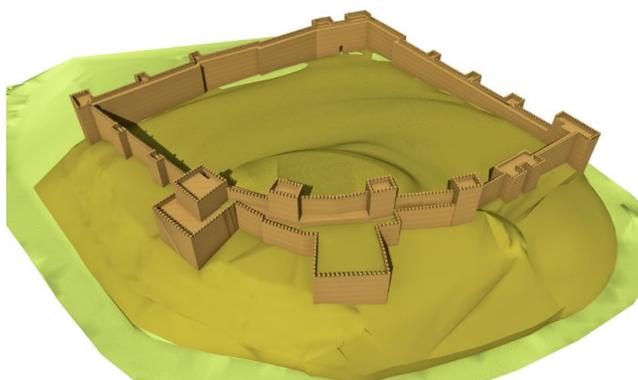
Durante el siglo XII se realizan una serie de intervenciones de reforzamiento del flanco meridional, consistente en la realización de dos torres (torres 16 y 17) que avanzan en la colina para proteger la zona más desprotegida visualmente. De igual forma, se refuerzan la torre puerta (torre 1) y la torre 5, aumentando sus dimensiones tanto en planta como en elevación.



Vista en planta de la hipótesis de construcción de la alcazaba de Guadix en el siglo XII. Realizado por el J.A.Benavides en base a los estudios arqueológicos.



Plano en planta con la hipótesis de reconstrucción virtual en el siglo XII. Vista realizada por García Soler, 2013



Vista en perspectiva de la reconstrucción virtual de la Alcazaba de Guadix en el siglo XII, vista sur. García Soler, 2013

FASE III. Siglos XIII-XIV: Periodo Nazarí. Cierre recinto interior, refuerzo de la puerta septentrional y refuerzo de barbacana en el flanco sur

En esta fase se realizan diferentes intervenciones de las que cabe destacar la construcción de la torre del homenaje y el cierre del recinto superior mediante una muralla, hoy en parte desaparecida. Se adelanta el frente meridional mediante el cierre de los lienzos que unen las torres 16 y 17, y se vuelve a reforzar la planta de la torre 5. En estas intervenciones se sustituye el tapial de cal y cantos por el tapial calicastro y el tapial hormigonado. La puerta septentrional se refuerza creando una entrada en L mediante la construcción de una estructura maciza y elevada, protegida con almenas, que tiene acceso defensivo a sus cuatro lados y la puerta de la medina.



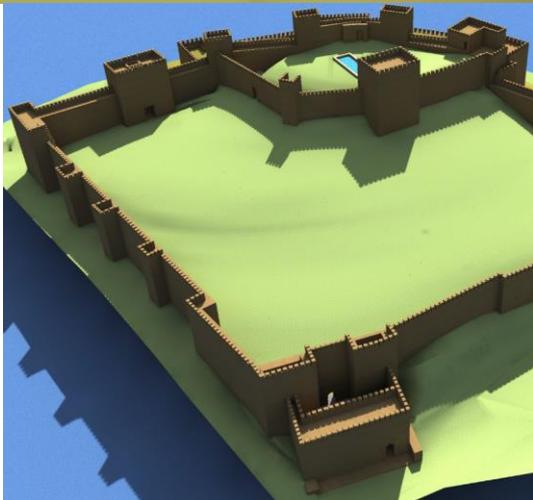
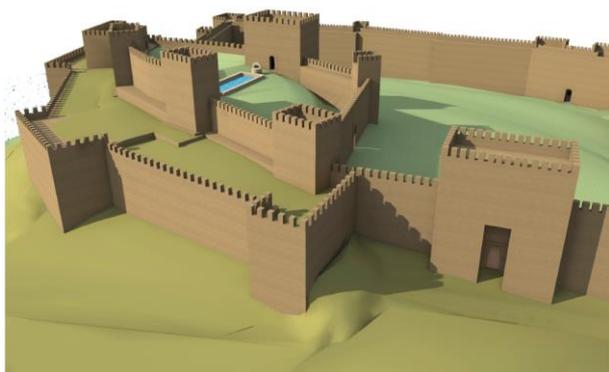
Cerramiento del recinto superior y construcción de la torre del homenaje y ampliación zona de ampliación de la barbacana en el sector meridional. Realizado por el J.A.Benavides.



Plano en planta con la hipótesis de reconstrucción virtual en el siglo XIII-XIV. Vista realizada por García Soler, 2013



Vista en perspectiva desde el sur de la reconstrucción virtual de la Alcazaba de Guadix en el siglo XIII- XIV. García Soler, 2013



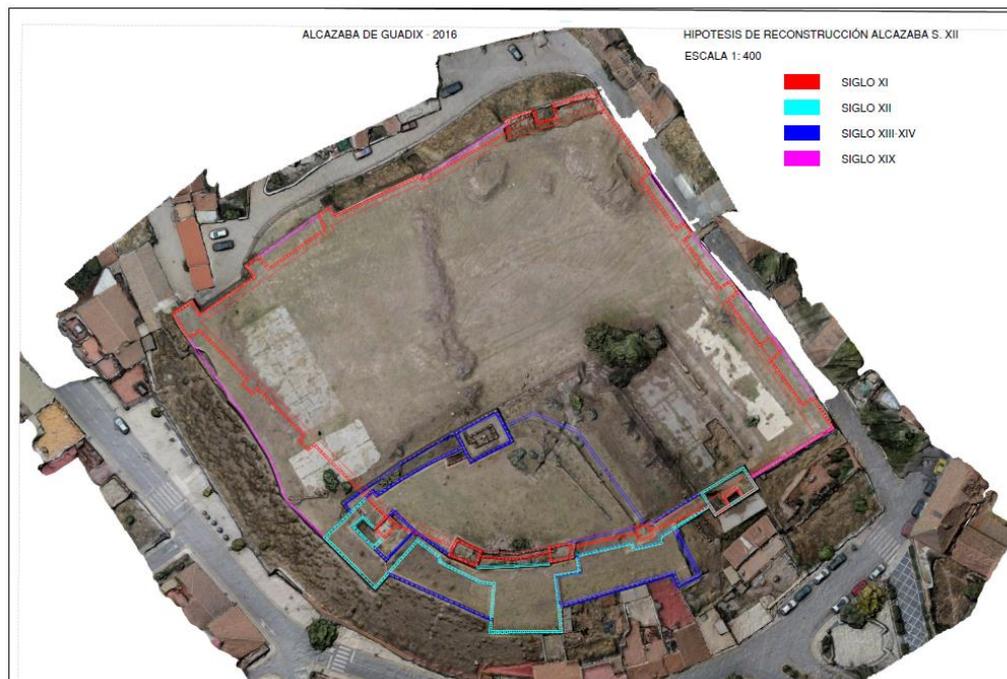
Vistas en perspectiva desde el sureste y noreste. Reconstrucción virtual correspondiente a los siglos XIII-XIV. García Soler, 2013

Tras la conquista de los Reyes Católicos en 1489, comenzó el abandono de la fortaleza si bien realizaron varias intervenciones de reparación o refuerzo. Cabe destacar el refuerzo realizado sobre el sector septentrional de la torre-puerta.

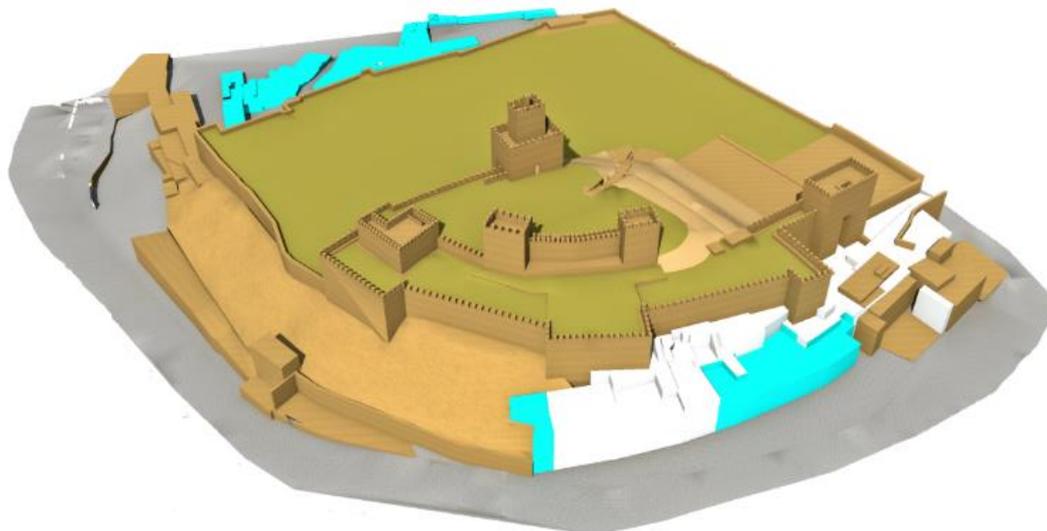
FASE IV. MODERNA Y CONTEMPORANEA

Durante la ocupación napoleónica de Guadix (1810-1812), el ejército francés instala su campamento en la alcazaba, realizando importantes modificaciones en el perímetro exterior y en la explanada del recinto septentrional. Se cierran los huecos entre las torres mediante la realización de muros de mampostería y ladrillo, dejando oculto los lienzos originales de las murallas y se rellena la explanada para la instalación del campamento. De igual manera se crea una nueva puerta de acceso al recinto, junto a la torre 1, realizada mediante aparejo de ladrillo. Este nuevo muro ha sido demolido en el año 2009.

En el pasado siglo, tras finalizar la Guerra Civil, se realizaron algunas intervenciones de restauración por Regiones Devastadas, siendo cedida posteriormente a la Iglesia que la utilizó como patio del colegio Seminario, construyendo las infraestructuras necesarias para su funcionamiento.



Ampliación exterior a cara de torres y relleno de la explanada. Realizado por el J.A.Benavides.



Vista en perspectiva desde el sur del estado actual. Recreación virtual. Realizado por García Soler.

5.2 DOCUMENTACIÓN GRÁFICA

Como ya indicamos, la complejidad geométrica y morfológica de un edificio o yacimiento hacen que su análisis no pueda realizarse en su conjunto, necesitando una sistematización y simplificación. Las representaciones bidimensionales han demostrado ser un medio eficaz para su estudio

La documentación del patrimonio a partir de ortofotografías constituye el medio más eficaz de conocimiento

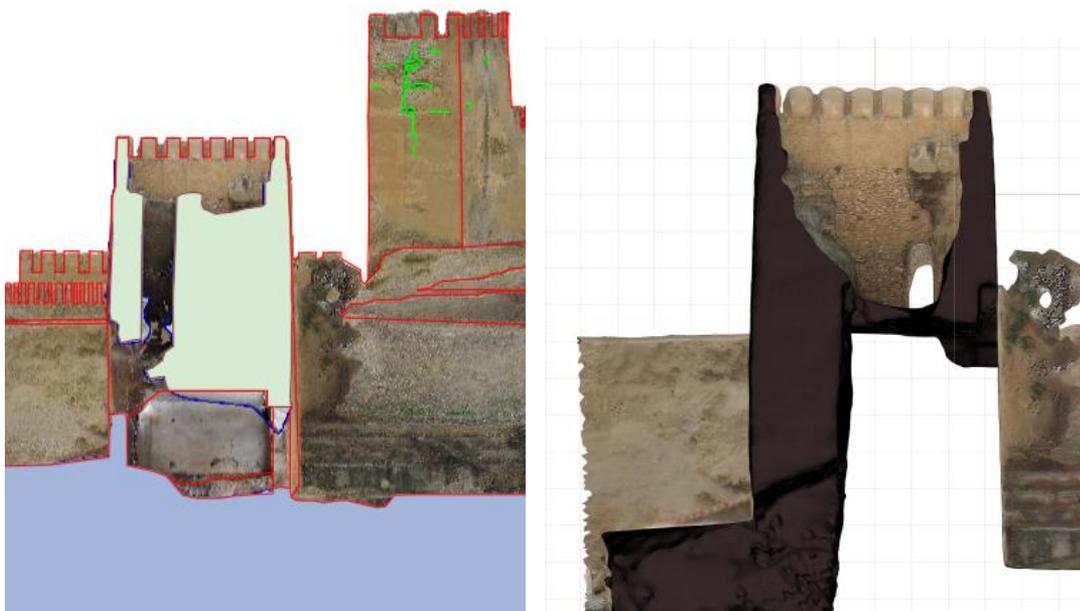
al aunar en un mismo documento *imagen y dibujo*. Son el instrumento técnico, descriptivo y analítico, que facilita la visualización, estudio e interpretación científica del objeto de estudio y de los procesos de alteración y degradación que le afectan. Son además, una herramienta fundamental para la transmisión del conocimiento.



Documentación gráfica a partir de ortoimágenes generadas a partir del modelo 3D. (J.A.Benavides)



Documentos gráficos de los alzados correspondientes a la torre puerta S-E. (J.A.Benavides)



Secciones longitudinales con y sin dibujo en diferentes zonas de la torre puerta S-E. El rigor métrico y la calidad gráfica han servido de gran ayuda para interpretar las relaciones estructurales entre diferentes paramentos. (J.A.Benavides)





Ortofotografía torres en calle S. Miguel. .(J.A.Benavides)

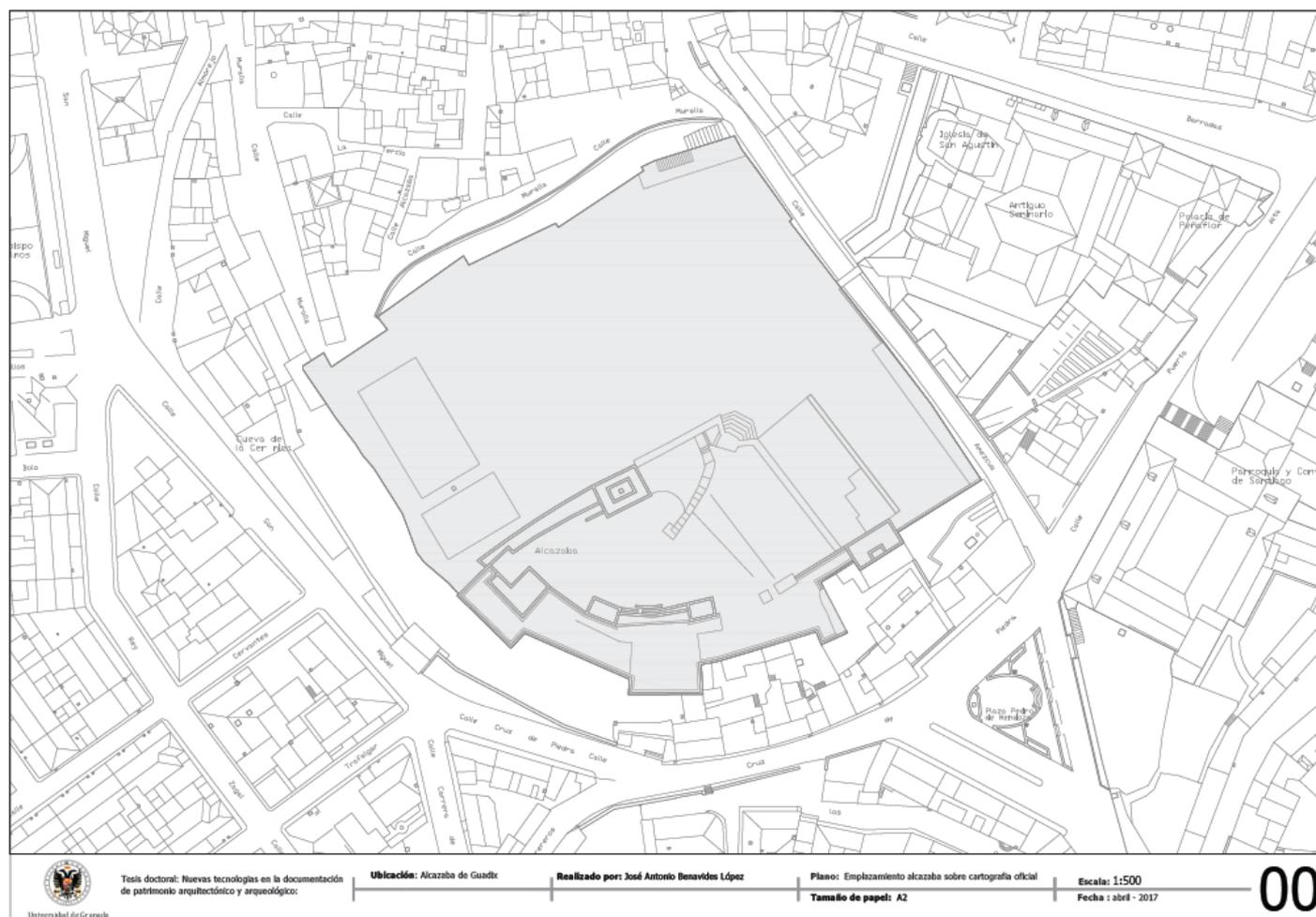
5.2.1 DOCUMENTOS GRÁFICOS DEL ESTADO ACTUAL

A continuación se exponen los documentos gráficos realizados por este doctorando, cumpliendo los criterios de rigor métrico y calidad gráfica para la correcta la completa documentación de la alcazaba de Guadix.



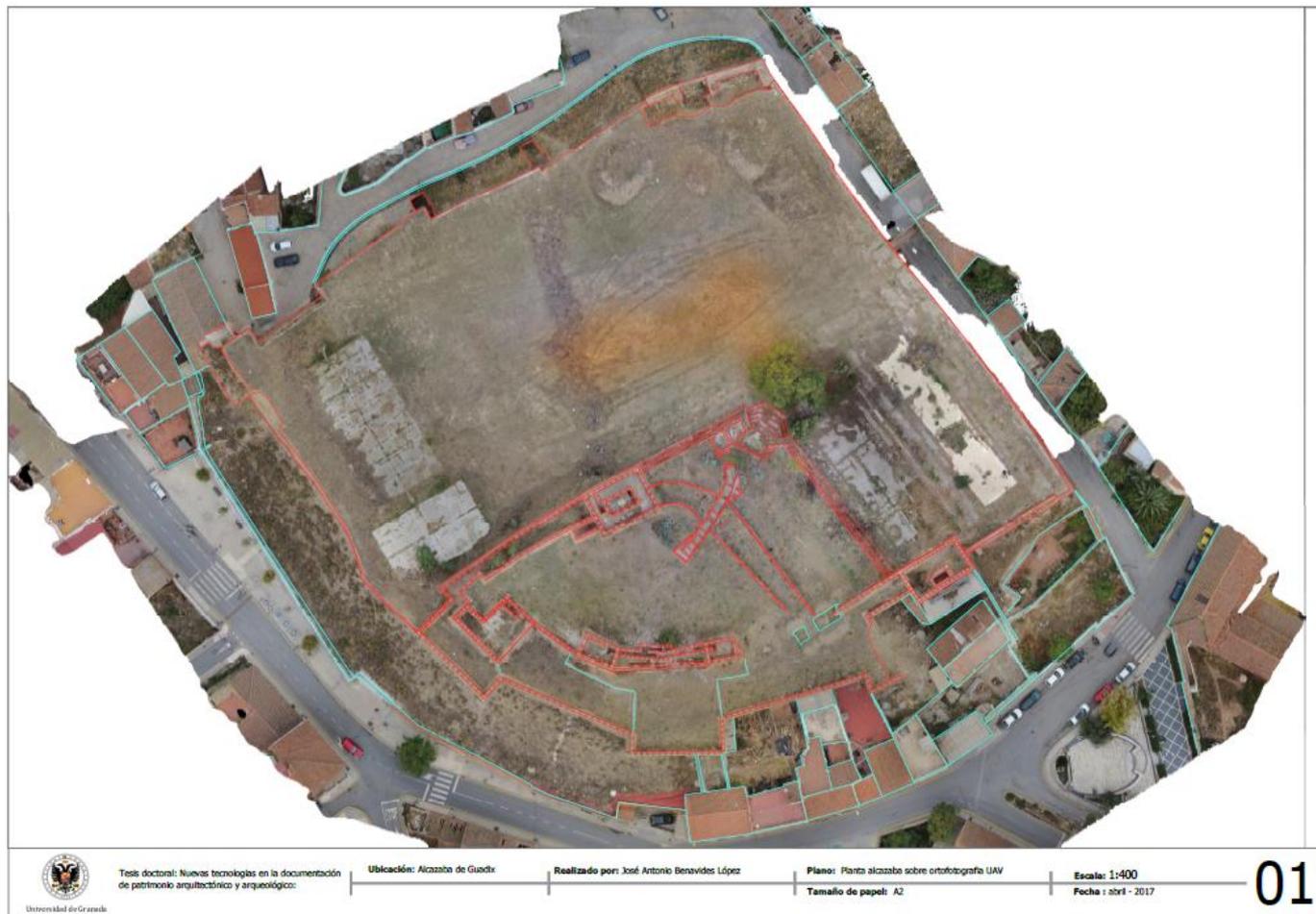
ALCAZABA DE GUADIX

PLANO DE SITUACION A2 E 1:1500



00

Plano de emplazamiento. .(J.A.Benavides)



Plano de planta del estado actual. .(J.A.Benavides)



Universidad de Granada

Tesis doctoral: Nuevas tecnologías en la documentación de patrimonio arquitectónico y arqueológico.

Ubicación: Alcazaba de Guadix

Realizado por: José Antonio Benavides López

Plano: Alzado sur sobre ortofotografía

Escala: 1:250

Tamaño de papel: A2

Fecha: abril - 2017

02



Tesis doctoral: Nuevas tecnologías en la documentación de patrimonio arquitectónico y arqueológico.

Ubicación: Alcazaba de Guadix

Realizado por: José Antonio Benavides López

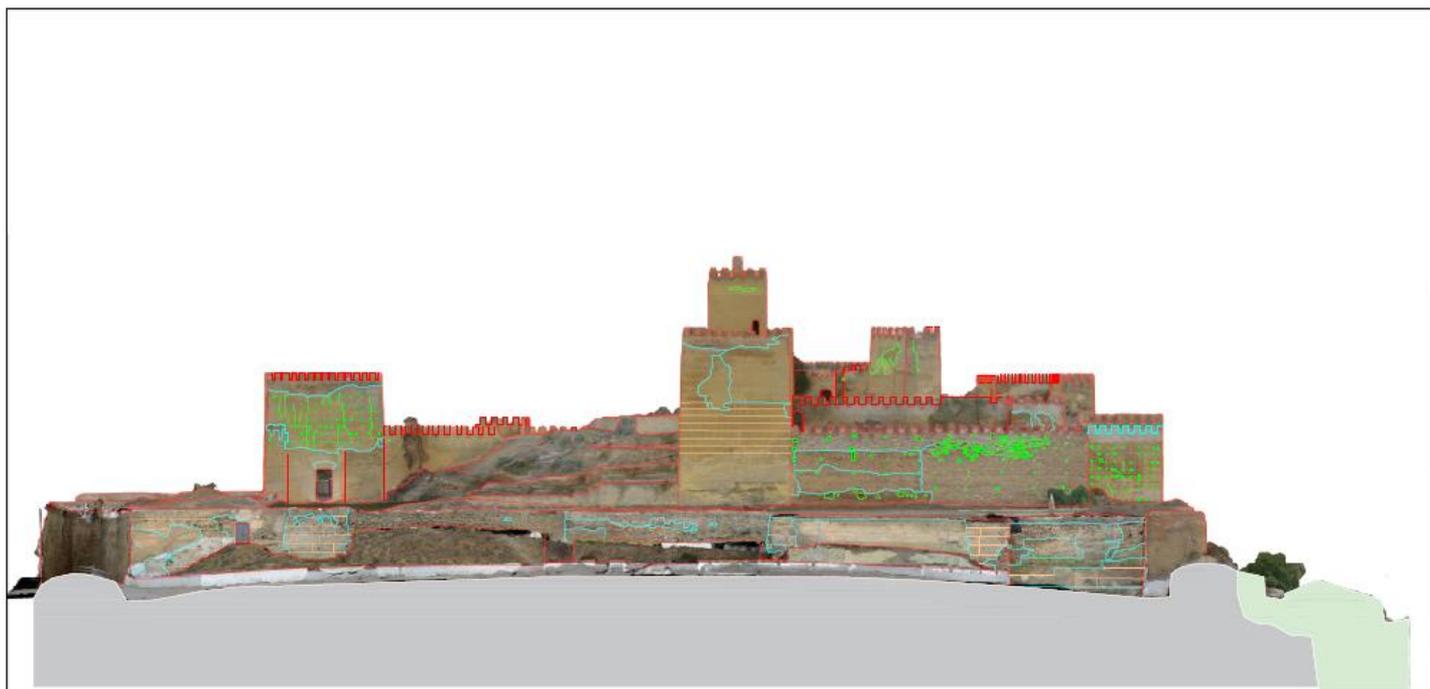
Plano: Alzado oeste sobre ortofotografía

Escala: 1:250

Tamaño de papel: A2

Fecha: abril - 2017

03



Universidad de Granada

Tesis doctoral: Nuevas tecnologías en la documentación de patrimonio arquitectónico y arqueológico:

Ubicación: Alcazaba de Guadix

Realizado por: José Antonio Benavides López

Plano: Alzado norte sobre ortofotografía

Tamaño de papel: A2

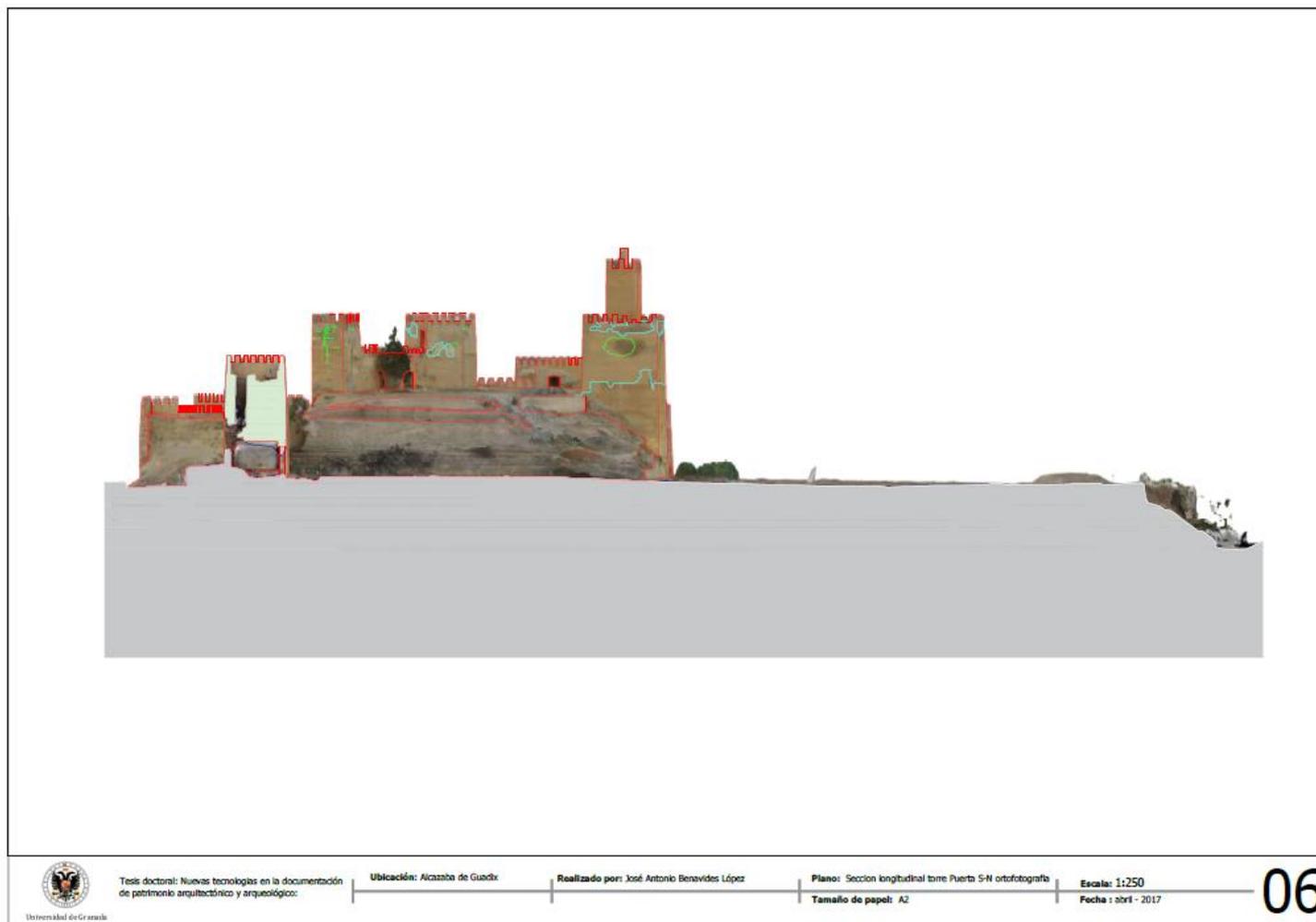
Escala: 1:250

Fecha: abril - 2017

04



Alzado norte desde calle Muralla.(J.A.Benavides)



Sección longitudinal por torre puerta y explanada.(J.A.Benavides)



Sección transversal por explanada superior de torre homenaje.(J.A.Benavides)

5.2.1 DOCUMENTACIÓN GRÁFICA: PLANOS DE LA HIPÓTESIS CONSTRUCTIVA



Planta de la hipótesis constructiva fases I medieval.(J.A.Benavides)



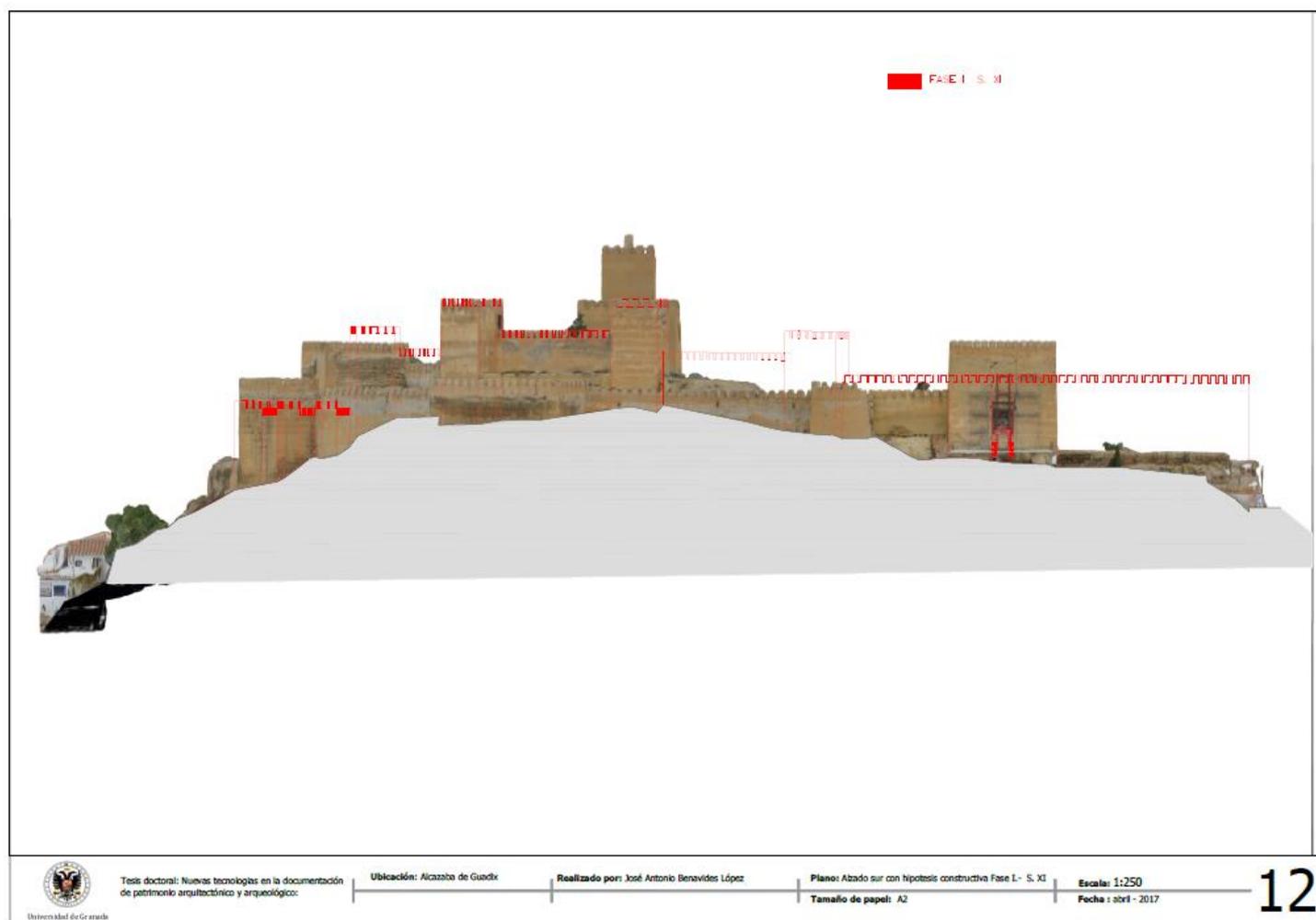
Planta de la hipótesis constructiva fases I-II medieval



Planta de la hipótesis constructiva fases I-II y III medieval.(J.A.Benavides)



Planta de la hipótesis constructiva fases I-II y III medieval e invasión napoleónica.(J.A.Benavides)



Alzado torre Puerta- Hipótesis constructiva fases I.(J.A.Benavides)



Alzado torre Puerta. Hipótesis constructiva fases I-II. medieval.(J.A.Benavides)



Universidad de Granada

Tesis doctoral: Nuevas tecnologías en la documentación de patrimonio arquitectónico y arqueológico:

Ubicación: Alcazaba de Guadix

Realizado por: José Antonio Benavides López

Plano: Abadío sur con hipótesis constructiva Fase III - S. XIII-XIV

Escala: 1:250

Tamaño de papel: A2

Fecha: abril - 2017

5.3 BIM APLICADO A LA DOCUMENTACIÓN Y REGISTRO ARQUEOLÓGICO DE LA ALCAZABA DE GUADIX

Con el fin de mostrar la eficiencia del modelado de las estructuras y fases históricas de la Alcazaba se han utilizado los registros de datos procedentes del escaneo láser y del registro SFM ya descritas en los apartados anteriores.

El primer paso para el registro de estas estructuras en programas BIM “Revit, Archicad, Graphisoft, etc” ha sido convertir las nubes generadas en formato ascii (*.xyz) en formato compatible (*.rcs) o (.rcp) siendo necesario realizar un proceso intermedio en el programa Recap de Autodesk



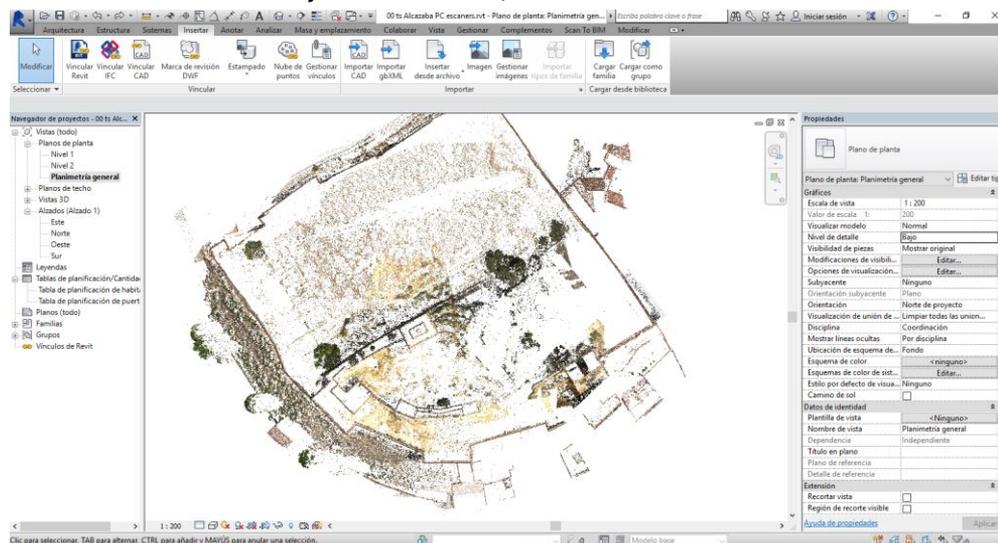
Comandos de importación y exportación de datos procedentes de escáner láser o SFM y su exportación en formato compatible (*.rcs) o (*.rcp). (J.A.Benavides)



Comandos que regulan los modos de visualización. De igual modo este *software* permite la edición de la nube de puntos. (J.A.Benavides)

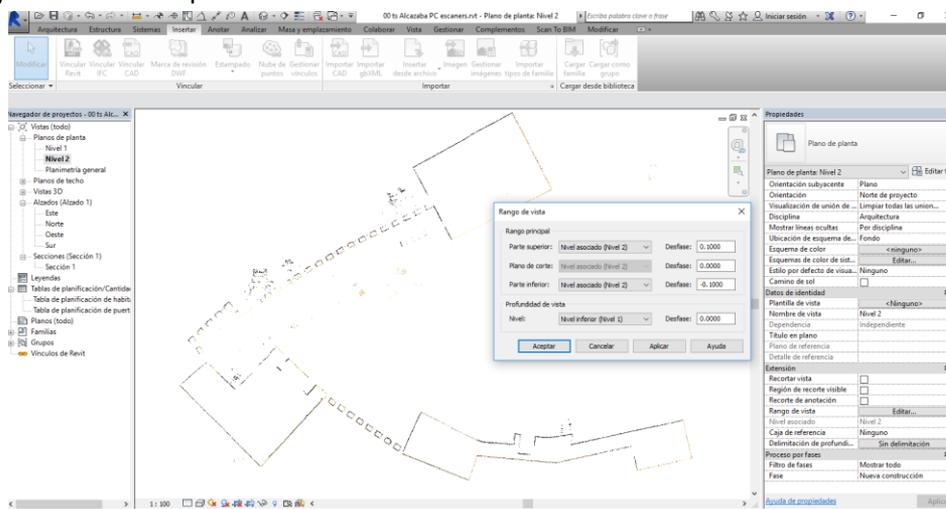
Para no colapsar el equipo informático por el excesivo peso de los archivos de nubes de puntos (422 Megabytes para los archivos de escáner o 975 Mbytes para los de fotogrametría) se recomienda compartimentar los ficheros en zonas de trabajo. Por otro lado, es de suma

importancia que los datos se inserten en sus georreferencias exactas, para lo cual habrá que tener en cuenta tanto las unidades métricas de los modelos como el punto origen de georreferencia.

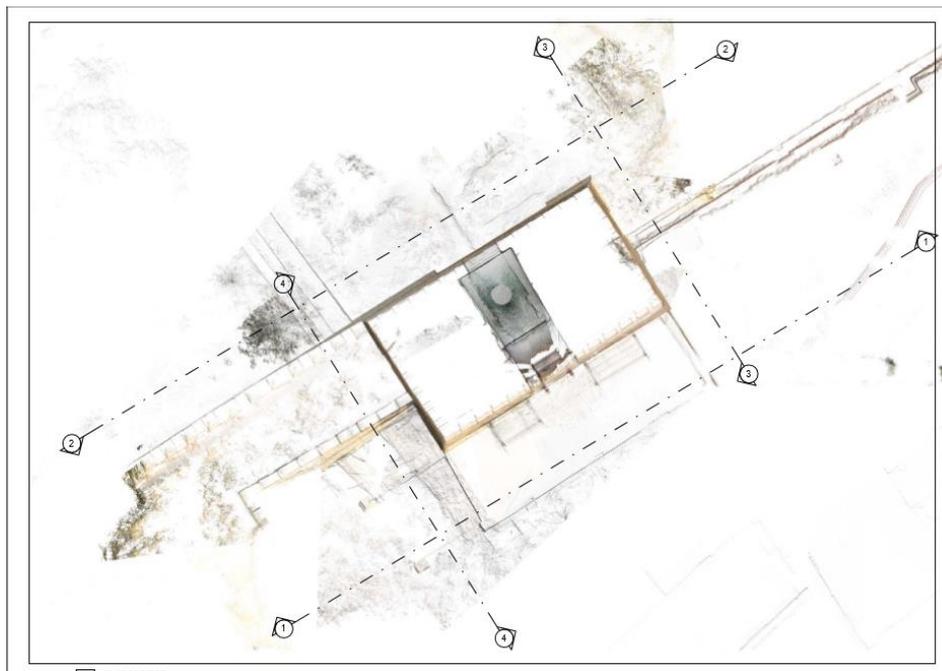


Modelo de nube de puntos realizado con escáner importado y gestionado mediante plataforma BIM.(J.A.Benavides)

El adecuado análisis geométrico se realiza filtrando los elementos de la vista mediante secciones a diferentes niveles y con distinto espesor.

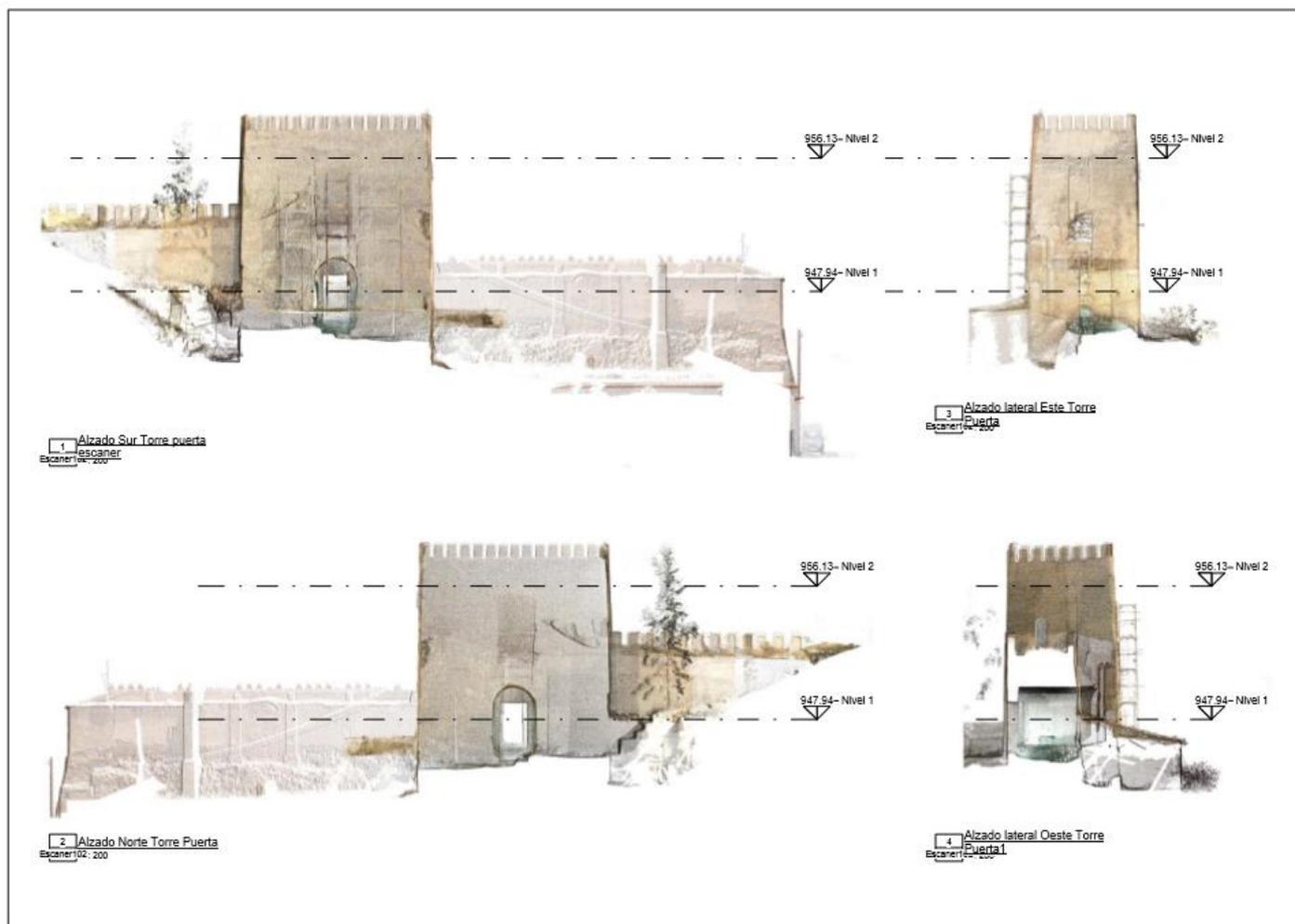


Menú de selección de la profundidad de las vistas en el nivel 1. (J.A.Benavides)

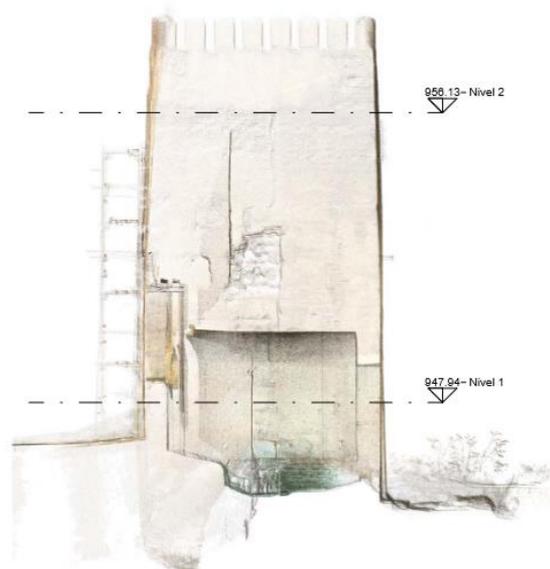


Vista en planta de la nube de puntos correspondiente al modelo de escáner de la torre puerta. La escasa densidad de los puntos de este sistema permite el análisis de la torre en su conjunto (zonas visibles y no visibles). (J.A.Benavides)

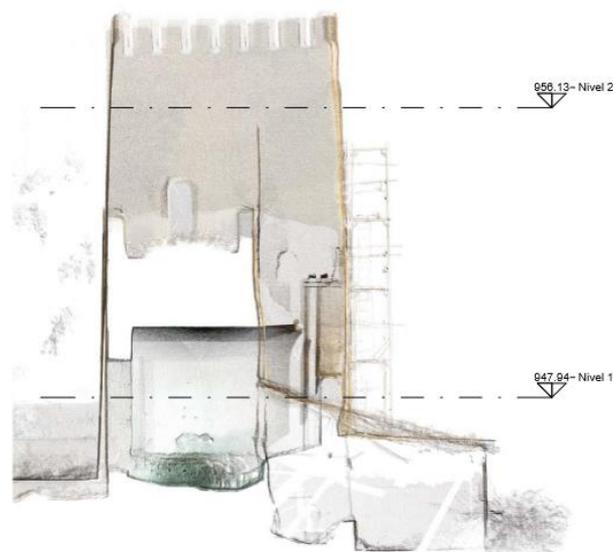
Diferentes herramientas visualización permiten cambiar el punto de vista del modelo obteniendo otros documentos (alzados o secciones), necesarios para la completa documentación del bien.



Vistas de alzados correspondientes al modelo de nube de puntos del escáner de la torre puerta sureste. (J.A.Benavides).

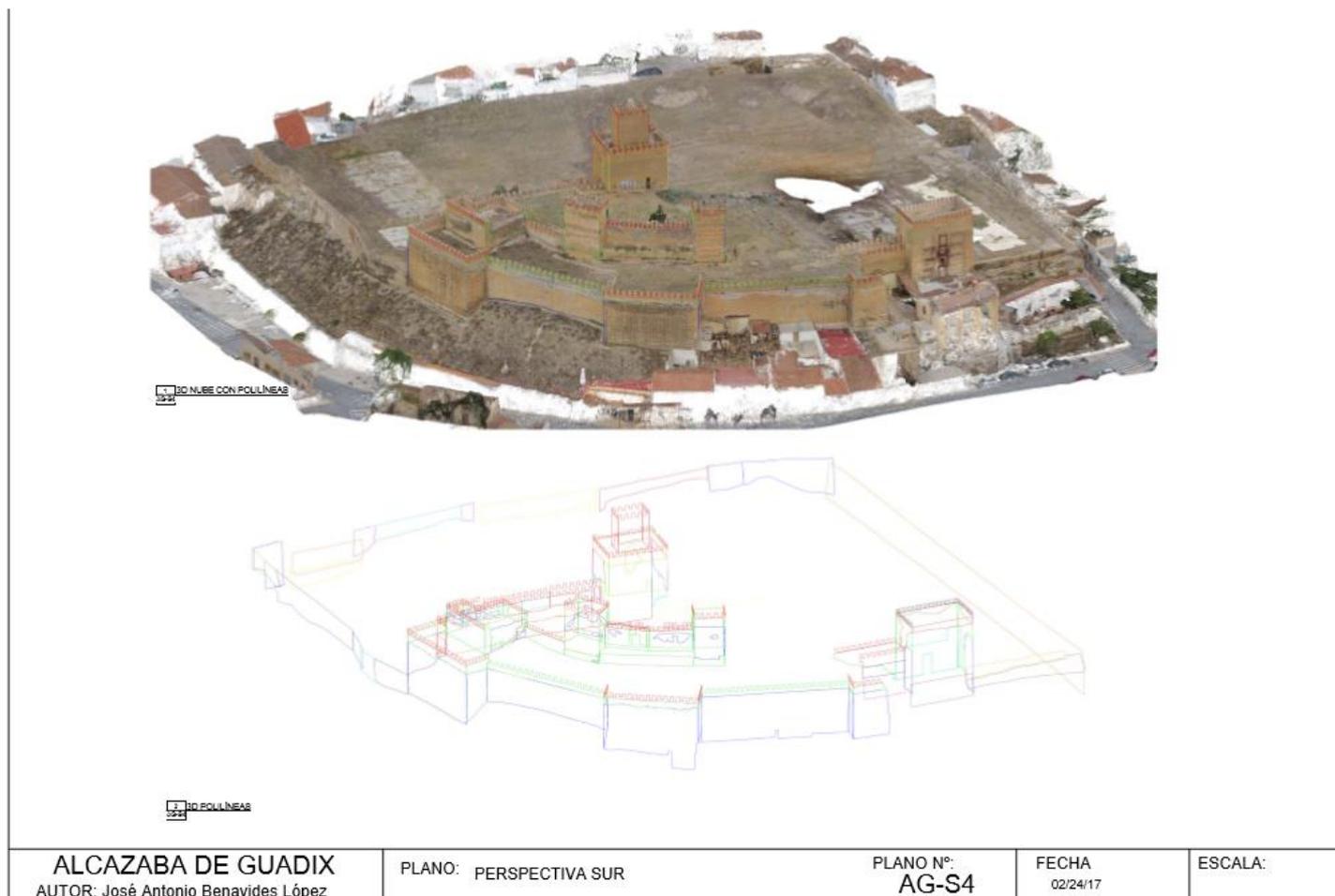


1 Alzado lateral Este Torre
Escane1 Puerta Copia 1

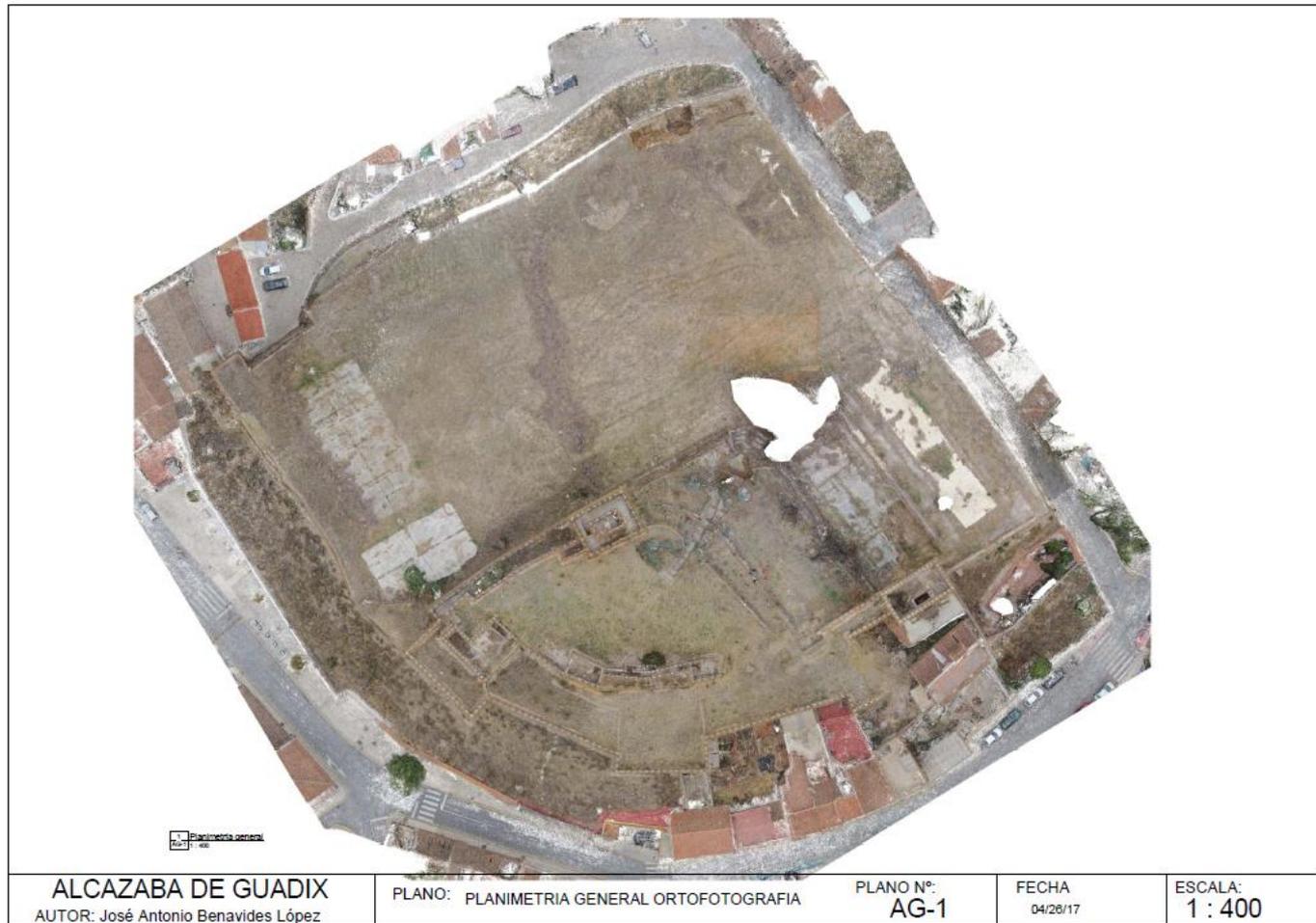


2 Alzado lateral Oeste Torre
Escane1 Puerta Copia 1

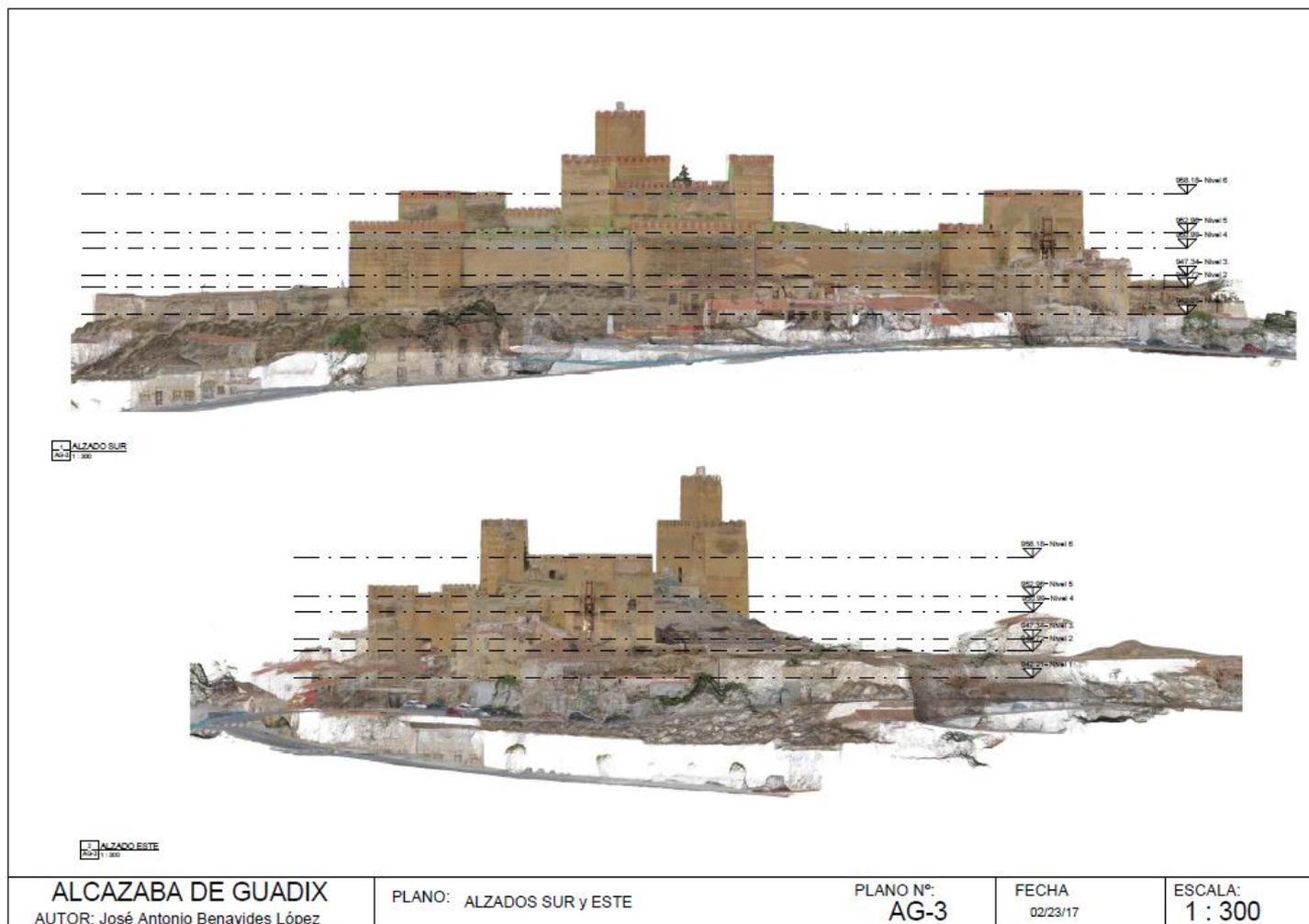
El efecto transparente de las nubes de puntos permite realizar un análisis comparado de los elementos externos e internos. (J.A.Benavides)



Modelo alámbrico con definición de las fases históricas. Vista desde el sur. (J.A. Benavides)



Planimetría general obtenida a partir del modelo 3D de nube de puntos.(J.A.Benavides)



ALCAZABA DE GUADIX

AUTOR: José Antonio Benavides López

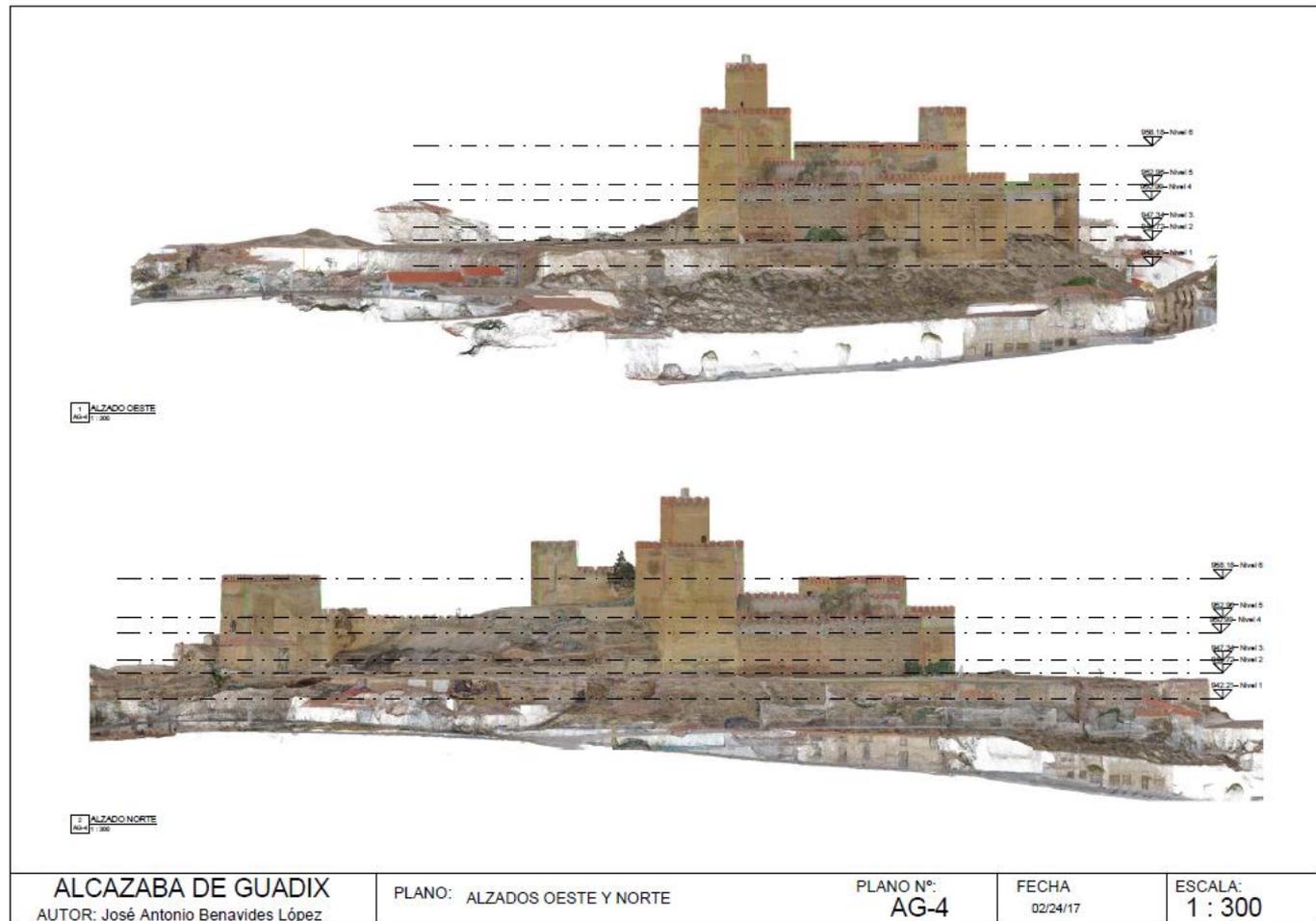
PLANO: ALZADOS SUR y ESTE

PLANO Nº:
AG-3

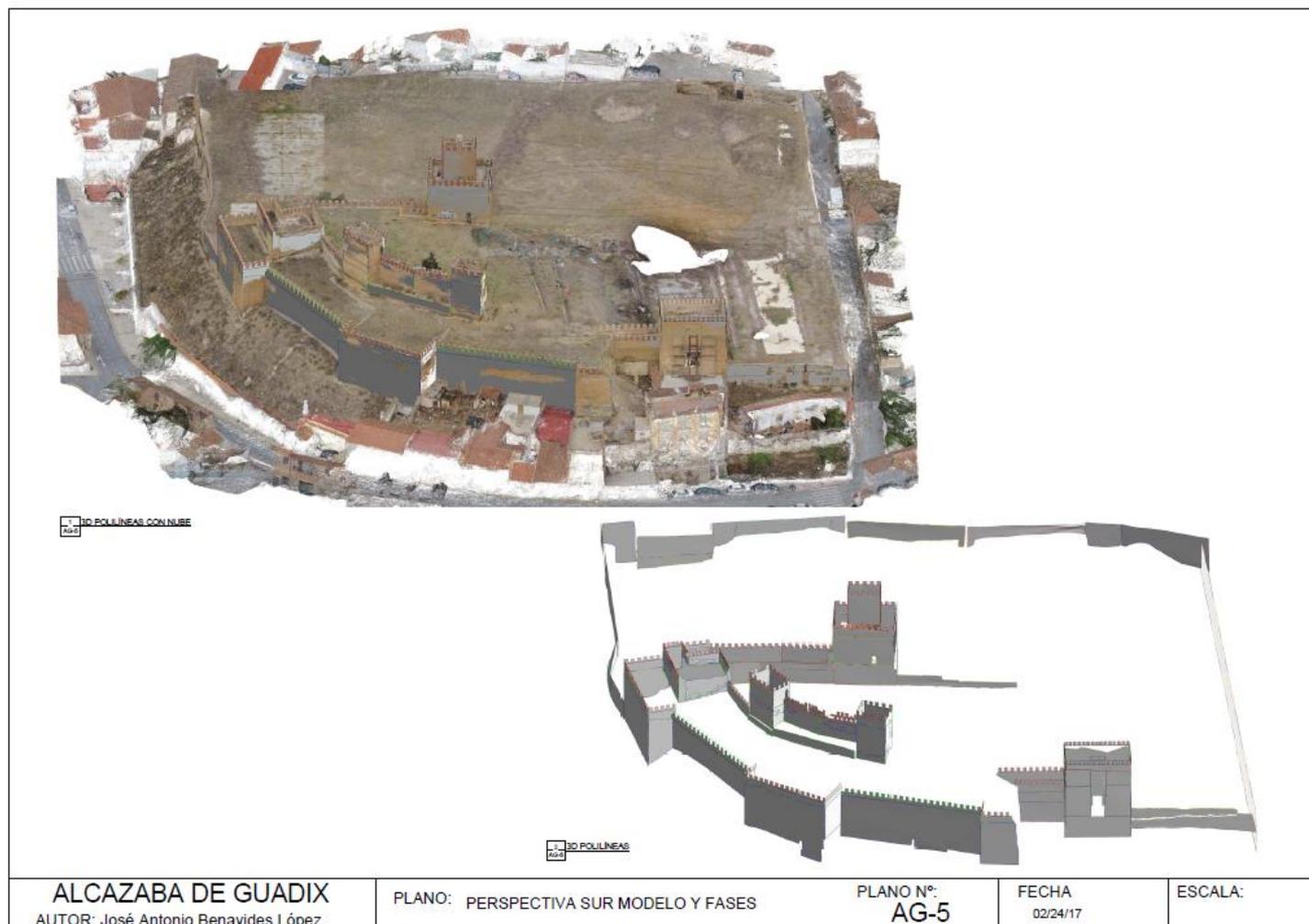
FECHA
02/23/17

ESCALA:
1 : 300

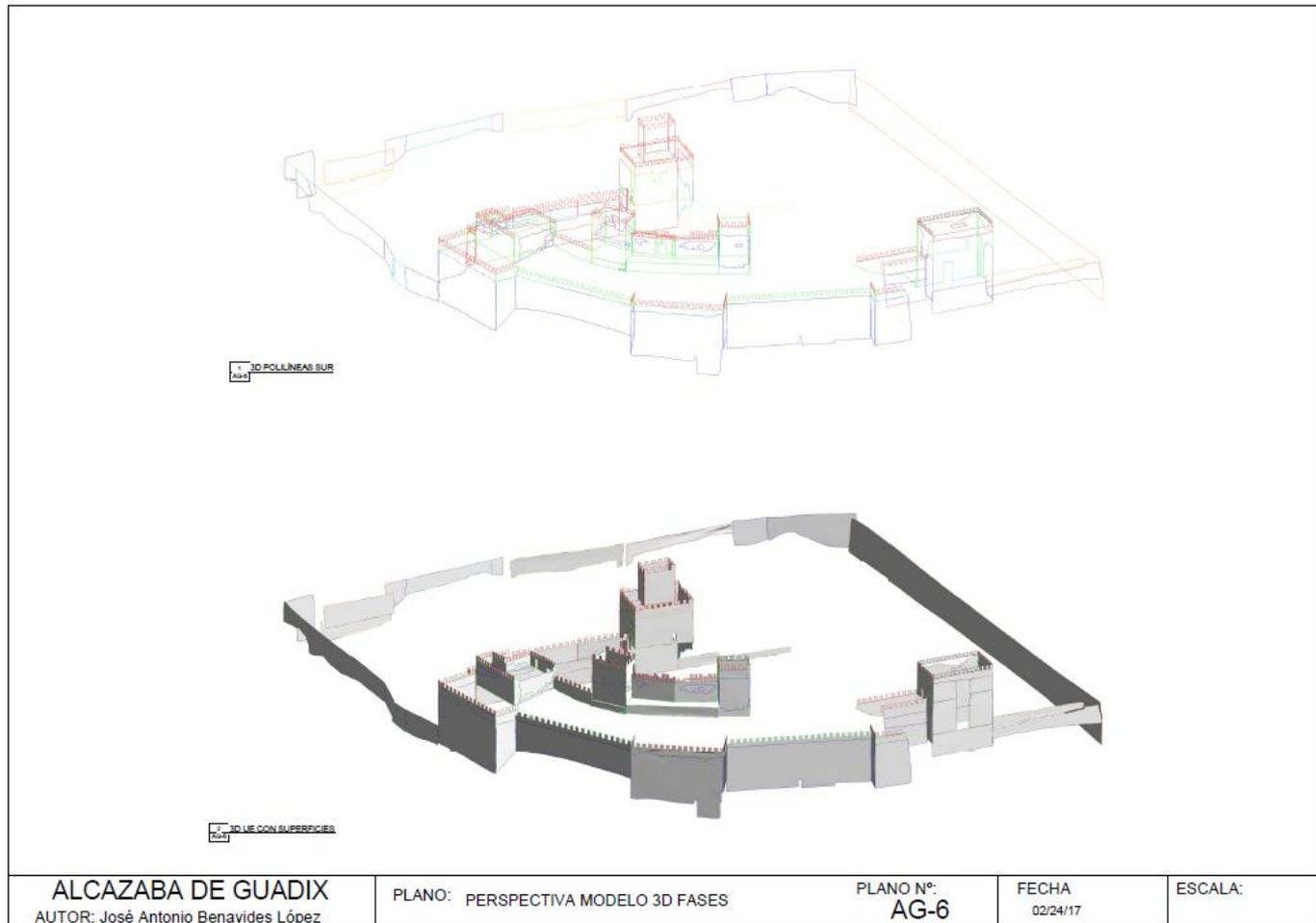
Plano con alzados sur y este con indicación de los niveles de corte, obtenidos en Revit 2017 (AutoDesk) a partir del modelo 3D de nube de puntos.
(J.A.Benavides)



Plano con alzados oeste y norte con indicación de los niveles de corte, obtenidos en Revit 2017 (AutoDesk) a partir del modelo 3D de nube de puntos. (J.A.Benavides)



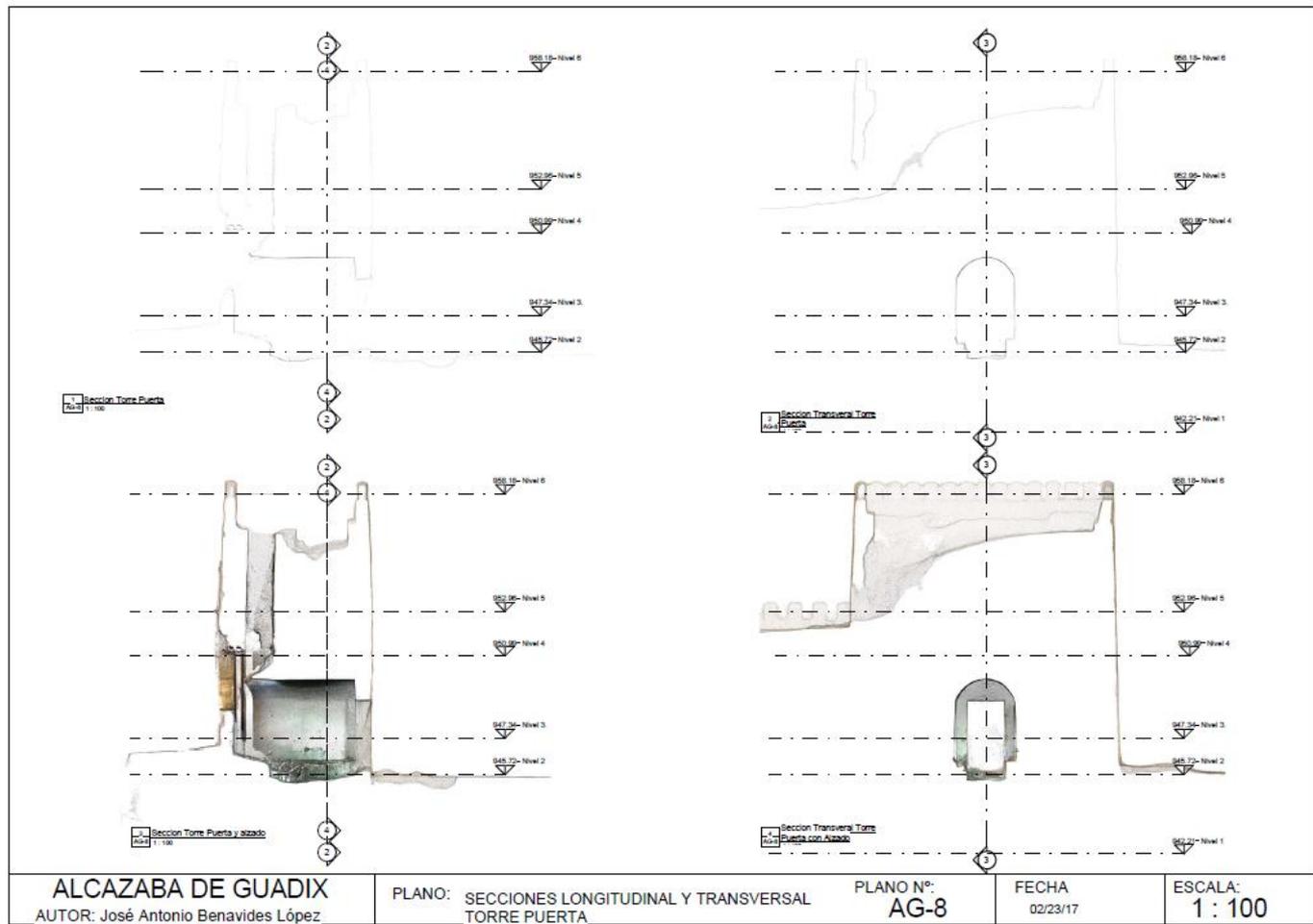
Perspectiva sur del modelo de nube de puntos con superposición de superficies correspondientes a las fases constructivas. .(J.A.Benavides)



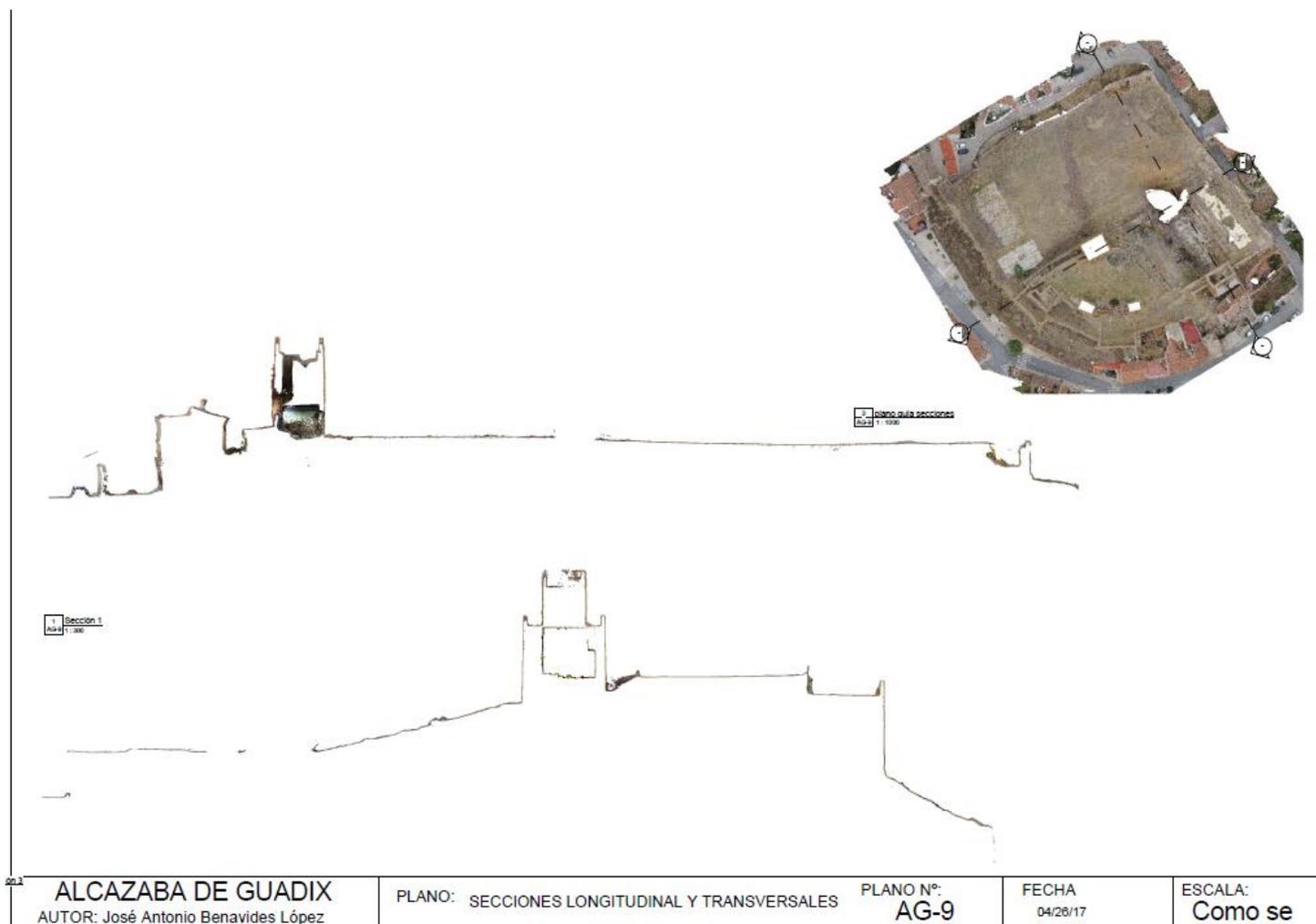
Perspectiva sur con los modelos alámbrico y superficial por fases constructivas.(J.A.Benavides)



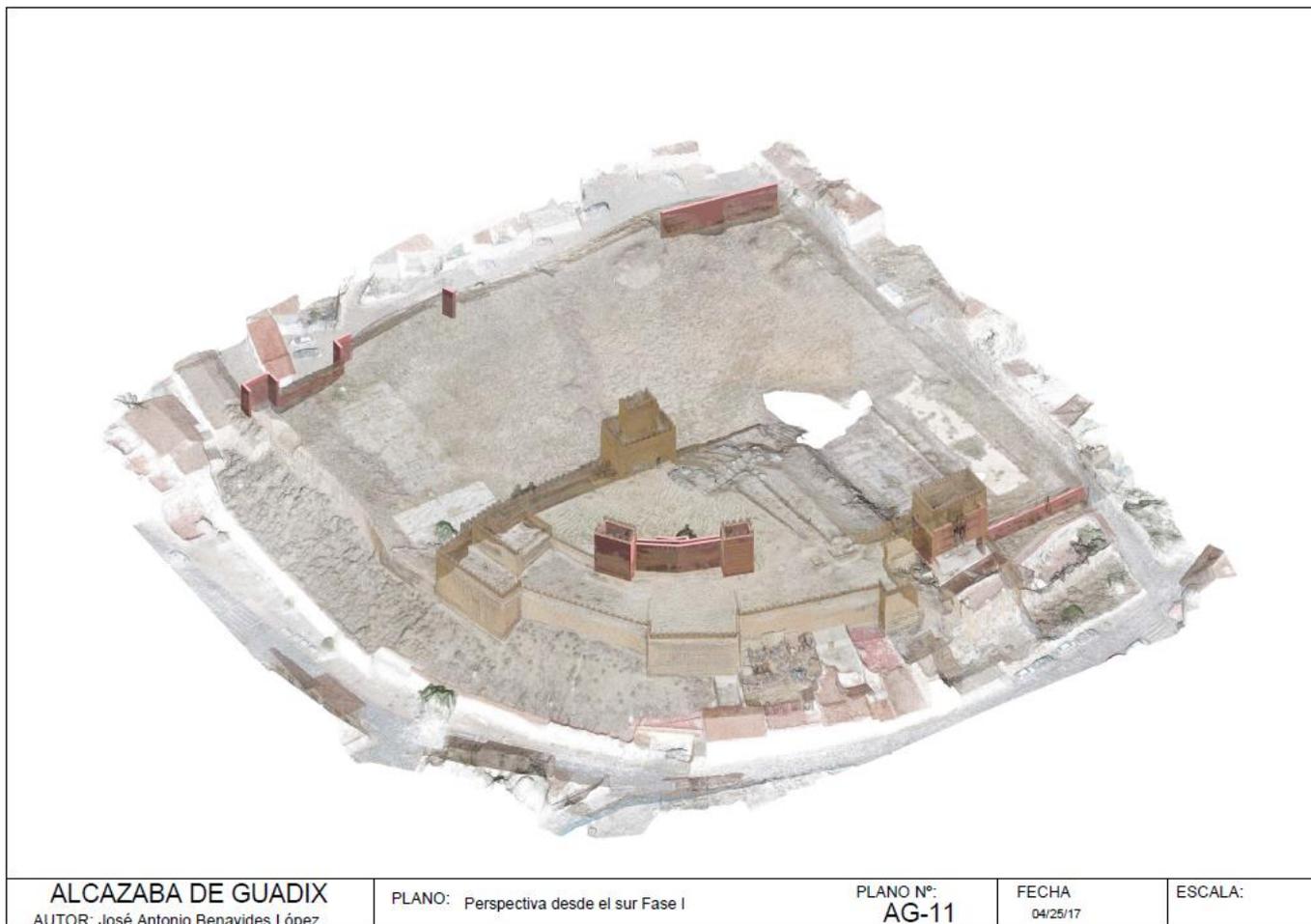
Planos de planta a diferente nivel de la torre puerta sureste, a partir de la gestión de la nube de puntos generada por el modelo fotogramétrico.(J.A.Benavides)



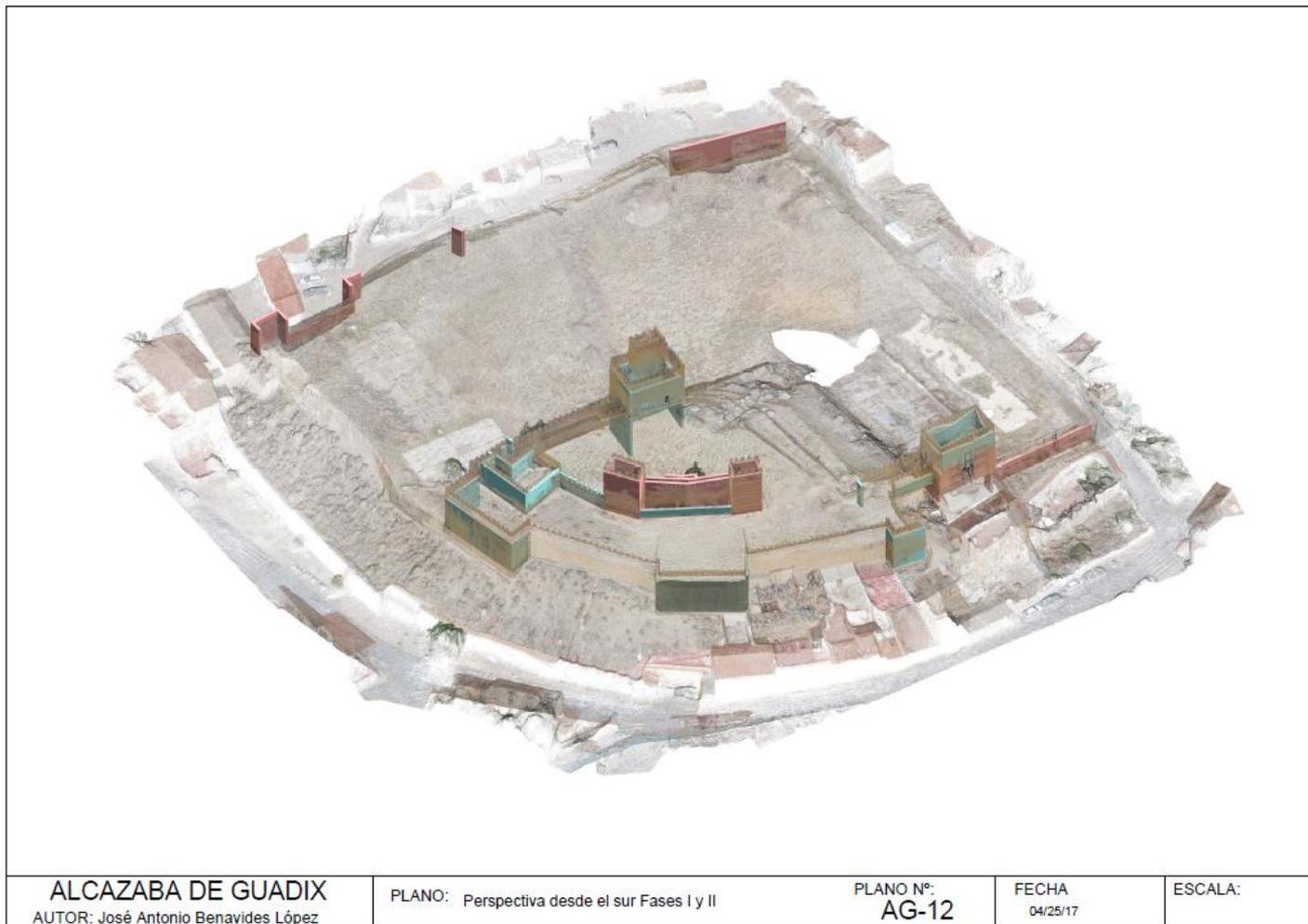
Plano de secciones longitudinales y transversales obtenidas a partir de la nube de puntos fotogramétrica.(J.A.Benavides)



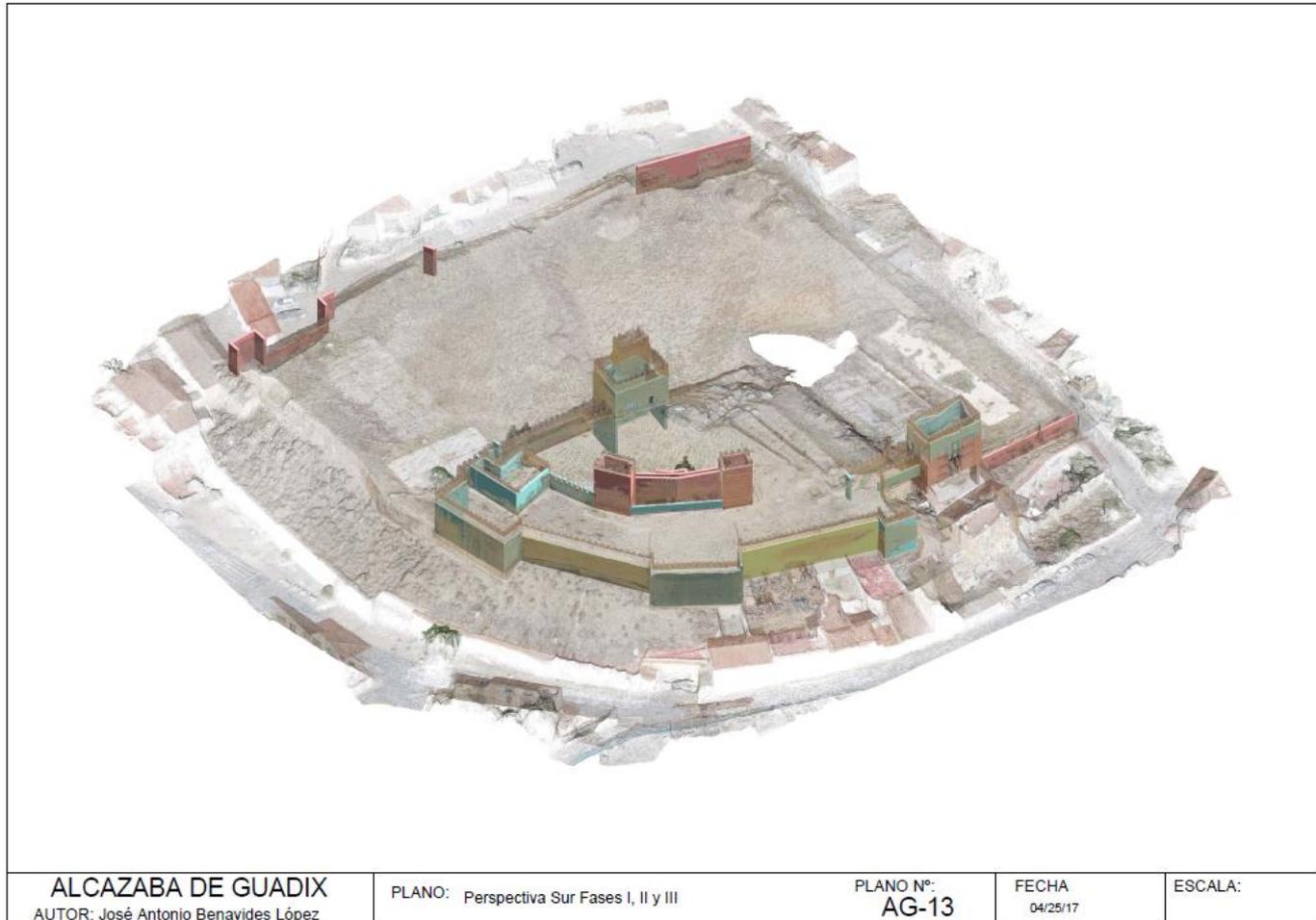
Plano de secciones generales de la alcazaba a partir de la nube de puntos fotogramétrica. .(J.A.Benavides)



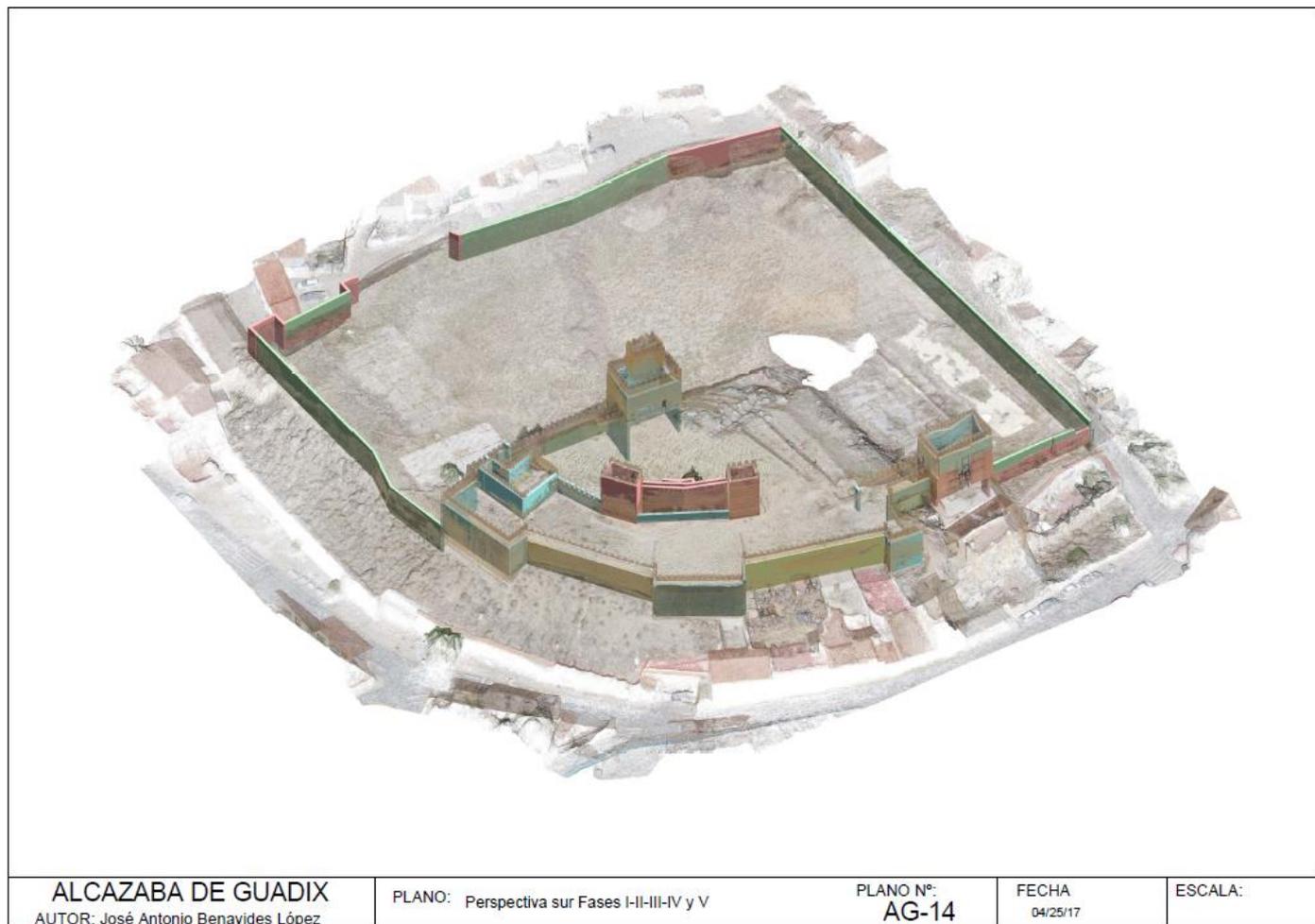
Reconstrucción de los elementos estructurales correspondientes a la fase constructiva I (tapial de cal y canto) sobre el modelo 3D de nube de puntos.(J.A.Benavides)



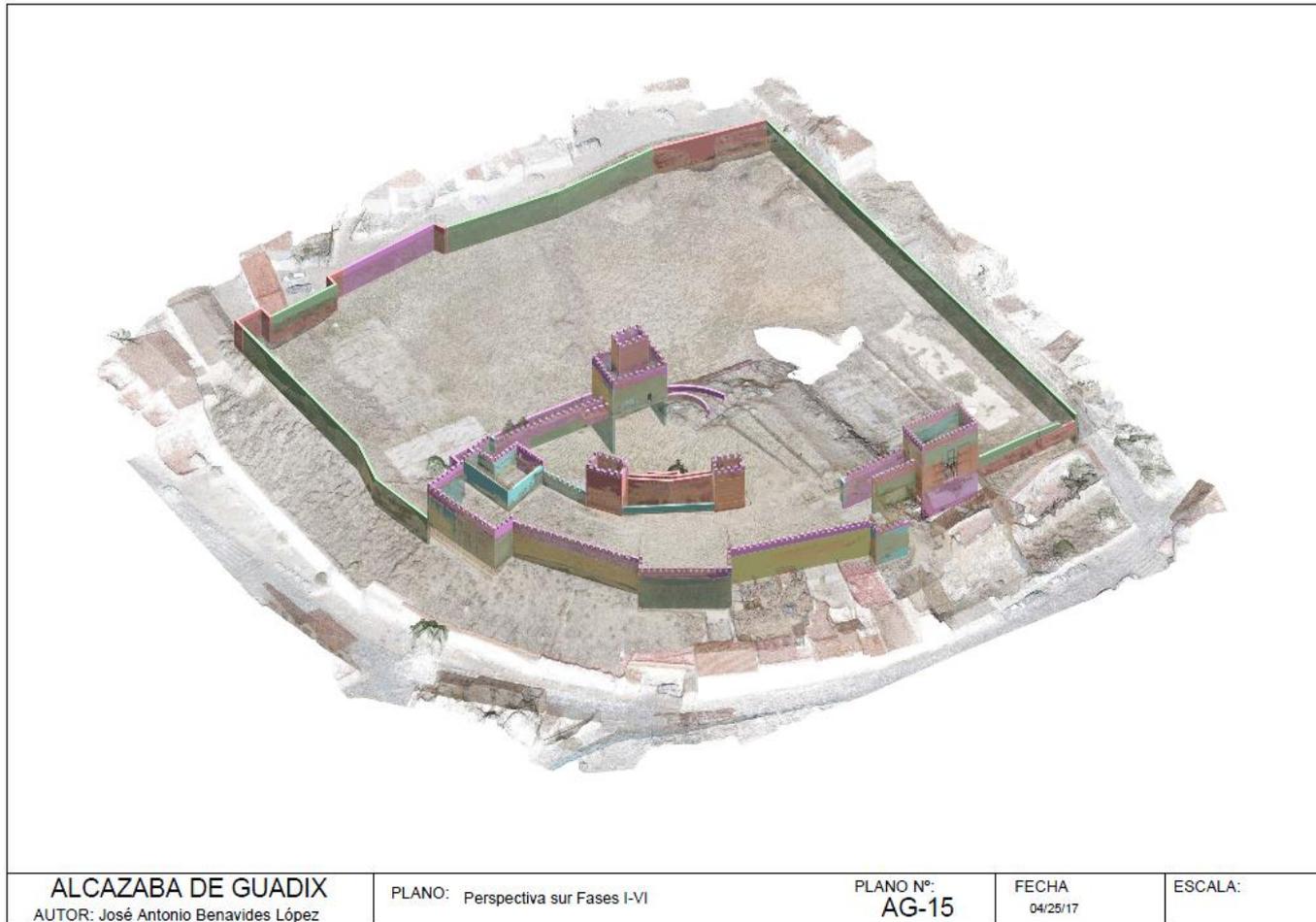
Reconstrucción de los elementos estructurales correspondientes a las fases constructivas I y II (tapial de calicanto y tapial calicostrado) sobre el modelo 3D de nube de puntos.(J.A.Benavides)



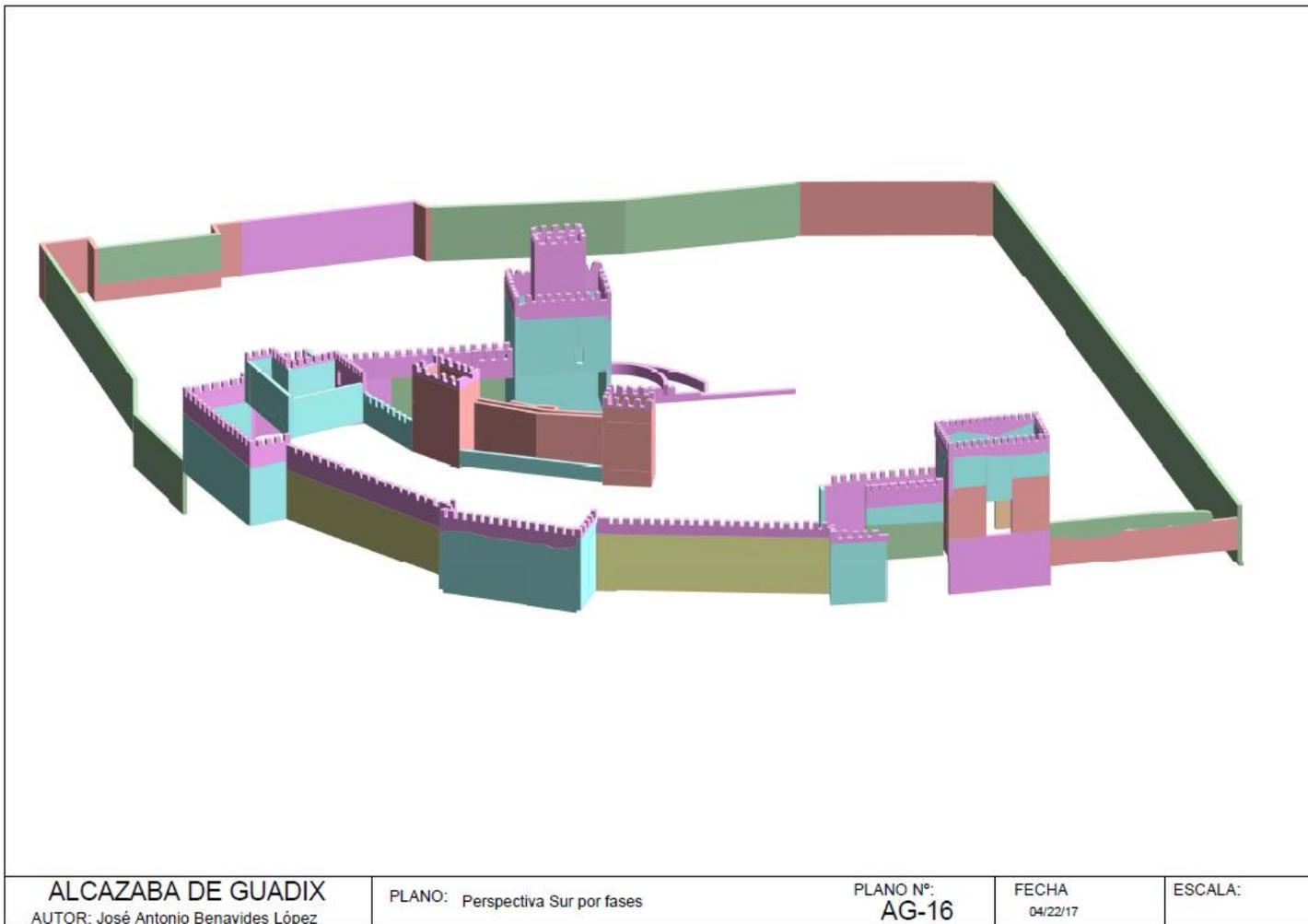
Reconstrucción de los elementos estructurales correspondientes a las fases constructivas I, II y III (tapial de calicanto, tapial calicostrado, tapial hormigonado) sobre el modelo 3D de nube de puntos.(J.A.Benavides)



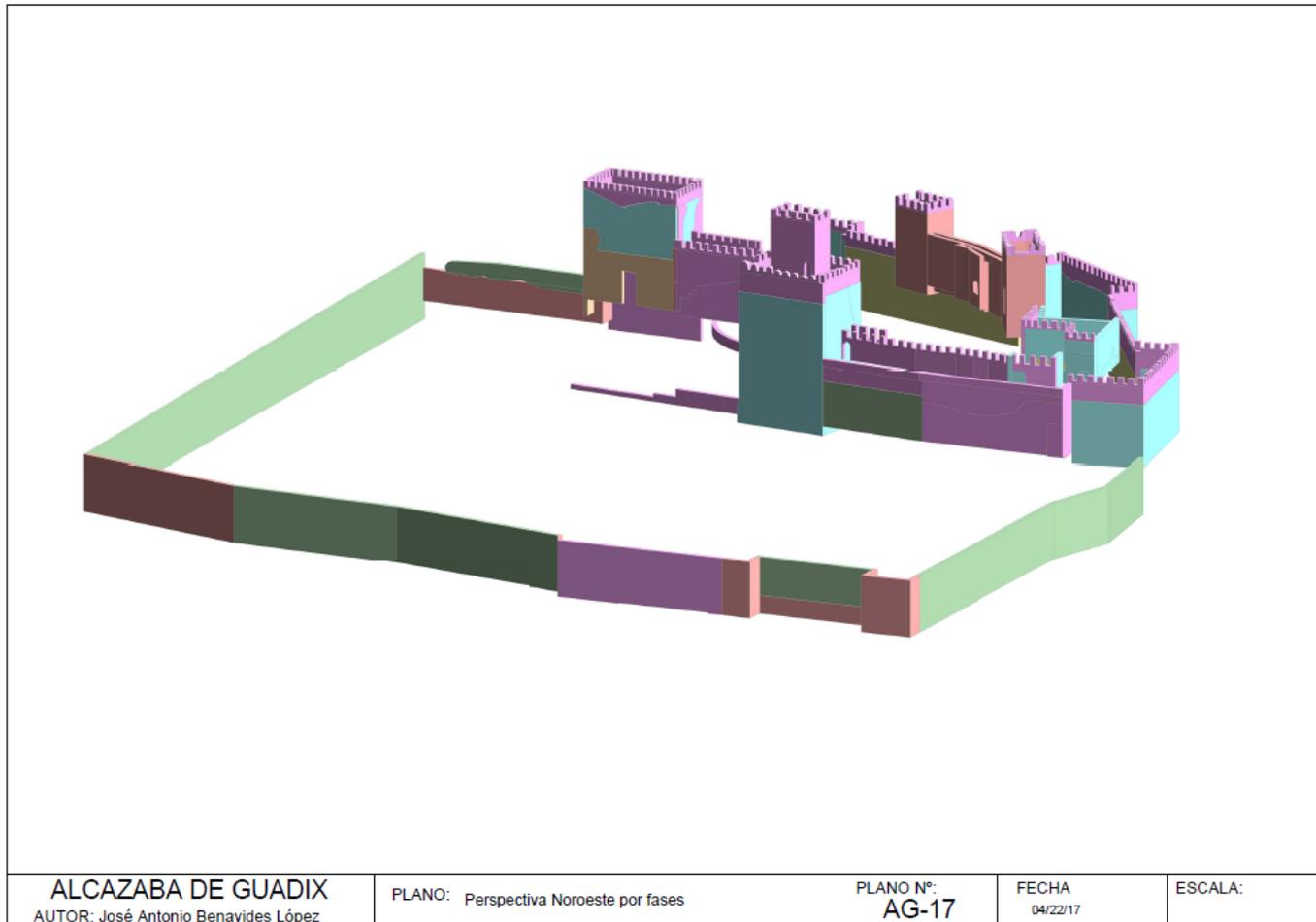
Reconstrucción de los elementos estructurales correspondientes a las fases constructivas I, II, III y IV y V (tapial de calicanto, tapial calicostrado, tapial hormigonado, reparación cristiana y reformas napoleónicas) sobre el modelo 3D de nube de puntos.(J.A.Benavides)



Reconstrucción de los elementos estructurales por fases, incluida las contemporánea sobre el modelo 3D de nube de puntos.(J.A.Benavides)

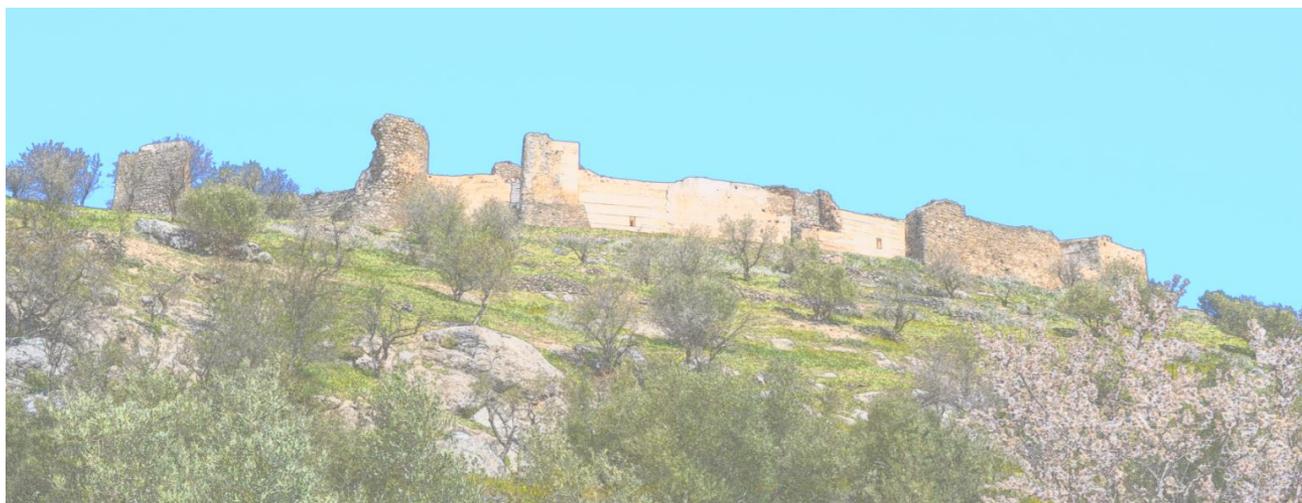


Vista desde el sur de la reconstrucción de los elementos estructurales por la fases, incluida las contemporánea.(J.A.Benavides)



Vista desde el noroeste de la reconstrucción de los elementos estructurales por la fases, incluida las contemporánea.(J.A.Benavides)

CASTILLO DE PÍÑAR



5.4 HISTORIOGRAFIA Y LOCALIZACIÓN

La villa fortificada de Píñar se encuentra en la comarca de los Montes orientales de la provincia de Granada, la parte occidental viene dada por la cuenca del río Cubillas que pasa por Iznalloz y constituye el paso directo a la vega de Granada.

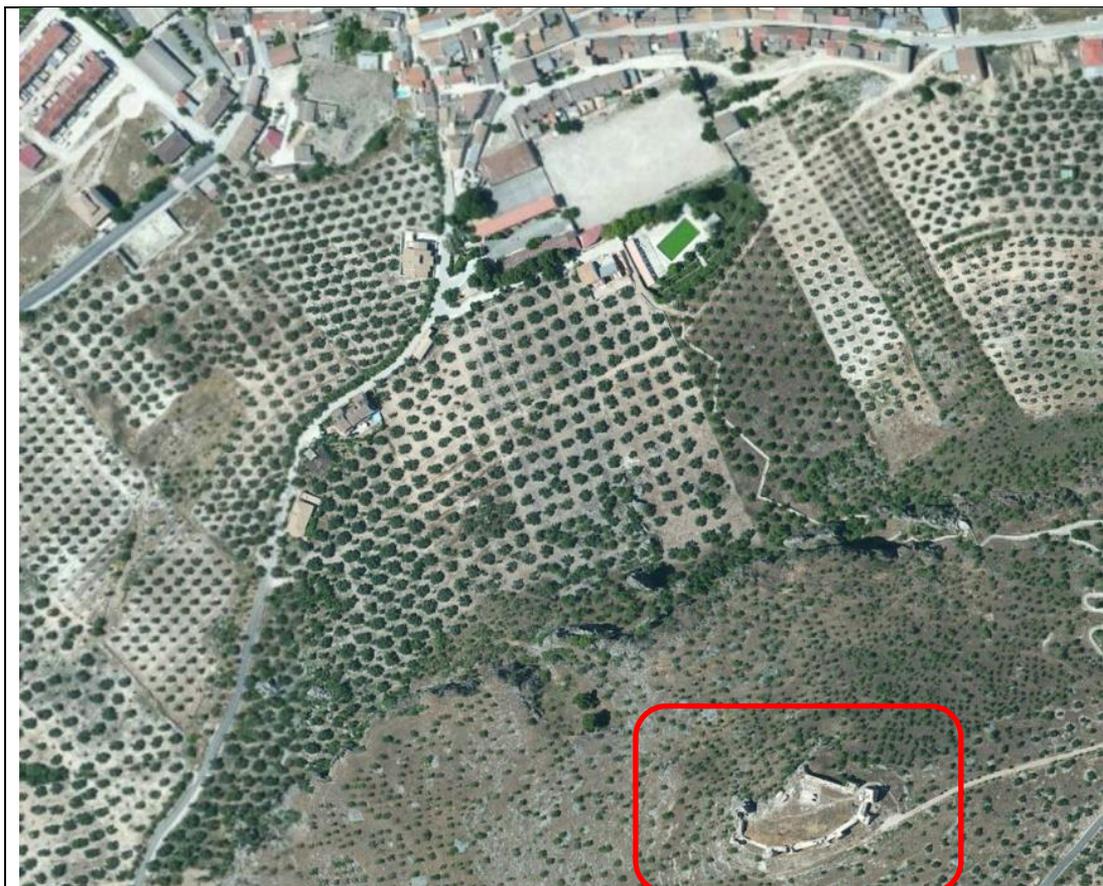
Se carecen de noticias acerca de Píñar anteriores al período altomedieval. Se cuentan con pocas menciones sobre los asentamientos de esta zona anteriores a la formación del reino nazarí. Es en esta época cuando el territorio de los montes adquiere un papel fundamental, ya que se convierte en zona fronteriza, enclave fundamental de la defensa del reino frente a la presión castellana.

El castillo de Píñar se alza sobre un cerro a cuyos pies se encuentra la localidad del mismo nombre, y perteneciente a la provincia de Granada. La peña en la que se localiza, constituida por materiales calizos, alcanza una altitud de 1.121 m sobre el nivel del mar. Su escarpado relieve constituye uno de los factores fundamentales que explican la ubicación. Su flanco septentrional viene definido por un tajo que imposibilita el acceso por esta zona, siendo la zona meridional la única accesible por tener una topografía más suave. A las defensas naturales que proporciona su enclave, hay que sumar su amplia visibilidad que permite un buen control del territorio.

Esta fortaleza fue un baluarte muy importante en el período de refortificación del reino Nazarí, a mediados del siglo XIV, especialmente por ser la frontera entre los reinos cristianos y musulmanes de Granada.



Los restos actualmente visibles se limitan a un perímetro amurallado y a dos aljibes en su interior. El castillo está bien conservado con respecto a la forma original del mismo, mientras que las construcciones muestran algunos desperfectos, fundamentalmente por caídas y deterioros de muros y torres. Ocupa una extensión de casi 3.000 metros cuadrados, siendo su base ligeramente ovalada. Sus murallas y torres constituyen una amalgama de diferentes tipologías constructivas unas veces motivadas por reparación y en otras por refuerzo. Cuenta con diez torres casi todas ellas recrecidas por construcciones de tapial o mampostería: ocho torres son rectangulares y otras tres de planta semicircular. En las diferentes intervenciones arqueológicas realizadas en su interior se han localizado los restos de viviendas de un pequeño poblado hoy en día enterradas.



Ortoimagen de la localización del Castillo de Píñar respecto de la población.

Fue declarado Monumento Artístico Nacional en 1931 bajo y posteriormente Monumento nacional por el Decreto de 22 de abril de 1949, y la Ley 16/1985 sobre el Patrimonio Histórico Español. De igual forma, tiene al condición de Bien de Interés Cultural otorgado por la Junta de Andalucía de acuerdo a la ley 14/2007 sobre Patrimonio Histórico de Andalucía.

Como paso previo a la realización del levantamiento del Castillo de Píñar he realizado una búsqueda bibliográfica de todos aquellos documentos que pudieran

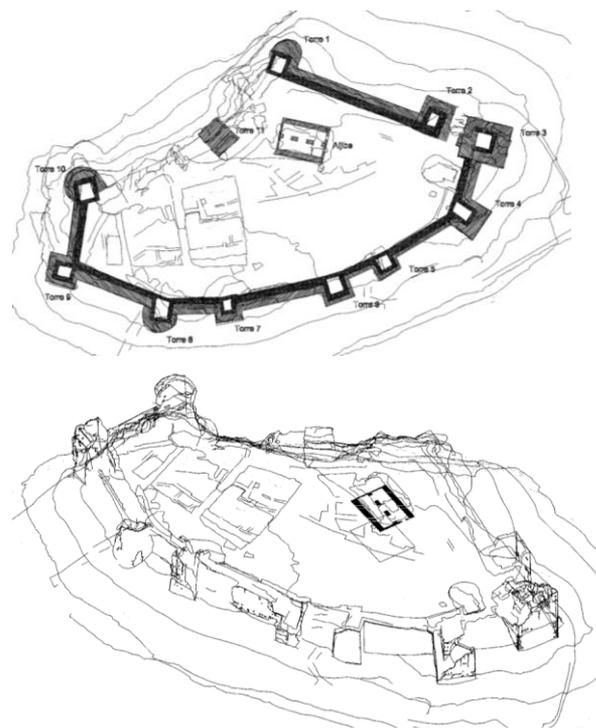
aportar conocimiento al trabajo a desarrollar. Entre ellos cabe destacar el trabajo realizado por Flor de Luque Martínez [298] sobre el análisis arqueológico de las estructuras de superficie y las aportaciones gráficas de Antonio Almagro [299] realizadas por fotogrametría estereoscópica.

²⁹⁸ LUQUE MARTÍNEZ, Flor de. (2003) *El castillo de Píñar: análisis arqueológico de las estructuras de superficie*. Granada

²⁹⁹ ALMAGRO GORBEA, A. (2004). *Levantamiento arquitectónico*. Universidad de Granada.



Documentación fotográfica de los lienzos de muralla 6 y 7 y de la torre 8 antes y después de la restauración de 2011.



Planta y perspectiva axonométrica del Castillo de Píñar realizada a partir de restitución estereoscópica. (Almagro, 2004)

SITUACIÓN ADMINISTRATIVA

Al igual que el resto de castillo de España, en el año 1931 fue declarada Monumento Artístico Nacional. Posteriormente, de acuerdo a la *Ley 16/1985, de 25 de junio, del Patrimonio Histórico Español* y a la *Ley 14/2007, de 26 de noviembre, del Patrimonio Histórico de Andalucía* (BOJA nº 248, de 19 de diciembre de 2007), tiene la condición de Bien de Interés Cultural. Sus datos pueden ser consultados en la ficha de inventario disponible en la web de la Junta de Andalucía. (<http://www.juntadeandalucia.es/cultura/iaph/bdi/>). En el anexo 10.4 se incluye la ficha completa de este BIC.

Patrimonio Inmueble de Andalucía

Presentación **Búsqueda** Ayuda

Búsqueda Granada | Piñar Volver al listado | 1 Registros | 1 de 1 | Informe

Identificación | Descripción | Protección | Fuentes de información

IDENTIFICACIÓN

Denominación: Castillo
Otras denominaciones: Castillo de Piñar
Código: 01181590001
Caracterización: Arqueológica, Arquitectónica
Provincia: Granada
Municipio: Piñar



Más imágenes
Cartografía
Más Bibliografía
Más Información

DESCRIPCIÓN

Tipologías

Tipologías	Actividades	P.Históricos/Etnias	Cronología	Estilos
Castillos	Defensa	Edad Media		

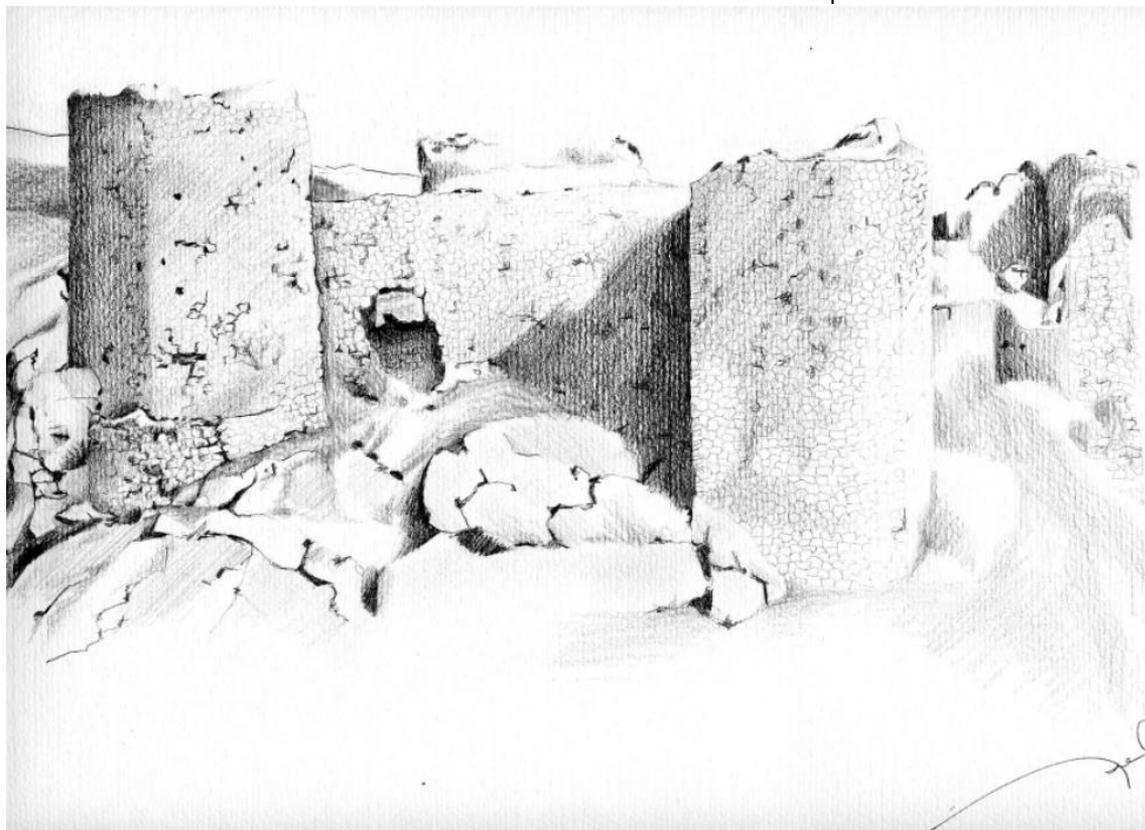
Descripción

Se trata de los restos de un castillo árabe enclavado en la cumbre del cerro que domina el pueblo de Piñar. Su acceso se realiza a partir del mismo, a través de un intrincado camino de tierra, que por no llegar a la cumbre obliga a realizar los últimos metros andando campo a través. El castillo presenta restos de ocho torres en muy mal estado de conservación, apenas unidos por restos de muralla. Presenta la peculiaridad de tener una torre de planta circular en el paño donde se encuentra la puerta de acceso, siendo las demás cuadradas. En el interior del recinto se encuentra un aljibe formado por dos bóvedas realizadas en piedra. Los restos del castillo se presentan realizados en mampostería de piedra e interior de tapial.

PROTECCIÓN

Tipología	Publicado

Ficha de inventario del Instituto Andaluz de Patrimonio Histórico. Ver completa en anexo 10.4



5.5 LEVANTAMIENTO DEL CASTILLO DE PÍÑAR MEDIANTE ESCANER LASER



El trabajo llevado a cabo en el Castillo de Píñar mediante láser scanner 3D (TLS) ha permitido construir un modelo 3D texturizado del complejo arquitectónico que sirviera de base para el proyecto de restauración y consolidación llevado a cabo en el año 2010.

Como se ha indicado en el estudio de la alcazaba de Guadix, el proceso de escaneado de un elemento patrimonial se dividen en: tareas de campo y tareas de laboratorio. Las primeras consisten en una planificación previa y en la captura metódica de datos de las nubes de puntos y de los puntos de control. En las segundas se realizan diferentes procesos informáticos de preparación de datos, registro y procesamiento de las diferentes tomas y por último obtención de los datos

(planos, ortofotografías, modelos) y control de resultados.

5.5.1 TRABAJOS DE CAMPO

5.5.1.1 PLANIFICACIÓN PREVIA

Planteado el caso de estudio “castillo de Píñar” se procedió a un análisis del conjunto arquitectónico situado en la coronación de un cerro al que solo se accede por el flanco sur a través de un camino de acceso de fuerte pendiente. El flanco norte es del todo inaccesible al existir un acantilado de unos 200 m de desnivel. Todo ello ha obligado a realizar escaneados muy próximos a los muros y por tanto con mala geometría en la incidencia del rayo sobre determinados paramentos no perpendiculares a la posición del escáner. Por otro

lado, las complicadas formas que presentan las estructuras, especialmente las torres, por su mal estado de conservación obliga a que deban realizarse múltiples desde diferentes posiciones, debiendo cumplir además las condición de solape entre las diferentes nubes de puntos.



Equipo de escáner utilizado *Riegl Z420i* . Captura del interior de la torre 8



Localización de la posición de los escáneres en planta. Todos los escáneres están situados en la proximidad de los paramentos, salvo uno situado a unos 400 m. Cuadrícula de 5m. (J.A. Benavides)

La elección del equipo (escáner láser de “tiempo de vuelo” Riegl LMS-Z420i) viene determinada por su disponibilidad al tratarse de un equipo adquirido por la Universidad de Granada y gestionado mediante alquiler por el Centro de Instrumentación Científica (C.I.C de la Universidad de Granada). Su utilización requiere bastante experiencia en el control de sus parámetros de hardware y *software* planteándose algunos problemas que hubo que solucionar. Este equipo de alta precisión incorpora una cámara réflex de alta calidad que se encuentra alineada con el eje de escáner y permite transferir la textura de la imagen a la nube de puntos.

El trabajo de campo se ha dividido en 46 tomas para cubrir por completo el exterior, el interior y la coronación de los muros cuando ha sido posible. La cantidad de tomas no es excesiva dada la complejidad de las estructuras y la imposibilidad de situarse en posiciones de escáner más altas y alejadas que permitan una captura más genérica del conjunto arquitectónico. El interior de la fortificación no presenta complejidad aparente salvo algunas las estructuras que sobresalen en su periferia, un aljibe de doble bóveda y un pequeño estanque o aljibe de forma rectangular. De esta forma se ha conseguido cubrir toda la superficie del castillo, incluyendo un pequeño lienzo de muralla que era inaccesible desde el exterior inmediato y que se ha registrado mediante una toma realizada desde el casco urbano del municipio de Píñar, situado a unos 400 metros de distancia.

Este trabajo comenzó a realizarse en febrero y marzo de 2009 con el objeto de documentar los trabajos de excavación del poblado situado en interior del Castillo

y la restauración de los lienzos de muralla y coronación que se estaba llevando a cabo (intervención arqueológica [300] dirigida por Teresa Bonet). Esta primera intervención se realizó con una Estación Total robotizada de imagen TOPCON IS Image Station y cámara Digital Canon Ds1-Mark II para la captura de imágenes que sirvieran para la restitución fotogramétrica posterior. Esta investigación se desarrolla de forma amplia en el apartado de experimentación en fotogrametría.



Imágenes capturadas por la Estación Total de imagen Topcom IS en los puntos de apoyo fotogramétrico.(J.A.Benavides)

300 Intervención arqueológica en el Castillo de Píñar dirigida por Teresa Bonet dentro del proyecto de restauración

Entre los meses de mayo y junio de 2010 se realizó el levantamiento completo del Castillo mediante metodología escáner laser. En concreto el trabajo de campo se desarrolló durante 3 días distanciados en el tiempo: días 19 y 27 de mayo y 10 de junio.

5.5.1.2 DEFINICIÓN DEL AREA DE ESCANEADO

Como ya se ha indicado en la experimentación desarrollada en la Alcazaba de Guadix, para evitar pérdidas de tiempo y captura de datos innecesarios el escaneado debe realizarse sobre la zona de interés, Esta operación se realiza a partir de un escaneado ultrarrápido mediante ensanchamiento del haz (aprox. 10 segundos), pero sin ninguna resolución y que solo permite trazar un rectángulo de selección del área de trabajo (ver imagen seleccionada). Otra forma de operar es seleccionar la zona de escaneado sobre una panorámica 360º que realiza la cámara fotográfica, siendo este proceso más lento.

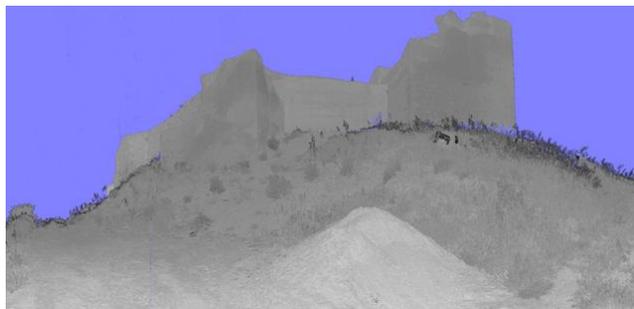


Imagen de la zona seleccionada de escaneado en la posición Scan-1 definida a partir de escaneado a baja resolución mediante ensanchamiento del haz.(J.A.Benavides)

5.5.1.3 CAPTURA DE DATOS CON ESCANER

El trabajo de campo estaba previsto realizarlo en dos secciones de trabajo, si bien la complejidad de las formas que presentan las estructuras tanto por el exterior como en el interior han hecho que se ampliara a tres días. En total se han realizado 46 tomas: 17 en el exterior y 29 en el interior.

La fuerte pendiente del terreno en la periferia del Castillo motivo la necesidad de posicionar el escáner en la proximidad de los paramentos lo que provoca capturas poco homogéneas en cuanto a resolución o incluso muy tangenciales del rayo láser respecto de estos, aportando diferentes nubes de puntos con resoluciones muy variables dependiendo del punto de captura. Esta dispersión en la resolución ha motivado realizar tomas con una resolución muy alta (inferior al centímetro) al objeto de obtener resoluciones de puntos suficientes en otras zonas más alejadas.

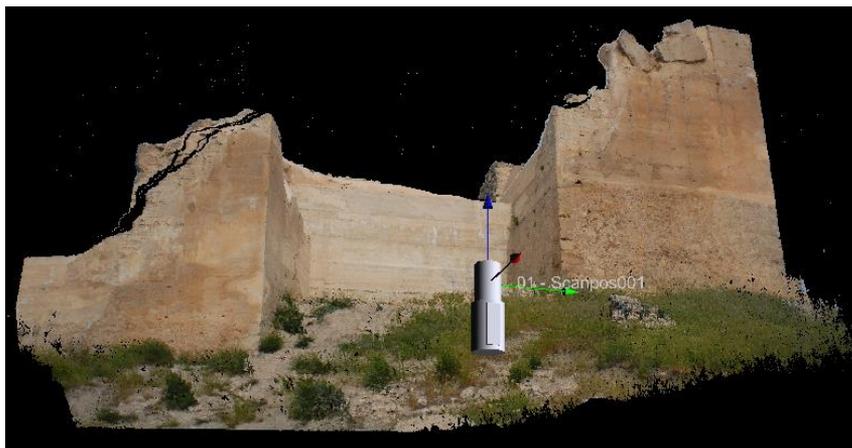


Imagen del posicionamiento 1, formado por 5.311.752 puntos de captura. Excesivo número de puntos para unas estructuras de pequeña dimensión. (J.A.Benavides)

Para conseguir el ajuste óptimo de las nubes de puntos se requería una resolución adecuada de la nube para las tomas exteriores, para ello se fijó una resolución de 2 cm para las zonas más lejanas de solape llegando a ser inferior a 5mm en las más próximas. Esta resolución resulta excesiva para un monumento de estas magnitudes por lo que se procederá a un filtrado posterior mediante *software*, depurando el número de puntos por centímetro cuadrado, a través de algoritmos tipo "octree"

Definida el área de captura para cada posicionamiento y su resolución, se procede a la captura de datos. Este proceso es totalmente automático constando de tres fases: Una primera captura general a la resolución establecida. Una segunda captura de las dianas o puntos de referencia a mayor resolución (milimétrica). Por último, una captura de imágenes desde el propio escáner para la texturización de la nube de puntos. La duración aproximada de cada escaneado fue de 30 minutos sin contar el tiempo de desplazamientos y montaje del equipo. En este sentido se planteó un serio problema tecnológico en los escaneados 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13 pues el cable de conexión escáner-cámara se rompió

perdiendo mucho tiempo en intentar, sin éxito, arreglarlo. El problema se solucionó tomando fotografías con otra cámara digital externa independiente del escáner situándola en una posición similar a la cámara fija calibrada debiendo posteriormente alinear manualmente en el post-proceso.



Filtrado de puntos realizada en el post proceso. Mismo modelo de la imagen anterior en la que la nube de puntos se ha reducido a 221.943 puntos para una resolución 2 cm. (J.A.Benavides)



Escaneado desde del interior del castillo de las torres 4 (derecha) y 5 (izquierda) mediante equipo TLS Riegl LMS-Z420i perteneciente a la Universidad de Granada. (J.A.Benavides)

A continuación se muestran algunas imágenes que muestran la complejidad de las capturas realizadas con el equipo de escáner Riegl LMS-Z420i.



Especial complejidad tubo la captura del aljibe. Se necesitan 4 tomas para cubrir todo el elemento. Las capturas muy próximas a la estructuras presentan graves problemas en la captura fotográfica complete de las imágenes o en la alineación de estas con respecto a las nube debido al paralaje entre eje escaner y eje fotográfico.



La captura de la parte superior de las estructuras plantea graves inconvenientes con el posicionado de escáner laser entrañando riesgos para los operadores. El trípode soporte del escáner dificulta la captura generando zonas de sombra.(J.A.Benavides).

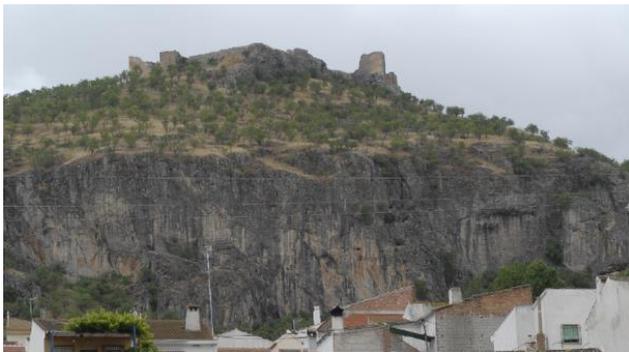


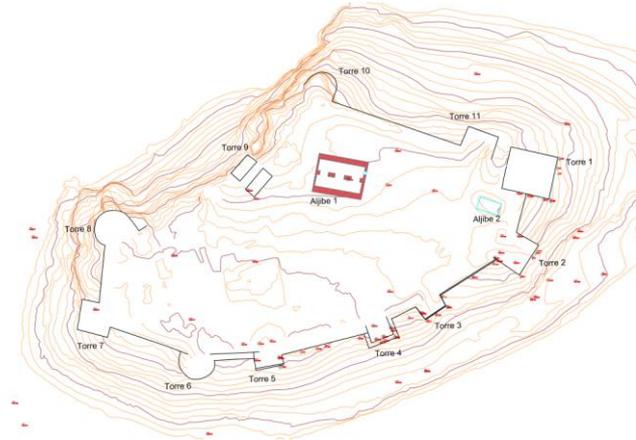
Imagen de la posición de registro (aprox. 400 m) del lienzo norte del castillo desde el propio municipio de Píñar. La fuerte pendiente del terreno y el riesgo de caída imposibilitan una posición más cercana.(J.A.Benavides).

5.5.1.4 GEORREFERENCIACIÓN Y AJUSTE DEL MODELO A PARTIR DEL APOYO TOPOGRÁFICO CON ESTACIÓN TOTAL

La georreferenciación, orientación y ajuste fino de los modelos de escáner necesitan obligatoriamente de una medición precisa de los puntos de apoyo mediante Estaciones totales topográficas (precisión milimétrica) apoyadas en bases pertenecientes a una poligonal cerrada o en puntos con coordenadas absolutas capturadas mediante GPS-RTK.



Levantamiento de los puntos singulares y puntos de apoyo mediante estaciones totales y equipo GPS-RTK



Apoyo topográfico realizado por GPS-RTK y Estación Total sobre paramentos.

Este proceso de georreferenciación del modelo a partir de puntos de referencia no siempre es fácil pues se requiere la localización muy precisa de puntos sobre la nube. Para facilitar esta labor, optamos por georreferenciar la posición del escáner a partir de las coordenadas aportadas por la antena GPS-RTK situada sobre un soporte en el propio instrumento TLS.



Equipo GPS-RTK (precisión centimétrica). Permitió la Georreferenciación directa del escáner mediante la colocación de la antena móvil sobre el soporte específico para ello.



Estacionado de escáner sobre un punto de coordenadas conocidas a partir de la posición dada por el GPS – RTK. La orientación aproximada se realiza a partir de una brújula.

5.5.2 TRABAJOS DE LABORATORIO

5.5.2.1 EXPERIMENTACIÓN CON REGISTRO

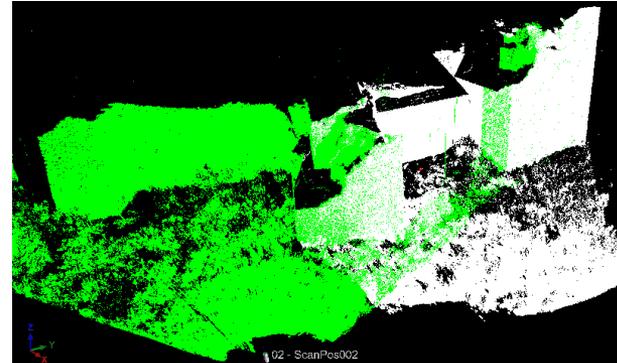
Como ya se ha indicado, el registro de los puntos escaneados consiste en georreferenciarlos bajo un mismo sistema de referencia, ya sea personal o universal. En el Castillo de Píñar se ha realizado una alineación y registro mediante un ajuste multi-estación, es decir a partir del ajuste de simultáneo de puntos de referencia, nubes de puntos y planos de referencia. Este ajuste requiere un ajuste previo grosero mediante la orden "coarse registration", necesitando definir puntos homologos de las diferentes nubes para poder llevarse a cabo [301].

La falta de un punto de vista general que permita registrar simultáneamente el exterior e interior del Castillo ha provocado ciertos problemas en el registro fino de las diferentes nubes de puntos, al no existir suficiente solape entre las nubes realizadas en el interior y el exterior. Por tanto, se han realizado dos registros generales, uno exterior y otro interior realizándose a través de métodos indirectos (alineación de nubes de puntos entre sí o a partir de puntos de control) y unidos entre sí mediante métodos directos a partir de los puntos de apoyo topográfico.

Debido a la enorme cantidad de datos que el *software* debe analizar para conseguir el ajuste fino de las nubes de puntos se recomienda seguir el siguiente proceso:

- Alineación o registro bruto "coarse registration" de dos registros a partir de 4 puntos de geometría clara, si bien tres son suficientes, un cuarto punto nos proporciona los valores medios de desviación. Este ajuste se realiza mediante la técnica llamada

ICP (Iterative Closest Point) siempre que haya suficiente solape.



Alineado y registro de las nubes de puntos correspondientes a los escaneados 1 (color blanco) y 2 (color verde) del Castillo de Píñar. (J.A.Benavides)



Alineado y registro de las nubes de puntos correspondientes a los escaneados 1 y 2 en color. (J.A.Benavides)

El realización del trabajo en tres sesiones diferidas en el tiempo ha obligado retirar las dianas colocadas durante el primer día, no pudiendo realizar el ajuste "Diana-Diana", necesitando un ajuste mediante áreas de solape y la mediación de puntos de control en elementos singulares.

301 ESQUIVEL, J. A., BENAVIDES, J. A., & GONZÁLEZ, C. (2012). Utilización de un modelo digital mediante laser escáner 3D para la documentación y restauración del

Castillo de Píñar (Granada, Andalucía). In *I Congreso Internacional "El patrimonio cultural y natural como motor de desarrollo: investigación e innovación"* (pp. 2171-2179). Universidad Internacional de Andalucía.

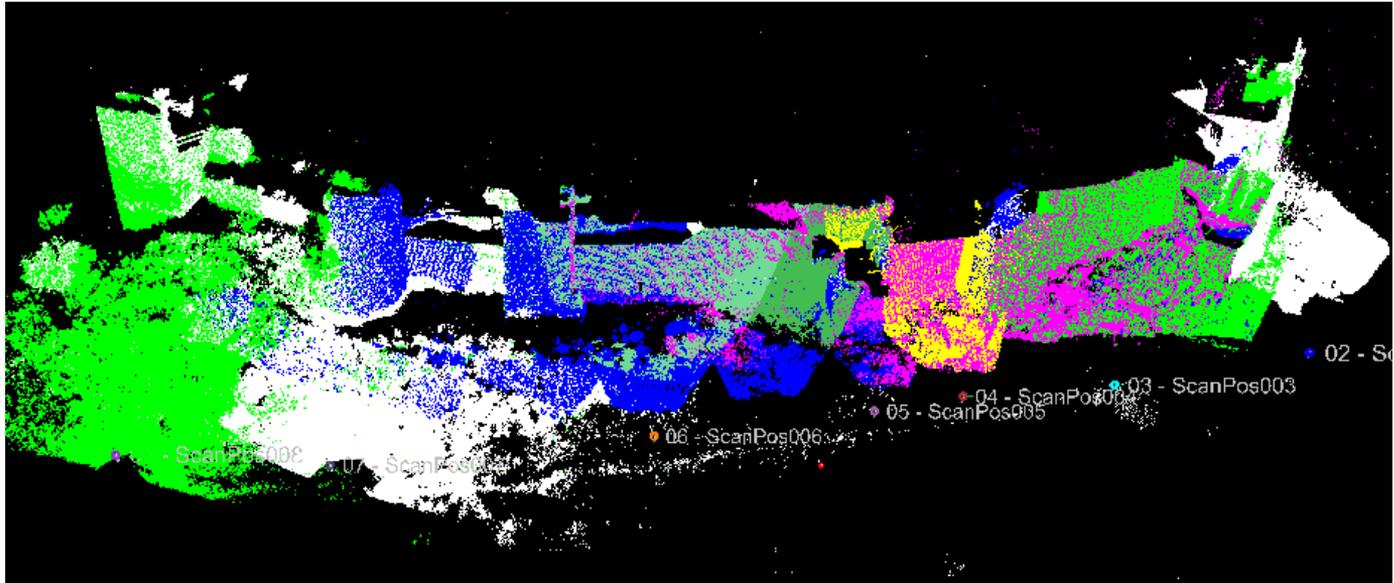


Imagen de cada uno de los registros de las nubes de puntos (coloreadas) alineadas a partir del ajuste *multiestación* mediante las zonas de solape.(J.A.Benavides)

Para el ajuste de las zonas con solape el mejor proceso de registro lo hemos encontrado al combinar varios sistemas (directos e indirectos) a través de la orden *Multi-ajuste*. Este ajuste permite procesar y alinear más de 2 escaneados al mismo tiempo si bien recomendamos hacer los ajustes de dos en dos y una vez todos alineados reprocesar el ajuste.

Multi Station Adjustment

Input Results Switch to page "Results" automatically

SCAN POSITIONS TO ADJUST Display mode Show parameters

Name	X	Y	Z	Roll	Pitch	Yaw	Scale
01 - ScanPos001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0
02 - ScanPos002	-12.100	-10.822	1.186	3.028	10.121	-39.346	0
03 - ScanPos003	-22.799	-19.749	0.712	-4.186	9.124	-48.180	0
04 - ScanPos004	-30.679	-25.006	0.594	-3.097	13.856	-59.175	0
05 - ScanPos005	-34.921	-28.718	0.466	1.736	12.847	-68.706	0
06 - ScanPos006	-45.279	-35.938	-0.068	2.164	9.768	-58.676	0
07 - ScanPos007	-60.775	-44.172	-1.836	2.389	13.950	-89.962	0
08 - ScanPos008	-73.401	-47.265	-3.360	0.888	7.298	-86.643	0
09 - ScanPos009	-82.477	-43.521	-2.342	7.319	12.595	-88.879	0
10 - ScanPos010	-95.058	-41.859	-3.145	1.261	11.108	-151.585	0
11 - ScanPos011	-97.283	-36.034	-2.842	-3.022	15.468	-155.373	0
12 - ScanPos012	-96.791	-22.768	-2.757	-4.073	21.695	177.868	0
13 - ScanPos013	-97.649	-15.951	-3.780	0.554	23.229	167.666	0
14 - ScanPos014	-9.839	14.405	4.491	-0.319	16.926	17.866	0
15 - ScanPos015	-15.684	18.835	5.659	113.639	87.809	81.412	0
16 - ScanPos016	-15.823	18.939	5.812	-1.537	7.646	61.461	0
17 - ScanPos017	-30.733	22.337	4.768	-1.658	22.010	89.189	0
18 - ScanPos018	-31.586	11.402	13.178	-0.503	-18.951	120.283	0
19 - ScanPos019	-36.614	3.866	11.497	0.365	5.037	-84.611	0
20 - ScanPos020	-64.021	-2.376	14.736	-0.836	2.910	167.684	0
21 - ScanPos021	-16.983	12.625	15.729	-8.312	-43.971	109.509	0
22 - ScanPos022	-16.911	12.699	15.739	-2.415	-39.098	169.176	0
23 - ScanPos023	-21.272	10.673	12.830	-4.983	-16.227	170.516	0
24 - ScanPos024	-19.980	-1.523	12.057	1.025	0.302	-88.591	0
25 - ScanPos025	-26.047	-1.930	11.517	2.643	-29.878	-162.714	0
26 - ScanPos026	-56.857	13.910	13.573	-3.255	-13.462	60.589	0
27 - ScanPos027	-76.701	-16.381	8.895	2.710	-3.279	8.182	0
28 - ScanPos028	-82.203	-19.801	7.983	-1.997	-1.457	-65.992	0
29 - ScanPos029	-84.630	-17.159	8.601	1.564	-3.221	-122.618	0
30 - ScanPos030	-84.483	-17.152	8.463	-15.772	-86.856	-157.514	0
31 - ScanPos031	-83.182	-29.981	9.217	5.293	1.083	-25.754	0
32 - ScanPos032	-83.239	-30.030	8.570	-130.284	-85.612	-143.225	0
33 - ScanPos033	-61.390	-29.180	8.911	104.919	-88.176	-9.736	0
34 - ScanPos034	-238.055	597.613	-196.594	-3.547	10.544	106.668	0

OBJECTS

Name	Type	Weight	Remarks

Units: [m], [deg]

INPUT DATA

Ignore tiepoints [1]

Use tieobjects [1]

Use polydata objects [1]

Ignore measured scan positions [1]

PARAMETERS

Nearest point search:

Mode: [all nearest points (recommended)]

Search radius [m]: [0.500]

Max. tilt angle [deg]: [5.000]

Adjustment:

Min. change of error 1 [m]: [0.1000]

Min. change of error 2 [m]: [0.0050]

Outlier threshold [1]: [2]

Calculation mode: [least square fitting]

Update display: [seldom (recommended)]

ADJUSTMENT

Adjust range offset [m]: [0.000]

Adjust theta offset [deg]: [0.000]

Tie points: 2D mode ignore range - EXPERIMENTAL

Time running: [n.v.]

Current action: [n.v.]

STATISTICS

Error (StdDev) [m]: [n.v.]

Number of observations used for calculation:

Tiepoints: [n.v.] Tieobjects: [n.v.] Polydata: [n.v.] Scan pos.: [n.v.]

Save calculation statistics to file (*.csv)...

Analyse Calculate

>> Minimize Undo last Undo all

Help Close

Captura de pantalla correspondiente al multiajuste de los escáner 1, 2, 3, 26 y 34. En la alineación de las diferentes posiciones de escáner se observa las nuevas coordenadas y giros del escáner respecto de la posición considerada como fija Scanposition 1. (Esta posición ha sido bloqueada para evitar desplazamientos o giros). (J.A.Benavides)

Al realizar un análisis previo, el programa nos indica la desviación estándar entre los dos modelos. Tras procesar el ajuste en la tecla "calculo" se analiza todos los datos objeto emitiendo el siguiente informe de ajuste.

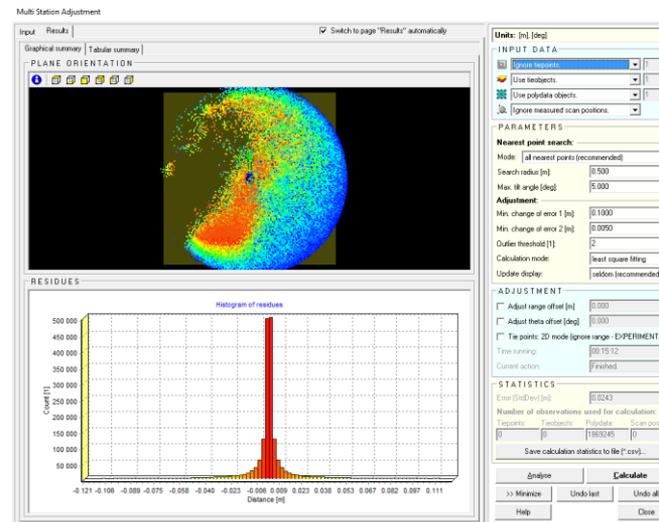


Imagen del análisis del registro multi-estación de las nubes de puntos correspondientes a "Scan1", "Scan2" y "Scan3". La desviación estándar es de RSD 0.0243 m. (J.A.Benavides)

El registro de algunas nubes puntos de las estructuras interiores del Castillo presentó graves inconvenientes debido a la poca área de solape vertical, utilizando para el ajuste la superficie del terreno. La crecida de la hierba desde una visita a la siguiente provocó un cambio de este plano del terreno de 11 cm, impidiendo su

alineación mediante el ajuste fino. Para realizar el registro se debió eliminar, momentáneamente, la nube de puntos correspondiente al suelo y realizar el ajuste solo a través de las estructuras y puntos de control.

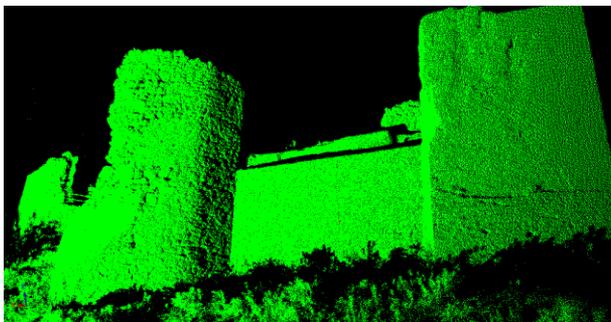


Imagen de la explanada interior del Castillo. La mayor altura de la hierba provocó graves errores en el registro las nubes de puntos entre unos días y otros.(J.A.Benavides)



Fuego provocado por un empleado para eliminar la hierba. La necesidad de disponer de la superficie del terreno para como elemento de apoyo para el registro de los diferentes escaneados hizo que propusiéramos al ayuntamiento la eliminación de la hierba. La poca sensibilidad del empleado hacia el patrimonio hizo que en la siguiente visita el castillo presentara este aspecto.(J.A.Benavides).

PROBLEMAS CON EL REGISTRO DE IMÁGENES Y TEXTURIZADO DEL MODELO.



Nube de puntos correspondiente al Scan 7 (torres 7 y 8). La rotura del cable USB de la cámara no permitió la captura de imágenes panorámicas desde el soporte de escaner, por lo que fue necesaria una captura con cámara externa para posteriormente alinear de forma manual con el modelo.(J.A.Benavides).



Imagen de la torre 8 captura con cámara Canon Ds1-Mark II. Los puntos de referencia que aparecen se alinearon con sus homólogos en la nube para dar textura.(J.A.Benavides).



Imagen de la nube de puntos texturizada de los escaneado registrados: Scan 4, 5 y 6. La diferencia de iluminación en las distintas tomas provoca cambios en la textura no deseados.(J.A.Benavides).

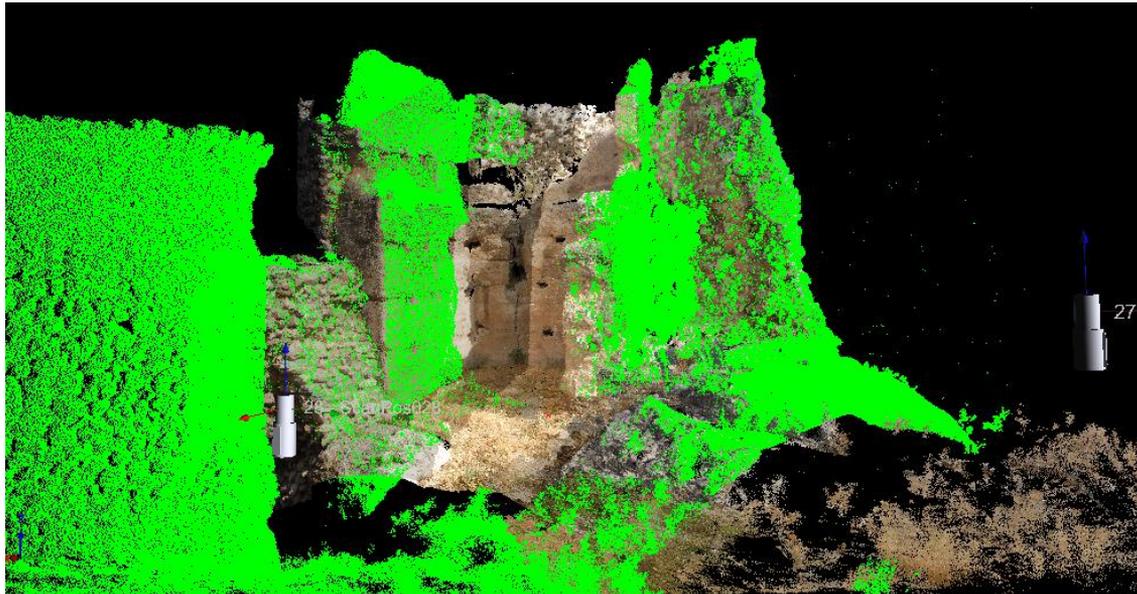


Imagen del alineado y registro de los escaneados 27 (verde) y 28 (textura de imagen) para captura interior de la torre 5.(J.A.Benavides)



Imagen del modelo interior de la torre 5 texturizada desde las posiciones 27 y 28. Los problemas de cambio de tono en la textura se pueden solucionar mediante su ajuste en programas de tratamiento fotográfico de imágenes.(J.A.Benavides).

5.5.2.2 OBTENCIÓN DE RESULTADOS

Conseguido el registro de todos los escáners procedemos al procesado del modelo para obtener datos finales. Estos resultados se pueden conseguir directamente a partir de la visualización de las nube de puntos obteniendo vistas de planos de planta, alzados, secciones y/o perspectivas) o por el contrario, generando previamente un modelo triangular de malla texturizada para posteriormente extraer la información.

Trabajar con modelos 3D mallados implica un trabajo adicional bastante importante pues además de lento da unos resultados poco gratificantes. Los requerimientos de hardware se hacen cada vez más importantes pues los tiempos de proceso aumentan considerablemente. Por esta razón, cada día más se intenta trabajar directamente con nubes de puntos en lugar de con mallas de superficie. Los programas actuales de CAD [302] incorporan la utilización de las nubes de puntos como apoyo diseño gráfico.



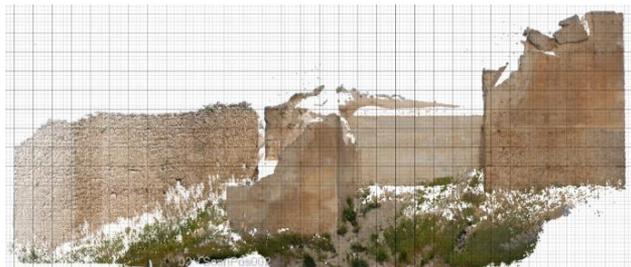
Captura de alzado Sur del Castillo a partir de las nubes de puntos texturizadas.(J.A.Benavides).

Generalmente, las nubes de puntos capturadas por los escáner tienen una resolución suficiente como para que el modelo generado tenga un aspecto fotorrealista. El problema se plantea al intentar acercarnos al modelo para observar los detalles. Los puntos, geoméricamente definidos, empiezan a separarse debido al aumento de escala haciendo que el modelo se vuelva transparente e imposibilitan el trabajo sobre él.

En algunas ocasiones la solución consiste en aumentar el tamaño del punto consiguiendo que lleguen a conectarse. Valores demasiados altos producen efectos más artísticos que realísticos.



Imagen capturada de una vista ortogonal de la nube de puntos con un tamaño de punto 1.(J.A.Benavides)



Ortofotografía obtenida a partir de la nube de puntos. Alzados torres 11 y 1. (J.A.Benavides)

Las representaciones mediante nubes de puntos proporcionan documentos gráficos con adecuada resolución geométrica pero por el contrario no aportan la suficiente calidad gráfica de la textura para ser utilizadas en el análisis arqueológico de los paramentos, necesitando, en esos casos, realizar modelos digitales de superficie para la obtención de texturas con la adecuada resolución.

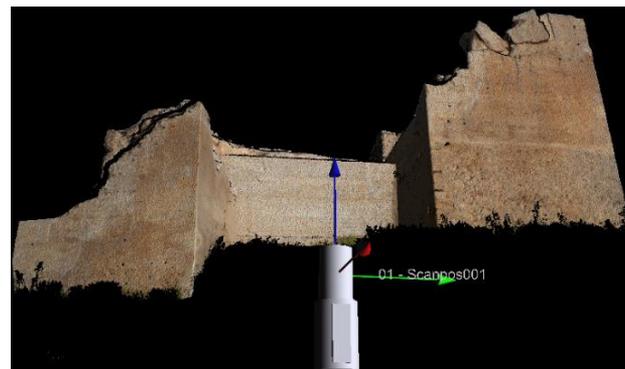
MODELADO 3D

Este complicado proceso utiliza normalmente los algoritmos de triangulación de Delaunay. La triangulación es el proceso de crear una superficie a partir de una nube de puntos formada por triángulos que conectan los puntos, existiendo dos modos diferentes de realizarla: por "Triangulación plana" y por "Triangulación polar".

Como ya hemos indicado, la triangulación plana se realiza a partir de las coordenadas 2D de los puntos asignados a la visualización elegida, resultando muy adecuada para modelos no agresivos (terrenos, esculturas, etc) ya que no deja huecos.

La triangulación polar aporta mejores resultados al tener en cuenta la posición de captura, pero, para que el resultado sea óptimo, solo es posible triangular los puntos capturados desde esa posición.

Un paso previo en el proceso de mallado consiste en eliminar aquellos puntos dispersos producto del ruido que generan el pulso laser o aquellas partes de la nube recogidas por el escáner y que no forman parte del modelo objeto de nuestro estudio. En este proceso hay que tener especial cuidado en el borrado por descuido de elementos que pueden ser útiles.



El modelado de las superficies depende de la ejecución simultánea de distintas variables no siempre bien definidas. (J.A.Benavides).



La diferente densidad de puntos y los errores instrumentales de medición del láser provocan mallas no homogéneas, con diferentes grados de rugosidad que provocan mala resolución en el texturizado. (J.A.Benavides)

Independientemente de los valores de triangulación óptimos para generar las superficies, los errores instrumentales de medición del rayo láser provocan mallas no homogéneas que se traducen en superficies rugosas. Algoritmos de decimado (reducción del número triángulos cuando son coplanarios) y de suavizado

(aplicando filtros matemáticos) permiten un aspecto más real de la superficie pero rigurosamente menos precisa. Al igual que en proceso anterior estas operaciones requieren la aplicación conjunta de distintas variables para optimizar los resultados.

Los datos triangulados (también denominados "malla") proporcionan una mejor representación del objeto escaneado, formando superficies sobre las que aplicar la textura de las fotografías. Este proceso requiere una gran inversión de tiempo no siendo los resultados siempre satisfactorios. Por otro lado, la intersección de mallas en las áreas solapadas produce incoherencias que se solucionan con el costoso trabajo de borrando manual de alguna de estas zonas comunes.

El proceso de triangulación de tan enorme cantidad de datos requiere establecer determinadas reglas de correlación para evitar triángulos indeseados. La distancia entre puntos consecutivos en cada toma varía mucho dependiendo de la distancia al punto y del ángulo formado entre el objetivo y el escáner, lo que exige descartar algunos de los triángulos formados entre puntos vecinos. Los criterios más usuales para evitar estos resultados son:

- a) que la superficie de cada triángulo no supere un valor límite ya que los triángulos demasiado grandes tienen grandes posibilidades de ser incorrectos,
- b) la proporción entre las aristas del triángulo debe ser pequeña evitando triángulos excesivamente deformados.
- c) que el ángulo formado por el triángulo y el escáner se aleje lo menos posible de la perpendicular (situación óptima de escaneado), evitando la aparición de caras que no son reales
- d) que la distancia radial entre dos puntos no sea mayor que un factor de profundidad que corresponde a

la distancia horizontal entre ambos puntos en rango promedio

Utilizando las funciones incorporadas en el *software* de tratamientos de los datos Riscan-pro V6, se ha generado la planimetría completa del castillo, así como las ortofotografías de los alzados y distintas secciones y perfiles.

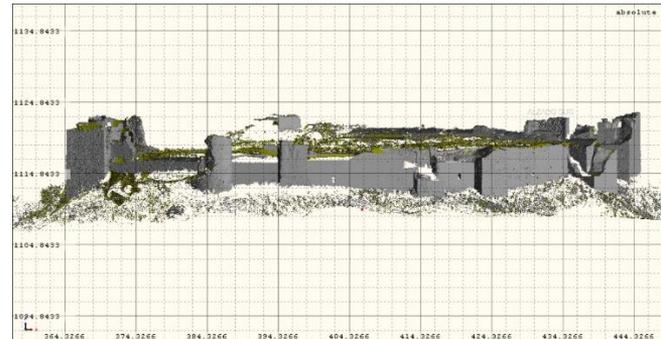
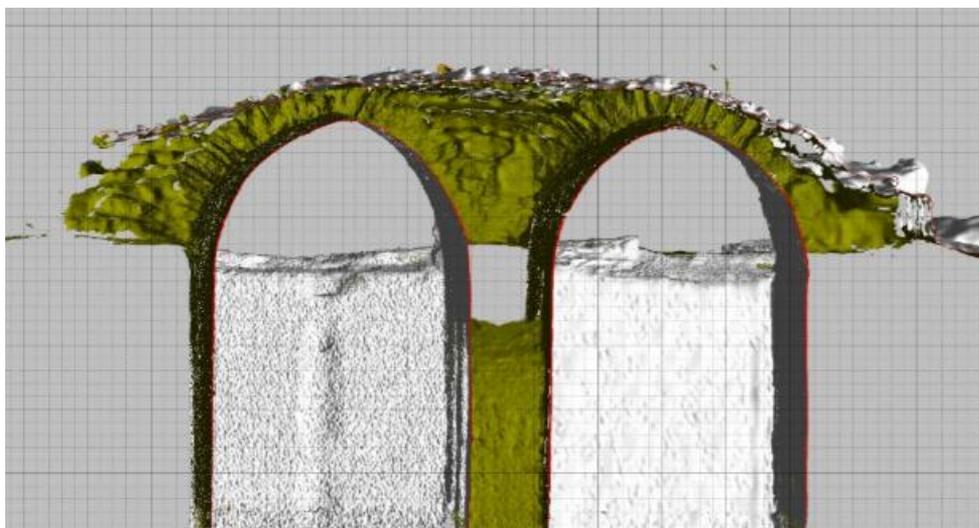


Imagen de la ortofotografía tomada desde el Sur correspondiente al modelo 3D de superficie en coordenadas absolutas. (J.A.Benavides)

SECCIONES



Representación planimétrica del castillo mediante curvas de nivel generadas a partir de modelo tridimensional.(J.A.Benavides)



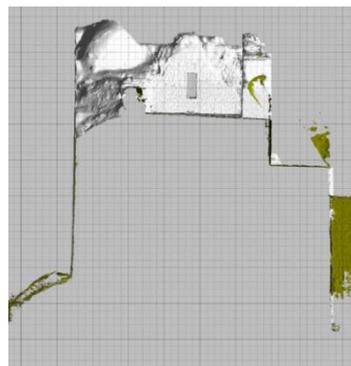
Sección transversal por el aljibe de doble bóveda a partir del modelo tridimensional sin textura.(J.A.Benavides).



Vista en perspectiva de la sección transversal por el aljibe .(J.A.Benavides)



Plano con la sección transversal completa del castillo definida en la imagen anterior.(J.A.Benavides)



Sección longitudinal y transversal por torre 1 desde el interior.(J.A.Benavides)

INFOGRAFÍAS E HIPÓTESIS DE RECONSTRUCCIÓN VIRTUAL

Los resultados obtenidos sirvieron de base para realizar diferentes infografías e hipótesis de reconstrucción virtual que permitieran analizar el impacto que supondrían distintas propuestas de intervención planteadas por el equipo de restauración. Además, el atractivo efecto visual que representan estos modelos facilita su explicación y divulgación mediante imágenes o vídeos.



Infografías de reconstrucción de las torres 1, 2 y 3 en tapial.(J.A.Benavides).



Infografías de hipótesis de reconstrucción virtual de las torres en distintos materiales, propuestas por el equipo de restauración del Castillo. En estas infografías se ha tenido en cuenta los criterios de restauración en cuanto a la diferenciación de materiales.(J.A.Benavides).

DIVULGACIÓN

La presentación de imágenes y videos constituyen una herramienta importante para la divulgación y difusión del patrimonio.



Perspectivas del Castillo de Píñar desde el Este (izq), desde el Oeste (der). (J.A.Benavides)



Imagen que se corresponde con el video del modelo 3D del Castillo de Píñar.(J.A.Benavides)

5.6 APLICACIÓN DE LA FOTOGRAFOMETRÍA MULTIMAGEN AL CASTILLO DE PÍÑAR

Como se ha indicado en anteriormente, toda investigación sobre el patrimonio arquitectónico debe considerarse como un método de análisis cuya finalidad es un mejor conocimiento del Bien. Este conocimiento debe ser lo más completo posible, necesitando para ello una planificación de acciones y una verificación de resultados.

5.6.1 TRABAJOS DE CAMPO

5.6.1.1 PLANIFICACIÓN PREVIA

Los trabajos de documentación ya realizados en el Castillo de Píñar mediante escáner laser sirvieron de base para la planificación de los trabajos en base a fotogrametría multimagen. La captura fotográfica desde tierra, presenta por lo general, los mismos problemas de accesibilidad que presenta el trabajo con escáner laser. La utilización de un equipo UAV ha solucionado por completo estos problemas necesitando una nueva planificación de acuerdo a este tipo de tecnología: equipo a utilizar, calidad de los resultados, altura de vuelo, planificación de las pasadas y su recubrimiento, horario, climatología, posición y número de puntos de referencia, tamaño de la diana, etc.

La peor calidad de imagen que, por lo general, nos aportan las cámaras que montan los *drones*, queda to-

talmente justificada por las significativas ventajas respecto del punto de vista desde el que son tomadas las fotografías y por la facilidad en su captura.

El registro de automático programado de las fotografías en intervalos de segundos hace que se disponga de una información superabundante para la generación de un modelo tridimensional con una geometría muy precisa y con mejor calidad gráfica que nos aportan otros sistemas incluido los escáner laser.

El registro gráfico del Castillo de Píñar se ha desarrollado en varias fases y con diferentes equipos:

Como ya indique, en febrero y marzo de 2009 con el objeto de documentar los trabajos de excavación del poblado situado en interior del castillo y de los trabajos de restauración de los lienzos y coronación de las torres y murallas (intervención arqueológica [303] dirigida por Teresa Bonet) se realizó un levantamiento topográfico y fotogramétricos de determinadas zonas que presentaban un especial interés. Para la captura topográfica y de puntos de apoyo fotogramétrico se utilizó una Estación Total robotizada de imagen TOPCON IS Image Station y una cámara Digital Canon Ds1-Mark II para la captura de imágenes desde tierra, que sirvieran para la restitución fotogramétrica posterior. La captura de imágenes se realizó pensando en una restitución estereoscópica, realizando tomas cenitales mediante cámara digital situada sobre una pértiga de 4 m, así como pares horizontales desde el suelo.

303 Intervención arqueológica en el Castillo de Píñar dirigida por Teresa Bonet dentro del proyecto de restauración



Imágenes de las estructuras excavadas en febrero de 2009. Captura de imagen cenital (arriba) realizada con jalón. Imagen frontal de las excavación capturada desde tierra (abajo.(J.A.Benavides))

La potencialidad de las nuevas herramientas fotogramétricas y los programas de gestión gráfica nos han permitido generar un modelo tridimensional de las estructuras excavadas en aquella época, a partir de las fotografías realizadas con otro propósito en febrero de 2009. La posibilidad de georreferenciar el yacimiento, actualmente enterrado, a partir de puntos homólogos entre imágenes antiguas y nuevas facilita enormemente la superposición de modelos, lo que permite ir incorporando intervenciones, pasadas o futuras, disponiendo de un modelo completo y actualizado con todas ellas.

Por otro lado, en el año 2010, dentro de los trabajos de documentación con escáner se realizaron capturas sistemáticas de fotografías para la restitución fotogramétrica, en aquellas zonas en las que el escáner no disponía de visión.



Captura de imágenes cenitales mediante pértiga de la torre 9. (derecha) Fotografía capturada desde la posición de la pértiga. (J.A.Benavides)



Captura de imágenes de difícil acceso o visión desde tierra. Imagen capturada desde jalón (4 m.) del lienzo oeste del castillo. (J.A.Benavides).

Posteriormente, en diciembre de 2014 se realizó el primer vuelo sobre el Castillo de Píñar utilizando para ello un equipo *drone* DJI *phantom2 visión plus*, en el que un solo operador maneja el equipo de vuelo y programa la captura automática de imágenes, solucionando de este modo los problemas que se nos habían planteado anteriormente mediante las capturas desde tierra. En esta ocasión, se realizó un vuelo mediante control manual, capturando 219 fotografías cenitales y otras 363 fotografías horizontales o inclinadas para los paramentos verticales de las torres y murallas. Tras un filtrado sistemático se seleccionaron un total de 234 imágenes que debían servir para construir el modelo completo del castillo.

Este equipo UAV incorpora una cámara FC200 con resolución de 4384 x 3288 pixel (14 megapíxeles) y un campo de visión (FOV) de 110º para una distancia focal de 5 mm. Dispone de un sensor CMOS de 1/2,3 pulgadas. Las imágenes que proporciona son de buena calidad, si bien el pequeño tamaño del sensor y la alta resolución geométrica hacen que aparezca ruido en los píxeles.





Imagen capturada por el equipo UAV Phantom2 visión-plus en diciembre 2014. Resolución de imagen (4384 x 3288), apertura de diafragma (f/2.8), tiempo de exposición (1/314seg), distancia focal (5mm) .(J.A.Benavides)

El gran ángulo de visión de la cámara (110º, ojo de pez) permite capturar en una sola imagen prácticamente la totalidad de castillo, lo que provoca importantes deformaciones que son necesarias corregir para su utilización en los programas de modelado multimagen. Estas deformaciones pueden ser corregidas por programas de tratamiento digital de fotografía como Photoshop, Lightroom, etc. En nuestro caso se ha realizado mediante el proceso automatizado de corrección de lente de Photoshop CS6 que realiza la misma rutina de manera secuencial sobre cada una de las fotografías.



Imágenes originales que presenta gran deformación. Vista Este y Oeste del Castillo de Piñar .(J.A.Benavides)



Imagen de la torre 4 desde el norte. El gran desnivel del terreno en esta zona impedía la captura de imágenes desde tierra.(J.A.Benavides)

En marzo de 2015, con motivo de las prácticas de campo de la asignatura Fotogrametría y Documentación del Grado de Edificación de la Universidad de Granada, se realizó un levantamiento exhaustivo, utilizando el equipo *drone* DJI *phantom2 visión plus* para la captura de imágenes y equipos de topografía, GPS-RTK y Estaciones Totales con distanciometría laser para el levantamiento de las bases y puntos de apoyo fotogramétrico.

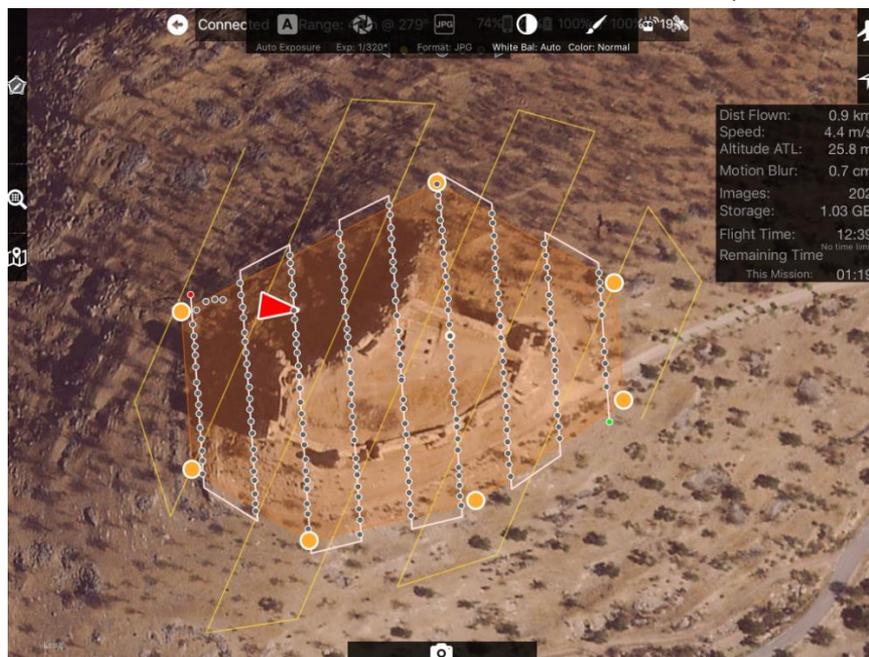


Equipos de alumnos desarrollando diferentes trabajos: Medición GPS de puntos de apoyo y estacionado en tierras. Medición de puntos de apoyo en paramentos con Estaciones Totales con distanciometría laser y vuelo del equipo *drone* para la captura de imágenes.(J.A.Benavides)

Si bien se realizó una planificación del vuelo, el deseo de los alumnos por pilotar el equipo hizo que todos los vuelos se realizaran de forma manual. La inexperiencia en el manejo hizo que muchas pasadas se realizaran sobre la misma trayectoria, lo que provocó un excesivo número de imágenes (948 fotografías). Tras el filtrado posterior se utilizaron un total de 909 para construir el modelo.

Las nuevas experimentaciones realizadas durante este tiempo, en cuanto a la captura mejorada de imágenes y la planificación del vuelo, han hecho que en marzo de 2017 se realizara un nuevo levantamiento del castillo. En esta ocasión se ha utilizado un equipo *DJI Phantom 3 Profesional*.

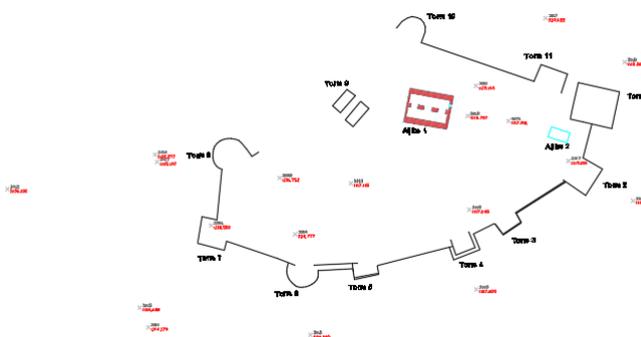
En esta ocasión se han programado varios vuelos mediante la utilización de varias aplicaciones, lo que nos permite comparar sus resultados de cara a futuras intervenciones. El conocimiento exhaustivo que se dispone del castillo ha permitido realizar una mejor planificación de los datos necesarios, generando más información con menor número de imágenes. Se han capturado 203 imágenes cenitales y 408 imágenes de paramentos exteriores e interiores, una pasada con cámara en posición horizontal (150 imágenes) y otra con vistas oblicuas (258 imágenes), que permitan conectar adecuadamente el modelo del terreno con el de los paramentos de muros y torres)



Planificación del vuelo cenital en marzo 2017 mediante la aplicación Map-Pilot [304].(J.A.Benavides)

5.6.1.2 GEORREFERENCIACIÓN GPS Y PUNTOS DE APOYO TOPOGRÁFICOS

Al igual que ocurría en la documentación con escáner, la realización de un modelo preciso y georreferenciado del castillo necesita obligatoriamente de un apoyo topográfico. La difícil comunicación visual entre el exterior e interior de castillo para el enlace de estaciones nos ha planteado la realización de un método mixto, consistente en el establecimiento de una red de puntos distribuidos de forma regular por todo el conjunto y medidos mediante tecnología GPS-RTK (precisión centimétrica) y que sirvieran de base para el posterior estacionado de los taquímetros electrónicos (Estaciones Totales) para la medición de puntos sobre los paramentos. De esta forma se obtiene una precisión absoluta mayor que una poligonal cerrada de muchos ejes.



Puntos de apoyo topográfico realizados por GPS-RTK. Estos puntos sirvieron de estacionado y orientación para la medición con Estación Total sobre paramentos. (J.A.Benavides)

Una de las primeras fases del proyecto consiste en la geolocalización del yacimiento y puntos singulares de las estructuras en un sistema de referencia global (coordenadas UTM-ETRS89), utilizando para ello un equipo de posicionamiento global en tiempo real

DGPS. En este sistema, un equipo fijo de referencia perteneciente a la RAP (Red Andaluza de Posicionamiento), proporciona correcciones en tiempo real al receptor móvil que captura las coordenadas de los puntos con una precisión que oscila entre 1 a 2 cm dependiendo del número y la geometría de los satélites que en ese momento orbitan en el cielo y de los obstáculos que las estructuras del castillo provocar. Este método proporciona coordenadas universales referidas al sistema oficial (ETRS-89) por lo que el modelo final estará completamente georreferenciado. El equipo utilizado es un GPS marca Leica modelo *Smarth Rovert 1200* que permite la recepción de señales de la constelación NAVSTAR-GPS y GLONASS y que conectado mediante radio-modem a las antenas de referencia recibe las correcciones de posicionamiento en tiempo real.

La gran precisión absoluta que se logra con este sistema nos permite medir puntos sin necesidad de intervisibilidad entre ellos, obtenido coordenadas absolutas geolocalizadas, tanto de los puntos de apoyo fotogramétrico para el vuelo mediante equipo UAV, como para la medición de las bases de apoyo para el estacionado posterior con topografía electrónica. Ambos puntos han sido marcados previamente mediante clavos de diferente tamaño sobre el terreno y marcados con spray para evitar su pérdida. De igual manera, se han medido mediante este sistema los puntos singulares que definen las estructuras y que son fácilmente accesibles.



Medición mediante DGPS de los puntos singulares accesibles de las estructuras.

Los puntos se descargan en gabinete a través del *software* Leica-Geo-office que permite realizar las transformaciones de datos brutos (datos Rinex) en datos en formato coordenadas universales geográficas y su transformación en UTM y en el sistema de referencia actual “*ETRS-89 European Terrestrial Reference System 1989*” .

3001	461417.8799	4143791.8623	1119.1649
3002	461416.5940	4143768.2078	1117.2450
3003	461393.9860	4143773.2275	1117.1149
3004	461383.3369	4143763.5177	1116.7771
3005	461380.3895	4143774.2614	1116.7516
3006	461367.2795	4143765.1943	1118.5898
3007	461435.5163	4143777.5187	1119.0058
3008	461477.1665	4143783.3260	1102.6526
3009	461417.9321	4143752.9657	1107.8547
3010	461386.2540	4143744.2951	1106.0451
3011	461355.3264	4143745.7523	1104.1789
3012	461328.4197	4143772.1254	1096.0812
3013	461356.9914	4143777.3252	1105.1371
3014	461356.5959	4143778.7161	1105.2766
3015	461353.6630	4143749.4752	1104.6882
3016	461447.8792	4143769.9016	1107.5527
3017	461431.1598	4143804.7919	1110.6220
3018	461446.2510	4143796.3878	1112.2018
3019	461416.3013	4143786.1234	1118.7973
4000	461424.0751	4143785.1510	1117.9123

Coordenadas UTM en el Huso30 ETRS-89 y altimétricas correspondientes a los puntos de apoyo y bases de estación en tierra.

5.6.1.3 PUNTOS DE APOYO TOPOGRÁFICOS

Los puntos de apoyo topográfico son una fase muy importante del proceso de modelado y documentación. Los diferentes programas de procesamiento por SFM son capaces de generar de forma casi automática un modelo 3D a partir del análisis de multitud de imágenes, pero necesitan de estos puntos para poder ajustar las dimensiones del objeto, georreferenciarlo y ajustar la precisión del modelo para la garantizar su calidad y utilidad:

- Escala: para que el modelo generado tenga dimensiones reales es necesario escalarlo a partir de las coordenadas conocidas de los puntos de apoyo.
- Orientación: Estas mismas coordenadas confieren al modelo la orientación deseada, tanto en dirección, como en nivelación.
- Precisión: si bien los algoritmos de inteligencia artificial son capaces de detectar y relacionar decenas de miles de puntos homólogos en diferentes imágenes, estos producen cierto grado de error debido, fundamentalmente, a la deformación de la imagen causada por las imperfecciones de la lente o conjunto de lentes. Este proceso de calibración de las deformaciones de la lente, conocido con el nombre de orientación interna, precisa de los puntos de apoyo para calibrarlos.

Como ya indicamos, la red de puntos de apoyo se realiza colocando dianas adhesivas en el suelo y paramentos verticales en el entorno de los elementos a documentar, que posteriormente quedaran recogidas en la secuencia de imágenes capturadas por el vuelo fotogramétrico UAV o por fotografías desde tierra y que deberán ser medidas con instrumento topográfico a partir de puntos de estación de coordenadas conocidas.



Programación del vuelo del castillo de Piñar en marzo de 2017 mediante la app Map-Pilot

Por otro lado, la aplicación *Litchi* permite configurar la misión que debe realizar el equipo UAV para la captura sistemática de imágenes. Para ello, se define manualmente los puntos de paso “Waypoint”, aplicando una numeración de acuerdo al recorrido que se desea realizar. Para el vuelo programado se necesita tener plena seguridad de los datos a introducir y el control visual continuo para evitar el choque del equipo contra estructuras o árboles.

Será necesario controlar los siguientes parámetros:

- La altitud del waypoint con respecto a la elevación de la aeronave en su punto de despegue.
- Velocidad de la aeronave.
- Tiempo de repetición de captura de imagen.
- La dirección en la que se orienta la cabeza del *drone* durante el vuelo entre dos waypoints. Cuando dos waypoints consecutivos tienen diferentes encabezados, la aeronave girará suavemente desde el primer rumbo al siguiente.



Planificación en campo del vuelo cenital para el castillo de Piñar. En cada waypoint (punto de paso) es necesario definir la altura deseada para la aeronave respecto del punto inicio de despegue.

Por tanto, de acuerdo a la iluminación existente, es necesario definir la velocidad de disparo para una captura óptima de las imágenes, debiendo regularse simultáneamente la velocidad del equipo UAV para evitar que las imágenes aparezcan desenfocadas por el movimiento de la cámara. Este último parámetro viene condicionado igualmente la altura del vuelo (en vuelos a baja altura se producen un mayor desplazamiento relativo). La situación ideal consiste en una velocidad de disparo lo más alta posible y una velocidad de la aeronave lo más baja posible. Otras variables como tipo de imagen, área de solapamiento, diferente iluminación, meteorología, etc., condicionan de manera decisiva el resultado final del modelo.

En esta ocasión se utilizó un dron Phantom3 profesional que incorpora una cámara con las siguientes características:

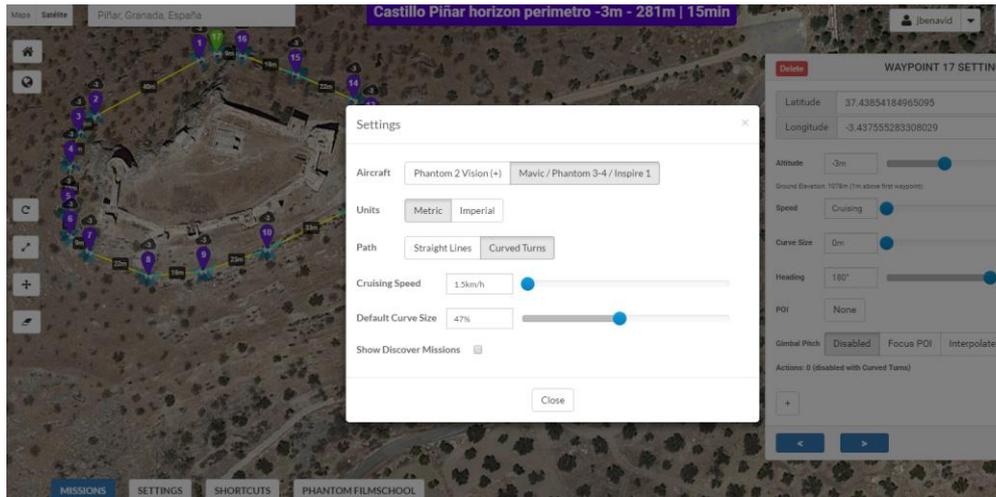
Sensor	1/2.3" CMOS Píxeles efectivos: 12.4 M (píxeles totales: 12.76 M)
Tamaño Máx. de Imagen	4000×3000 pixel
Lente	FOV 94° 20 mm (35 mm formato equivalente) f/2.8, enfoque a ∞
Rango ISO	100-3200 (vídeo) 100-1600 (foto)
Velocidad Del Obturador	8s -1/8000s
Modos de Fotografía	Disparo único Disparo en ráfaga: 3/5/7 disparos Exposición Automática en Horquillado (AEB): 3/5 Horquilla de Exposición a 0.7EV Bias Time-lapse.

Se realizaron 948 fotografías. Previo al procesamiento se eliminaron 39 imágenes que tenían mala calidad o que, por motivo del giro del *drone* estaban movidas, dejando un total 909 fotografías.



La captura cenital de imágenes aporta significativas ventajas respecto de la captura desde terreno. Vista de las imágenes capturadas correspondientes a la planta de las torres 5, 7 y 1. (J.A. Benavides)

Además de las capturas cenitales se programó un vuelo para la captura horizontal y oblicua de los paramentos exteriores e interiores. El diferente punto de vista de una misma estructura entre las imágenes cenitales y horizontales provoca la falta de reconocimiento de los puntos homólogos (SIFT) impidiendo su alineación. Esto obliga a capturas oblicuas que recojan ambos puntos de vista.



Programación del vuelo del perímetro exterior. Velocidad de 1,5 km/h (0,41 m/s). En esta ocasión, la cabeza del *drone* debe estar siempre dirigida hacia los paramentos.(J.A.Benavides)

Además, se realizó un vuelo manual para capturar la complejidad de los alzados de las estructuras interiores.

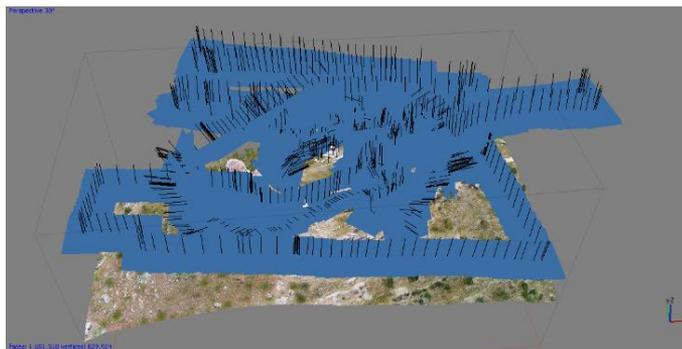


Vistas inclinadas de los paramentos verticales. Permite el solape con respecto al suelo, de lo contrario se generarían modelos no conectados.(J.A.Benavides)

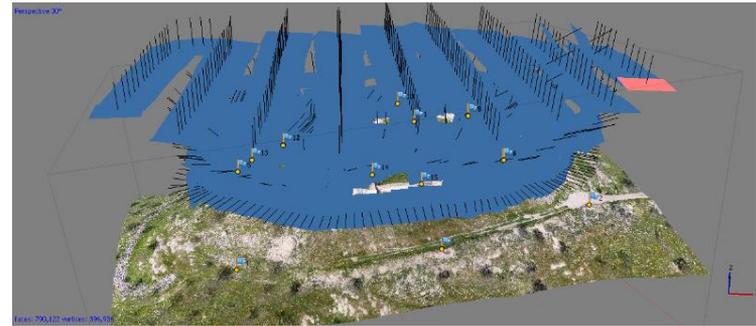
5.6.2 TRABAJOS DE PROCESAMIENTO: OBTENCIÓN DE MODELO 3D FOTOGRAMÉTRICO

Descargadas las fotografías sobre el equipo informático es necesario realizar un filtrado inicial para eliminar aquellas imágenes que no son válidas para el objeto del trabajo (imágenes del despegue, de personas, de giros indeseados del UAV, imágenes capturadas a contra sol, etc.). De igual forma se recomienda controlar los parámetros de revelado para ajustar, si fuera necesario, la exposición o el balance de blancos. Este proceso se realiza sobre programas de tratamiento digital de fotografías.

Indiscutiblemente, la programación realizada del vuelo, va a determinar de forma decisiva el flujo de trabajo en la fase de procesamiento. Un menor número de imágenes con mejor geometría disminuye considerablemente el tiempo a la vez que aumentamos la precisión.



Vista en perspectiva de la situación y orientación de las 909 fotografías cenitales e inclinadas, capturadas en 2015. (J.A.Benavides)



Situación y orientación de las cámaras en el vuelo del año 2017. La programación del vuelo permite un mejor registro con un menor número de imágenes (602 imágenes) .(J.A.Benavides)

PROCESADO SFM PARA OBTENCIÓN DEL MODELO 3D

Como ya hemos indicado, la precisión y resolución del modelo 3D mediante la tecnología SFM va a depender de varios factores relacionados con las imágenes fotográficas. Las variables geométricas y radiométricas de las imágenes deben ser controladas y corregidas para garantizar la calidad del trabajo: la escala (relación métrica entre imagen capturada y realidad), tamaño del GSD (*Ground Sample Distance*, tamaño del pixel en unidades terreno), calidad de la imagen, relación base-altura del vuelo, textura del objeto modelo, visibilidad de puntos de control, etc y que van a determinar de forma decisiva la calidad del modelo [306].

El proceso de trabajo se fundamenta en los siguientes pasos:

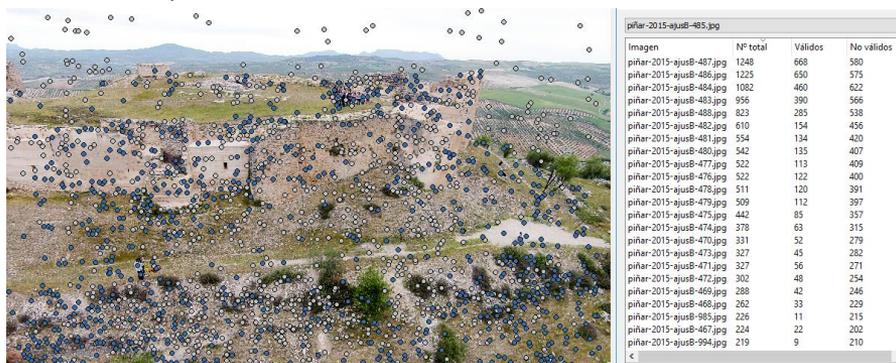
306 WESTOBY, M. J., BRASINGTON, J., GLASSER, N. F., HAMBREY, M. J., & REYNOLDS, J. M. (2012). 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective

tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 179, 300-314.

5.6.2.1 AJUSTE Y ORIENTACIÓN DE FOTOGRAFÍAS

El siguiente paso consiste en situar y orientar las imágenes en la misma posición relativa en la que se capturaron. Este proceso, que se conoce como alineación de cámaras, consiste en correlacionar pares de imágenes a partir de los puntos homólogos detectados entre ellas, determinando de esta forma la posición y orientación relativa de cada una de las cámaras con respecto a las demás. Este proceso es, sin duda, el paso más importante para la reconstrucción de modelos 3D pues determina, de manera decisiva, el resto de los procesos.

Como ya indicamos en la experimentación, el ajuste de la precisión va a depender de los parámetros que fijemos en el análisis, lo que condicionará el número de puntos de control radiométrico detectados para la estimación de la posición relativa de las cámaras.



Puntos SIFT detectados en una imagen (1225 puntos) y su correlación con otras imágenes. De ellos, 650 se consideran válidos, por estar presentes en otras imágenes y 575 invalidados, por haber sido detectados solo en esta imagen. (J.A. Benavides)

La realización de un nuevo modelo en marzo de 2017, mejor programado y con un menor número de imágenes (602 imágenes) ha permitido la determinación de la posición y orientación mediante el establecimiento de un nivel de ajuste medio, detectando un mayor número de puntos SIFT por imagen (18.500). Esta mayor

La realización de varios modelos, en diferentes momentos (2015 y 2017) nos ha permitido comparar las características de uno y otro, extrayendo algunas conclusiones para futuras intervenciones.

La orientación relativa de 909 imágenes, capturadas en el año 2015, exige establecer un filtro de detección y selección de puntos bajo, evitando importantes tiempos de procesamiento informático. En este caso se obtuvieron aproximadamente 1200 puntos por imagen que se correlacionan con sus homólogos de diferentes fotografías obteniendo la posición relativa de los puntos unitivos (en la siguiente imagen se muestran los puntos detectados y la cantidad de puntos de emparejamiento válidos y no válidos para con otras imágenes). A partir de esta red inicial y por ajuste de haces, se localiza la posición y orientación relativa de las imágenes entre sí.

determinación, permite un mejor ajuste. En la siguiente imagen se muestra el emparejamiento de los puntos homólogos de una imagen con respecto al resto.



Puntos homólogos de enlace. En azul se representan los válidos y en blanco los no válidos. La visualización de dos imágenes consecutivas nos muestra sus puntos homólogos (color azul) y los no detectados (blanco). (J.A. Benavides)

El total de puntos unitivos utilizados para el ajuste de las 602 imágenes ha sido de 33.906, datos más que suficientes para una ajuste preciso de la posición y orientación de todas las imágenes.

El proceso de orientación relativa de unas imágenes con respecto a otras es conocido como *orientación interna*. Este modelo de puntos unitivos que relaciona todas las imágenes, no dispone de escala ni orientación, necesitando realizar dos nuevos ajustes para ob-

tener un modelo escalado y orientado (*orientación absoluta*): el *primero* consiste en orientar y escalar el modelo con respecto al sistema de referencia elegido; el *segundo* consistente en determinar y corregir los parámetros de deformación interna de la cámara (centro óptico, deformación radial y tangencial, etc...). Ambos pasos se basan en la información de los puntos de apoyo topográfico por lo que se necesita correlacionar los puntos de control fotogramétrico de las imágenes (dianas), con sus correspondientes puntos del levantamiento topográfico

Emparejamientos de puntos homólogos

Imagen	Nº total	Válidos	No válidos
H-RAW-AW-77.jpg	884	456	428
H-RAW-AW-79.jpg	870	466	404
H-RAW-AW-80.jpg	795	424	371
H-RAW-AW-76.jpg	786	403	383
H-RAW-AW-81.jpg	697	366	331
H-RAW-AW-75.jpg	660	307	353
H-RAW-AW-82.jpg	628	333	295
H-RAW-AW-74.jpg	569	254	315
H-RAW-AW-83.jpg	555	294	261
H-RAW-AW-73.jpg	513	200	313
H-RAW-AW-84.jpg	479	241	238
H-RAW-AW-72.jpg	450	183	267
H-RAW-AW-71.jpg	419	159	260
H-RAW-AW-85.jpg	394	189	205
H-RAW-AW-70.jpg	373	140	233
H-RAW-AW-69.jpg	359	136	223
H-RAW-AW-68.jpg	335	123	212
H-RAW-AW-86.jpg	304	141	163
H-RAW-AW-67.jpg	291	98	193
H-RAW-AW-66.jpg	241	66	175
H-RAW-AW-87.jpg	221	85	136
H-RAW-AW-65.jpg	196	50	146
H-RAW-AW-64.jpg	178	44	134
H-RAW-AW-203.jpg	174	84	90
H-RAW-AW-200.jpg	172	91	81
H-RAW-AW-204.jpg	164	75	89
H-RAW-AW-63.jpg	164	30	134
H-RAW-AW-202.jpg	163	84	79
H-RAW-AW-88.jpg	155	49	106
H-RAW-AW-201.jpg	151	76	75
H-RAW-AW-53.jpg	148	0	148
H-RAW-AW-205.jpg	147	71	76
H-RAW-AW-54.jpg	143	0	143
H-RAW-AW-57.jpg	142	0	142
H-RAW-AW-93.jpg	137	4	133
H-RAW-AW-60.jpg	136	0	136
H-RAW-AW-52.jpg	135	0	135

Número de puntos de emparejamiento (homólogos) entre la H-RAW-W-78 y el resto de imágenes orientadas. (J.A. Benavides).



Vista en perspectiva de la nube de puntos discreta, formada por 56.906 puntos unitivos que relaciona las 909 imágenes del levantamiento realizado en 2015. (J.A.Benavides).

El modelado preciso de las estructuras requiere la localización de los marcadores (puntos de apoyo topográfico) sobre cada una de las imágenes. Este proceso, aunque tedioso, habitualmente es necesario realizarlo manualmente, es de suma importancia para determinar la calibración de las imágenes, el ajuste métrico del modelo y su orientación respecto del sistema de referencia universal.



Puntos de apoyo topográfico. En verde puntos de apoyo visible en este imagen. En gris, puntos de apoyo del modelo no utilizados para esta imagen. (J.A.Benavides)



Situación de los puntos de apoyo sobre paramentos verticales. Torres 11 y 8. (J.A.Benavides)

Como se puede observar en la siguiente imagen, la georreferenciación de los puntos de apoyo, confiere coordenadas universales a las imágenes.

Cámaras	X (m)	Y (m)	Z (m)
<input checked="" type="checkbox"/> piñar-2...	461406.725757	4143790.809759	1128.208343
<input checked="" type="checkbox"/> piñar-2...	461409.376390	4143787.627170	1127.063401
<input checked="" type="checkbox"/> piñar-2...	461408.237814	4143785.564425	1126.999666
<input checked="" type="checkbox"/> piñar-2...	461406.131212	4143783.354281	1126.995812
<input checked="" type="checkbox"/> piñar-2...	461404.420727	4143781.058720	1127.593704
<input checked="" type="checkbox"/> piñar-2...	461408.503887	4143779.845859	1127.669155
<input checked="" type="checkbox"/> piñar-2...	461410.632502	4143783.467172	1127.909763

Marcadores	X (m)	Y (m)	Z (m)
<input checked="" type="checkbox"/> 1	461417.879900	4143791.862300	1119.164900
<input checked="" type="checkbox"/> 2	461416.594000	4143768.207800	1117.245000
<input checked="" type="checkbox"/> 3	461393.986000	4143773.227500	1117.114900
<input checked="" type="checkbox"/> 4	461383.336900	4143763.517700	1116.777100
<input checked="" type="checkbox"/> 5	461380.389500	4143774.261400	1116.751600
<input checked="" type="checkbox"/> 6	461367.279500	4143765.194300	1118.589800
<input checked="" type="checkbox"/> 8	461477.166500	4143783.326000	1102.652600
<input checked="" type="checkbox"/> 9	461417.932100	4143752.965700	1107.854700
<input checked="" type="checkbox"/> 10	461386.254000	4143744.295100	1106.045100
<input checked="" type="checkbox"/> 11	461355.326400	4143745.752300	1104.178900
<input checked="" type="checkbox"/> 12	461328.419700	4143772.125400	1096.081200
<input checked="" type="checkbox"/> 13	461356.991400	4143777.325200	1105.137100
<input checked="" type="checkbox"/> 14	461356.595900	4143778.716100	1105.276600
<input checked="" type="checkbox"/> 15	461353.663000	4143749.475200	1104.688200
<input checked="" type="checkbox"/> 19	461416.301300	4143786.123400	1118.797300
<input checked="" type="checkbox"/> 1000	461424.075100	4143785.151000	1117.912300

Coordenadas de cámaras y puntos de apoyo de acuerdo al sistema universal UTM-ETRS-89. (J.A.Benavides)

Las importantes magnitudes de las coordenadas universales, presenta problemas a la hora de importar los modelos sobre otros programas de gestión, siendo habitual restar una cantidad constante a todas ellas.

Marcadores	X (m)	Y (m)	Z (m)	Precisión (m)	Error (m)	Proyecciones
1	417.879900	3791.862300	1119.164900	0.005000	0.018394	48
2	416.594000	3768.207800	1117.245000	0.005000	0.015778	28
3	393.986000	3773.227500	1117.114900	0.005000	0.028896	13
4	383.336900	3763.517700	1116.777100	0.005000	0.020368	44
5	380.389500	3774.261400	1116.751600	0.005000	0.036960	49
6	367.279500	3765.194300	1118.589800	0.005000	0.900051	2
8	477.166500	3783.326000	1102.652600	0.005000		0
9	417.932100	3752.965700	1107.854700	0.005000	0.024296	34
10	386.254000	3744.295100	1106.045100	0.005000	0.013882	49
11	355.326400	3745.752300	1104.178900	0.005000	0.021453	6
12	328.419700	3772.125400	1096.081200	0.005000		0
13	356.991400	3777.325200	1105.137100	0.005000		0
14	356.595900	3778.716100	1105.276600	0.005000	0.059155	45
15	353.663000	3749.475200	1104.688200	0.005000	0.268791	1
19	416.301300	3786.123400	1118.797300	0.005000	1.818103	2

Los valores de las coordenadas X e Y son modificados restando una cantidad constante en todas ellas. Para la X se ha restado 641.000, quedando solo las centenas de metros. Para las coordenadas Y se le ha restado 4.140.0000, quedando solo los millares de metros. Programas de gestión como Revit no admite coordenadas universales UTM.(J.A.Benavides).

Realizado el ajuste fino del modelo es posible comprobar los errores por punto cometidos en la orientación absoluta del modelo

Marcadores	X err (m)	Y err (m)	Z err (m)	Precisión (m)	Error (m)	Proyecciones
1	0.012378	-0.006098	0.012162	0.005000	0.018394	48
2	0.008135	0.001704	-0.013412	0.005000	0.015778	28
3	0.009628	0.012468	0.024224	0.005000	0.028896	13
4	-0.015418	-0.012590	0.004320	0.005000	0.020368	44
5	-0.028707	0.011356	0.020323	0.005000	0.036960	49
6	-0.862623	0.243887	-0.080577	0.005000	0.900051	2
8				0.005000		0
9	-0.004180	0.010576	-0.021470	0.005000	0.024296	34
10	-0.010360	0.009229	-0.000467	0.005000	0.013882	49
11	-0.013023	-0.005552	0.016119	0.005000	0.021453	6
12				0.005000		0
13				0.005000		0
14	0.040965	-0.024447	-0.034978	0.005000	0.059155	45
15	-0.208050	-0.169478	0.015527	0.005000	0.268791	1
19	-0.940996	1.540136	-0.219108	0.005000	1.818103	2

Ejemplo de valores correspondientes a los errores (X, Y, Z) para el ajuste para cada uno de los puntos de apoyo.(J.A.Benavides)

Seguidamente es necesario realizar otro ajuste, consistente en determinar y corregir los parámetros de deformación interna de la cámara (centro óptico, deformación radial y tangencial, etc...), aumentando significativamente la precisión [307].

Tipo de cámara:	Normal	
Tamaño de píxel en sensor (mm):	0.00140989	x 0.00140989
Distancia focal (mm):	5	
<input type="button" value="Valores iniciales"/> <input type="button" value="Valores ajustados"/> <input type="button" value="GPS/INS offset"/>		
 		
f:	2461.81	
cx:	0.815234	b1: -0.182581
cy:	69.3446	b2: -0.0180143
k1:	-0.076142	p1: -0.00324032
k2:	0.0761276	p2: 0.000579137
k3:	-0.0243074	p3: 0
k4:	0	p4: 0

Parámetros de calibración de las imágenes realizada mediante ajuste de haces a partir de los puntos de apoyo definidos sobre las imágenes y la precisión de estos.(J.A.Benavides)

- Siendo f : la longitud focal medida en píxel.
- cx y cy : Coordenadas de punto principal, es decir coordenadas de intersección del eje óptico de la lente con el sistema de ejes del sensor.
- $k1$ $k2$ $k3$ $k4$: Coeficientes de distorsión radial.
- $b1$ y $b2$: Coeficiente de transformación de inclinación.
- $p1$, $p2$, $p3$, $p4$: Coeficientes de distorsión tangencial.

307 EL-HABROUK, H.; LI, X.P. Y FAIG, W. (1996). Determination of geometric characteristics of a Digital Camera by Self-Calibration. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXI(B1), 60-64

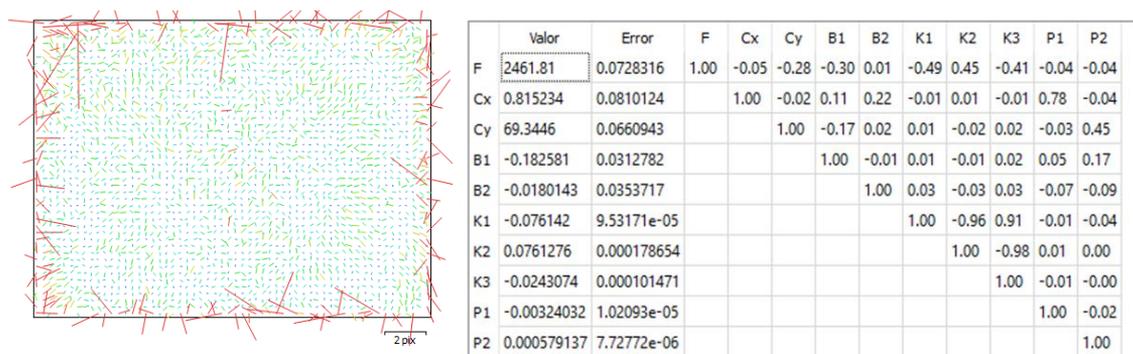


Gráfico de errores residuales con escala aumentada de la distorsión de la lente. Tabla de correlación de los parámetros de calibración de la cámara y los errores en mm. .(J.A.Benavides)

De acuerdo este gráfico, observamos que la mayor distribución de errores se produce en las zonas periféricas de la imagen. Por ello, se desaconseja toda referenciación de puntos de apoyo que se encuentren situados en estas zonas de las imágenes.

5.6.2.2 GENERACIÓN DE NUBE DE PUNTOS DENSA

Conocida la posición exacta de las cámaras procedemos a la generación, por ajuste de haces, de una nube de puntos densa por triangulación múltiple. Es decir, se reproducen los haces correspondientes a cada pixel, respecto del centro de proyección de cada imagen que interseca con los correspondientes haces de los puntos homólogos de otras imágenes produciendo millones de puntos en 3D que se corresponden fielmente con el modelo real del yacimiento.

Diferentes grados de resolución de acuerdo a las necesidades del trabajo:

Fijar la resolución del modelo es un factor decisivo a la hora de generar nubes de puntos y mallas 3D. Por lo general, esta resolución vendrá fijada por el tamaño del GSD y por el nivel de resolución (bajo, medio o alto) fijado para la generación del modelo. Modelos muy

precisos (resolución milimétrica) requieren mayor tiempo de procesamiento generando archivos que pueden ser inmanejables por el gran volumen de datos, por otro lado, modelos menos precisos (resolución centimétrica), pueden ser insuficientes para la correcta definición del elemento a documentar.



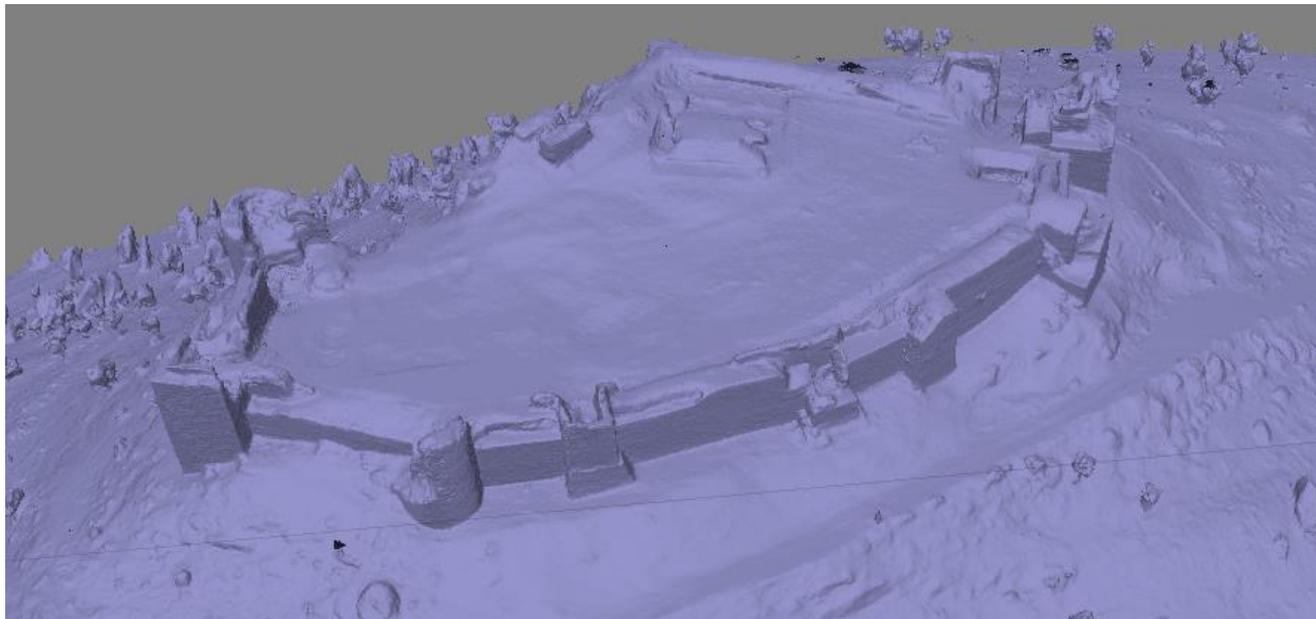
points: 25,943,480

Perspectiva desde el sur de la nube de puntos densa, correspondiente al modelo de 2015

5.6.2.3 OBTENCIÓN DE MODELO 3D DE SUPERFICIE

La indefinición de formas que genera la nube de puntos nos plantea la necesidad de disponer de un modelo digital de superficie mucho más realista y efectivo. Este proceso consiste en la aplicación de un algoritmo de

triangulación extremadamente complejo capaz de determinar la dirección correcta de cada una de sus caras de la superficie en función del posicionamiento de las cámaras. La precisión de la superficie generada TIN (triangular irregular network) depende de la resolución en la de la nube de puntos. Posteriormente, procesos de suavizado y oclusión de huecos se realizan para mejorar el modelo.



Modelo 3D de malla renderizada mejor visualización de las superficies. (J.A.Benavides)



Modelo 3D de malla con color.(J.A.Benavides)



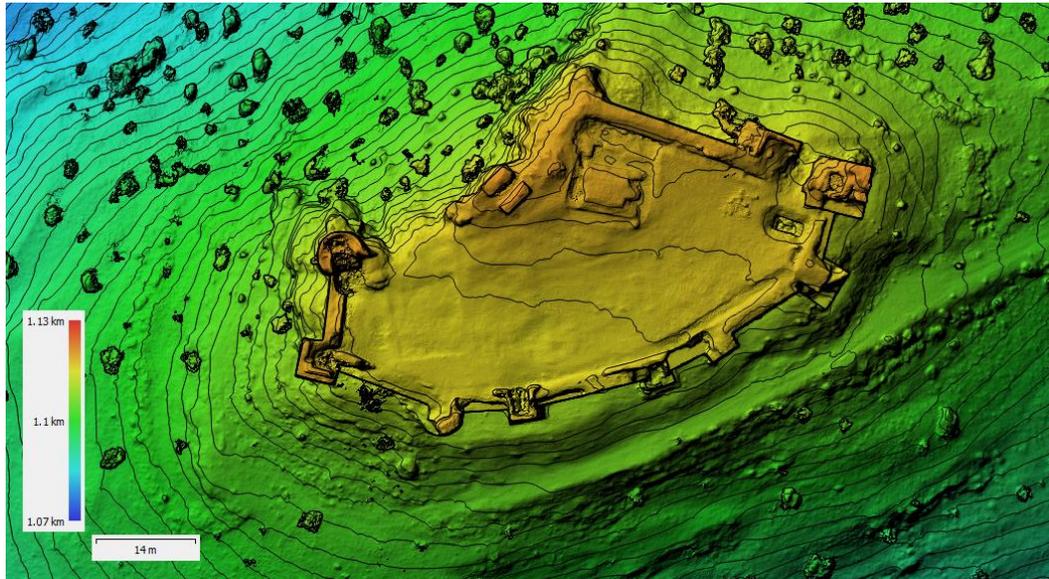
Malla con textura realista. El procesado para la aplicación de la textura a partir de miles de fotografías es complejo. Se recomienda generar el modelo con malla de color y posteriormente generar solo los ortofotografías de las vistas deseadas.(J.A.Benavides).



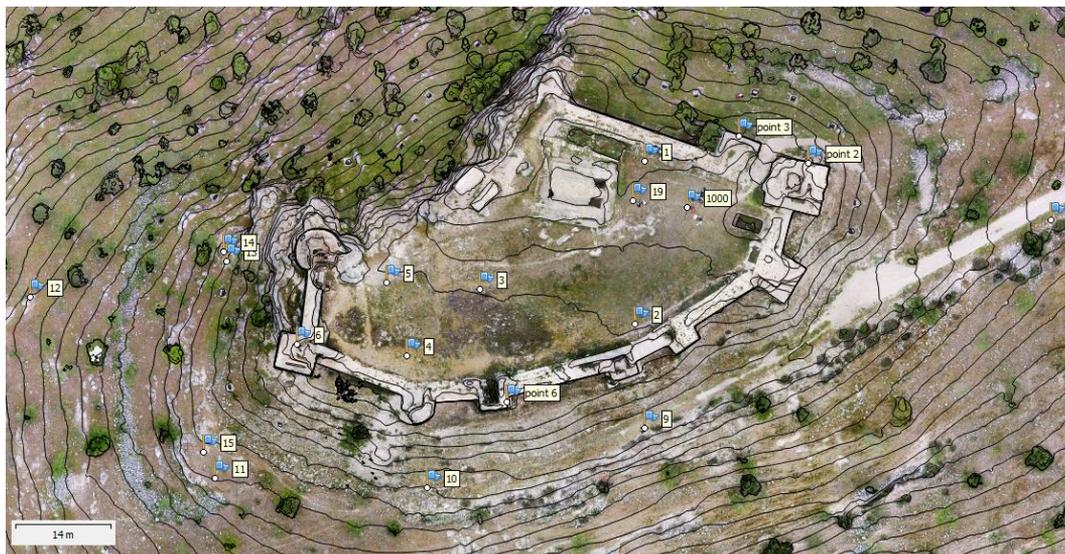
Vista en planta de la malla texturizada realista correspondiente al vuelo de marzo 2017. (J.A.Benavides)

5.6.2.4 OBTENCIÓN DE RESULTADOS

Los modelos DEM (Modelos Digitales de Elevaciones) están constituidos por superficies de mallas regulares producto de una triangulación plana. Son un medio ideal para la obtención de documentos de índole técnica, como planos con curvas de nivel o secciones de diferente tipo.



Modelo Digital de Elevaciones con resolución de malla de 15 cm y equidistancia de curvas 1m. El color e intensidad es función de su altura. (J.A.Benavides).



Los DEM son el soporte ideal para la generación de ortofotografías. Plano con curvas de nivel 1m sobre ortofotografía digital de la planta correspondiente al modelo de 2015.(J.A.Benavides)

Como se puede observar en las ortofotografías el vuelo programado del año 2017 dispone de una mejor resolución radiométrica con respecto al realizado en el año 2015, a pesar de que en este último las condiciones de

iluminación eran mejores al estar el día ligeramente nublado, evitando el efecto indeseado de las luces y sombras. Esta mayor calidad en las imágenes viene motivada por una menor velocidad en la vuelo.



Comparativa de ortofotografías del alzado sur del castillo, elaboradas en 2015 y marzo 2017. (J.A.Benavides)



Comparativa de ortofotografías del alzado este del castillo, elaboradas en 2015 y marzo 2017. (J.A.Benavides)



Comparativa de ortofotografías del alzado norte del castillo, elaboradas en 2015 y marzo 2017. (J.A.Benavides)



Comparativa de ortofotografía del alzado oeste del castillo, elaboradas en 2015 y marzo 2017. (J.A.Benavides)

5.6.2.5 INFORME DE PROCESADO Y GENERACIÓN DE MODELO 3D DEL CASTILLO DE PIÑAR

MODELADO : CASTILLO DE PIÑAR

PROCESAMIENTO DE DATOS

16 marzo 2017



Datos del levantamiento

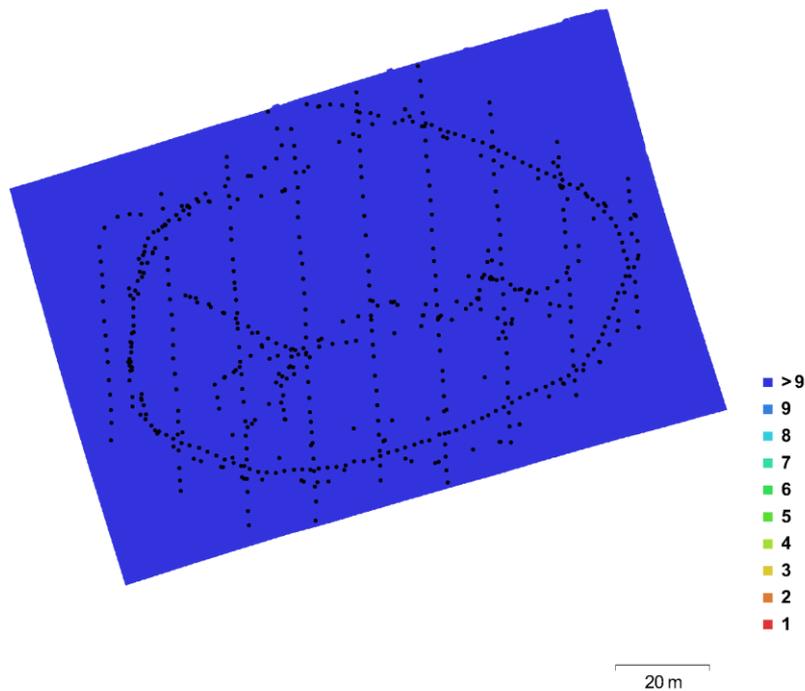


Fig. 1. Posiciones de cámaras y solapamiento de imágenes.

Número de imágenes:	602	Posiciones de cámara:	602
Altitud media de vuelo:	40.7 m	Puntos de enlace:	33,966
Resolución en terreno:	1.07 cm/pix	Proyecciones:	411,734
Superficie cubierta:	0.0118 km ²	Error de reproyección:	1.29 pix

Modelo de cámara	Resolución	Distancia focal	Tamaño de píxel	Precalibrada
FC300X (3.61 mm)	4000 x 3000	3.61 mm	1.56 x 1.56 micras	No
FC300X (3.61 mm)	3992 x 2992	3.61 mm	1.57 x 1.57 micras	No

Tabla 1. Cámaras.

Calibración de cámara

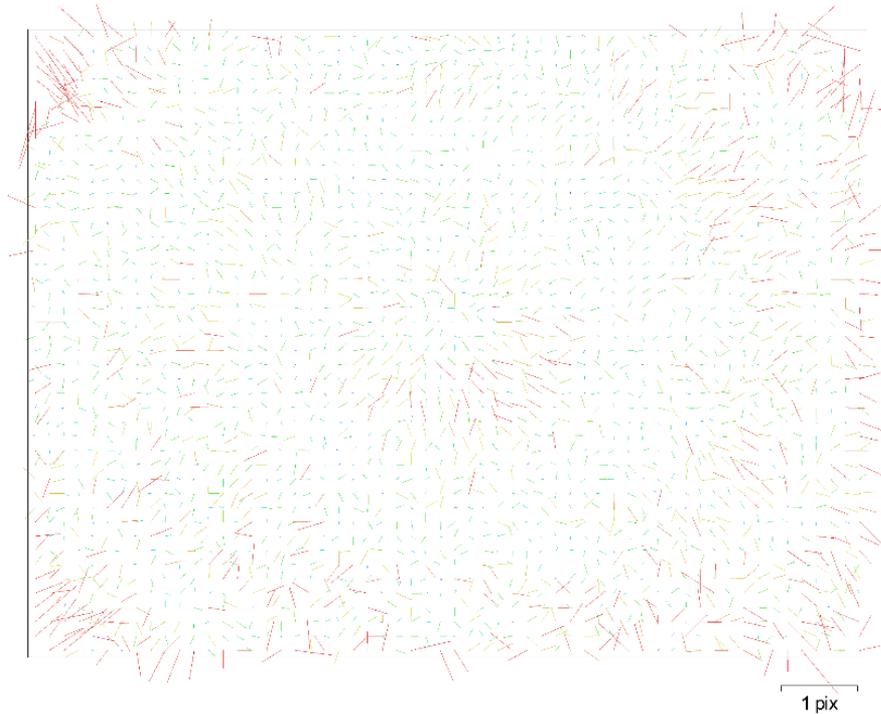


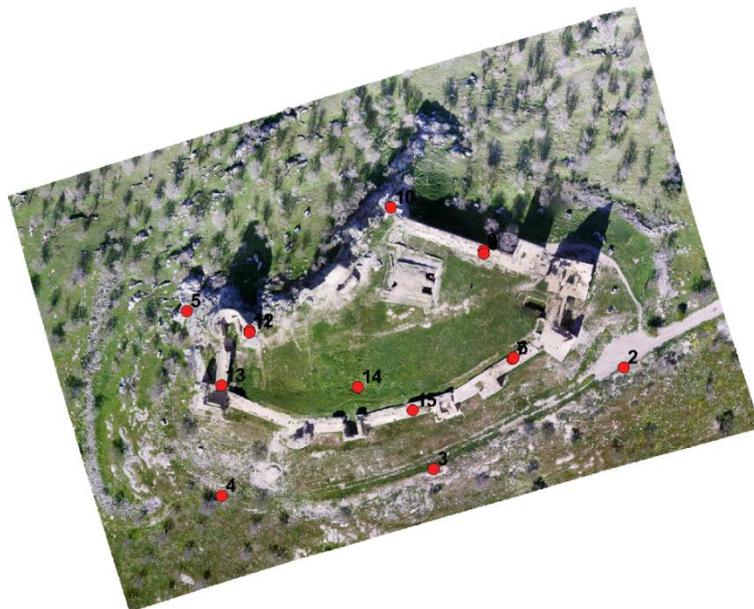
Fig. 3. Gráfico de residuos para FC300X (3.61 mm).

FC300X (3.61 mm)

400 imágenes

Resolución 3992 x 2992	Distancia focal 3.61 mm	Tamaño de píxel 1.57 x 1.57 micras	Precalibrada No
Tipo:	Cuadro	F:	2319.44
Cx:	4.0443	B1:	-0.857814
Cy:	-12.3017	B2:	-0.834454
K1:	-0.130543	P1:	0.00018747
K2:	0.106909	P2:	-2.68858e-05
K3:	-0.0140642	P3:	0
K4:	0	P4:	0

Puntos de control terrestres



● Puntos de apoyo

● Puntos de control de calidad

20 m

Fig. 4. Posiciones de puntos de apoyo.

Número	Error X (cm)	Error Y (cm)	Error Z (cm)	Error XY (cm)	Total (cm)	Imagen (pix)
7	1.38474	0.66939	0.525416	1.53805	1.62531	0.115

Tabla 2. ECM de puntos de apoyo.

Nombre	Error X (cm)	Error Y (cm)	Error Z (cm)	Total (cm)	Imagen (pix)
2	-1.85383	0.417183	0.965675	2.13149	0.141 (30)
12	0.804761	-0.563318	0.35869	1.04577	0.159 (64)
13	-1.15477	-1.19918	0.238483	1.68179	0.115 (76)
5	-0.835364	0.985945	-0.31867	1.33097	0.118 (74)
9	2.34949	0.308627	-0.632383	2.45261	0.076 (43)
14	1.2214	-0.235004	-0.558787	1.36356	0.076 (52)
7	-0.543075	0.290861	-0.0259364	0.616607	0.079 (49)
10					(0)
11					(0)
15					(0)
3					(0)
4					(0)
6					(0)
8					(0)
Total	1.38474	0.66939	0.525416	1.62531	0.115

Tabla 3. Puntos de apoyo.

Parámetros de procesamiento

Generales

Cámaras	602
Cámaras orientadas	602
Marcadores	14
Sistema de coordenadas	Local Coordinates (m)

Nube de puntos

Puntos	33,966 de 53,647
RMS error de reproyección	0.211938 (1.28788 pix)
Error de reproyección máximo	1.44597 (38.2128 pix)
Tamaño promedio de puntos característicos	5.55895 pix
Superposición efectiva	15.9054

Parámetros de orientación

Precisión	Media
Pre-procesar emparejamiento de imágenes	Genérico
Puntos claves por foto	40,000
Puntos de enlace por foto	1,000
Restricción de máscara activa	No
Adaptativo ajuste del modelo de cámara	Si
Tiempo búsqueda de puntos homólogos	1 hora 3 minutos
Tiempo de orientación	3 minutos 51 segundos

Parámetros de optimización

Parámetros	f, b1, b2, cx, cy, k1-k3, p1, p2
Tiempo de optimización	7 segundos

Nube de puntos densa

Puntos	11,852,587
--------	------------

Parámetros de reconstrucción

Calidad	Media
Filtrado de profundidad	Agresivo
Tiempo de generación de mapas de profundidad	8 horas 46 minutos
Tiempo de generación de nube de puntos densa	5 horas 14 minutos

Modelo

Caras	790,122
Vértices	396,936
Textura	4,096 x 4,096 x 8, uint8

Parámetros de reconstrucción

Tipo de superficie	Arbitrario
Datos fuente	Densa
Interpolación	Habilitada
Calidad	Media
Filtrado de profundidad	Agresivo
Número de caras	790,123
Duración del procesamiento	6 minutos 52 segundos

Parámetros de texturizado

Modo de mapeado	Genérico
Modo de mezcla	Mosaico
Tamaño de textura	4,096 x 4,096
Realizar corrección de color	Si
Realizar el relleno de agujeros	Si
Tiempo de mapeado en UV	1 minuto 7 segundos
Tiempo de mezcla	49 minutos 17 segundos

Modelo de teselas

Parámetros de reconstrucción

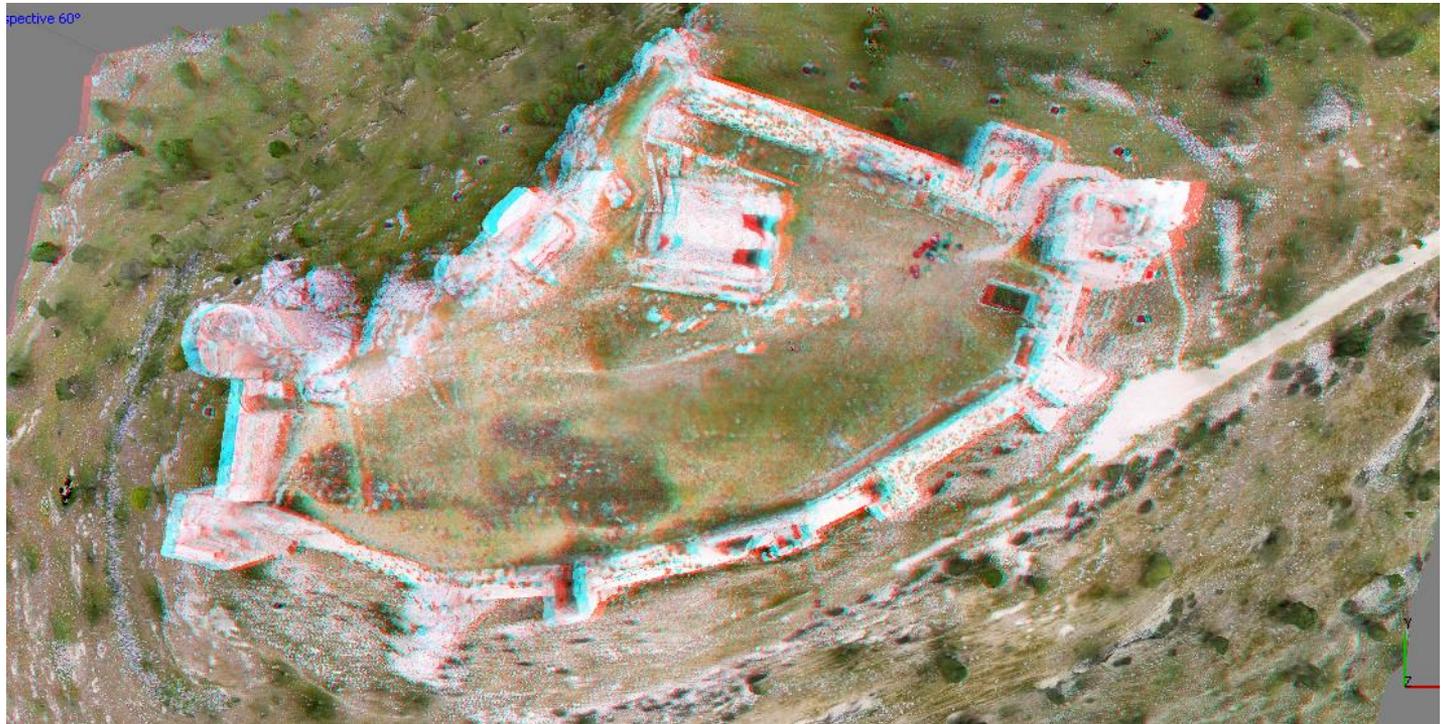
Datos fuente	Malla
Tamaño de tesela	256
Duración del procesamiento	29 minutos 28 segundos

5.6.2.6 VISIÓN TRIDIMENSIONAL ESTEREOSCÓPICAS DEL CASTILLO DE PÍÑAR MEDIANTE ANAGLIFOS

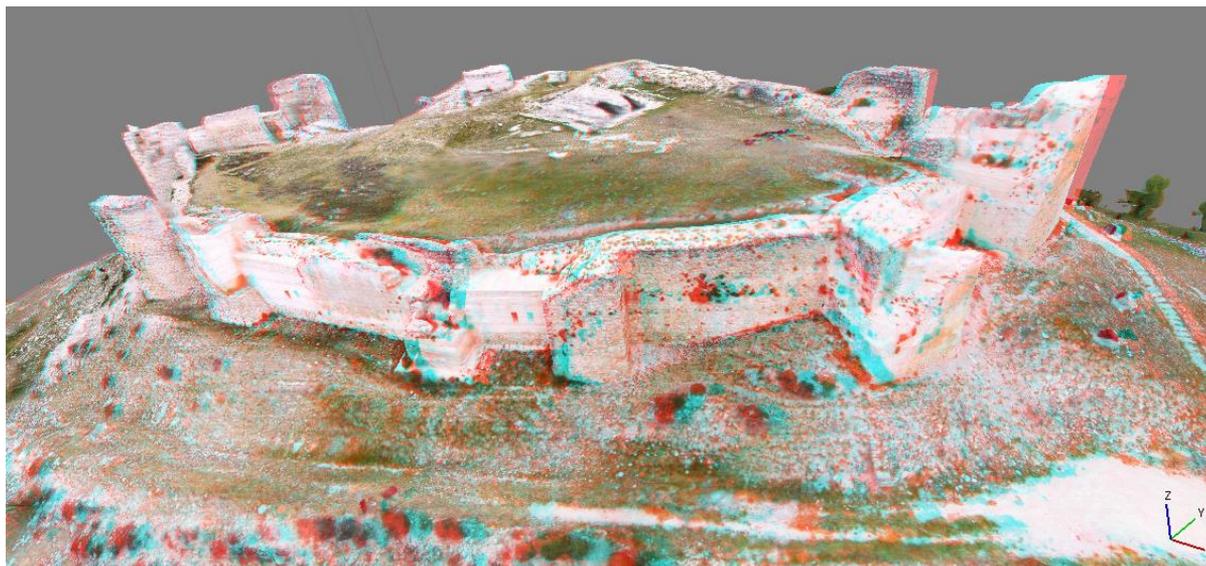
Los anaglifos son imágenes capaces de provocar una visión tridimensional cuando son observadas mediante filtros especiales (normalmente rojo y azul). Las imágenes

de anaglifo se componen de dos imágenes superpuestas a las que se les aplican filtros de color distintos. Debe estar ligeramente desplazada una con respecto a la otra para producir el efecto de profundidad de la visión binocular.

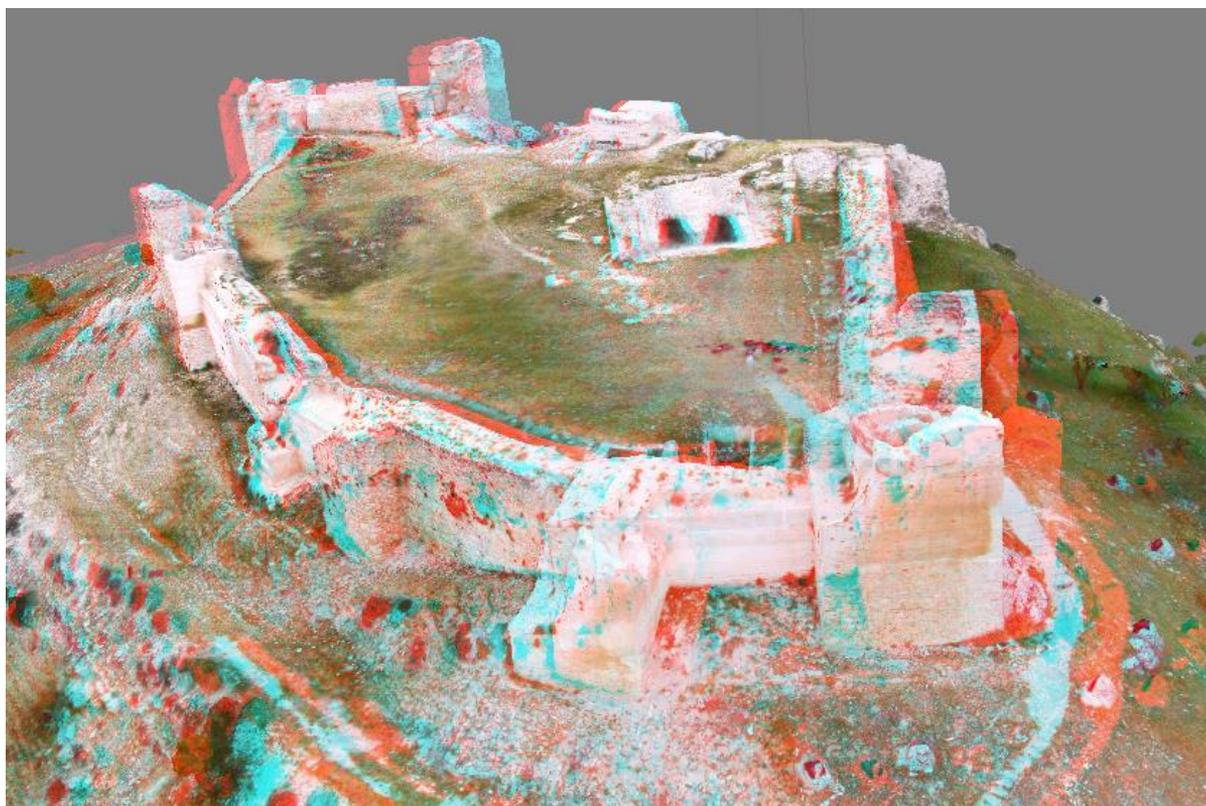
No cabe duda que esta visión tridimensional de la arquitectura ayuda a la comprensión sus formas, permitiéndonos una mejor interpretación de sus elementos.



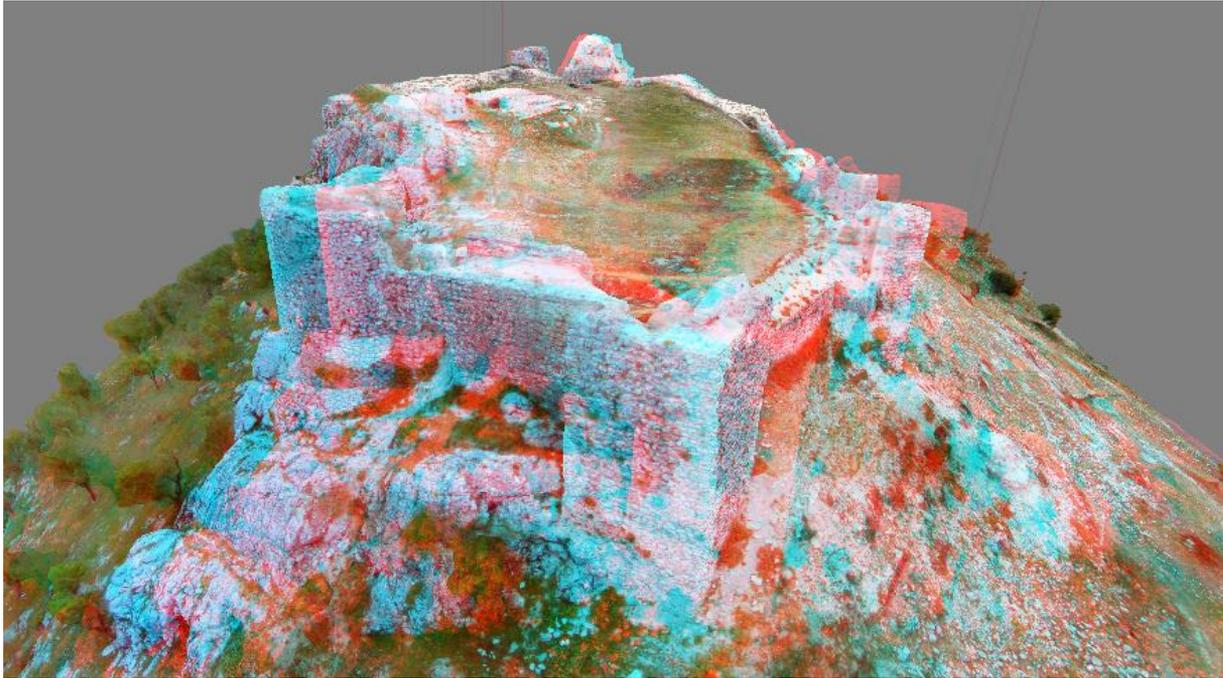
Visión tridimensional del castillo mediante estereoscopia por anaglifos. (J.A.Benavides).



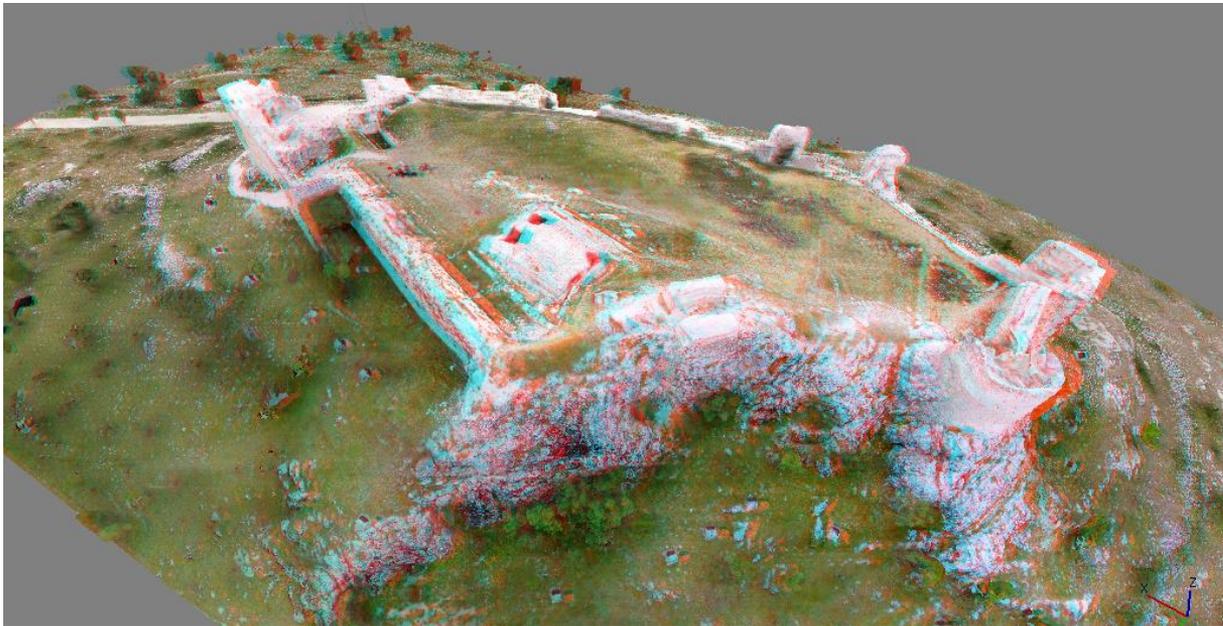
Visión tridimensional desde el sur del castillo mediante estereoscopia por anaglifos. (J.A.Benavides).



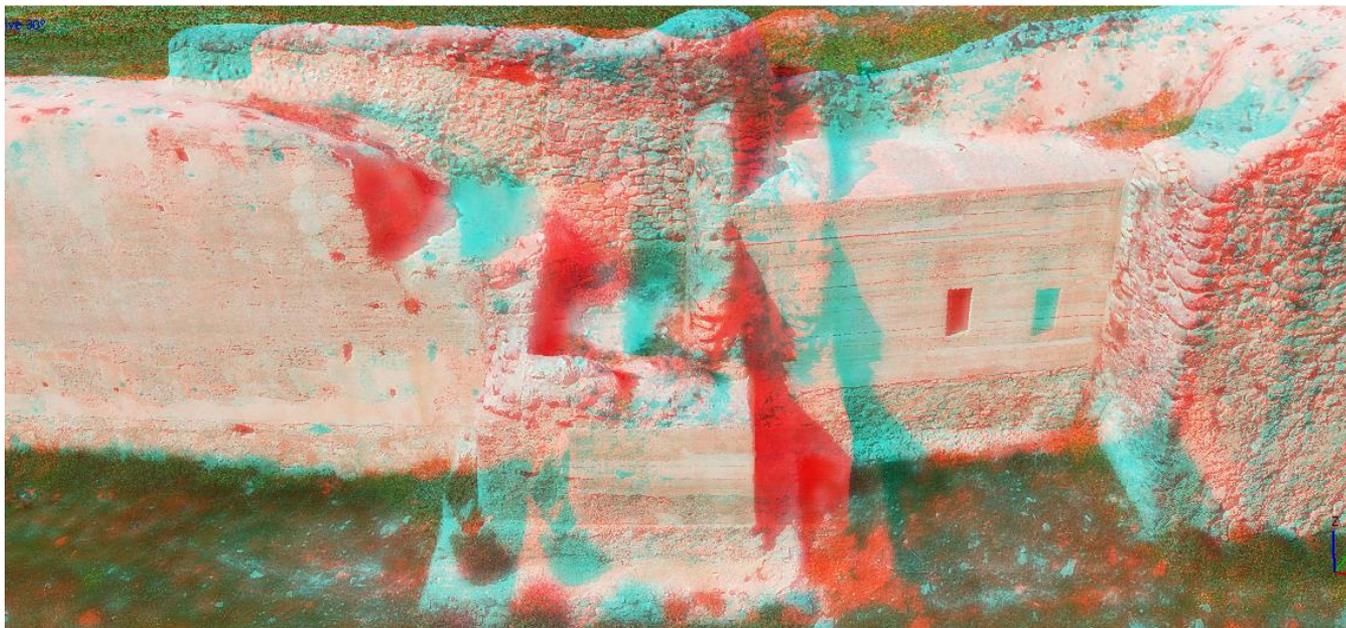
Visión tridimensional desde el este del castillo mediante estereoscopia por anaglifos. (J.A.Benavides)



Visión tridimensional desde el oeste del castillo mediante estereoscopia por anaglifos. (J.A.Benavides).



Visión tridimensional del castillo mediante estereoscopia por anaglifos. (J.A.Benavides).



Vista tridimensional mediante anaglifos de la torre 9, donde se distinguen las diferentes fases constructivas.(J.A.Benavides)

5.7 CARACTERIZACIÓN TÉCNICA CONSTRUCTIVAS

En el castillo de Píñar aparece una variada tipología constructiva consecuencia de sus múltiples intervenciones. Básicamente encontramos dos técnicas constructivas: el tapial y la mampostería, en sus diferentes modalidades, pero también encontramos otros materiales y técnicas aplicados con una finalidad específica. Así, encontramos como el aparejo de ladrillo en pequeñas reparaciones o la utilización de sillares o sillarejos en el refuerzo de las esquinas.

5.7.1 TAPIAL

El tapial está formado por una mezcla de tierra, cal, grava y mampuestos en diferentes proporciones y formas de ejecución, dando lugar a sus diferentes tipologías

El análisis preliminar de la obra de tapial debe identificar las características de los componentes de este material: Cal, tierra, mampuestos, madera, pero también es necesario saber cómo están ejecutados (encofrado continuo, cajones, etc.) y la manera en la que se relacionan entre sí geoméricamente.

En general, las estructuras de tapial están hechas con materiales extraídos del propio lugar. Presentan baja resistencia a la tracción y pueden mostrar fácilmente fisuración o separación entre elementos. Las retracciones propias de los materiales hacen que aparezcan estos signos, por lo que no siempre indican alguna patología grave.

5.7.1.1 TAPIAL DE TIERRA

Se trata de un tapial fácilmente reconocible por su alto contenido en tierra, que le confiere un color rojizo. Su

cara exterior presenta un color grisáceo debido al grueso enfoscado de cal que la protege. En algunas zonas se aprecia además una fina capa de enlucido de cal. Las caras interiores aparecen, por lo general, desnudas lo que provoca su rápido deterioro, si bien, en algunos lienzos interiores también se aprecia una capa de enlucido de cal. La coronación de cada cajón se rellena de una gruesa tongada de mortero de cal, lo que le confiere gran resistencia.



Cara interior del tapial de tierra en la torre 7: Se aprecia claramente la tongada de mortero de cal en la coronación de cada cajón, así como los mampuestos que cubren los mechinales. (derecha) Interior de la torre 5: muestra del color rojizo del tapial

El hueco del mechinal está cubierto por un mampuesto de gran tamaño lo que permite la extracción de las agujas una vez desencofrado. Por otro lado, en el tapial de tierra no se ha apreciado ningún tipo de apoyo de sobre muros de mampostería, método habitual en fases

posteriores de tapial. Los enlucidos están constituidos por un mortero de cal y arena al que en ocasiones se le añade arcillas o yeso. Su función era proteger e impermeabilizar los paramentos a la vez que los embellecía y reforzaba.



Imagen del enfoscado y enlucido de cal en la cara exterior del tapial de tierra en la torre 8

5.7.1.2 TAPIAL REAL. TORRE 4

El tapial real está formado por una alternancia de capas de cal y tierra de grosor más o menos igual, con una tongada de mortero de cal en la cara inferior y superior de los cajones, de mayor espesor. Las características constructivas de la torre 4 son muy interesantes. Es la única estructura del recinto realizado con esta técnica. Está formada por dos piezas que se adosan a ambos lados de la anterior muralla (ahora perdida). Por sus pequeñas dimensiones (4,62 x 2 m.), se ejecutó mediante encofrado continuo con una altura de cajones de 67 cm. El hecho de encofrarla a tres caras queda de manifiesto por la ausencia de mechinales en sus caras interiores. El último cajón, prácticamente ha desaparecido, por lo que se puede deducir que la altura total en su lado oriental, el más bajo, sería de 2 m.



Imagen de la Torre 4 desde el interior del recinto, donde se aprecian las diferentes tongadas de tierra y cal, propia de la tipología "tapial real". Se trata de una torre maciza que apoyada sobre una base de mampostería de gran tamaño para salvar los desniveles del terreno y aislarla de la humedad del terreno.

5.7.1.3 TAPIAL CALICASTRADO

Se trata de gruesos muros de tapial calicastro en la que la parte exterior presenta una gruesa costra más rica en cal. El núcleo interior está formado por tierra y piedras de pequeño tamaño, con algunos fragmentos de barro que se amalgaman con una proporción muy escasa de cal. Las tongadas tienen un espesor de 8 cm. Por tratarse de un material muy higroscópico, y con objeto de protegerlo de la humedad procedente del suelo, era frecuente construir una base de mampostería sobre la que apoyar. Las esquinas en las zonas bajas se reforzaban con sillares trabados de gran tamaño. Los mechinales y las juntas de los cajones son rellenos y enlucidos para presentar un mejor aspecto.



Imagen de tapial tipo 2 "calicastro", apoyado sobre mampostería irregular para nivelar los cajones y aislar el tapial de la humedad del terreno. Sillares conformando las esquinas en zonas bajas.(J.A.Benavides)

La mampostería de la base de los tapias se adapta a las formas del terreno provocando, en los casos del enlucido de los paramentos que se confunda con la propia tapia.



Disposición irregular de la base de mampostería adaptándose a la topografía del terreno. Su mayor resistencia hace que en muchos casos perviva a la propia tapia.(J.A.Benavides)

5.7.1.4 TAPIAL HORMIGONADO. ALJIBES

Se trata de un tapial en el que la tierra es sustituida por árido de grano fino y medio, con gran cantidad de cal, que lo hace muy compacto e impermeable, de ahí que, por lo general se utilice para la construcción de obras hidráulicas. Habitualmente se le aplica una capa de enlucido de cal.

Este tipo de material se localiza en la construcción de los muros y suelo de los aljibes, generalmente excavados en la roca. Su encofrado debe ser continuo y a una cara, para evitar juntas y huecos de mechinales.

5.7.2 MAMPOSTERIA

La mampostería es aquel aparejo que está conformado a base de piedras de mediano, o incluso gran tamaño, colocadas a mano y unidas por argamasa de cal. Generalmente se colocan sin labrar o con una labra muy tosca. La facilidad de su ejecución, economía y resistencia hace que hayan ido sustituyendo, en la mayoría de los casos al tapial.

Además de su uso como cerramiento o elemento estructural, es frecuente su empleo como base de muros de tapial, nivelando el terreno y aislándolo de las humedades de este. En muchos casos esta técnica queda camuflada por una gruesa capa de mortero de cal que lo hace confundirse con el propio tapial al que le da base. Por lo general, las piedras utilizadas para la elaboración de aparejos de mampostería, suelen proceder del lugar en el que se lleve a cabo la construcción. En el castillo de Píñar encontramos los siguientes tipos de mampostería:

5.7.2.1 MAMPOSTERIA IRREGULAR

Se trata de una mampostería irregular tomada con mortero rico en cal, cuya finalidad es reparar los muros de tapial de tierra, cubriendo los huecos dejados por los desprendimientos de la primera muralla, ya que guardan la misma línea interna. Solo, junto a la torre 8, se realizó una intervención de mayor entidad, presentando un mayor grosor y altura, lo que delata que fue utilizada como estructura de vivienda. Sus mampuestos son de pequeño o mediano tamaño.



Mampostería irregular adosada a la cara interna del muro de tapial T1. Su mayor resistencia hace que sobrevivan al propio tapial de tierra (izquierda). En la imagen derecha, junto a la torre 8, se observan esta tipología de muro con mayor altura y espesor, que junto con unos mechinales, delata que en algunos casos formaban parte de la estructura de viviendas. (J.A.Benavides)

5.7.2.2 MAMPOSTERÍA ENRIPIADA

Esta denominación se debe a la presencia de piedras de pequeño tamaño (ripios), que sirven de calzo y relleno entre los mampuestos.

Esta tipología ha sido identificada por varios autores, como fruto de un programa de construcción y refuerzo de época nazarí. Malpica Cuello [308] o Torres Balbás [309] indican la existencia de un refuerzo general de cercas y castillos, a base de mampostería, señalando, en parte como copia del sistema constructivo castellano y como elemento defensivo ante el ataque con armas de fuego.

En el castillo de Píñar, esta tipología alterna torres de sección rectangular y semicircular, llegando incluso a tener un espesor de 2,30 m (torre 5), lo que contrasta con el poco espesor de los muros de tapial de tierra.

En las esquinas de las torres rectangulares reforzadas con esta tipología, se colocan sillares de mayor tamaño, reforzando de este modo esta zona más débil.

La ejecución se realiza mediante hiladas horizontales de diferente tamaño de mampuestos. Por lo general, estas estructuras son afianzadas y revestidas con mortero de cal. La pérdida de este material por la erosión, hace que el mampuesto aparezca, generando una especie de llagueado en forma de vitola (Malpica Cuello, 1998)

En los lienzos del sector occidental, (4 y 5) se ha registrado una variante formal con respecto a la mampostería enripiada del resto del castillo. Se diferencia de la del resto, en que las verdugadas que enmarcan los mampuestos están formadas por lajas y tejas, con una

distribución horizontal de los mampuestos más regular. Estos muros alcanzan una potencia de entre 1,3 y 1,4 m



Diferenciación tipológica entre la mampostería enripiada de la torre 5 (izquierda) y el lienzo 4 de tamaño más regular de los mampuestos y verdugadas de laja o teja. (J.A.Benavides).

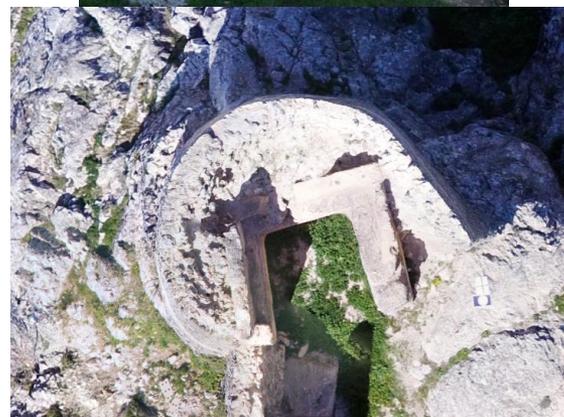


308 MALPICA CUELLO, A. (1998). *Los castillos en época nazarí: una primera aproximación*. Granada: Athos-Pérgamos.

309 TORRES BALBÁS, L. (1949). *Arte almohade; Arte nazarí; Arte mudéjar* (No. 4). Plus Ultra.



Torre 7: imagen de la construcción por hiladas de diferente tamaño. Imagen del resto de enfoscado exterior.



Alternancia de torres rectangulares y semicirculares en el refuerzo de la primera muralla de tapial. En las rectangulares se refuerzan con sillares las esquinas.

5.7.2.3 MAMPOSTERÍA CONCERTADA

Como base de la torre de tapial 4, aparece una mampostería irregular concertada de piedras de gran tamaño, que se distribuyen por hiladas horizontales. Este tipo de fábrica, los mampuestos tienen sus caras sensiblemente planas para el ajuste concertado de unos mampuestos con otros. No se admite el empleo de ripios y los mampuestos del paramento exterior deben prepararse de modo que las caras visibles tengan forma poligonal



Mampostería concertada bajo la torre 4. Sirve para salvar la topografía del terreno.

5.7.2.4 MAMPOSTERÍA CRISTIANA

Está constituido por mampuestos de gran tamaño que se distribuyen en hiladas horizontales, siendo su factura bastante irregular. No se trata de una mampostería enripiada, pues la presencia de ripios no es regular. Las esquinas están conformadas por pequeños sillares y ladrillos.



Refuerzo exterior de mampostería de época cristiana.

5.7.3 SILLARES y SILLAREJOS:

Los sillares están formados por elementos de piedra de gran tamaño y peso, que han sido trabajados en todas sus caras, formando paralelepípedos. Estos sillares se utilizan para conformar las esquinas de los muros dándole más durabilidad y resistencia. Los encontrados en el castillo de Píñar tienen una dimensión a soga de aproximada de 70 x 40 cm, estando trabados con el núcleo de los muros de mampostería enripiada. En estos casos se comienza la construcción en el exterior, siendo el núcleo rellanado con mampuestos de variado tamaño y ripios en sus huecos.



Sillares de gran tamaño formando las esquinas de la mampostería enripiada. Situados en la torre 1 junto a la zona de entrada.

SILLAREJO DE PIEDRA

Entendiendo como tales los sillares de pequeño tamaño. Esta práctica constructiva se reconoce en la construcción de las bóvedas del aljibe 2.



Bóveda de aljibe 2 realizada con sillares de piedra.

5.7.4 LADRILLO

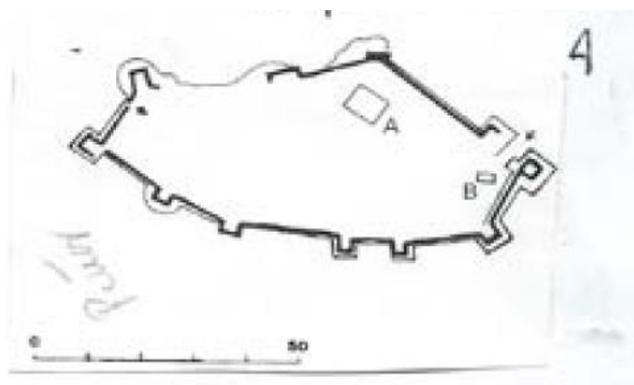
En el castillo de Píñar se ha reconocido un solo tipo de ladrillo, utilizado fundamentalmente en obras de pequeña reparación de muros y en la construcción de las pilastras centrales del aljibe 2. Se trata de ladrillos macizos de dimensiones de 30 x 14 x 5,5 cm.



La utilización del ladrillo se limita a pequeñas obras de reparación y en las pilastras interiores del aljibe 2.

5.8 ARQUEOLOGÍA DEL CASTILLO DE PÍÑAR

El análisis arqueológico realizado por Flor de Luque Martínez [310] sobre el Castillo de Píñar, mediante el estudio de las técnicas constructivas y sus relaciones espaciales, ha permitido ordenar una secuencia evolutiva del mismo, intentando establecer su cronología histórica. Este estudio ha servido de base para el desarrollo de una documentación gráfica exhaustiva del castillo generando ortofotografías y modelos tridimensionales que permitan un mejor conocimiento, interpretación y difusión de este Bien.



Interpretación del castillo realizada por Pavón Maldonado [311] mediante dibujo a mano alzada. Si bien no posee ningún rigor métrico, esquematiza de forma clara su geometría y las fases más importantes.

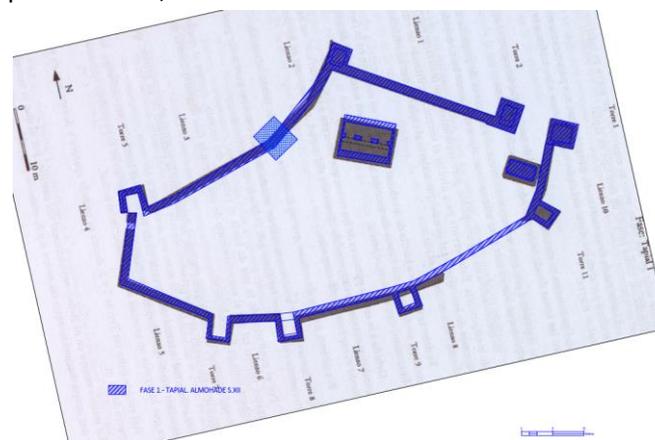
En el Castillo de Píñar se han registrado la existencia de cuatro grandes programas constructivos que afectan, bien a la totalidad del conjunto, bien a sectores determinados. Aparte de éstas grandes empresas se han

310 LUQUE MARTÍNEZ, Flor de. (2003) *El castillo de Píñar: análisis arqueológico de las estructuras de superficie*. Granada

efectuado una serie de actuaciones concretas de reparación o adecuación.

La primera de las fases se corresponde con una serie de torres y murallas de tapial de tierra, que define un perímetro muy similar al actual y aunque se trata del mismo tapial, se han registrado algunas variaciones entre el mortero de las torres y el de las murallas, siendo el de estas últimas bastante más rico en cal y con mayor cantidad de cantos, lo que las hace más resistentes [310]

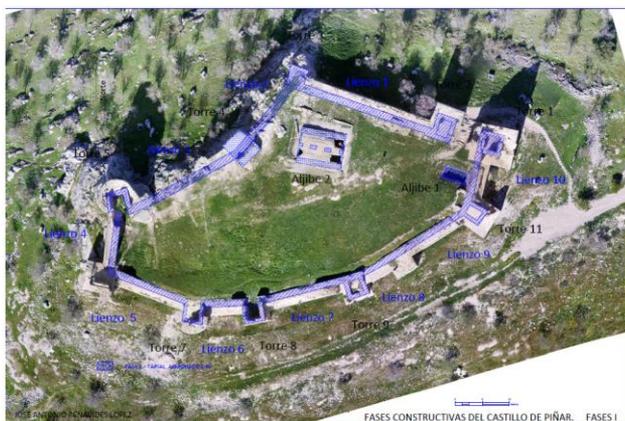
La ausencia de referencias escritas al Castillo de Píñar, en fechas anteriores a época nazarí, ha planteado problemas a la hora de atribuir cronologías, de igual manera, el estudio del tapial no ha permitido adscribirlo a ninguna época concreta. Tan solo, se han localizado dos fragmentos de cerámica que de manera probable pertenecen al siglo XII, o sea de época almohade, lo que ha permitido establecer una cronología *post quem*. El estudio de los materiales y las técnicas constructivas y sus dimensiones permiten evaluar o comprender el por qué de su uso, atendiendo tanto a cuestiones arquitectónicas, funcionales o a su valor cultural.



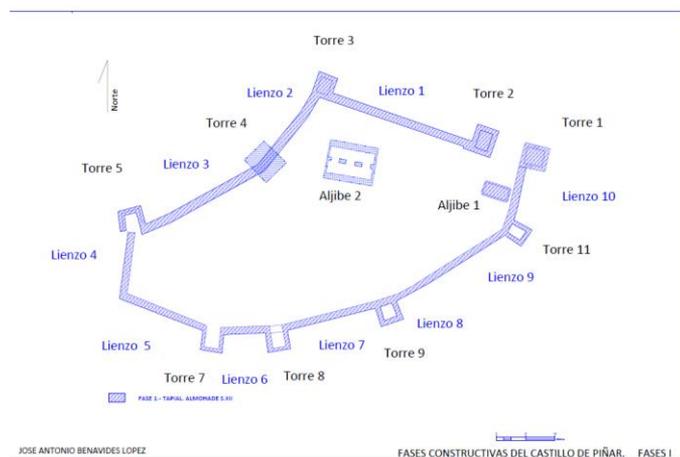
311 PAVON MALDONADO, B. (1999). *Tratado de arquitectura hispanomusulmana*, Tomo II: Ciudades y fortalezas.

La superposición de las estructuras dibujadas sobre el plano de planta aportado por Flor de Luque muestra algunos errores gráficos de escasa consideración.

Independientemente de la calidad gráfica y el rigor métrico de los dibujos aportados por Flor de Luque, la sola representación en planta de las diferentes fases constructivas impide comprender la complejidad estructural del castillo y su adaptación al terreno. La incorporación de ortofotografías de planta, alzados y del modelo tridimensional ayuda de manera significativa a su trazado y comprensión.



Dibujo de la fase 1 “tapial de tierra” a partir de examen atento de la ortofotografía en planta.(J.A.Benavides)



Plano de planta correspondiente a la primera fase de construcción. El dibujo se basa en la interpretación arqueológica realizada por Flor de Luque Martínez [310]. Su datación es posterior al S.XII. (Almohade). Plano realizado por José Antonio Benavides tomando como base al modelo 3D realizado con fotogrametría multi-magen. .(J.A.Benavides)



Perspectiva desde el sur de las estructuras de tapial correspondiente a la Fase I: Tapial de tierra. La visión tridimensional facilita su comprensión y análisis.

Fase I-bis: Reparación estructuras fase I

La falta de impermeabilización de la cara interna de tapial de tierra los hace más vulnerables. El deterioro causado en la cara interior de estas estructuras daría lugar a una fase de reparación de estos muros utilizando mampostería irregular apoyada directamente sobre el tapial. De acuerdo a las consideraciones de la arqueóloga Flor de Luque [310] *esta reforma interior pudo deberse a la construcción de un adarve, si bien, no se ha encontrado ningún resto que lo justifique*. La irregularidad de su trazado adaptándose a la fase anterior pone

de manifiesto que se trata de una obra de reparación. Tras un análisis minucioso de los paramentos y su ubicación, este doctorando estima que se trata de reparaciones de los muros de tapial debido a su deterioro por humedades del terreno. Esta tesis se fundamenta en que las estructuras encontradas presentan forma irregular, en la mayoría de los casos se trata de emparchados con mampostería que recubrirían los huecos que dejaría el tapial, fundamentalmente se sitúan junto al

terreno en las zonas más bajas de la explanada del castillo, donde existe mayor acumulación de aguas de lluvia. Por otro lado, la cara interior de estas estructuras está sin terminar lo que demuestra que se apoyaban directamente sobre el tapial, rellenando el hueco que se hubiera producido. Junto a estas zonas, encontramos reconstrucción del muro en todo su espesor lo que evidencia su derrumbe total. El hecho de que estos muros de tapial de tierra no construyeran sobre muros de mampostería, para evitar las humedades del terreno, provocaría mayor deterioro.



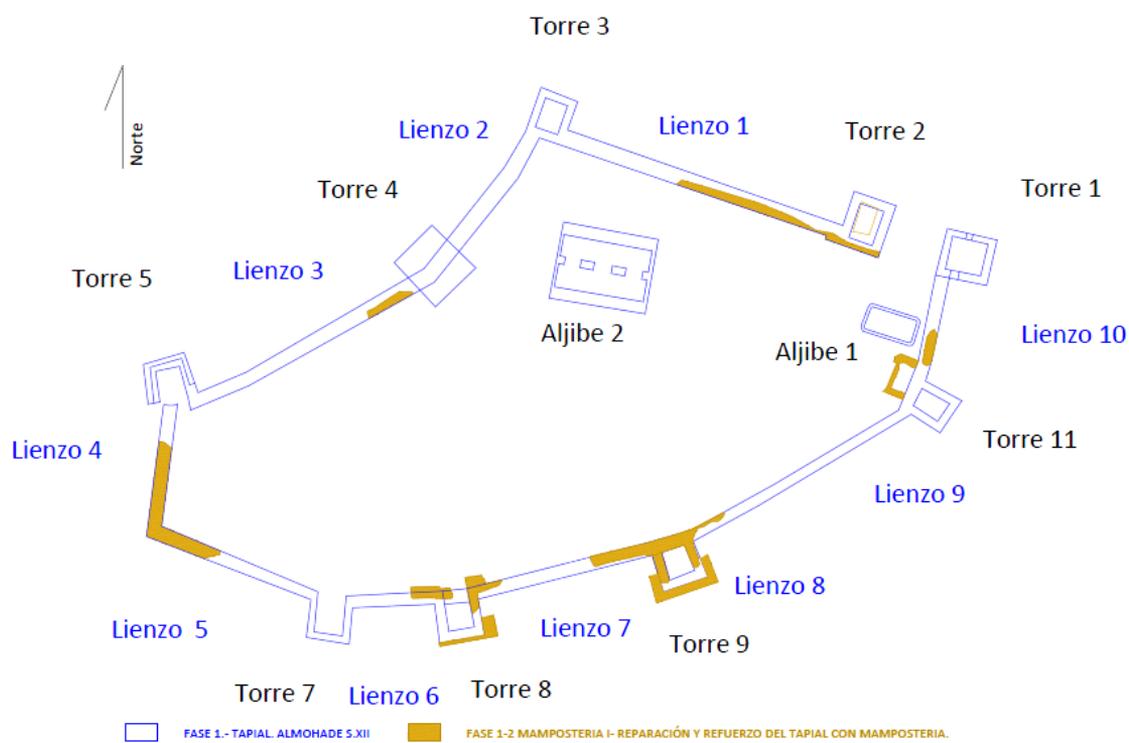
Estructura de la torre 9 donde se aprecian la secuencia de fases constructiva y la reparación con mampostería en determinadas zonas.

En la zona exterior de la torre 8 se constata un reforzamiento de su base mediante la construcción de un pieamigo de mampostería. La construcción en forma de talud no ha podido datarse cronológicamente, si bien Flor de Luque atribuye a fase cristiana. De acuerdo a esta hipótesis llama la atención que esta sea la única torre sobre la que no se hubiera intervenido en ninguna ocasión. Tras un minucioso análisis se observa que este refuerzo presenta diferentes fases. El emparchado de piedra de la esquina occidental se une sobre el tapial de tierra de forma similar a las reparaciones

de la parte interna del castillo. El resto del pieamigo se ve es claramente posterior.



Pieamigo bajo la torre 8. Detalle de mampostería en la esquina occidental que se adosa al muro de tapial de tierra.



JOSE ANTONIO BENAVIDES LOPEZ

FASES CONSTRUCTIVAS DEL CASTILLO DE PIÑAR. FASES I + REPARACION

Fase 1-bis Reparación de los muros interiores mediante mampostería irregular sobre el tapial. Refuerzo exterior de las torres 8 y 9 mediante la realización de un pieamigo en su parte inferior.

Fase I-tris: Construcción torre 4 con “tapial real”

En el flanco norte hay una torre maciza de tapial real (torre 4), construida a ambos lados de la primera muralla de tapial de tierra, que al haberse perdido, deja una especie de pasillo que discurre por en medio de ella. De acuerdo a los estudios estratigráficos realizados por Flor de Luque (Luque 2003). Es evidentes que esta torre es posterior a la primera muralla, no pudiendo datar ni comprender muy bien esta diferenciación tipológica con respecto al resto de fases. Sin duda

se trata de una torre de muy buena factura que venía a completar un tramo tan complejo como el de las torres 3 y 5. Las pequeñas dimensiones de la torre permitirían una obra de mejor factura que la ejecución del castillo en su totalidad. El hecho de encofrar a una sola cara impide la utilización de mechinales arriestrados en ambas caras lo que le da menos resistencia a la compresión del pisón para la construcción de un tapial calicastro.

Por otro lado, en el interior del recinto de han localizado **dos aljibes**. El más antiguo, coetáneo al inicio de la edificación, se sitúa junto a la entrada del castillo, apoyado sobre el lienzo 10. Sus muros son de tapial hormigonado que lo hacen más impermeable. Es de forma rectangular y de pequeñas dimensiones 4 por 2,15 m. La construcción del segundo aljibe es de época posterior, no pudiéndose datar si es de época almohade o nazarí, pues es en esta época cuando se generalizan este tipología. Tiene mayores dimensiones y

planta rectangular, con pequeñas variaciones de longitudes en sus lados (9,35m en el lado sur y 9.25 en el lateral norte; 6,25 m en el lateral este y 6,50 m en el oeste). Se trata de un aljibe de doble bóveda excavado en roca con muros de tapial de hormigón de unos 90 cm de espesor en el que se ha empleado la técnica del encofrado a una cara. Las esquinas interiores se encuentran achaflanadas para evitar las fugas de agua a través de las juntas.



Imagen de la torre 4 con el hueco interior de la muralla perdida. Esta torre es claramente posterior al tapial de tierra, pues hueco interior dejado por ella evidencia que no formaban parte de la misma fase. De igual manera, su construcción sobre mampostería irregular para nivelar su base y salvar el fuerte desnivel respecto del terreno, delata su posterioridad. Por otro lado, el apoyo de la mampostería enripiada en el sector occidental pone de manifiesto su anterioridad con respecto a esa otra fase.

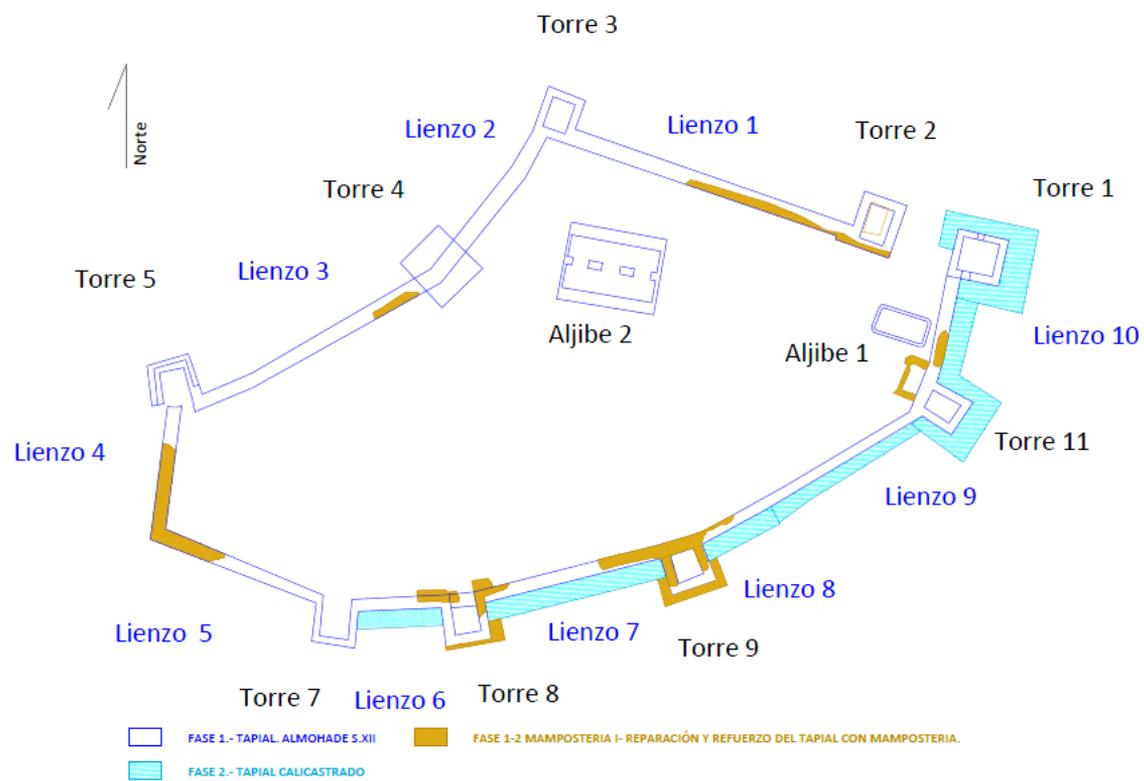


Imagen de aljibe 1 (coetáneo a la fase I) y aljibe 2, de doble bóveda (almohade o nazarí)

La Fase II: Reforzamiento de torres y lienzos meridionales con tapial calicestrado.

Esta fase consiste en la reforzamiento exterior de las torres 1 y 11 así como de todos los lienzos meridionales del castillo mediante la construcción de gruesos muros de tapial calicestrado. De acuerdo a la opinión de Flor de Luque, *esta construcción de debe a un programa de refuerzo de los elementos defensivos en aquellas zonas de más fácil acceso por ser la topografía más suave.* [310]

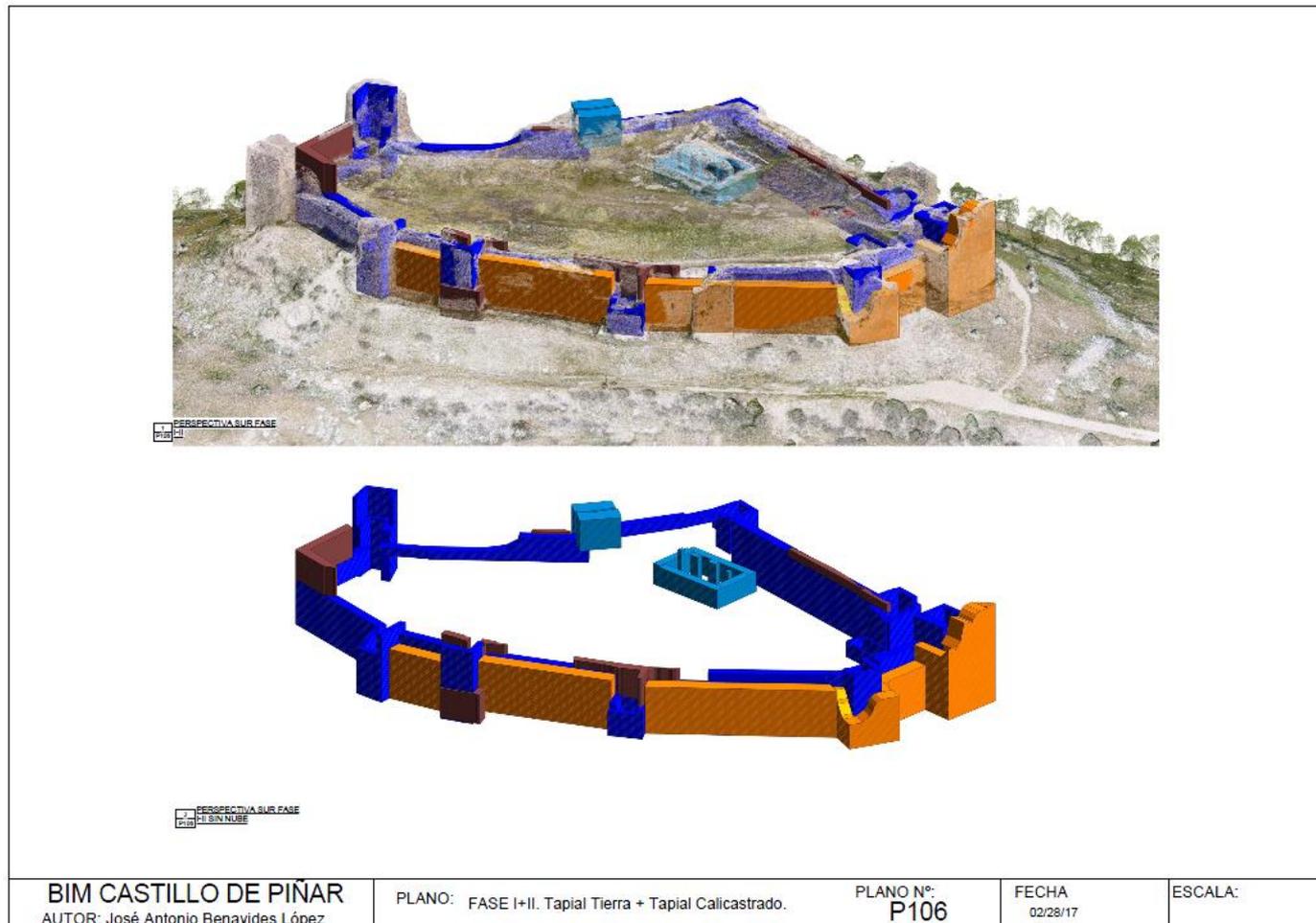
Este tipo de tapial calicestrado aparece en el periodo tardoalmohade, pero es en época nazarí, durante el reinado de Yusuf I (1333-1354), cuando se generaliza su uso.



JOSE ANTONIO BENAVIDES LOPEZ

FASES CONSTRUCTIVAS DEL CASTILLO DE PIÑAR. FASES I + II

Plano de planta con indicación de la Fase II (refuerzo de torres y murallas con muros de tapial calicastro), representado en color cian y la fase I-bis (reparación de muros y torres mediante mampostería irregular), color marrón.



Perspectiva desde el sur del modelo tridimensional de las estructuras de tapial correspondientes a las Fases I, I bis y II: Tapial de tierra, reparación de muros mediante mampostería irregular y Tapial calicastro (color anaranjado).

Fase III: Reforzamiento de torres y lienzos con mampostería enripiada.

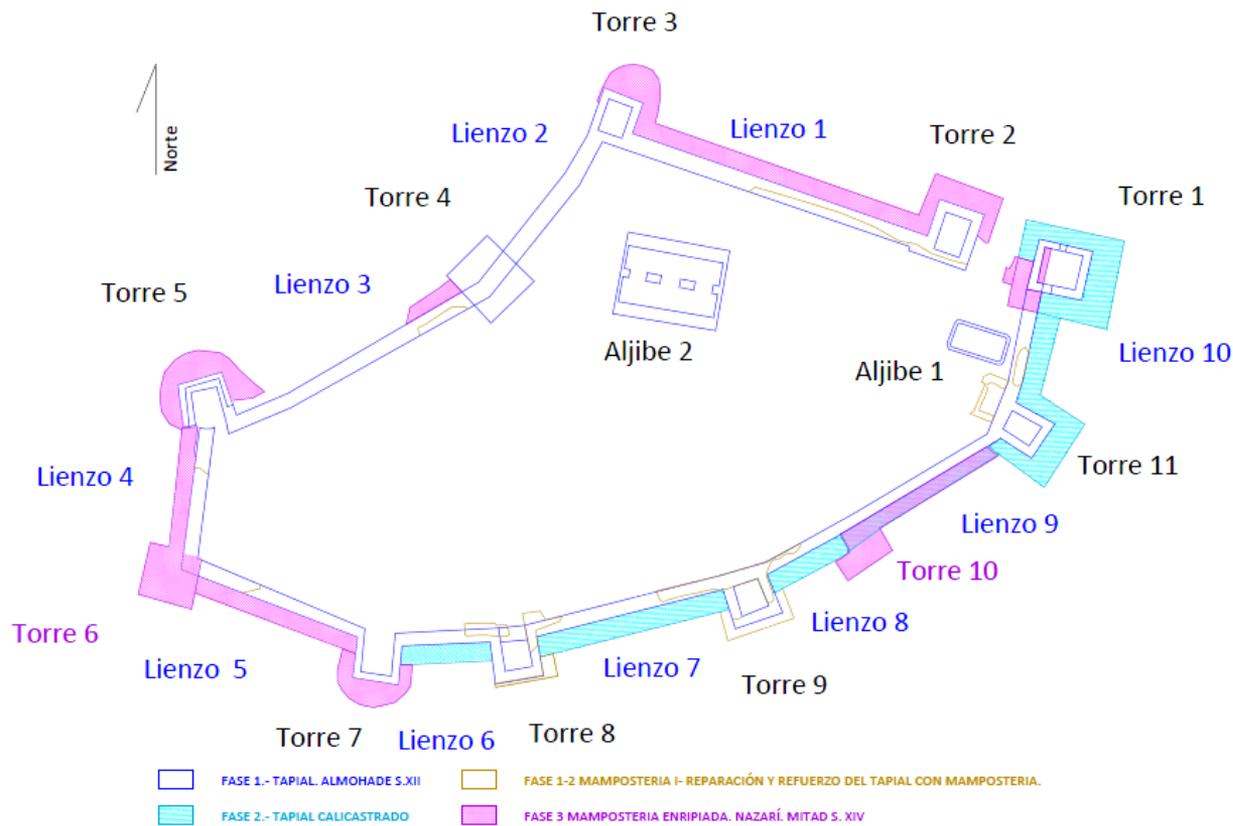
La tercera Fase se corresponde con un programa constructivo específico del periodo nazarí de la segunda mitad del siglo XIV, que se manifiesta en un aparejo concreto de mampostería enripiada y en la alternancia de torres de planta rectangular con sillares de piedra en las esquinas y otras de planta semicircular. Sus para-

mentos exteriores son reforzados mediante un enfocado rico en cal que deja la piedra vista, realizando un llagueado a modo de vitola en tomo a ella.

La identificación con un proceso refortificador llevado a cabo por Mohammed V, del que hablan las fuentes, permite contar con un referente cronológico absoluto (1354-1359 y 1362-1391).

Es curioso que la refortificación con mampostería enripiada aparece que aquellas zonas en las que no aparece el refuerzo con tapia. Solamente la torre 1, coexisten ambas técnicas mediante un pequeño reforzamiento en la puerta de acceso al recinto. Un caso singular lo constituye el lienzo de muralla 9 en el que, si bien no hay evidencias, la construcción de una nueva torre y muralla de mampostería ha debido sustituir a la

muralla anterior. La construcción de una torre 10 que embute parte del lienzo 8 y la construcción del lienzo 9 donde tuvo que existir otra muralla por lógica constructiva, justifican ambas fases. Por otro lado, la esquina suroeste es reforzada mediante la construcción de una nueva torre de mampostería enripiada (torre 6), no habiendo evidencias de alguna anterior.



FASES CONSTRUCTIVAS DEL CASTILLO DE PIÑAR. FASES I + ii + III

Plano de planta con indicación de la fase III (refuerzo de torres y murallas mediante mampostería enripiada), representado en color magenta y la fase anterior Fase II (refuerzo de torres y murallas con muros de tapias calicastro), representado en color cian.

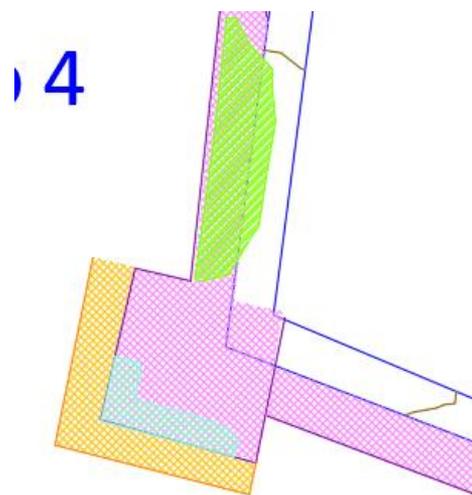
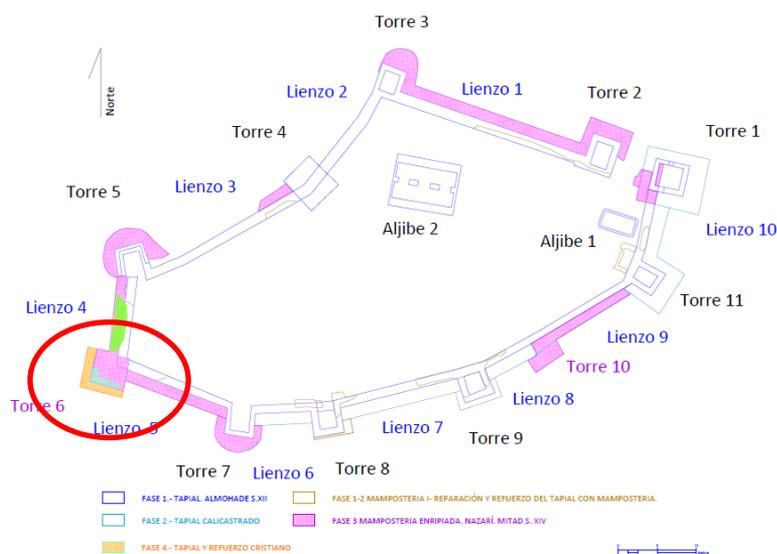


Perspectiva del modelo BIM correspondiente a las fases III (refuerzo de torres y murallas mediante mampostería enripiada), representado en color magenta y la fase anterior Fase II (refuerzo de torres y murallas con muros de tapias calicastro), representado en color anaranjado.

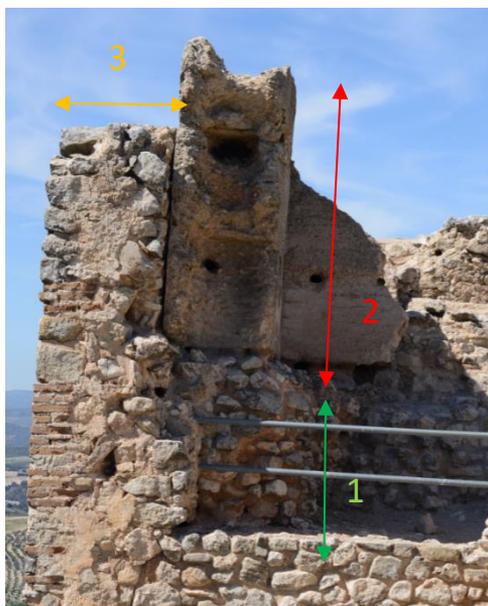
Fase IV: Cristiana

En época cristiana se ha constatado un pequeño refuerzo en la torre 6, mediante la construcción de una estancia con muros del tapial calicestrado sobre la mampostería enripiada de la fase anterior. A esta fase IV hemos incluido igualmente el reforzamiento de la

misma mediante un forro de mampostería en los flancos sur y oeste. De esta época es también la construcción de un adarve sobre el lienzo de muralla 4. Estas construcciones se atribuyen a un momento inmediato a la conquista.



Plano de planta con indicación de las subfases correspondientes a la fase IV (refuerzo en torre 6 tras la invasión cristiana)



Fase cristiana de reconstrucción de la torre 6 en tres sub-fases. 1. Recreido del muro de mampostería; 2. Recreido de la torre con tapial calicastro; 3. Refuerzo mediante revestido exterior con la construcción de un nuevo muro de mampostería.

Fase V: Contemporánea

Por último, a lo largo del siglo XX y el XXI se han realizado diferentes obras de restauración para su conservación. En el año 2009 se realizó una intervención arqueológica llevada a cabo por María Teresa Bonet con motivo de la restauración o consolidación de determinados lienzos y torres. En concreto: torre 2, torre 9, torre 8, lienzo 6, torre 7, lienzo 5, torre 6, lienzo 4 y la bóveda del aljibe 2.

La excavación llevada a cabo en el interior del castillo puso de manifiesto una serie de viviendas, cuya existencia ya era conocida tras una excavación ilegal llevada a cabo en 1994. No se ha podido precisar si estas viviendas corresponden a época cristiana o islámica. En la actualidad, estas estructuras se encuentran enterradas para evitar su deterioro, pero gracias a los datos

capturados por este doctorando en esa fecha se ha conseguido realizar una ortofotografía que documenta perfectamente su estado y situación.

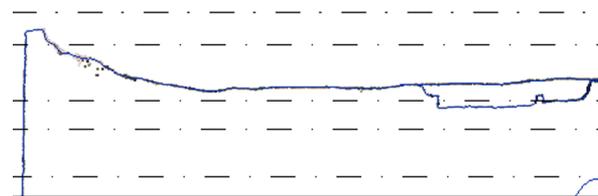


Imagen de la excavación arqueológica llevada a cabo en el año 2009 como apoyo a intervención a la restauración. La restitución gráfica nos ha permitido observar las estructuras del poblado en su verdadera ubicación (en la actualidad se encuentran enterradas). Igualmente se observa la merma de material sufrida por los muros de tapial del lienzo 6 y 7 antes de la restauración.

Por otro lado, en el flanco sur del castillo se ha localizado una barbacana cuya función era dificultar el ac-

ceso por esta zona de topografía más suave. Su trazado aparece y desaparece debido a su colmatación por los depósitos provenientes del castillo. En la actualidad solo se conserva la base de mampostería sobre la que posiblemente se levantara una estructura de tapial.

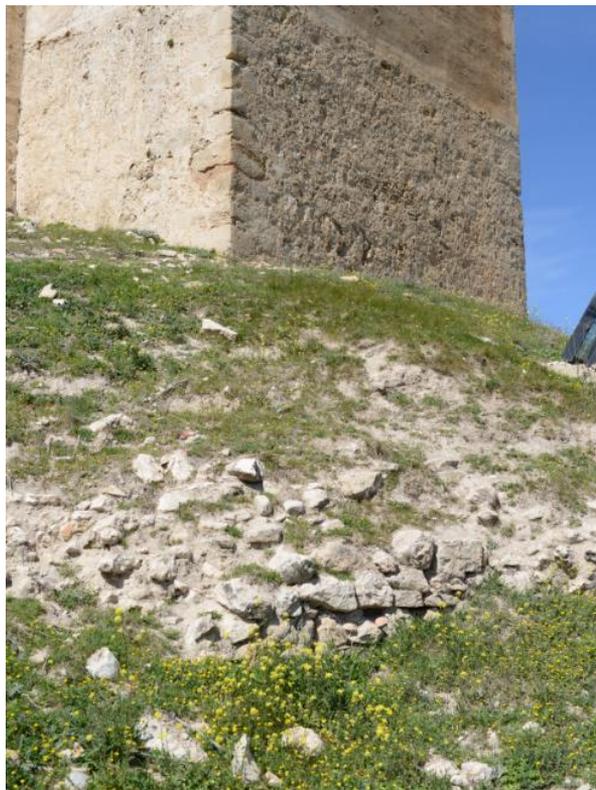
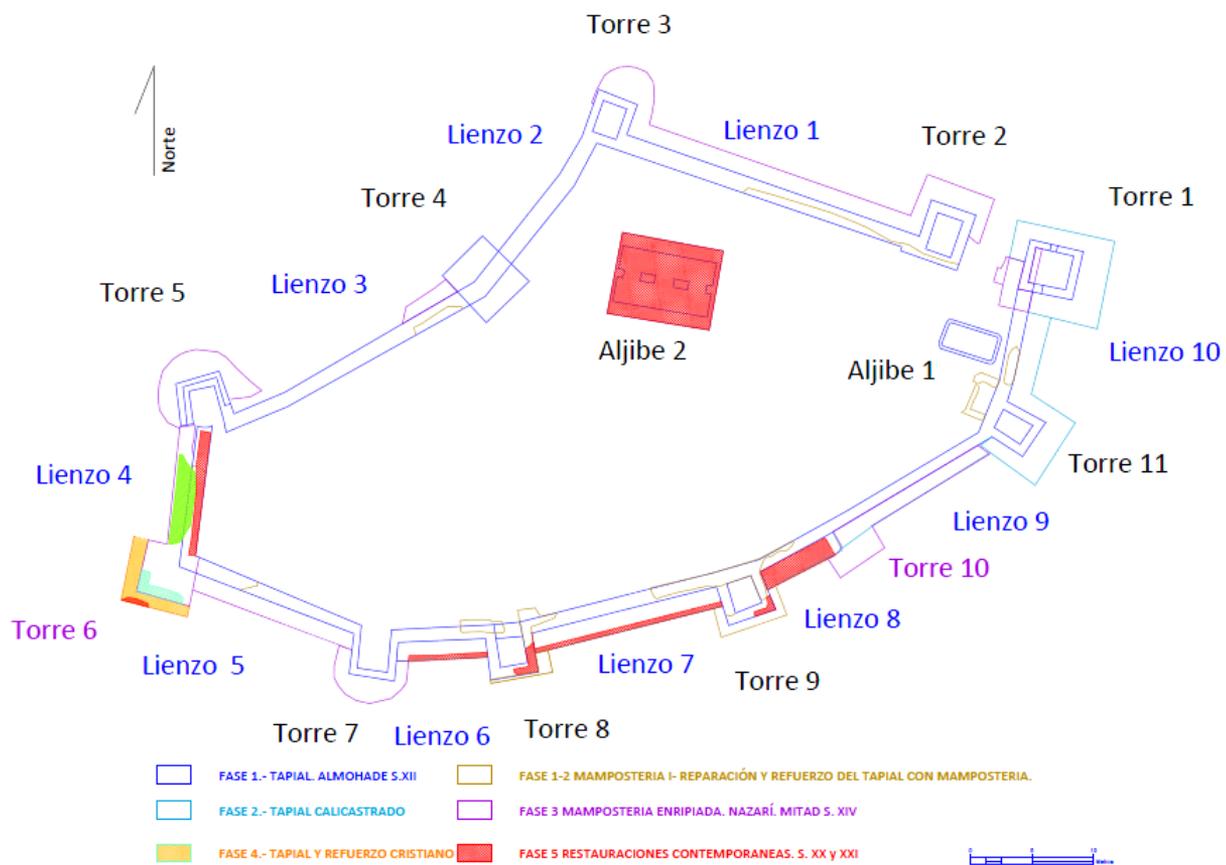


Imagen de los restos de la barbacana para dificultar el acceso a la torre 1

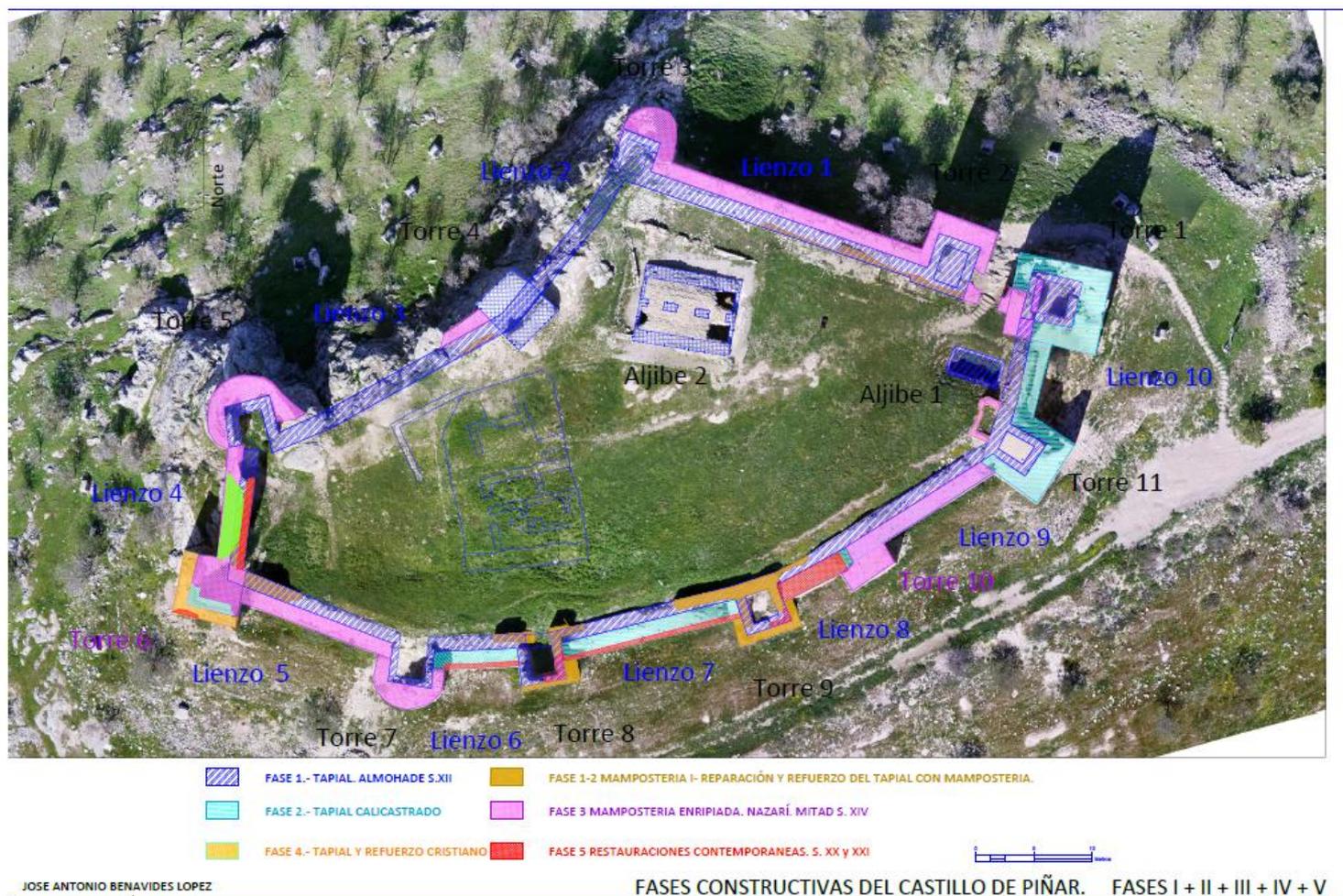


JOSE ANTONIO BENAVIDES LOPEZ

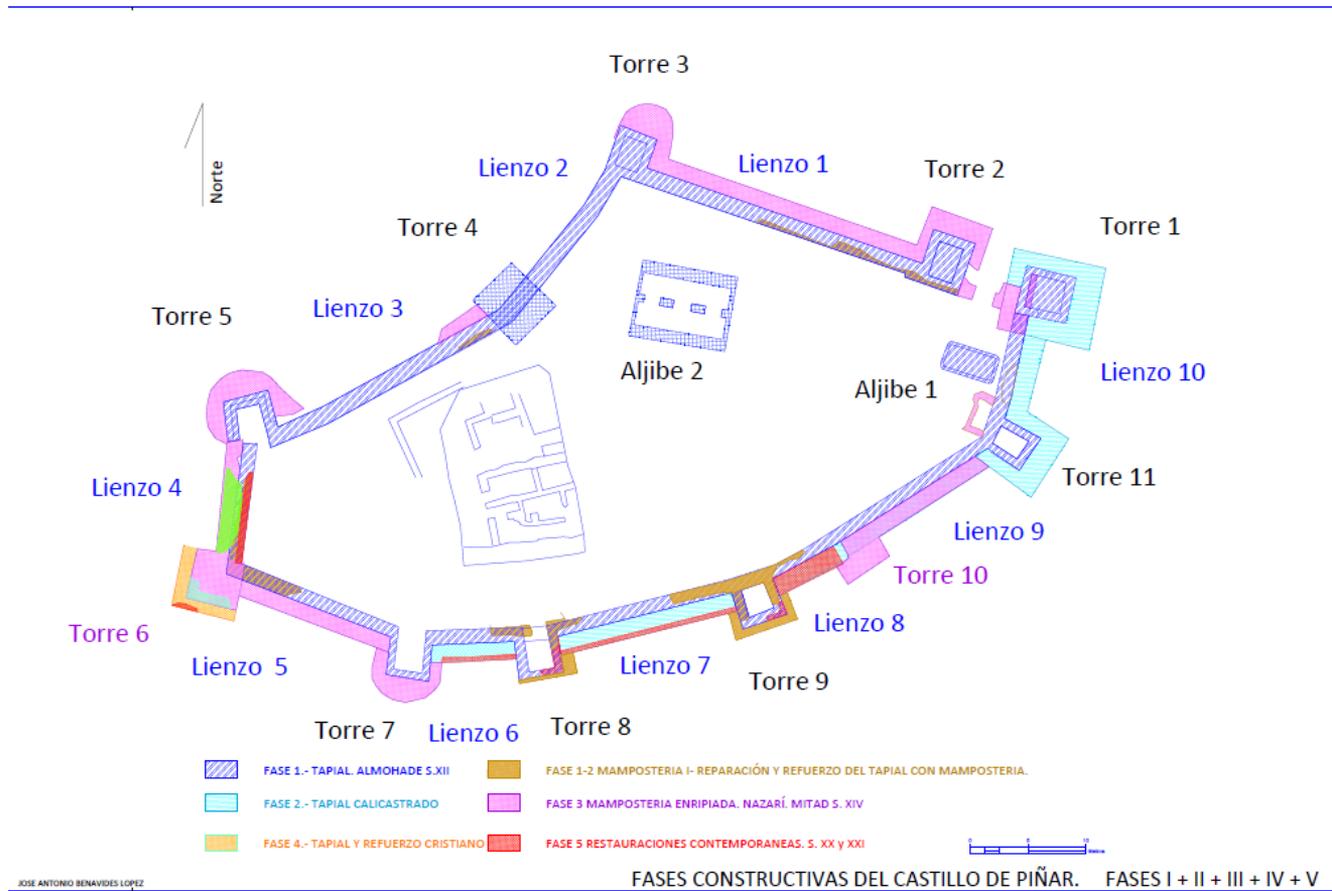
FASES CONSTRUCTIVAS DEL CASTILLO DE PIÑAR. FASES I + II + III + IV + V

Plano de planta con indicación de las restauraciones contemporáneas (rojo) y la fase anterior (refuerzo tras invasión cristiana sobre torre 6 y adarve lienzo 4

El soporte gráfico que supone las ortofotografías de planta y alzados nos ha permitido plasmar de manera precisa cada una de las fases.



Representación de todas las fases constructivas a partir de la ortofotografía de planta de resolución 1 cm.



Plano de planta con indicación de todas las fases constructivas

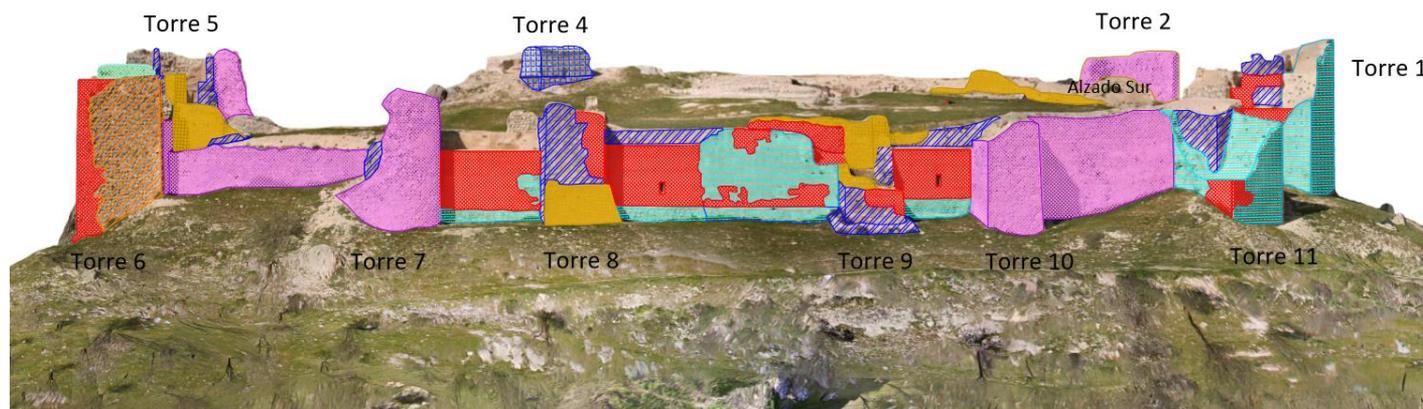
Como ya indicamos, la sola representación de la planta resulta insuficiente para definir la En la complejidad estructural del castillo y su fases constructivas siendo recomendable trabajar sobre modelos virtuales o sobre ortofotografías de los diferentes alzados.

La importante cantidad de datos que se recogen en el estudio estratigráfico de un edificio y la complejidad

tridimensional de la arquitectura, hacen casi imposible la realización de un diagrama de Harris para el edificio en su conjunto [312]. Por este motivo se realizan diagramas sobre estructuras independientes que finalmente se interrelacionan entre sí de modo gráfico.



Ortofotografía del alzado sur con resolución de 1cm. Realizada por J.A.Benavides 2017



JOSE ANTONIO BENAVIDES LOPEZ

FASES CONSTRUCTIVAS DEL CASTILLO DE PIÑAR. FASES I + II + III + IV + V

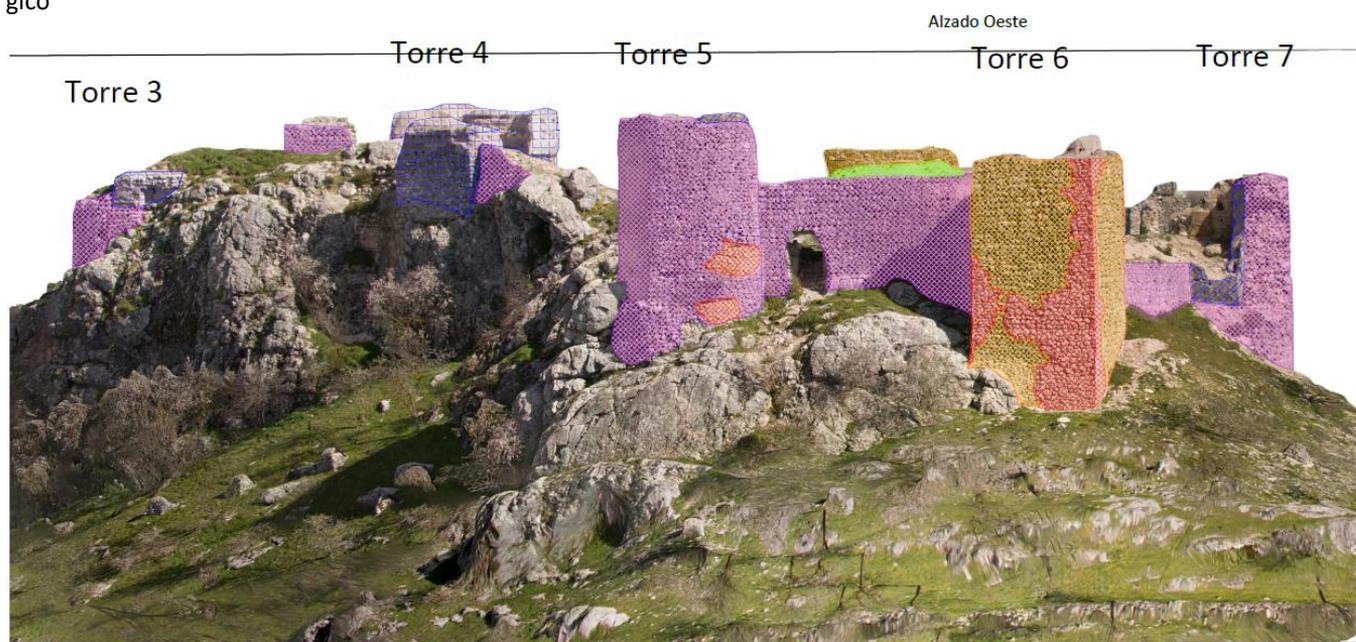
Estratigrafía del alzado sur. Realizada por J.A.Benavides 2017, en base al estudio arqueológico

312 MILETO, Camilla; VEGAS, Fernando. (2003) El análisis estratigráfico constructivo como estudio pre-

vio al proyecto de restauración arquitectónica: metodología y aplicación. *Arqueología de la Arquitectura*, no 2, p. 189-196.



Ortofotografía del alzado oeste con resolución de 1 cm.
Realizada por J.A.Benavides, en base al estudio arqueológico



JOSE ANTONIO BENAVIDES LOPEZ

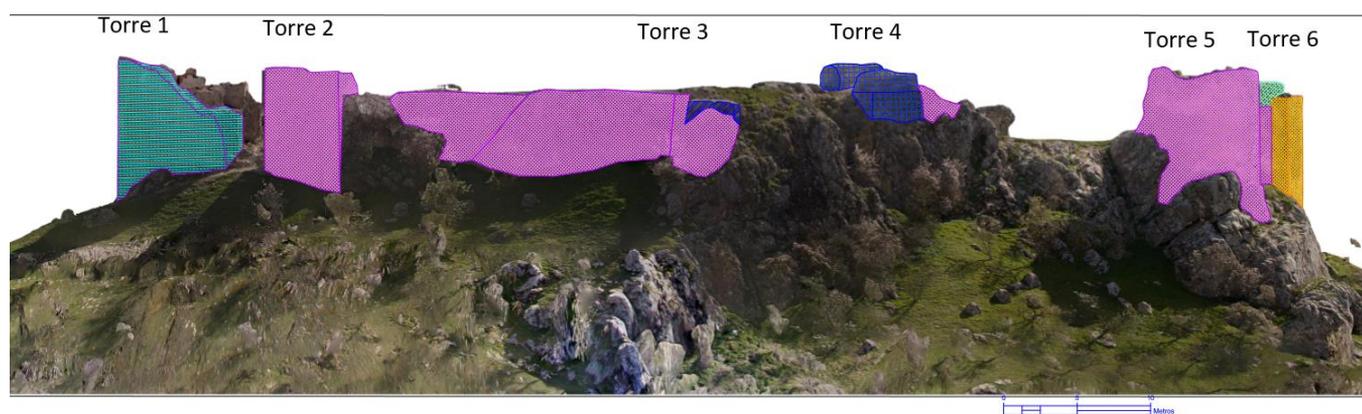
0 5 10 Metros
FASES CONSTRUCTIVAS DEL CASTILLO DE PIÑAR. FASES I + II + III + IV + V

Alzado oeste. Definición de fases constructivas, en base al estudio arqueológico



Ortofotografía del alzado norte con resolución de 1cm.

Alzado Norte



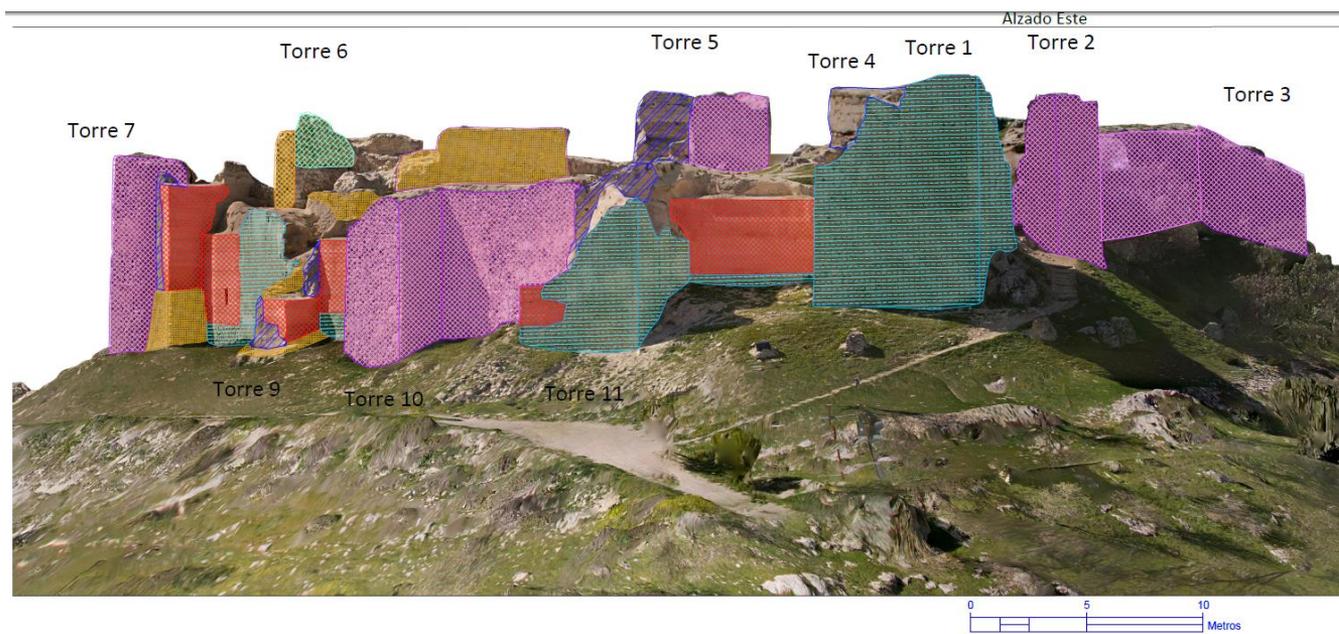
JOSE ANTONIO BENAVIDES LOPEZ

FASES CONSTRUCTIVAS DEL CASTILLO DE PIÑAR. FASES I + II + III + IV + V

Alzado Norte. Descripción de fases constructivas, en base al estudio arqueológico



Ortofotografía alzado este con resolución 1 cm. Realizada por J.A.Benavides.



JOSE ANTONIO BENAVIDES LOPEZ

FASES CONSTRUCTIVAS DEL CASTILLO DE PIÑAR. FASES I + II + III + IV + V

Alzado Este. Descripción de fases constructivas, en base al estudio arqueológico

La posibilidad de trabajar directamente sobre modelos virtuales tridimensionales abre unas nuevas expectativas a la interpretación de las secuencias histórica de los

edificios. La representación tridimensional de la UEs permite establecer relaciones no solo a nivel de un mismo paramento, sino sobre todo el edificio.

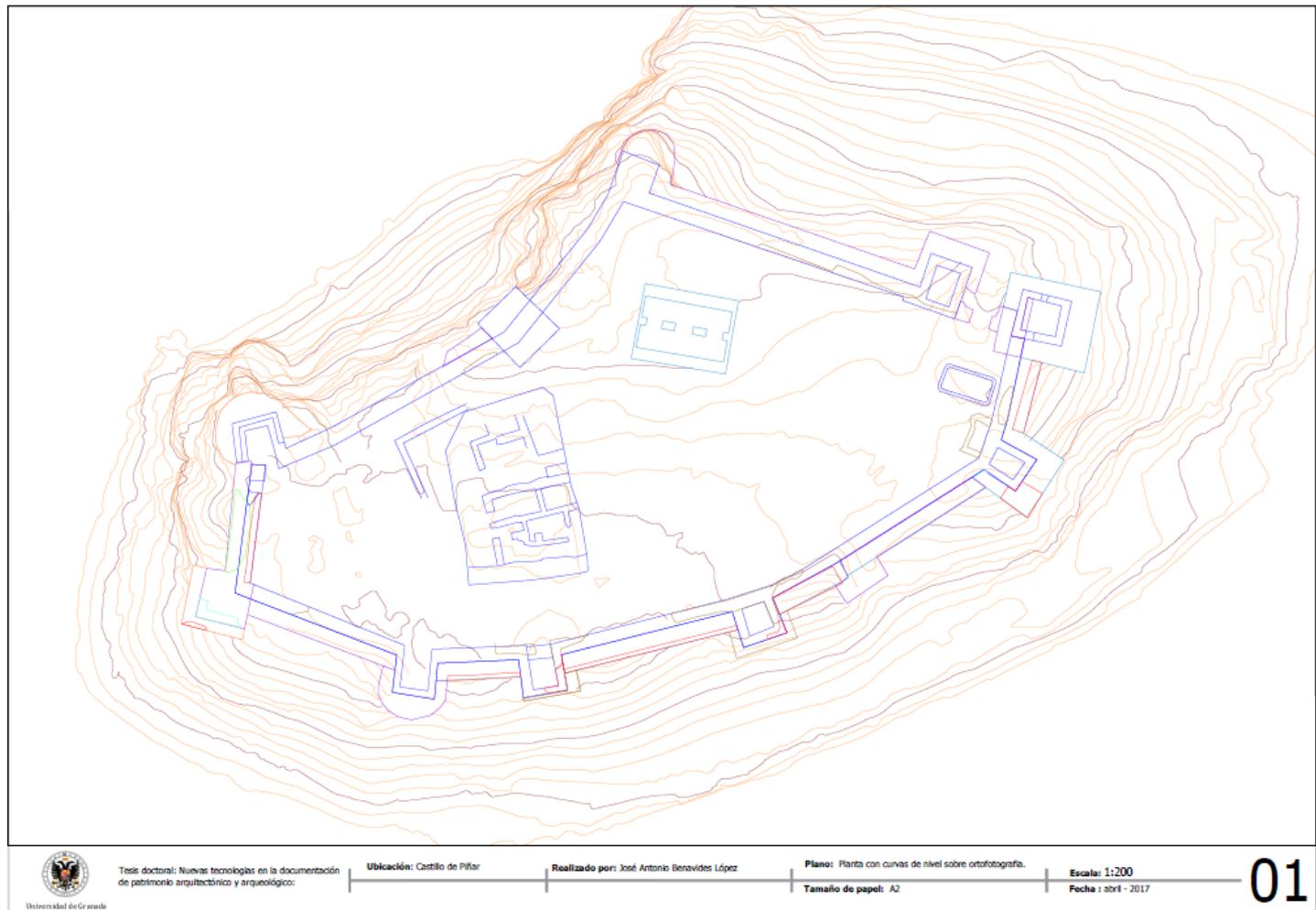


Perspectiva desde el sur del modelo 3D del castillo de Píñar con resolución 1 cm. Realizado por J.A.Benavides

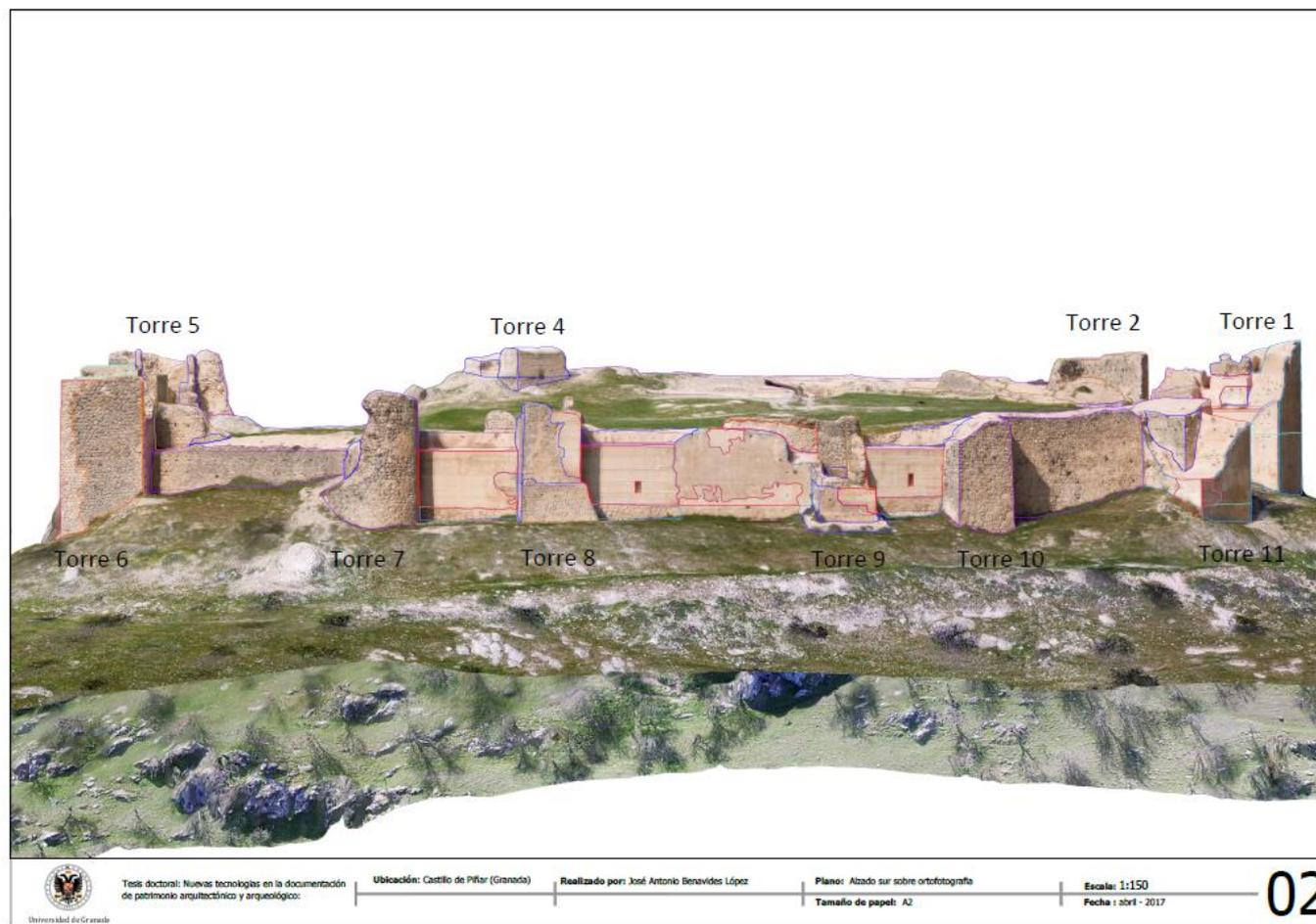
5.9 DOCUMENTACIÓN GRÁFICA

5.9.1 DOCUMENTOS GRAFICA

<



Plano de planta con el dibujo de los elementos constructivos de todas las fases realizado en base a la ortofotografía en planta.



Ortofotografía del alzado sur generada a partir del modelo 3D del castillo de Píñar, 2017



Tesis doctoral: Nuevas tecnologías en la documentación de patrimonio arquitectónico y arqueológico:

Ubicación: Castillo de Píñar

Realizado por: José Antonio Benavides López

Plano: Alzado oeste sobre ortofotografía

Tamaño de papel: A2

Escala: 1:200

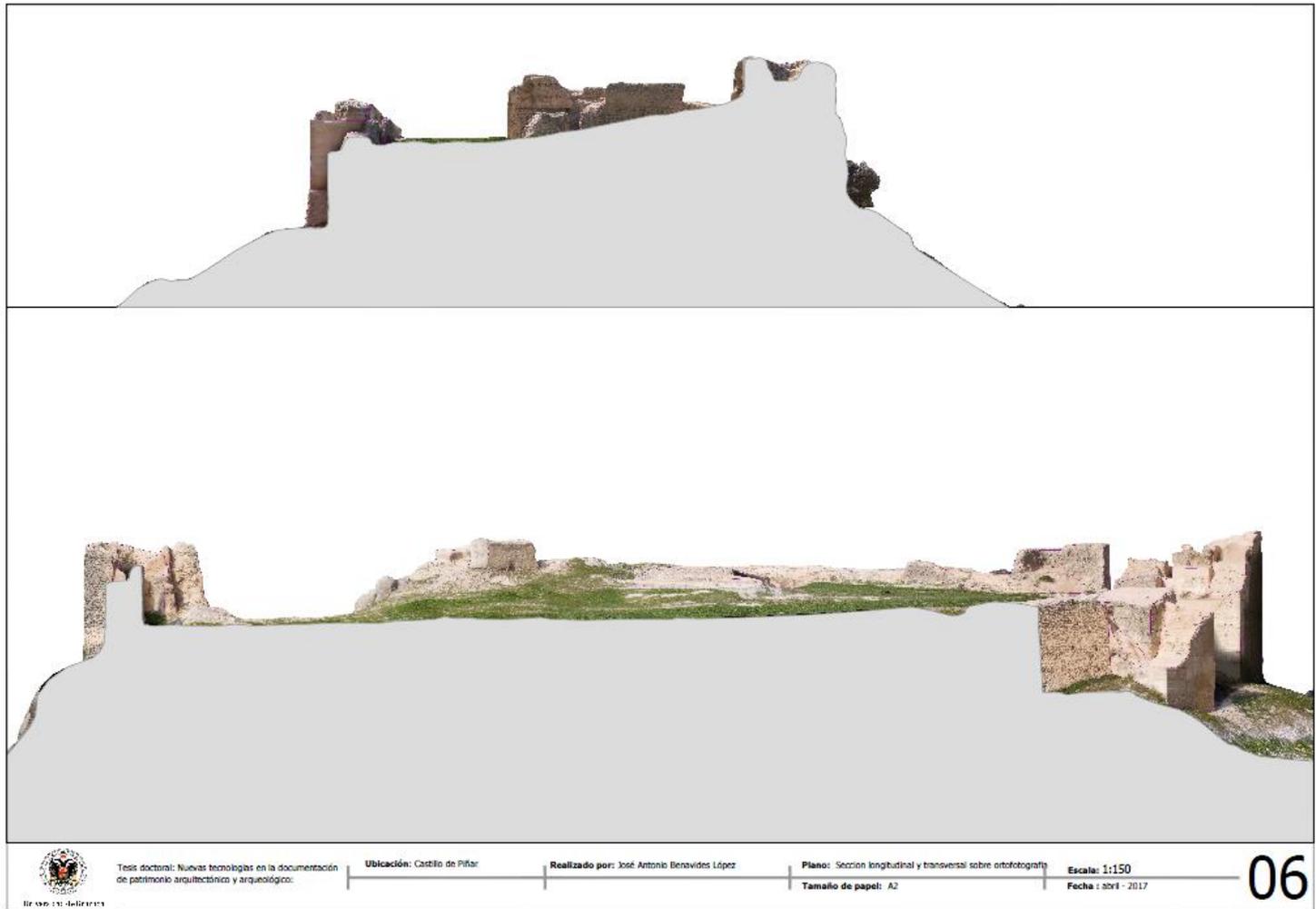
Fecha: abril - 2017

03

Ortofotografía del alzado oeste generada a partir del modelo 3D del castillo de Píñar, 2017



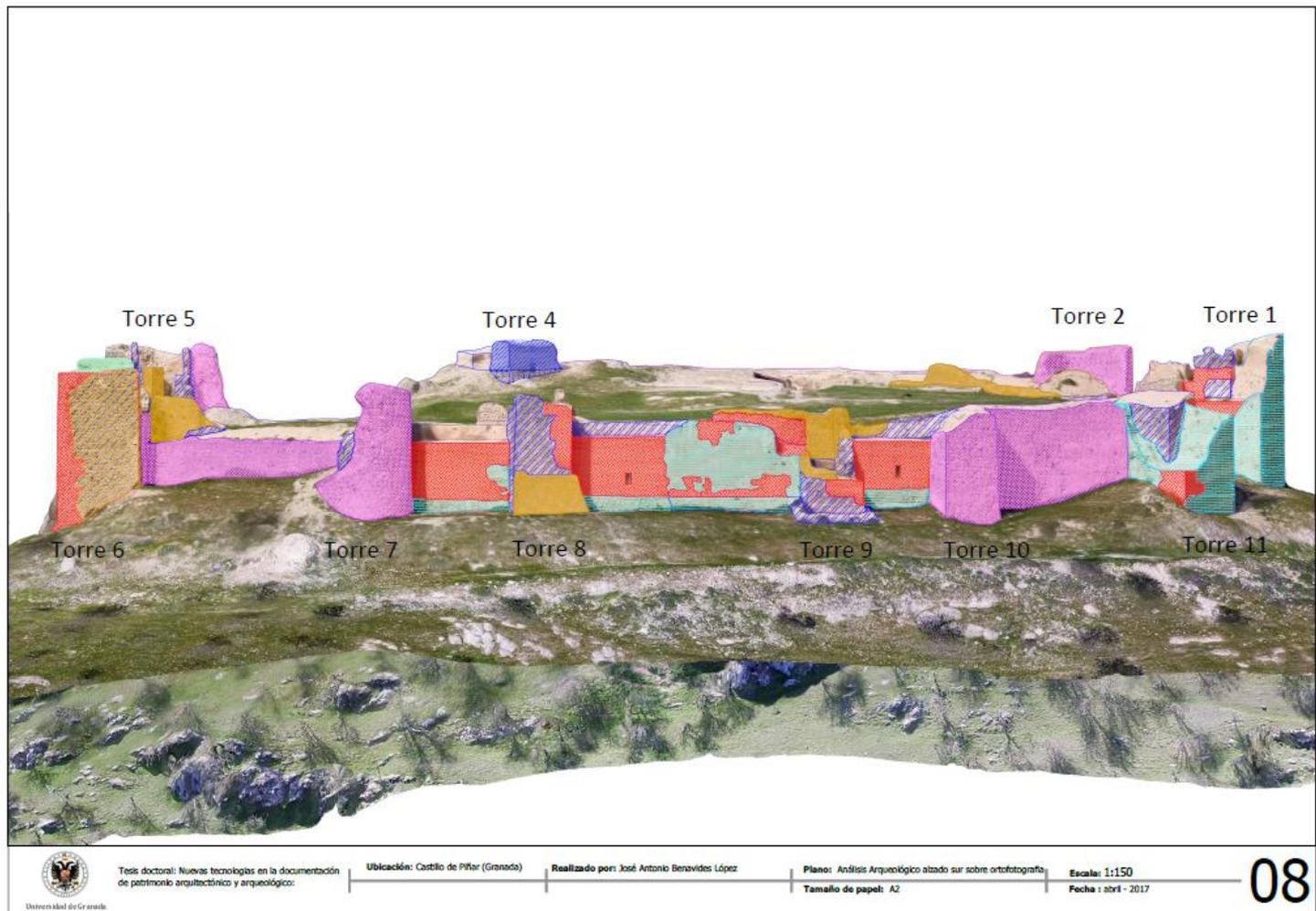
Ortografía del alzado este generada a partir del modelo 3D del castillo de Piñar



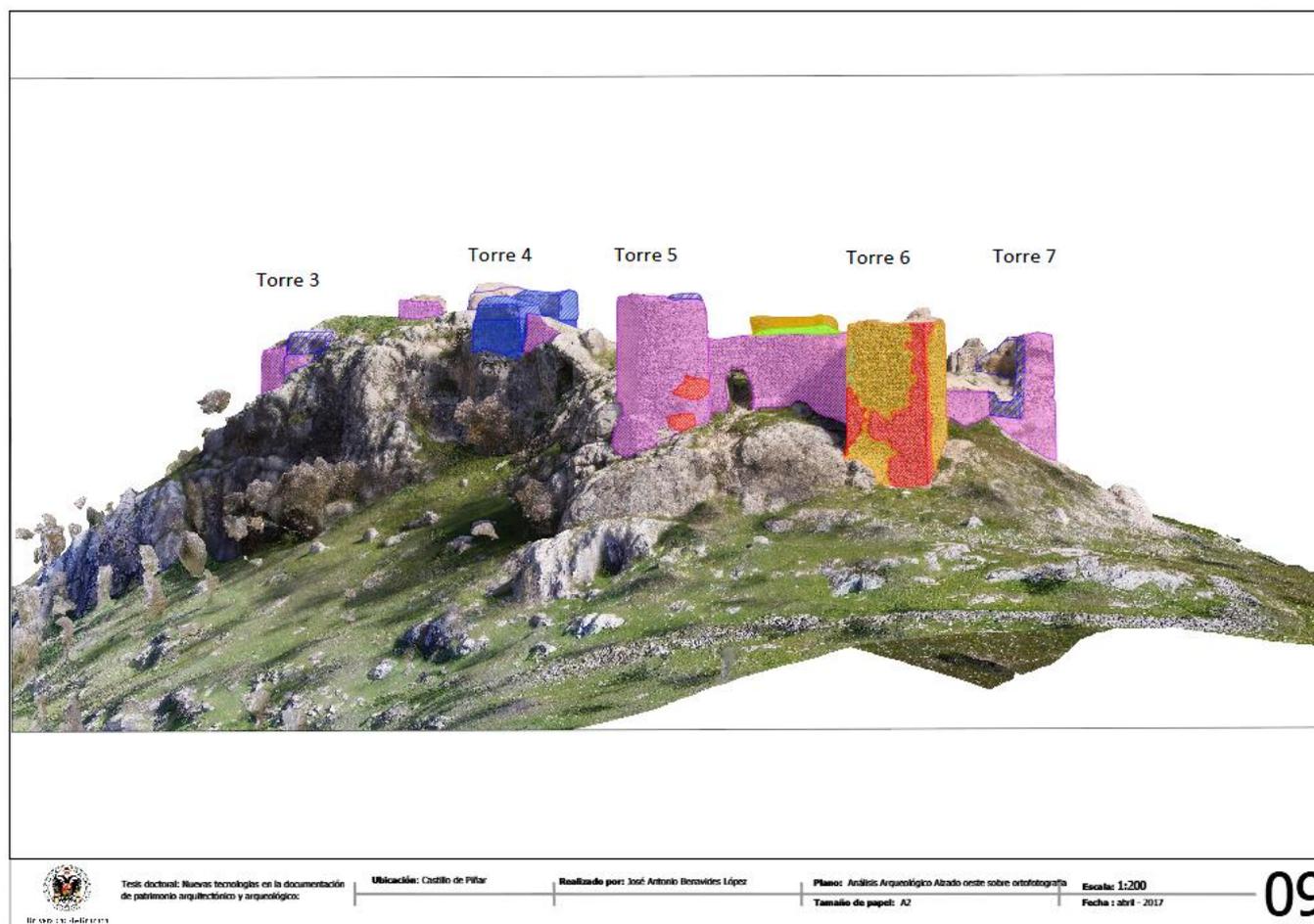
Sección longitudinal y transversal generadas a partir del modelo 3D del castillo de Píñar



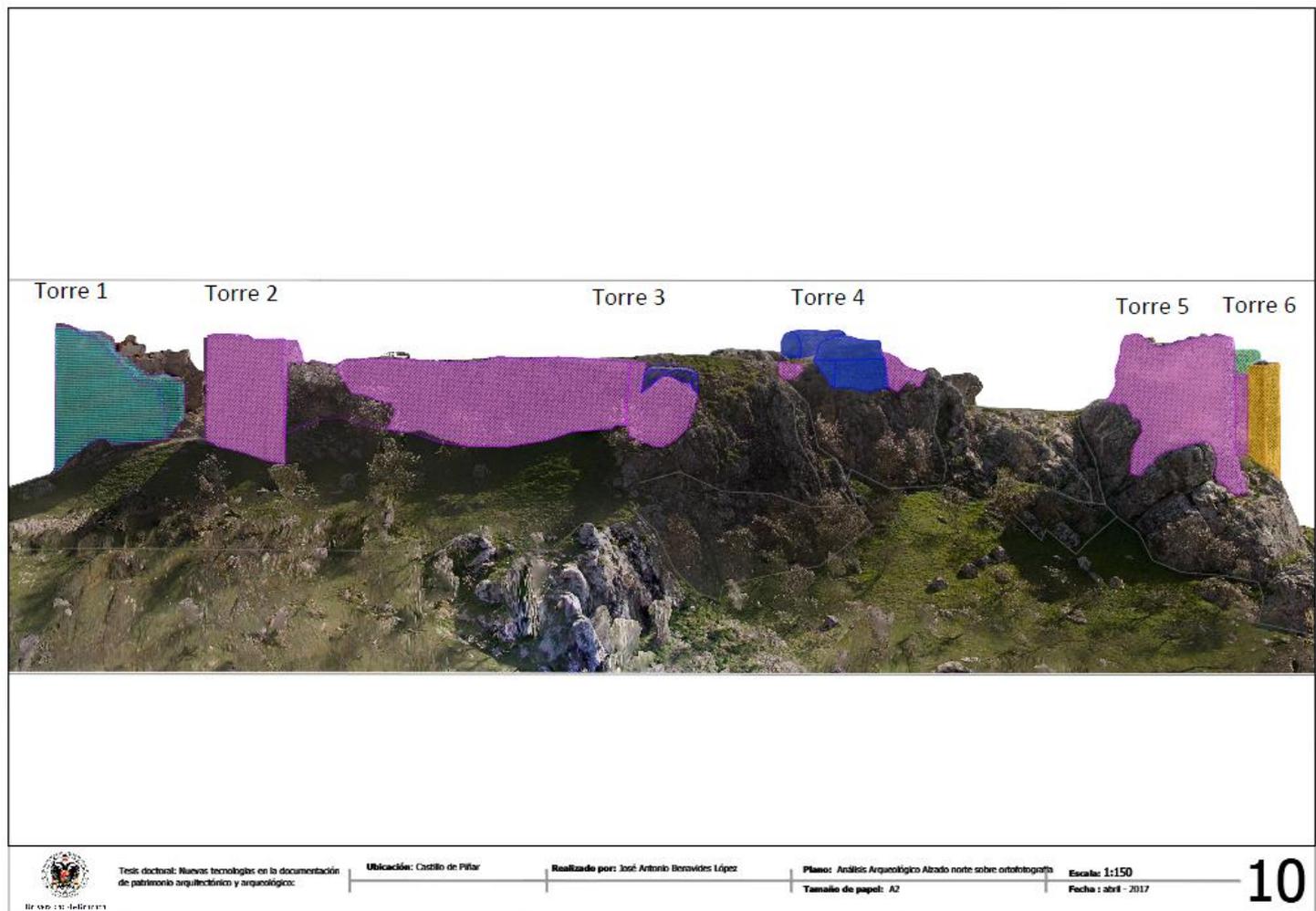
Plano de planta con indicación de las fases constructivas, realizado a partir del análisis arqueológico



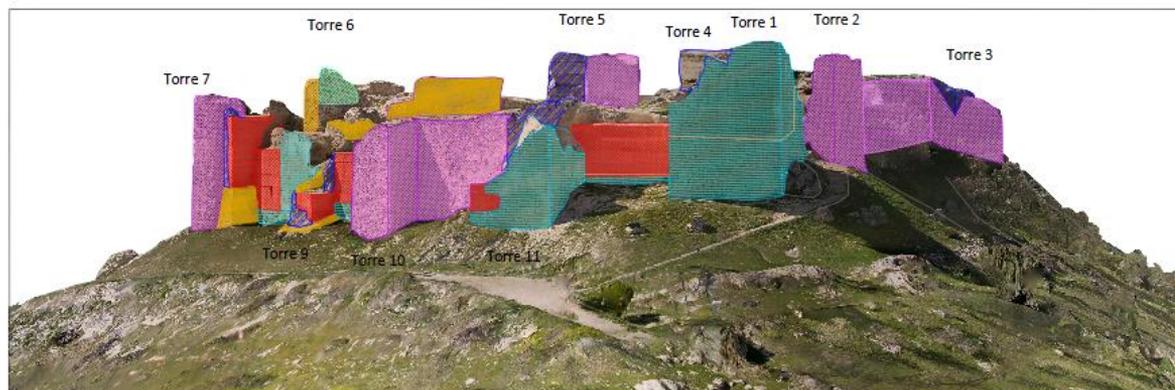
Plano de fases constructivas del alzado sur, realizado a partir del análisis arqueológico



Plano de fases constructivas del alzado oeste, realizado a partir del análisis arqueológico



Plano de fases constructivas del alzado norte, realizado a partir del análisis arqueológico



Plano de fases constructivas del alzado este, realizado a partir del análisis arqueológico



Plano de hipótesis constructiva fase I, tapial de tierra



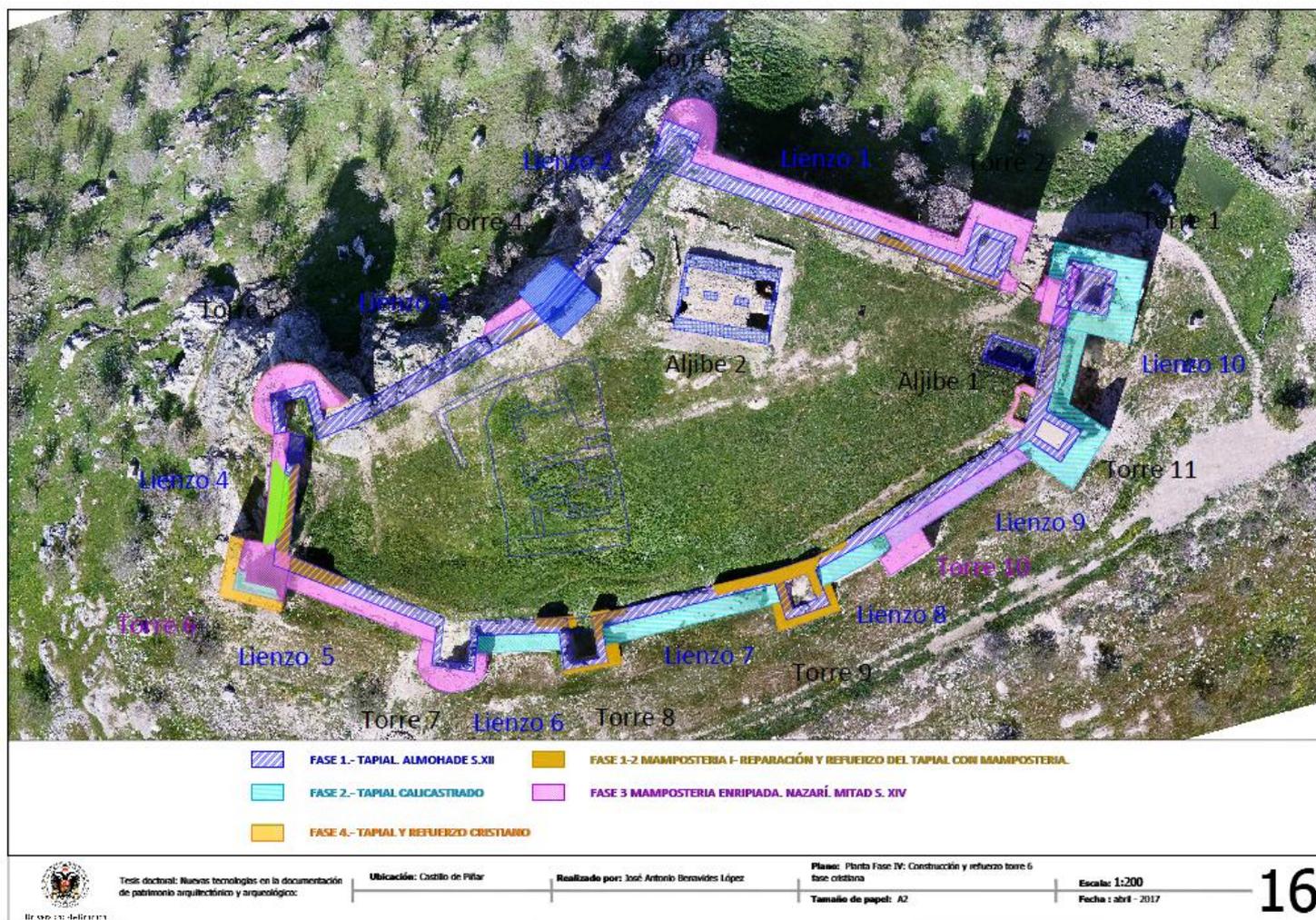
Plano de hipótesis constructiva fase I (tapial de tierra) y I-bis (reparación de muros con mampostería)



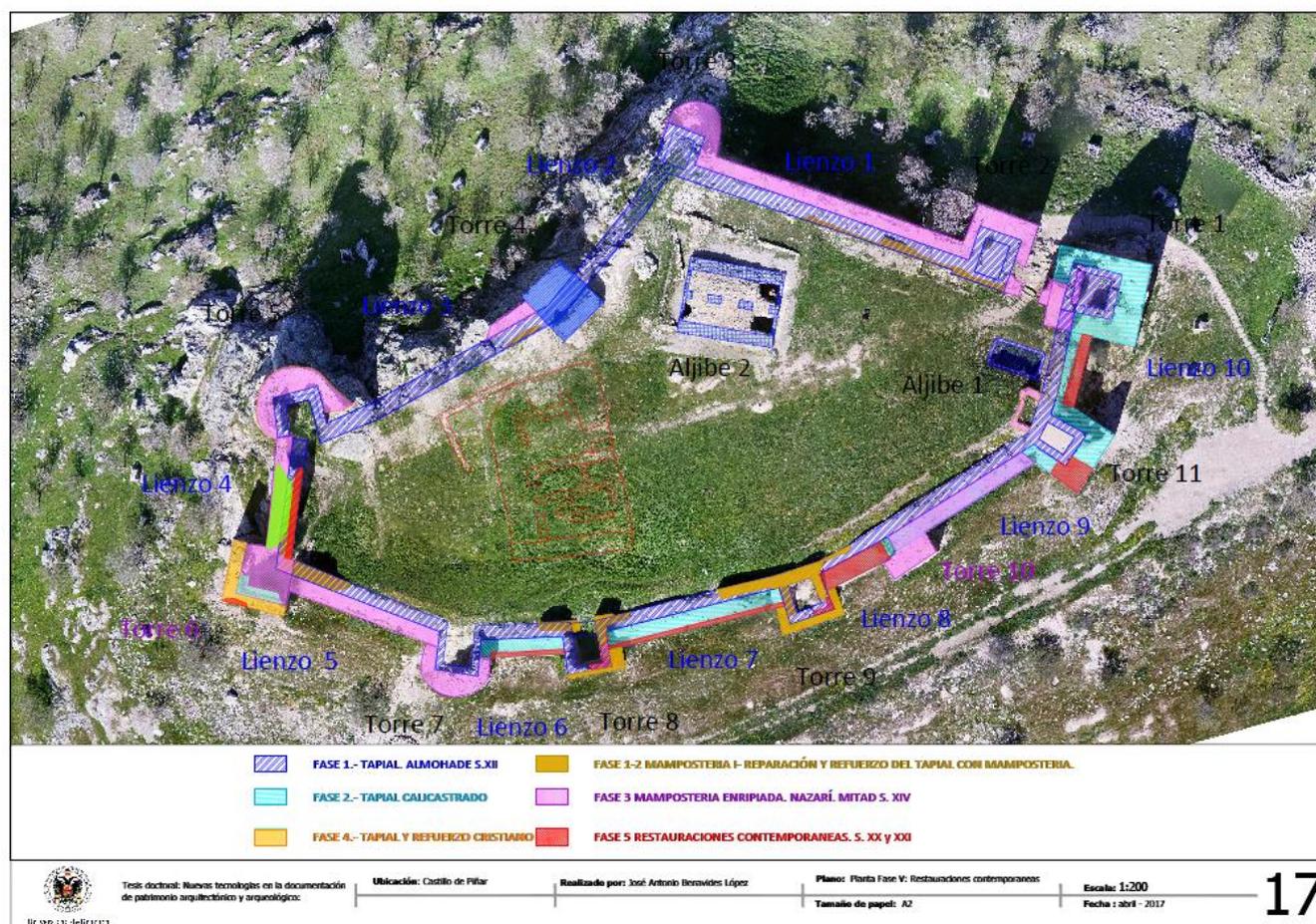
Plano de hipótesis constructiva fase I (tapial de tierra) y I-bis (reparación de muros con mampostería) y fase II (tapial calicastro)



Plano de hipótesis constructiva fase I (tapial de tierra) y I-bis (reparación de muros con mampostería), fase II (tapial calicastro) y fase III (refuerzo de muros y torres con mampostería enripiada)



Plano de hipótesis constructiva fase I (tapial de tierra) y I-bis (reparación de muros con mampostería), fase II (tapial calicastro), fase III (refuerzo de muros y torres con mampostería enripiada), fases IV (ampliación de torre 6 en diferentes sub-fases)



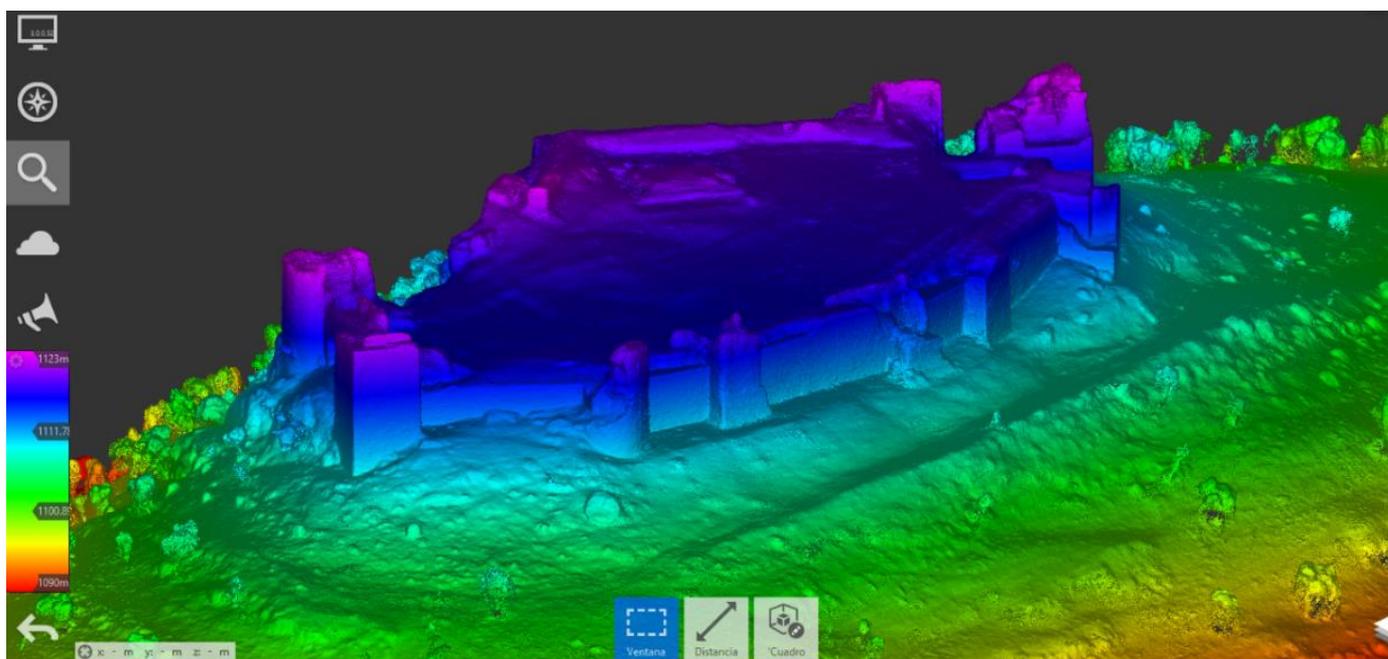
Plano de hipótesis constructiva fase I (tapial de tierra) y I-bis (reparación de muros con mampostería), fase II (tapial calicastro), fase III (refuerzo de muros y torres con mampostería enripiada), fases IV (ampliación de torre 6 en diferentes sub-fases), fase V (restauraciones contemporáneas)

5.9.2 BIM APLICADO A LA DOCUMENTACIÓN Y REGISTRO ARQUEOLÓGICO DEL CASTILLO DE PIÑAR

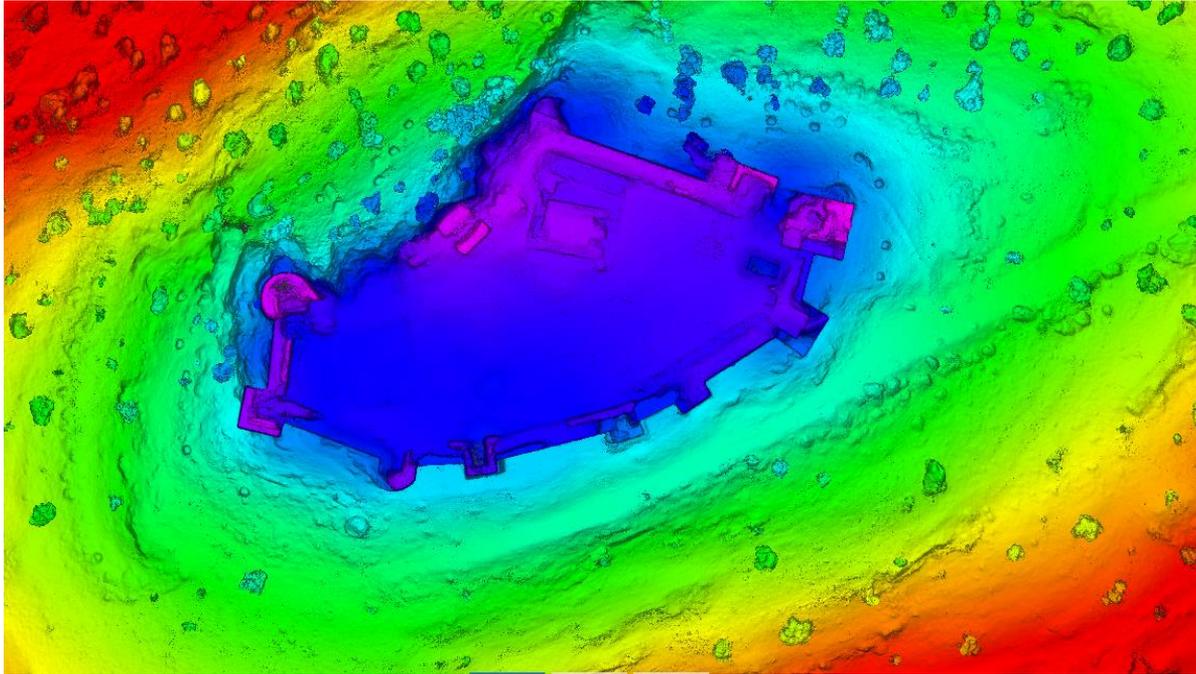
Como ya hemos indicado, las herramientas BIM (Building Information Modelling) constituyen un soporte ideal donde incorporar los diferentes registros elaborados por cada uno de los agentes intervinientes, mejorando los recursos gráficos para la representación y

edición de las estructuras o los restos arqueológicos mediante la generación de modelos tridimensionales semánticos.

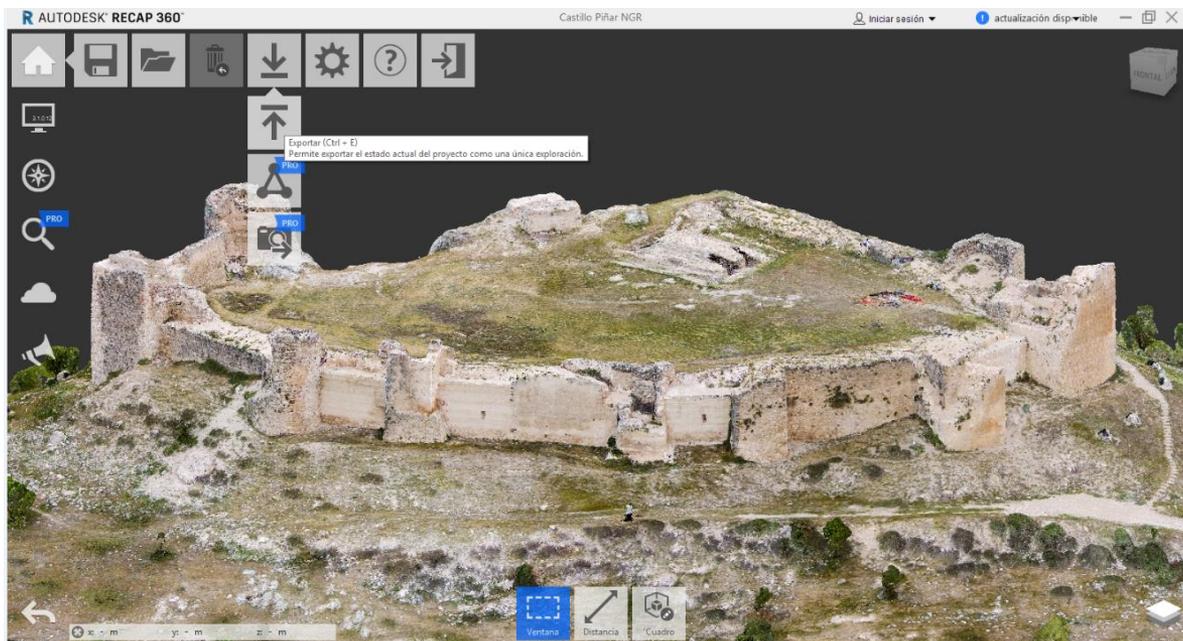
El primer paso para poder cargar la nube de puntos en el programa de BIM "Revit" ha sido convertir las nubes de puntos generadas en formato ascii (xyz,rgb) en formato compatible (*.rcs) o (rcp) siendo necesario realizar un proceso intermedio en el programa Recap de Autodesk



Vista en perspectiva de modelo tridimensional de nube de puntos importado sobre el *software* Recap (Autodesk). Convierte los datos ascii en formato compatible de Autodesk Revit.

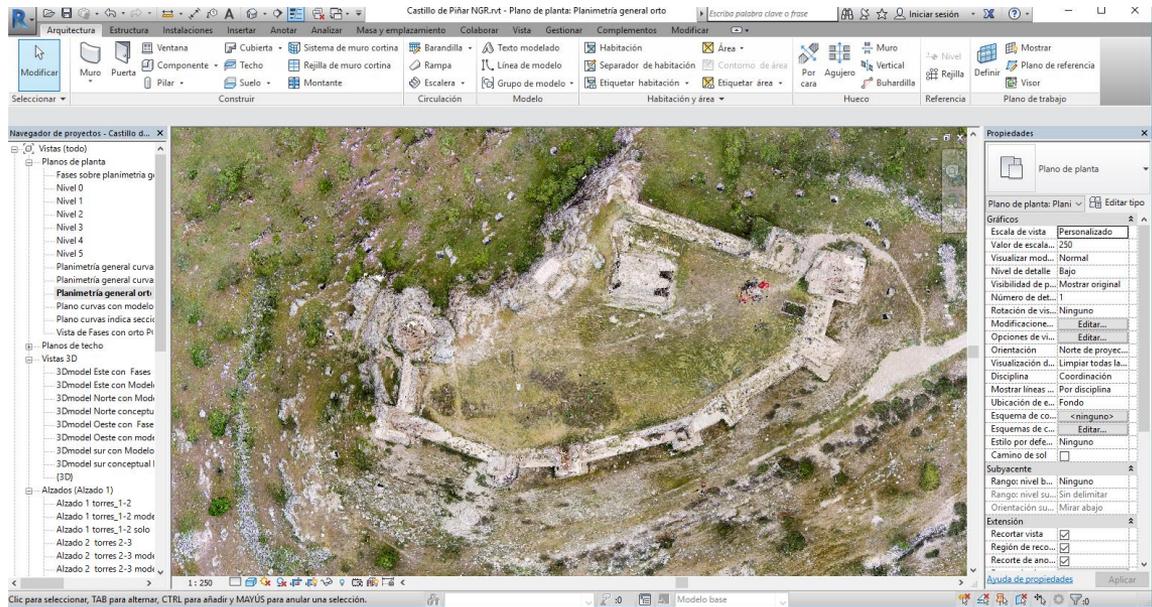


Vista en planta del modelo tridimensional representado en isótono de color de acuerdo a la altura.

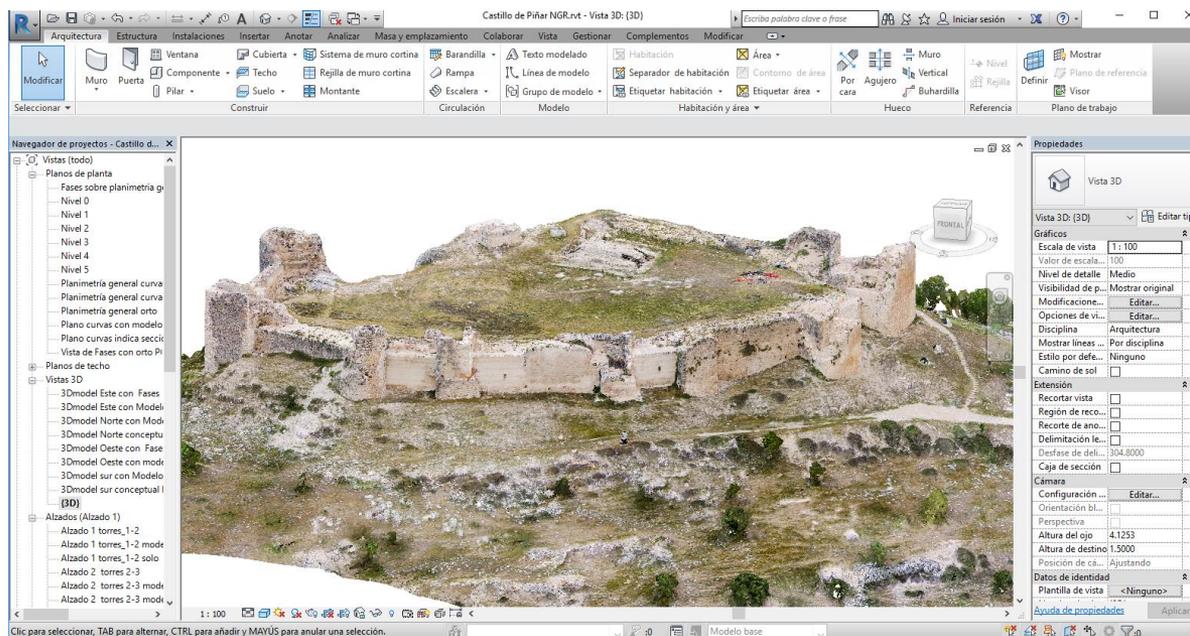


Vista en perspectiva de modelo tridimensional de nube de puntos coloreados en su color verdadero RGB. La orden exportar genera un archivo RCP susceptible de ser usado por el programa de Autodesk "Revit-2017".

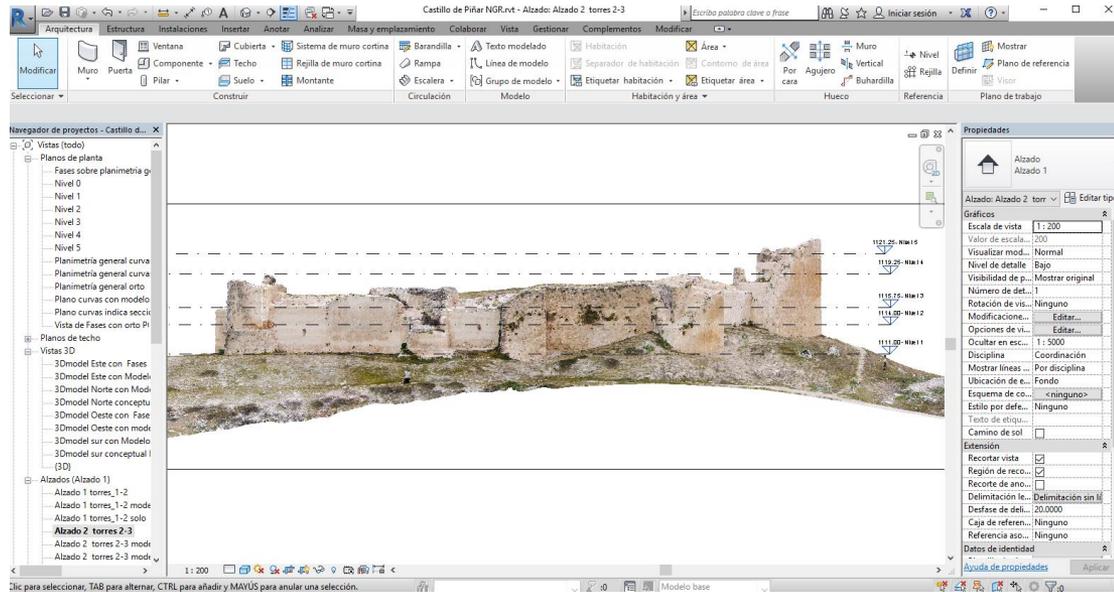
El modelo importado permite la generación automática de vistas planas (plantas, alzados, secciones) o incluso de perspectivas que facilitan enormemente la capacidad de análisis de estos modelos.



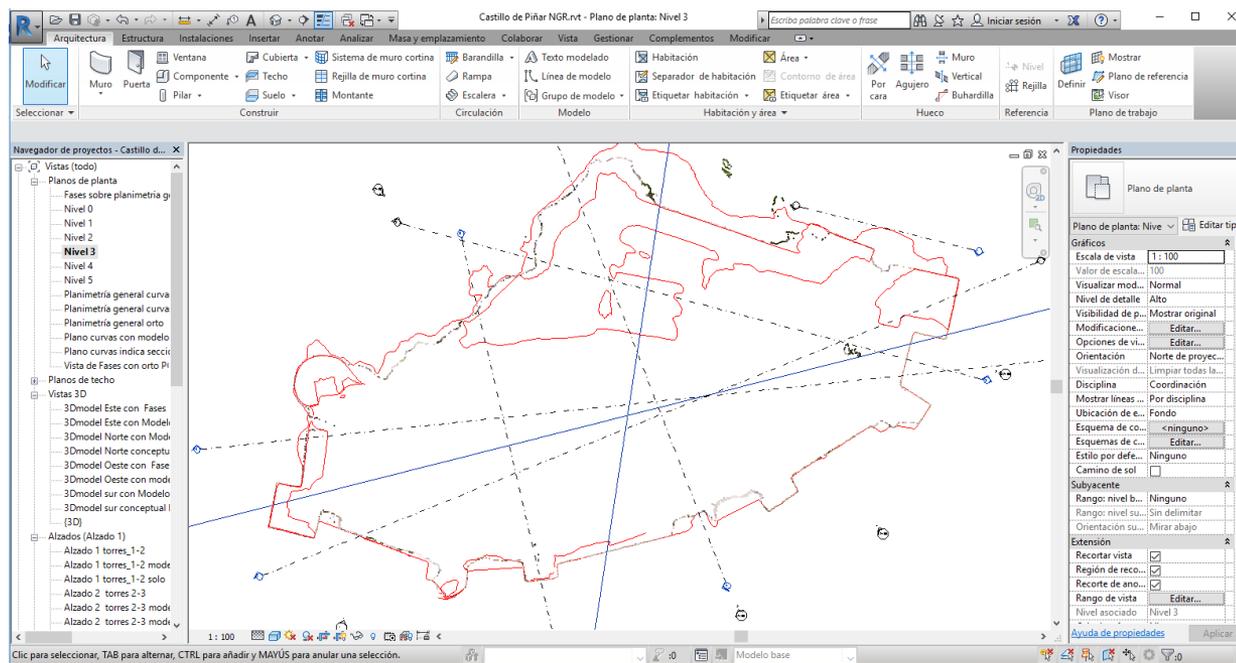
Vista en planta del modelo tridimensional importado sobre la herramienta BIM (Revit) representado en color verdadero (RGB)



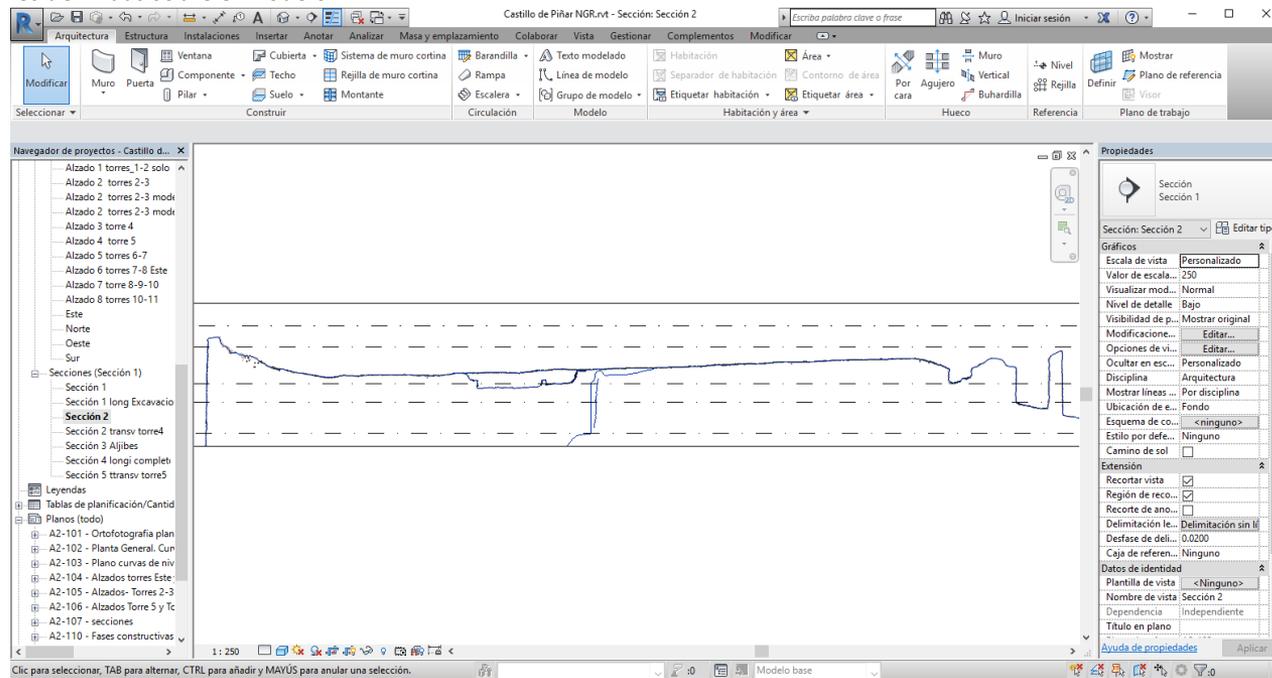
Vista en perspectiva del modelo tridimensional importado en sus coordenadas georreferenciadas. La visualización del modelo desde diferentes puntos de vista facilita enormemente su comprensión.



Vista del alzado sur con indicación de los niveles de vista o corte horizontal.

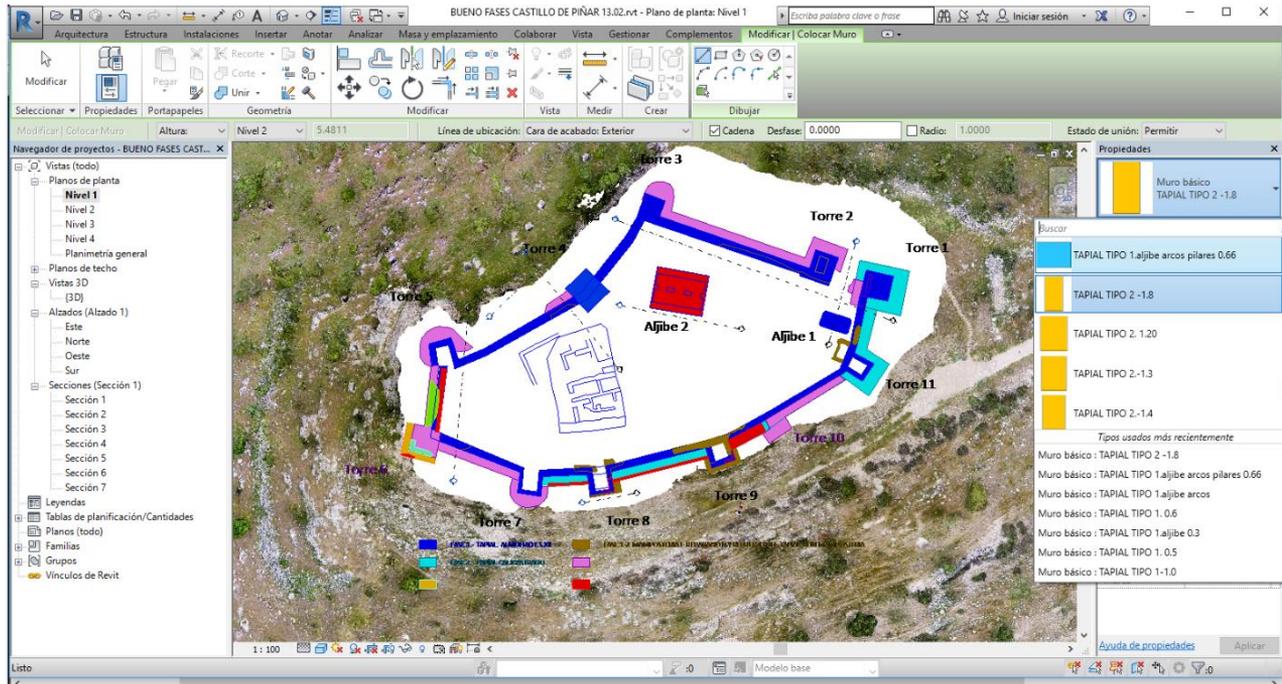


Representación en planta de la sección correspondiente al nivel 3 con indicación de las diferentes secciones verticales definidas sobre el modelo

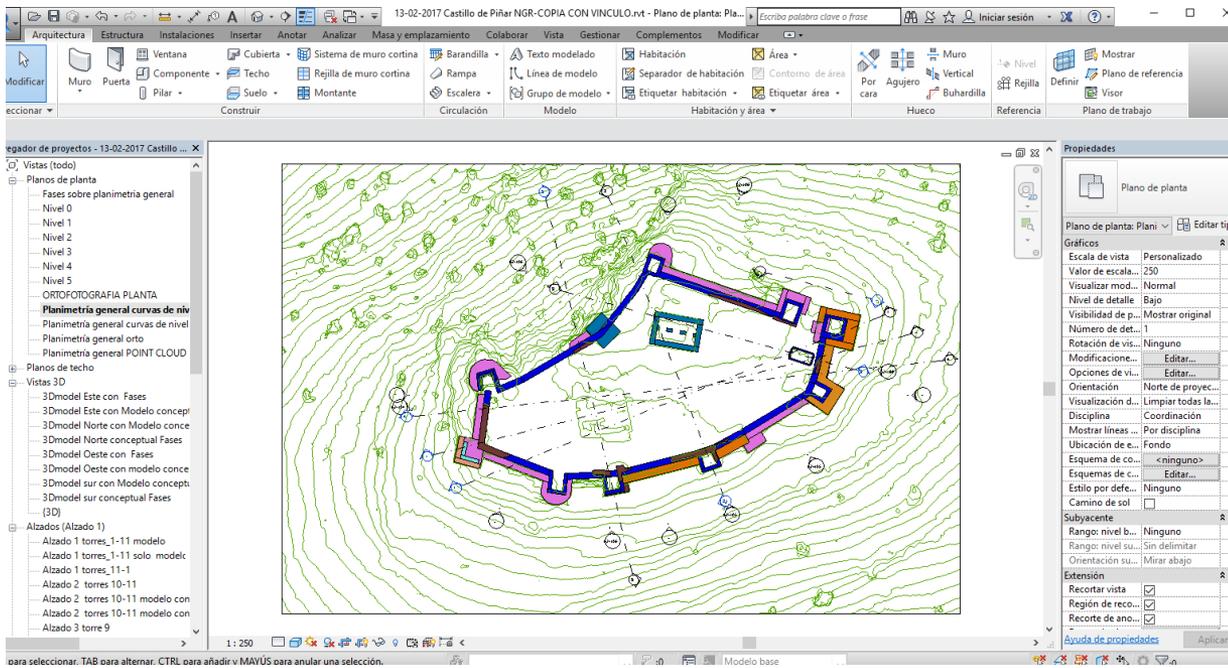


Sección longitudinal del modelo de nube de puntos. La representación de todos los estratos registrados, incluso los ya enterrados, permite realizar una contextualización de los datos de la excavación.

El modelado tridimensional mediante esta herramienta permite dotar a las distintas entidades de la capacidad de contener y generar información, es decir, consiste en realizar un modelo gráfico 3d donde las formas no son meros gráficos vectoriales sino objetos con cualidades bien determinadas dentro de un entorno gráfico que permita su fácil visualización y edición (Angulo, 2012). Es posible dotar a las unidades estratigráficas (UEs) de las cualidades materiales, históricas o de gestión necesarias para su mejor conocimiento, protección y conservación.



Vista en planta de la construcción sólida de la fases utilizando distintas tipologías de materiales.

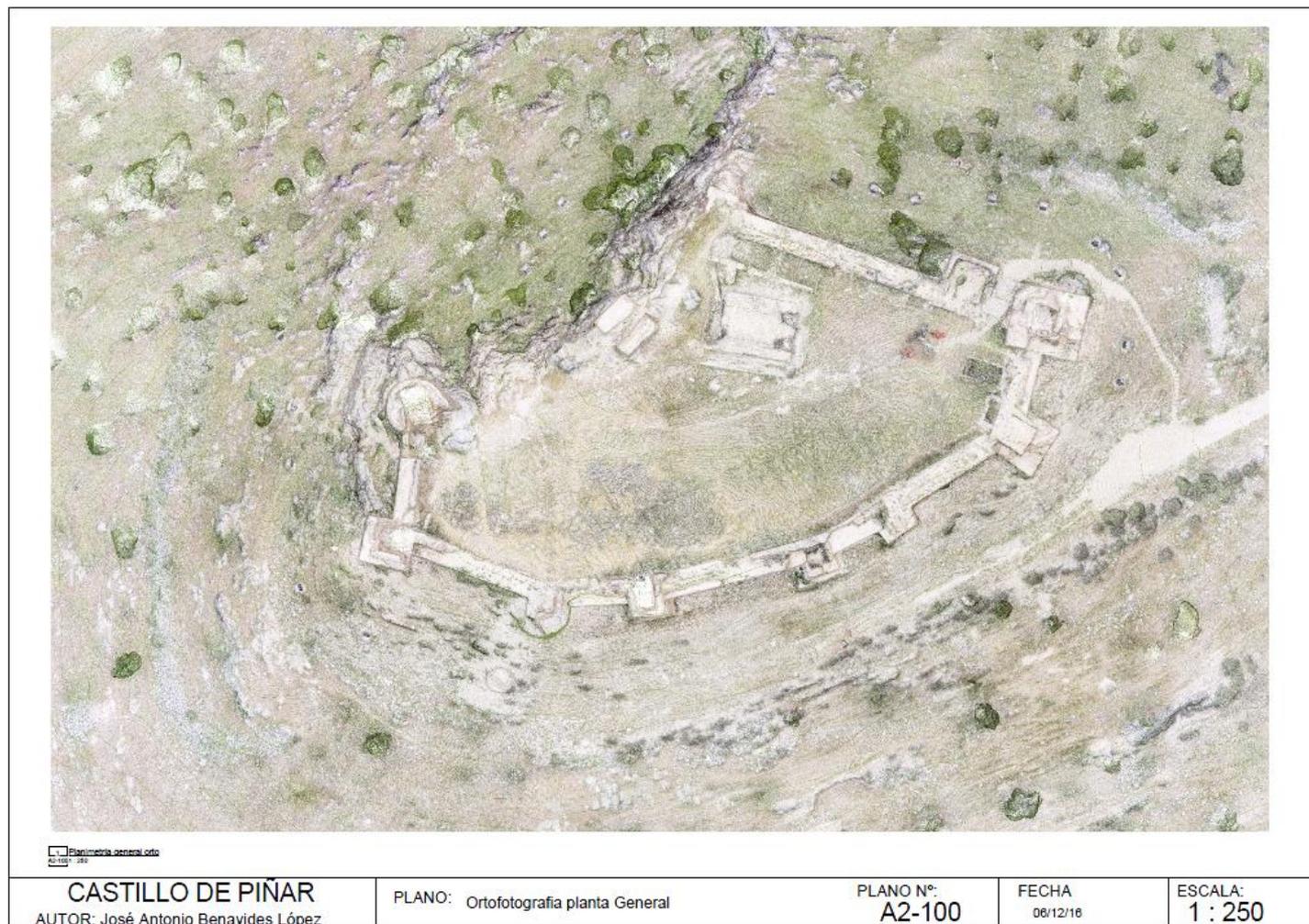


Representación del modelo tridimensional de las fases constructivas sobre el modelo de curvas de nivel del terreno.

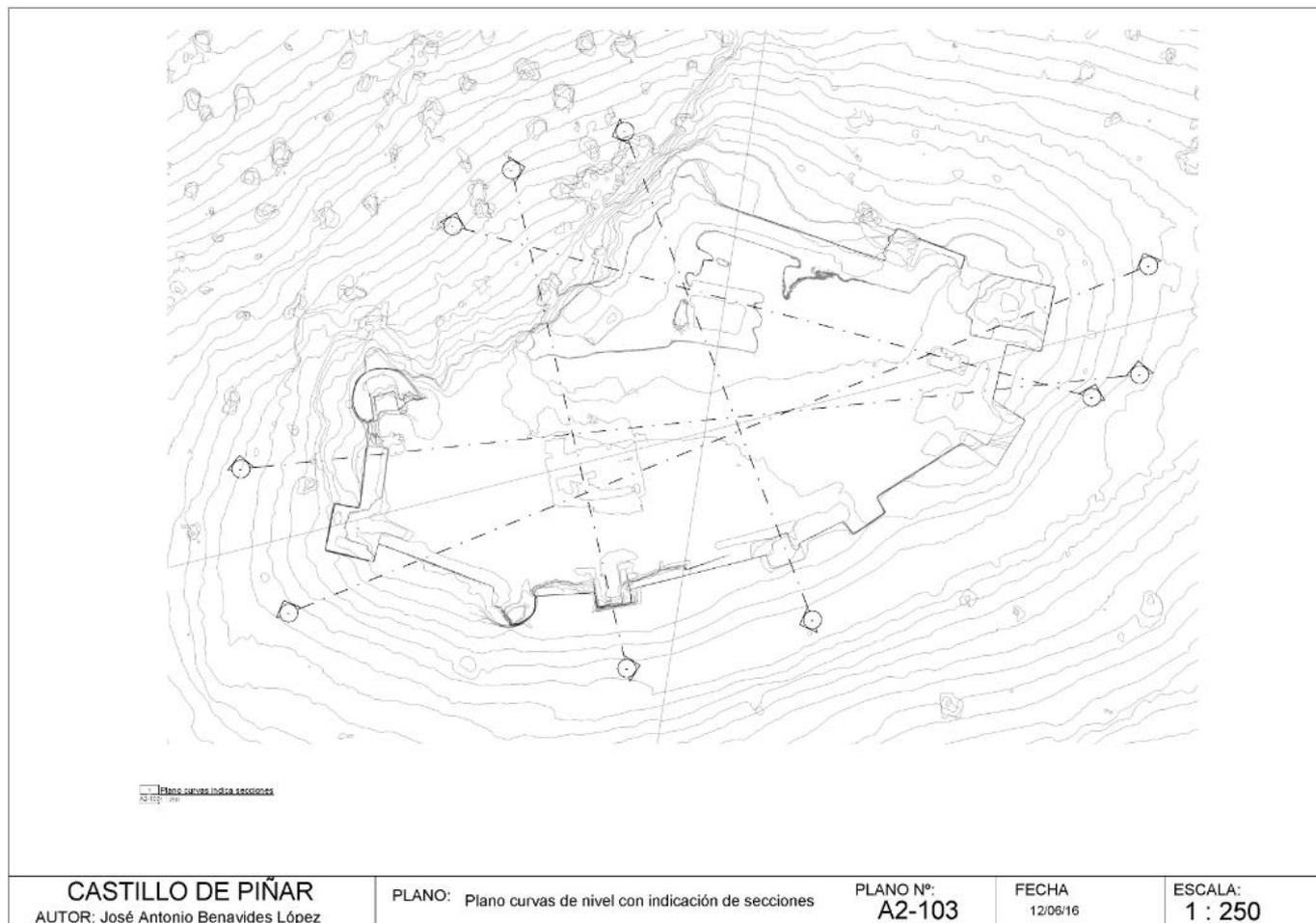
PLANOS GENERADOS EN BIM: CASTILLO DE PIÑAR



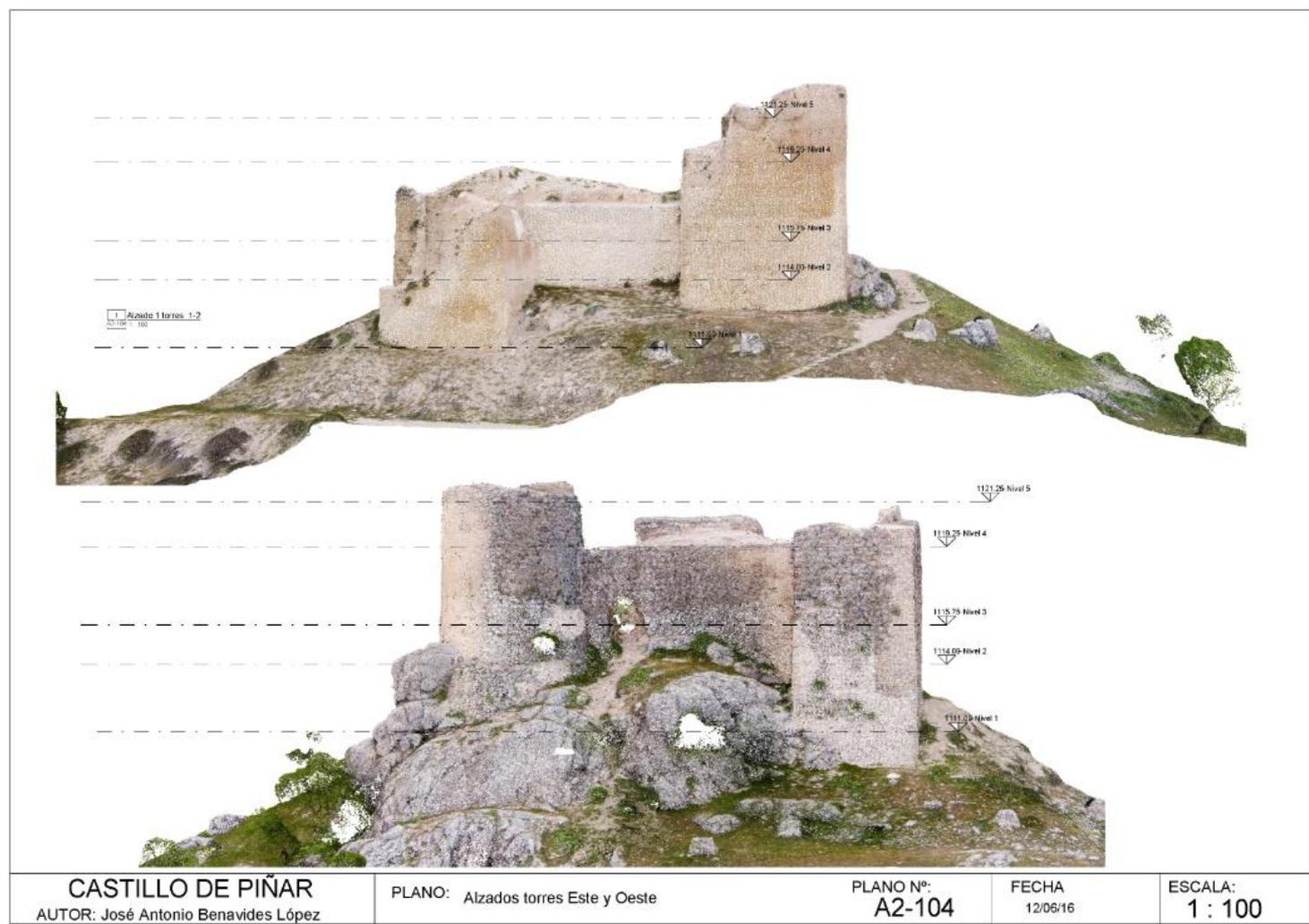
Plano de planta con ortofotografía general. Formato A2. Escala 1:250. Impresión con resolución media



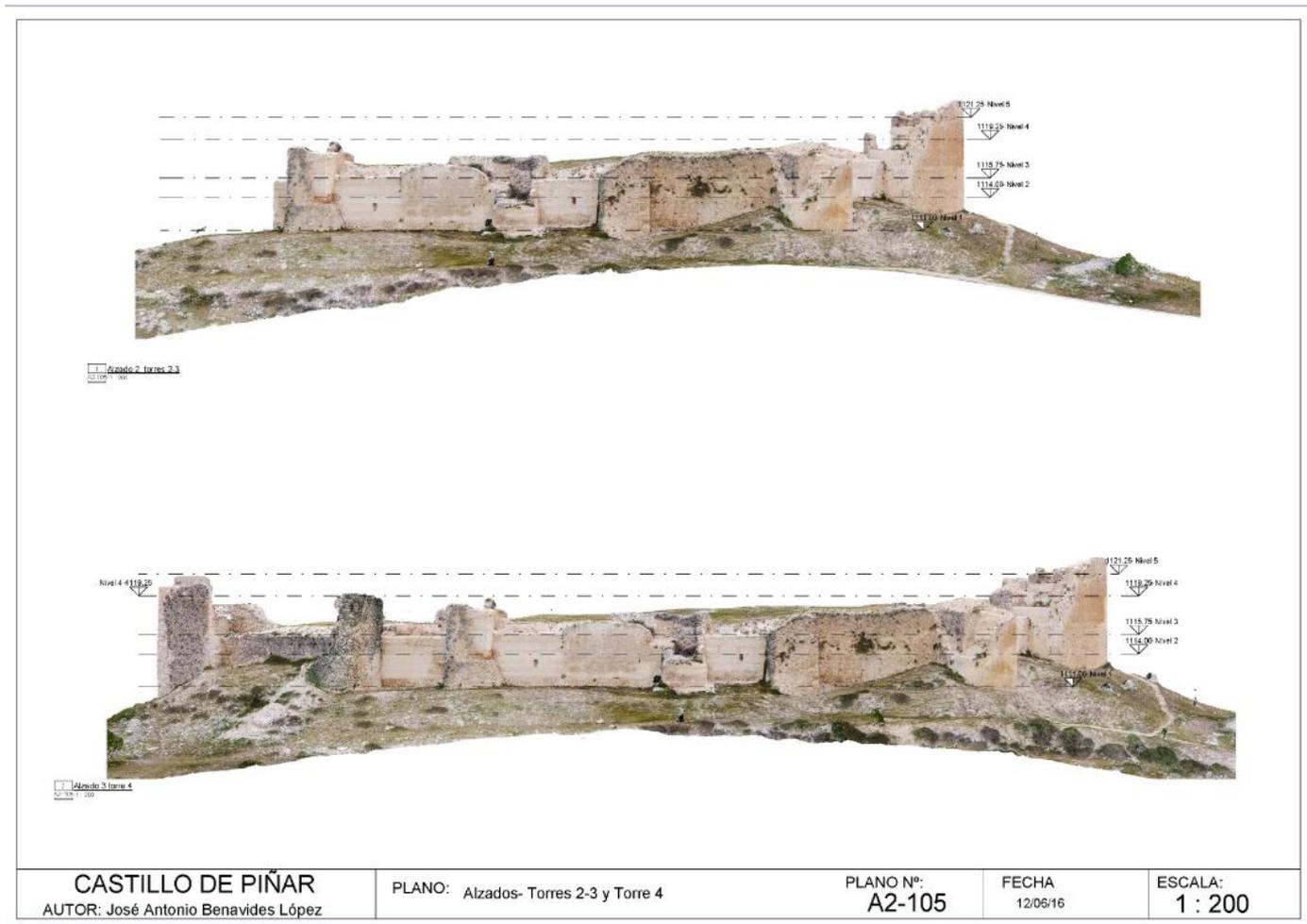
Plano de planta con ortofotografía general. Formato A2. Escala 1:250. La impresión en resolución alta crea un efecto semitransparente del modelo.



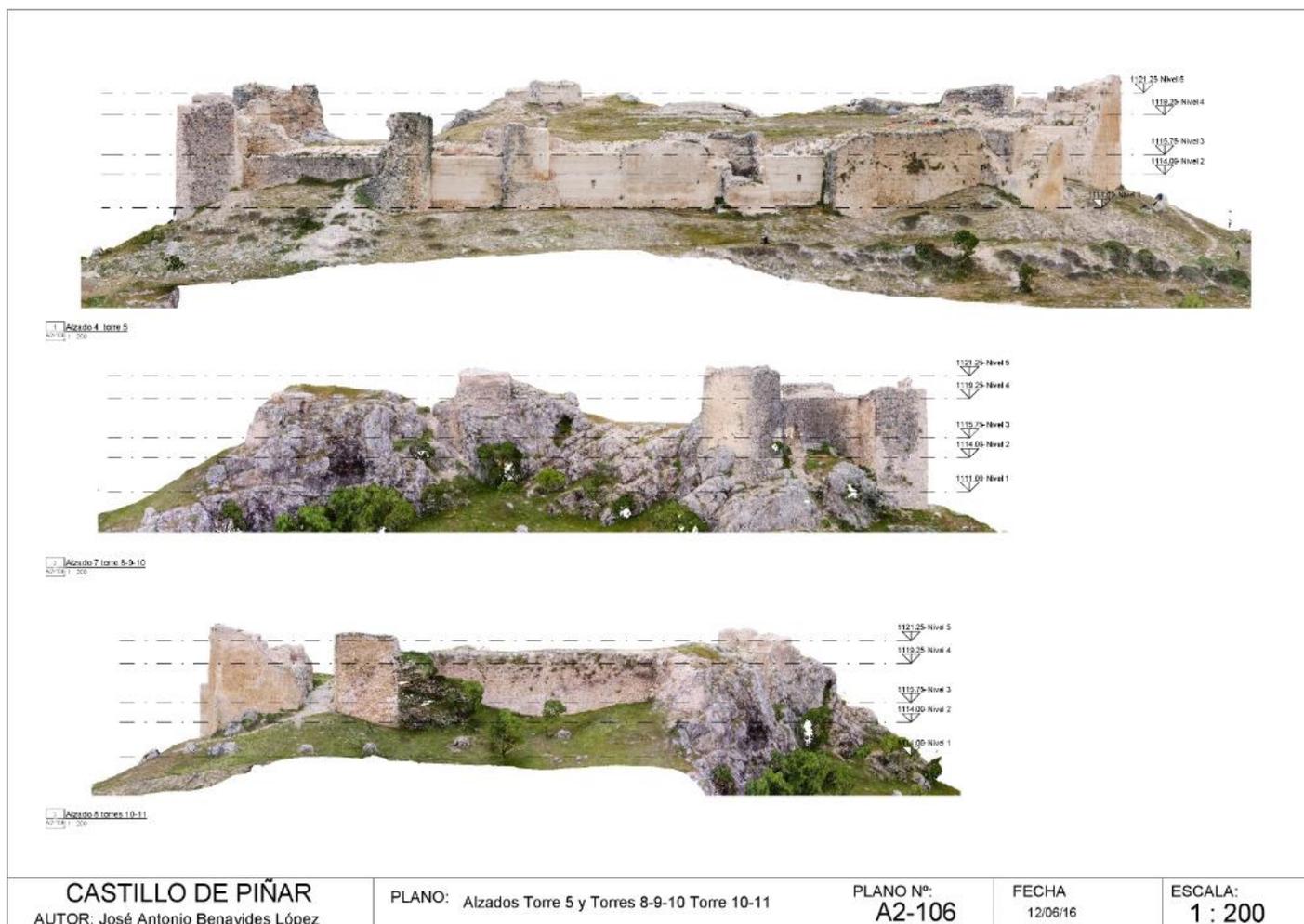
Plano de planta con curvas de nivel del terreno con equidistancia 1 m. Formato A2. Escala 1:250. Documento técnico con impresión vectorial.



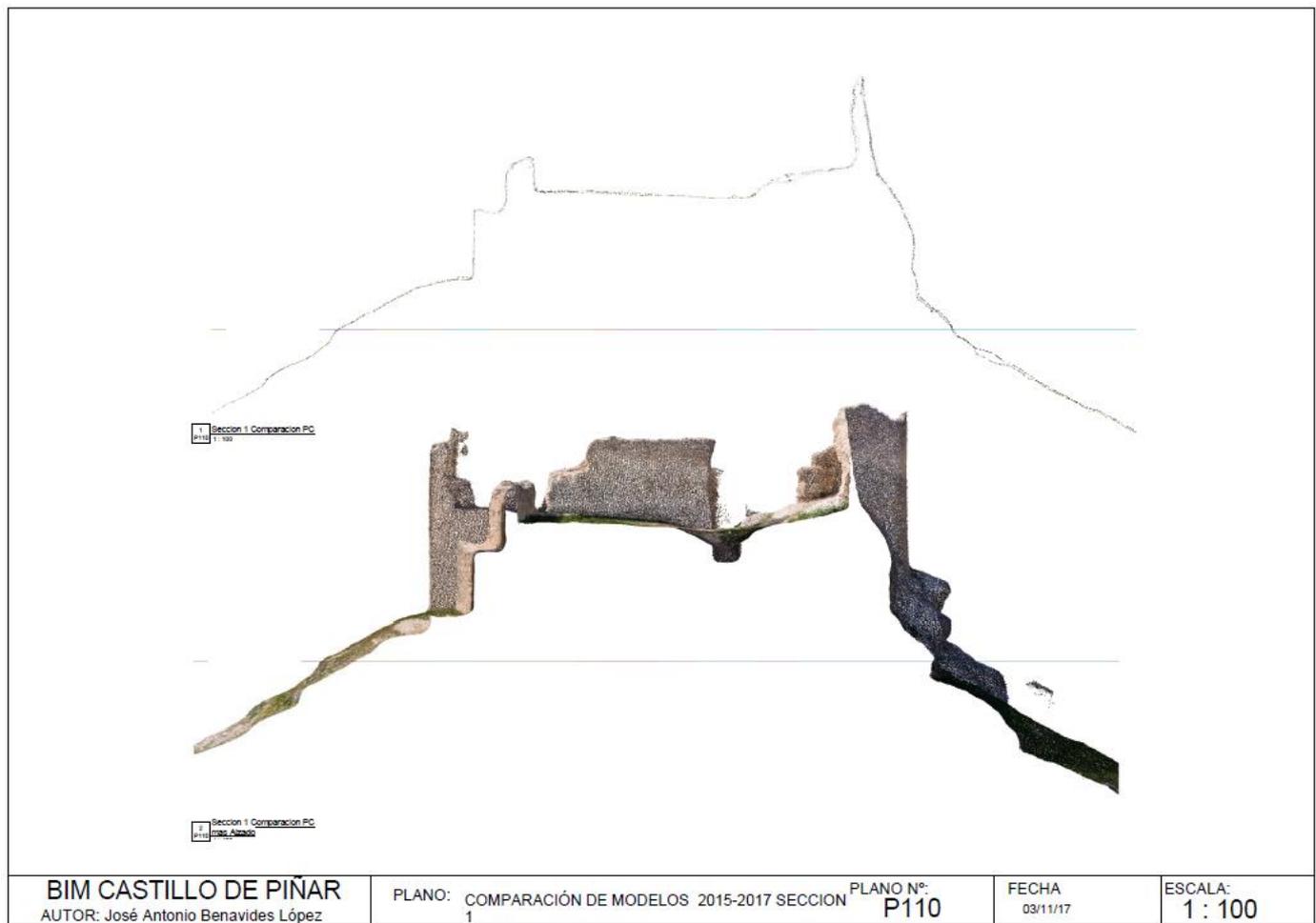
Plano con ortofotografías de alzados Este y Oeste, con indicación de los niveles de vista o cota.



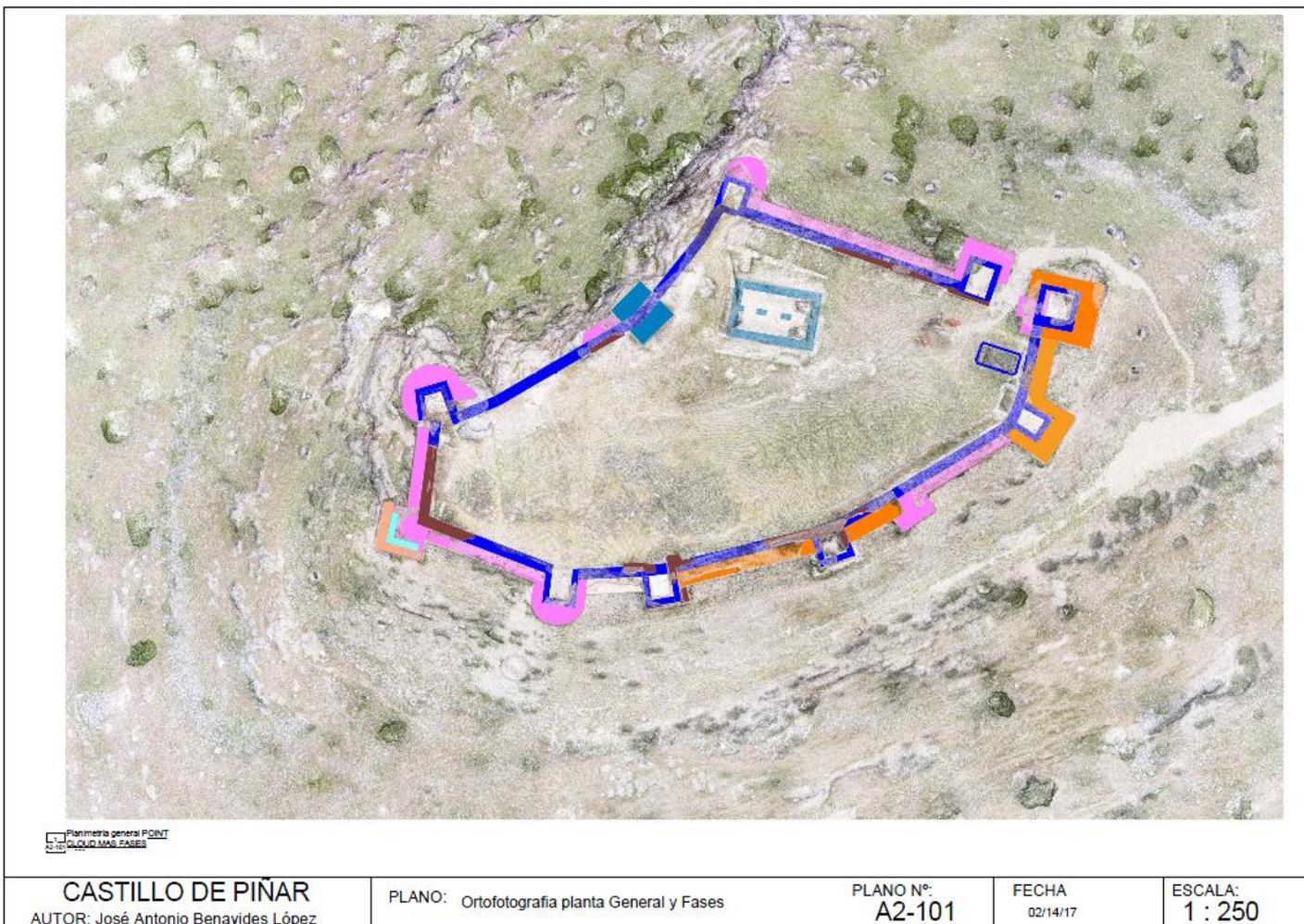
Plano con ortofotografías correspondientes a dos vistas del alzado sur.



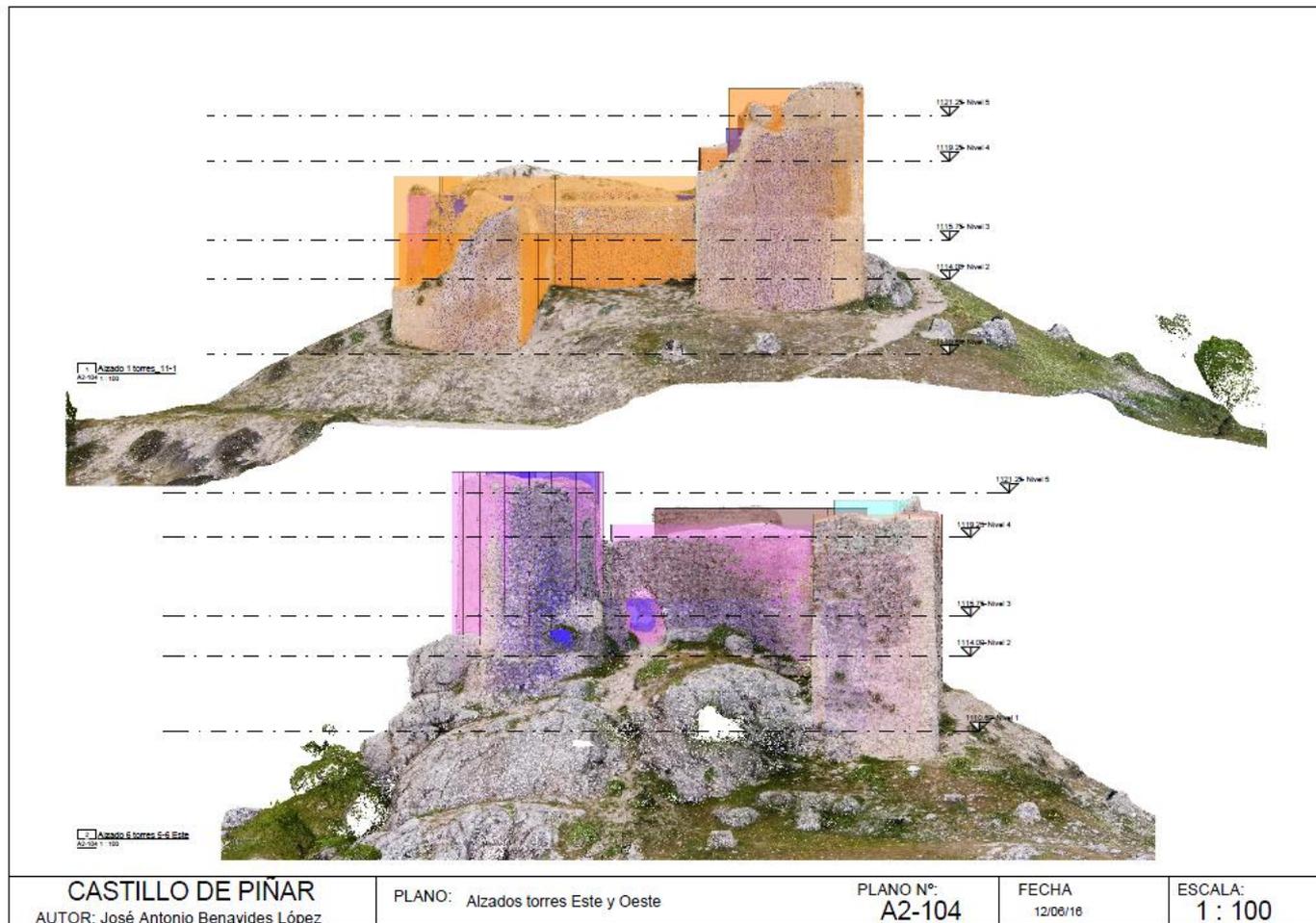
Plano correspondiente a la vista sur (torre 5) y a la zona norte.



Sección longitudinal de castillo con y sin alzado.



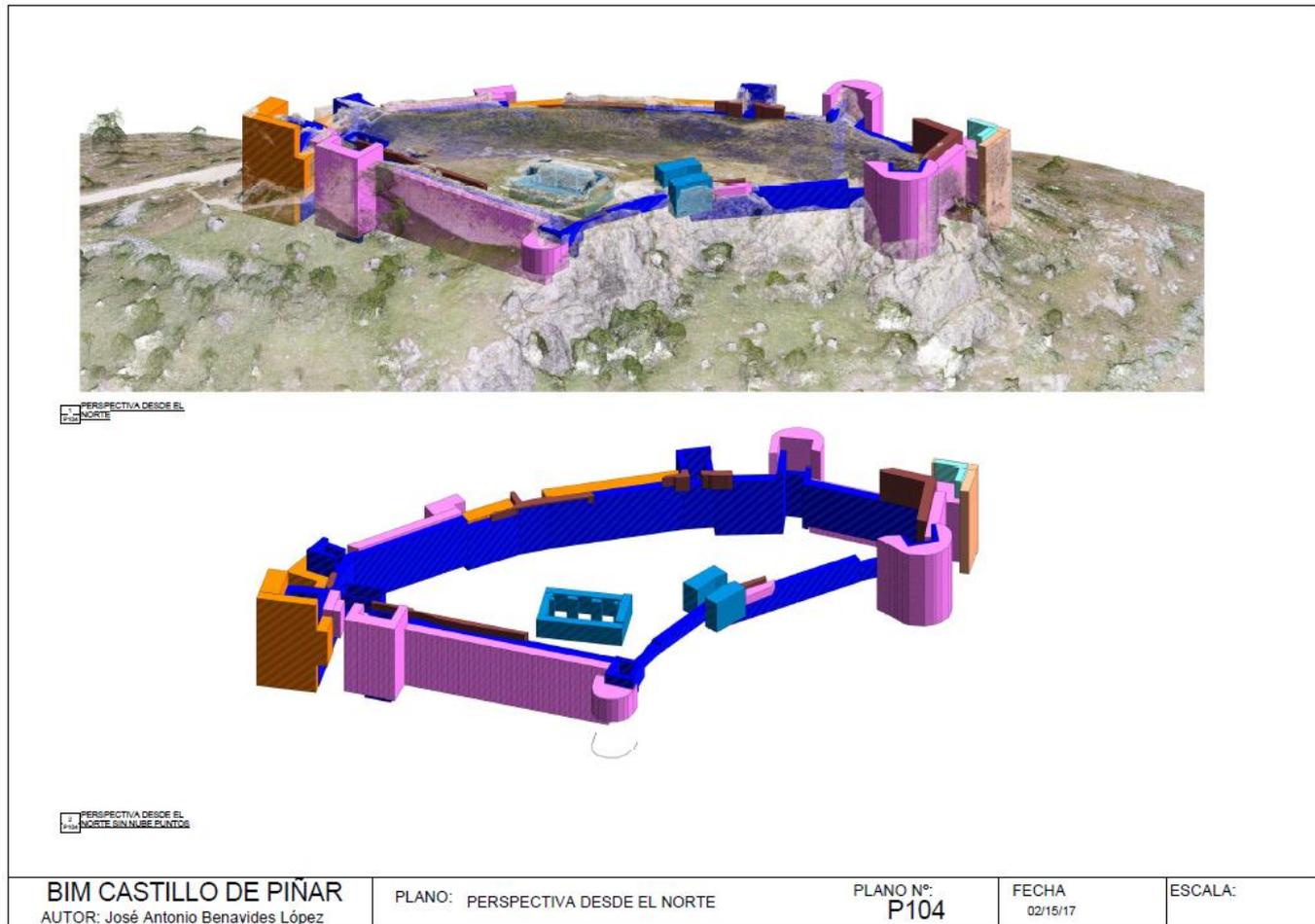
Plano con superposición de ortofotografía general en planta y fases constructivas. Formato A2. Escala 1:250. Impresión con resolución alta que los hace semitransparentes



Plano con superposición del modelo tridimensional de las fases constructivas sobre ortofotografías de las vistas Este y Oeste del castillo. Formato A2. Escala 1:100. Impresión con resolución alta que los hace semitransparentes



Plano de la vista sur del modelo tridimensional de las fases constructivas. En la vista superior se observa la superposición del modelo reconstruido sobre la nube de puntos. Formato A2.



Plano de la vista norte del modelo tridimensional de las fases constructivas. En la vista superior se observa la superposición del modelo reconstruido sobre la nube de puntos. Formato A2.



Plano de vistas este y oeste del modelo tridimensional de las fases constructivas. En la vista superior se observa la superposición del modelo reconstruido sobre la nube de puntos. Formato A2.

6 CAPÍTULO VI.- DISCUSIÓN

En este apartado nos proponemos valorar el resultado final del estudio, analizando las ventajas e inconvenientes de los nuevos sistemas de registro y documentación gráfica. Los resultados obtenidos nos permiten discutir sobre la efectividad de las nuevas tecnologías y los modos de gestión de la información así como comentar futuras líneas de mejora metodológica que podrían realizarse tras observar los resultados o posibles caminos con los que continuar complementando el proyecto.

La documentación actual del patrimonio arquitectónico y arqueológico necesita de un importante despliegue de medios técnicos para el registro de datos (*drones*, cámaras convencionales, escáner laser, estaciones totales, GPS, etc.), pero fundamentalmente exige una actualización continua de conocimientos por parte de los investigadores o usuarios no especializados sobre la gestión e extracción de información, necesaria para la adecuada documentación del Bien.

Vivimos una época de constantes cambios tecnológicos que impiden que, incluso los especialistas en una materia, conozcan y dominen todas las transformaciones instrumentales y metodológicas que cada día se van produciendo. Puede decirse que cada pocos meses surge un nuevo dispositivo o técnica que mejora a la anterior necesitando una importante inversión de tiempo y dinero para discriminar los beneficios que nos aporta y para adaptarnos a esa nueva forma de trabajo. Esta dinámica da lugar a que en muchos casos se priorice la tecnología a utilizar respecto de la verdadera finalidad de nuestro estudio. Por tanto, el verda-

dero avance no se encuentra en la propia técnica utilizada, sino en la conjugación de técnica y objetivos para obtener una optimización de los resultados.

Podemos decir que vivimos inmersos en una *Revolución Tecnológica* donde los procesos de conocimiento y gestión de la información se han democratizado, hasta tal punto que cualquier persona puede disponer, mediante una PC o incluso mediante un *Smartphone* de todos los contenidos científicos sobre cualquier área de conocimiento. Pero, aún más importante, dispone de infinidad de herramientas o aplicaciones de forma gratuita o a muy bajo coste, necesarias para la captura de datos y el registro de la información. Así, aplicaciones como *Recap-360* o *VisualSFM* permiten obtener modelos tridimensionales de nubes de puntos de forma gratuita e incluso procesarse y guardarse en la nube.

Tecnologías como el escáner laser de muy alto coste y compleja utilización, serán sustituidas de manera inmediata por estas nuevas tecnologías que además de su menor coste proporcionan datos de una forma más fácil, con mayor calidad y en menor tiempo.

La documentación del patrimonio mediante los dibujos tradicionales a escala de plantas, alzados y secciones ha constituido y constituye una fuente de conocimiento importantísima para el objeto de estudio. Pero estos dibujos, en la mayoría de los casos con una calidad gráfica excepcional y que podemos considerar auténticas obras de arte, han carecido del rigor métrico necesario para determinados análisis geométricos o históricos. A los errores propios de la medición con los instrumentos de la época, habría que añadir los errores del dibujo manual o la subjetividad de quien los interpretó y los dibujó. Los nuevos sistemas de registro sobre un soporte digital, fundamentalmente ortoimáge-

nes 2D o modelos 3D, permiten no solo ganar en precisión, sino dejar constancia de la interpretación y documentación realizada o incluso de la no registrada.

En cualquier caso, las espectaculares reproducciones tridimensionales que se obtienen de la realidad mediante las nuevas tecnologías digitales, siguen requiriendo un proceso interpretación por parte de los especialistas. Esta tarea, imposible de ejecutar, por ahora, por ninguna máquina, debe ser realizada por técnicos especialistas y plasmada sobre documentos gráficos que permitan un mayor conocimiento e intercambio de la información.

La mayoría de los documentos elaborados por las administraciones para la protección del patrimonio, constituyen manifiestos de buenos propósitos o guías de actuación de acuerdo al bien. Sin lugar a dudas la elaboración de algunos de ellos, como el *Plan Nacional del Arquitectura Defensiva* o la *Carta de Baños de la Encina* han contribuido a una mayor protección, pero el lamentable estado de conservación en el que se encuentran muchos de estos bienes, carentes de función y utilidad pública desde hace tiempo, hace que necesiten un mayor compromiso por parte de todos. El verdadero impulso para su protección ha de venir de la propia sociedad y de los poderes políticos que la representen. La protección del patrimonio pasa con convencer a la sociedad y a sus representantes de la importancia cultural y económica que el patrimonio representa para un pueblo. Como investigadores y miembros de la universidad es nuestra responsabilidad desvelar y transmitir estos valores, denunciando, si es necesario, la inacción por parte de los que tienen la responsabilidad de protegerlos.

No cabe duda de que los métodos tradicionales siguen siendo de aplicación en la documentación de muchos

elementos patrimoniales, sin embargo, los actuales requisitos de precisión, calidad y rentabilidad hacen necesario la incorporación y adaptación de los profesionales, investigadores y administraciones a las nuevas tecnologías digitales. Pero debemos tener en cuenta que, independientemente de la tecnología utilizada, el proceso de levantamiento (conocimiento integral), lleva inherente un estudio sosegado y atento de la configuración constructiva, formal e histórica del edificio o yacimiento, precisando en la mayoría de los casos de equipos multidisciplinares de especialistas para que los resultados sean los adecuados.

Consideramos que las ortofotografías constituyen el soporte más eficaz para la documentación y registro gráfico del patrimonio arquitectónico y arqueológico, pues aúnan en un mismo documento imagen y geometría. Son el instrumento técnico, descriptivo y analítico, que facilita la visualización, estudio e interpretación científica del objeto de estudio y de los procesos de alteración y degradación que le afectan, constituyendo además, una herramienta muy importante para la transmisión del conocimiento. Mediante la digitalización, los especialistas plasman en un documento gráfico a escala la información analizada e interpretada que nos aporta la imagen.

Los programas de CAD no están concebidos para mover el volumen de datos que proporcionan los modelos de nubes de puntos, por lo que consideramos que la inserción de ortofotografías escaladas sobre sistemas CAD sigue siendo, por lo general, el medio más eficaz para la documentación, comunicación y difusión del patrimonio. Las técnicas de documentación del patrimonio mediante modelos tridimensionales 3D son, sin duda, la solución más efectiva y precisa para los trabajos de investigación y difusión. Entendemos que esta

documentación realizada con dinero público debe estar disponible para la consulta de otros técnicos u organismos, proponiendo que los trabajos realizados formen parte del inventario y documentación dentro de los planes nacionales o autonómicos, al menos, mediante modelos tridimensionales en PDF por ser una herramienta versátil y universal.

La generación de modelos tridimensionales del Patrimonio cultural se ha convertido un tema de gran interés en los últimos años debido al uso extendido del escaneo láser y la fotogrametría multimagén. La capacidad de representar y analizar yacimientos y edificios históricos a través de modelos virtuales digitales en 3D permite un mejor registro y gestión del Patrimonio Histórico, convirtiéndose en la herramienta ideal en el proceso de documentación y diseño.

La cualidad adaptativa de los modelos de malla tridimensional unida a la posibilidad de aplicación de textura fotográfica los hace el medio ideal para la representación de las formas irregulares de la arquitectura histórica y de los restos arqueológicos. Pero estas entidades solo recubren la superficie de los elementos, estando carentes de materialidad. Las nuevas herramientas BIM constituyen una solución a este problema mediante el modelado adaptativo a estas superficies con elementos masivos a partir de primitivas o elementos paramétricos previamente diseñados.

El BIM es una técnica de modelado sólido en tres dimensiones basado en elementos constructivos capaces de integrar información de diverso tipo (características de los materiales, imágenes, datos administrativos, intervenciones, suministradores, etc. etc.), que lo

convierten en un gran contenedor y organizador de la información, o lo que es lo mismo, lo asimila a un SIG³¹³ o base de datos gráfica tridimensional.

Si bien los resultados que hemos obtenido en esta tesis son de alta calidad, no cabe duda que estas aportaciones deben permitir una mejora continua de futuros resultados. Con la metodología propuesta hemos conseguido solucionar la parte científica de la documentación y protección de patrimonio, queda ahora la difícil tarea transmitir a la sociedad los valores patrimoniales, culturales e históricos, para que esta labor se considere efectiva, provocando de este modo en un mayor respeto y protección hacia nuestro patrimonio.

En cualquiera de los casos, en la documentación del patrimonio arquitectónico o arqueológico sigue habiendo fases que son insustituibles por las nuevas tecnologías. Así, la representación de un edificio histórico o un yacimiento debe ir siempre precedida de un conocimiento del mismo, puesto que el dibujo de Arquitectura o la Arqueología se basa en una interpretación de la realidad construida o existente. La realización de un croquis a mano alzada constituye una parte importantísima en el proceso de pensamiento e interpretación constructiva del edificio. Poder observar, analizar o incluso tocar los elementos en el propio edificio es un hecho que no puede ser sustituido por las mejores imágenes sobre una pantalla.

Mientras los modelos 3D proporcionan una información más detallada sobre las formas, dimensiones y localización de las estructuras y su entorno, los documentos 2D son necesarios para una mejor estructuración de la información, facilitando su interpretación y

³¹³ SIG (acrónimo) Sistema de Información Geográfica (GIS en inglés): es un conjunto de herramientas que integra y relaciona diversos componentes que

permiten la organización, almacenamiento, manipulación, análisis y modelización de grandes cantidades de datos procedentes del mundo real y que están vinculados a una referencia espacial

comunicación entre los diferentes agentes que forman parte de la investigación. Independientemente del método de registro utilizado, la realización de ortofotografías o modelos tridimensionales texturizados nos van a permitir un registro permanente y verificable, incluso después de realizada la excavación o intervención.

La generación de modelos de superficie, a partir de nubes de puntos capturadas con escáner, implica la realización de complicados y costosos procesos de filtrado, suavizado, texturizado, etc. generando un modelo que no siempre cumple las expectativas esperadas. En muchos procesos, como el mapeado de texturas, no hay correspondencia entre el trabajo realizado con el resultado obtenido.

La gestión directa de nubes de puntos en entornos de CAD está permitiendo un ahorro importante en tiempo de post-procesado. La visualización del modelo de la nube de puntos mediante cortes (lonchas) constituye una ayuda importante para el dibujo interpretado de las secciones que permitan un adecuado estudio geométrico.

No coincidimos, en absoluto, con aquellos que abogan por la utilización de programas que confeccionan automáticamente planos a partir de las siluetas de los modelos de nubes de puntos o mallas, pues se pierde la verdadera esencia del análisis del levantamiento, convirtiendo una vez más al patrimonio en un producto de consumo más que en una fuente de conocimiento.

Todos los sistemas de captura utilizados en la actualidad tratan de obtener un modelo tridimensional que cumpla los requisitos de rigor métrico necesario para cada tipo de intervención. En algunos casos solo mediante la representación alámbrica y en otros mediante verdaderos modelos tridimensionales mediante la representación de nubes de puntos y mallas que se

adaptan a la morfología de las superficies, aportando además, otras cualidades no métricas como la textura de los paramentos (tipo de material, patologías, fases constructivas, intervenciones, estado de conservación, etc.). Estos sistemas constituyen hoy en día el elemento fundamental para los estudios, investigación, intervención y difusión del patrimonio.

Las investigaciones actuales sobre el uso de las nubes de puntos dedican un amplio espacio a los métodos de integración y gestión de datos, junto a otros procesos de mejora de la visualización de imágenes (ortoimágenes). Las experiencias llevadas a cabo mediante el uso integrado del *software* BIM (Building Information Modeling) y el levantamiento mediante nubes de puntos están consiguiendo el objetivo de relacionar, datos gráficos tridimensionales y datos semánticos característicos de los objetos representados.

En la actualidad, el análisis y representación de los edificios históricos se basa en los siguientes resultados producto de la captura en campo y el procesamiento posterior:

- Conjunto de puntos discriminados obtenidos mediante estación total.
- Nubes de puntos producto de la captura con equipos TLS (escáner laser terrestre) o fotogrametría multimagén.
- Modelos tridimensionales de malla producto de la triangulación de las nubes de puntos.
- Ortoimágenes digitales producto de las rectificación de una sola imagen o extraídas a partir de proyecciones paralelas del modelo tridimensional, mediante aplicación de texturas.

En el primer caso, la medición discriminada mediante estación total es utilizada fundamentalmente como elemento de referencia a las otras técnicas de captura masiva. La sola medición con estación total permite la

obtención de las directrices geométricas de los edificios mediante estructuras alámbricas simples, permitiéndonos obtener de forma rápida la representación de plantas, alzados, secciones. El modelo alámbrico tridimensional sin un soporte digital (ortofotografía) aporta poca o ninguna claridad a la representación, salvo que se tomen miles de puntos. La falta de certeza en un punto medido impide su utilización.

Mediante el empleo de la fotogrametría estereoscópica apoyada sobre puntos topográficos, es posible obtener la misma representación alámbrica, de forma más efectiva, mediante digitalizaciones sobre modelos estereoscópicos, lo que permite, en todo momento, cotejar la información gráfica sobre el modelo. La disponibilidad de los datos (imágenes digitales y puntos de apoyo topográfico) permite un registro diferido en el tiempo, permitiendo testear la fiabilidad de la restitución o comparar y analizar la evolución histórica del edificio o yacimiento.

La captura de datos mediante escáner láser o fotogrametría multimagen aportan nubes de puntos de alta densidad, generando modelos tridimensionales que constituyen un soporte eficaz para la obtención de otros documentos gráficos más comunes (plantas, alzados, secciones) de acuerdo a las necesidades específicas de la documentación o incluso modelos tridimensionales digitales soporte para el registro gráficos o el modelado conceptual mediante aplicaciones BIM o CAD-3D.

La captura de modelos mediante TLS (escáner láser terrestre), no dispone de la versatilidad de la fotogrametría multimagen respecto del coste de las intervenciones ni del tiempo de captura, obteniendo en la mayoría de los casos resultados incompletos debido a falta de visibilidad desde los puntos de toma. El coste de adquisición o alquiler es alto y su manejo es complejo por lo

que está especialmente indicada en aquellos elementos arquitectónicos de gran amplitud que requieren pocas posiciones para su captura o que tienen una textura o iluminación escasa (ejemplo: interiores de templos). La utilización de sensores activos permite la determinación geométrica de elementos complejos de forma simultánea a su captura, sin necesidad de realizar apoyos topográficos. El texturizado automático con imágenes procedentes de cámaras internas del escáner no resulta aceptable en la mayoría de los casos, necesitando la captura adicional de imágenes con cámara externas de alta calidad, controladas por el operador, pero con un importante trabajo de post-proceso para su alineación con el modelo. Los errores intrínsecos al sistema de medición laser, provocan superficies no homogéneas (rugosas) presentando una mala calidad en la aplicación de la textura. Los procesos de triangulación no están optimizados y menos aun cuando se superponen superficies capturadas desde diferentes posiciones de escáner.

Entre sus ventajas están:

- Rápida captura de nube de puntos. Los datos se presentan de manera inmediata.
- El proceso de captura está bastante automatizado.

Sus inconvenientes:

- Medición indiscriminada de objetos ajenos al elemento a documentar: personas, vehículos, mobiliario urbano, etc.
- Falta de homogeneidad en la resolución de la nube en función de la distancia o el ángulo de incidencia es uno de los principales inconvenientes que presenta la medición con escáner laser.
- Incertidumbre en la definición geométrica de los objetos mediante nube de puntos.

- Es necesario conjugar infinidad de variables matemáticas de ajuste no siempre bien definidas. Estos complejos ajustes queda fuera del control del operador salvo que se disponga de una importante especialización técnica.
- Coste importante de adquisición o alquiler.
- Necesita realizar múltiples cambios de posición para cubrir todo el objeto necesitando siempre de una amplio solape entre las diferentes tomas.
- Requiere el trabajo de al menos dos operadores.
- Importante trabajo de post-proceso para el filtrado, alineación y registro de las tomas.
- Las posiciones del escáner provocan, en la mayoría de los casos de estudio, zonas sin cobertura, bien por el relieve de los objetos o bien por falta de visión
- La captura fotográfica automatizada desde la posición del escáner provoca, en muchas ocasiones, imágenes de mala calidad (sub o sobre-expuestas, a contra sol, diferente iluminación de imágenes consecutivas, etc.). El tiempo de captura entre una y otra toma provoca un cambio de iluminación en los parámetros difícil de solucionar
- La captura de imágenes desde la posición del escáner (a distancia u oblicuas) produce texturas de mala calidad.
- La incorrecta adaptación de objetivo de la cámara (distancia focal) al área de escaneado provoca zonas de la nube de puntos sin textura, o en su defecto con una resolución geométrica deficiente.

La fotogrametría multimagen supera considerablemente en precisión, reducción de tiempos y economía de medios a sistemas directos tradicionales (topografía

y fotogrametría estereoscópica) así, como a los sistemas tecnológicamente más avanzados como el escáner laser:

- Proporciona un nivel homogéneo de registro de datos de toda la estructura, siendo en gran medida independiente del nivel de detalle.
- Proporciona una buena precisión absoluta en todo el elemento a medir. Esta precisión está condicionada por la resolución y calidad de las imágenes y la precisión de los puntos de apoyo.
- Respeto la integridad del elemento a documentar al no necesitar contacto. Se trata de un método no destructivo.
- La captura digital de los datos permite la conexión directa con sistemas CAD.
- Se obtiene un registro tridimensional completo, sin huecos, del elemento a documentar.
- Disminuye el riesgo del operador al no tener que acceder a zonas peligrosas como ocurre con los métodos directos.
- El archivo de los fotogramas posibilita una futura evaluación de los datos.

Sin embargo, es también importante reconocer sus limitaciones:

- Es una técnica que requiere especialización: se requieren conocimientos amplios de topografía, fotografía, geometría e informática.
- La realización de modelos o el trazado de dibujos de línea no siempre es sólida, sobre todo en aquellas zonas donde la textura es homogénea.
- Requiere conocimientos de fotografía para que el registro sea el óptimo.
- La legislación es rigurosa en cuanto a la captura de imágenes mediante UAV en zonas habitadas.

La evaluación de los modelos comparados mediante SFM y escáner laser aplicados a la Alcazaba de Guadix

y el Castillo de Píñar demuestra la completa supremacía del sistema fotogramétrico: La economía de medios; la reducción considerable de tiempo en la toma de datos; la capacidad y precisión para la captura de formas complejas o la representación hiperrealista mediante texturas, lo convierten actualmente, en el medio más eficaz para la documentación del patrimonio arquitectónico y arqueológico.

Calidad métrica: Los resultados del análisis de precisión a una distancia de captura de aproximada de 35 metros muestran una precisión del GSD de 1.1 cm. En este sentido, hay que destacar que el grado de resolución obtenido es inversamente proporcional a la manejabilidad del modelo y exige disponer de un equipo informático con mayores prestaciones.

La nube de puntos procesada en *Agisoft-Photoscan-pro* en coordenadas absolutas, es decir, mediante la orientación a través de puntos de apoyo topográficos georreferenciados, ha sido resuelta con un error medio cuadrático (RMS) de 3.41 centímetros. El RMS para la orientación planimétrica ha sido de 2.82 cm y 1.9 cm para la altimétrica.

La sencillez y versatilidad de este método es incuestionable. El manejo de la cámara fotográfica requiere una captura secuencial de imágenes desde puntos de vista adecuados, que eviten objetos intermedios, por lo que se recomienda el uso de UAV o jalones telescópicos. Las cámaras permitirán el disparo diferido desde el equipo de radio control o a través del teléfono móvil.

Los programas informáticos de modelado tridimensional mediante SFM utilizados son muy intuitivos, por lo que no se requiere una gran especialización por parte del usuario. La precisión del modelo depende esencialmente correcta captura de puntos de apoyo, tanto en la imagen como en la precisión y georreferenciación de la medición.

El registro espacial de diferentes modelos de un mismo objeto lo convierte en la herramienta ideal para cuantificar sus modificaciones. De igual forma, la superposición de diferentes modelos temporales de una misma excavación permite una contextualización de los diferentes estratos o artefactos registrados.

La gran capacidad de procesamiento de los equipos informáticos hace que cada día se realicen levantamientos más exigentes, en algunos casos con precisión milimétrica, pero con archivos de enorme volumen difíciles de gestionar y almacenar. En cualquier caso, el vertiginoso avance de los equipos informáticos hará que pronto puedan ser usados y gestionados con absoluta normalidad.

Las experimentaciones realizadas en cuanto a planificación del trabajo demuestran una importante mejora en cuanto al número de imágenes necesarias, su calidad radiométrica y al registro completo del objeto de estudio.

Por otro lado, debemos subrayar la rapidez de esta técnica: Se estima que el tiempo de fotografiado en ambos casos no superó los 120 minutos; el filtrado y ajuste de parámetros de exposición fotográfica 40 min. Por su parte, el tiempo de procesado mediante *software* para orientación de las cámaras, generación de nubes de puntos densa, modelado 3D mediante malla y texturizado del modelo variará en función del número de fotografías, su resolución geométrica y la densidad de datos exigida. Para la realización del modelo de la alcazaba de Guadix se ha empleado un tiempo de 53 horas, mientras que para el modelo optimizado del castillo de Píñar se han empleado 20 horas.

El uso combinado del UAV DJI Phantom y de una cámara convencional, junto con la utilización de Estaciones totales para la captura de puntos de apoyo y su procesado mediante *software* comercial como Agisoft

PhotoScan profesional o Pix4D hacen de esta técnica una de las más asequibles en términos económicos.

Para la explotación posterior del modelo nos hemos servido de diferentes aplicaciones de gestión de modelos tridimensionales:

- Ortofotografías a partir del modelo tridimensional realizado por Agisoft Photoscan y gestionado a través de Rhinoceros 5.0. De igual forma se han generado ortofotografías a partir de modelos en PDF-3D. La facilidad de uso y transferencia permiten ser usados por cualquier persona sin conocimientos sobre programas de diseño asistido.
- Modelos vectoriales tridimensionales a partir del modelo de malla 3D, de forma manual (AutoCAD 2017) o de forma automatizada (Rapidform XOS o Geomagic; Rhinoceros 5.0)
- Generación de modelos sólidos conceptuales óptimos para la gestión de bases de datos que manejan identificadores semánticos intrínsecos a los elementos o materiales (Revit 2017).

Por el contrario, el automatismo de estos sistemas está provocando que, en muchos casos, se elimine el proceso reflexivo del investigador, producto de la observación directa y meditada en campo, basando todos sus datos en la explotación posterior del modelo en laboratorio. De igual manera, el modelo obtenido, no deja de ser una reproducción digital escalada del modelo real, necesitando un trabajo de análisis y extracción de datos para su correcto conocimiento.

Por otro lado, el sensacionalismo que producen los medios tecnológicos hacen que, en algunos casos, se desvirtúe la verdadera finalidad de nuestro trabajo: El conocimiento integral del objeto de estudio como herramienta indispensable para su protección y conservación.

De igual modo, los resultados obtenidos: (modelos tridimensionales formados por nubes de puntos coloreadas; modelos tridimensionales de superficie formados por mallas de triángulos texturizadas; modelos tridimensionales de elevaciones mediante curvas de nivel, ortofotografías con diferente resolución, etc.), suscitan bastantes problemas en la difusión masiva, intercambio y conservación de estos datos. Los diferentes archivos de intercambio (PDF, WRML, OBJ, PLY, ASCII, TIF, RAW, JPG, LAS, etc.), no siempre son compatibles con todas las herramientas, necesitando conocer las virtudes y defectos de cada uno de ellos. El problema fundamental radica en la falta de conocimiento por parte de muchos profesionales o administraciones para tratar este tipo de datos. En otros casos, el enorme volumen de datos imposibilita la manejabilidad de modelo, incluso con los equipos informáticos más potentes. Su almacenamiento además obliga a disponer de discos duros de altísima capacidad.

La necesaria interpretación de los diversos datos recogidos en los modelos tridimensionales se realiza mediante la digitalización directa en modo alámbrico, o mediante modelos sólidos conceptuales, que obtenidos con herramientas BIM, aportan mayores ventajas en cuanto a la obtención de documentos gráficos y registro de la información, aunque, aún no son capaces de reproducir las irregularidades propias de los edificios históricos o restos arqueológicos.

La restitución manual de elementos a partir de los modelos u ortofotografías permite conseguir una gran precisión geométrica. La calidad geométrica y gráfica de las imágenes nos permite obtener un ortofotoplano en el que la restitución se realice solo en aquellos elementos que sean realmente de interés en función del

tipo de investigación o intervención a desarrollar, permitiendo en cualquier momento añadir mayor información.

La obtención de modelos tridimensionales en formato digital, abre nuevas perspectivas en cuanto al registro de elementos y datos espaciales. El uso, cada más extendido, del registro en la nube permite el acceso y utilización desde cualquier dispositivo móvil conectado a internet.

El estudio realizado ha superado con creces las expectativas prefijadas en la tesis, habiendo conseguido unos resultados de altísima calidad en cuanto al rigor métrico y resultados gráficos. Por otra parte, la aplicación de distintas técnicas nos ha permitido poder llevar a cabo una comparación y una evaluación de las mismas que es en parte también diacrónica. Efectivamente, a lo largo del tiempo en el que se ha desarrollado esta investigación hemos podido conocer la aparición de los láser escáner terrestres y aplicarlos de manera pionera en nuestro contexto, pero también hemos visto como el interés y su aplicabilidad han decaído y se han visto superados por otras técnicas como el SFM tal y como hemos visto.

Las irregularidades morfológicas recogidas por los modelos digitales tridimensionales (deformaciones, desprendimientos, materiales, etc.) hacen que el dibujo vectorial directo apoyado sobre el modelo no satisfaga los requisitos actuales de documentación. La solución considerada como más idónea en la actualidad consiste en la documentación gráfica en base a plantas, alzados y secciones realizadas a partir de ortofotografías a escala extraídas a partir del modelo tridimensional realista. Este registro aúna en un mismo documento: calidad métrica, análisis tipológico (tipo de material, estado de conservación, patologías) y testigo fiel y per-

manente de su estado en un momento dado, permitiendo además ser garante del análisis realizado, pudiendo incorporar elementos que no han sido considerados, ahora o en el futuro.

La conservación del patrimonio arquitectónico, posee una consideración ambivalente, por una parte es un bien común que nos identifica y nos enorgullece, y por otra, constituye una pesada carga económica para instituciones y propietarios encargados de su conservación.

Los recursos limitados de todas las administraciones obligan a realizar una gestión eficiente del patrimonio público y si bien no podemos pretender que este se autofinancie, es un objetivo primordial para las administraciones autonómicas y locales fomentar el valor de la cultura como motor del desarrollo económico. En este sentido, y consientes de estas limitaciones económicas, el *Convenio para la salvaguarda del Patrimonio Arquitectónico de Europa*, (Granada, 1985) recomienda, en su artículo 14, la necesidad de lograr la cooperación entre autoridades estatales, regionales y locales, las entidades y asociaciones culturales y el público en general, con objeto de promover el desarrollo del mecenazgo y de las asociaciones no lucrativas que actúan en este sector.

7 CAPÍTULO VII.- CONCLUSIONES

El concepto de patrimonio cultural ha ido evolucionado a lo largo de la historia en función de las circunstancias y valores socio-culturales de cada época. Esta nueva concepción ha sido tanto física (se ha pasado de la valorización del elemento aislados a la valorización del territorio, centro urbano o paisaje) como semántica, desde lo individual hasta lo colectivo y de lo concreto a lo intangible, provocando un cambio de mentalidad general sobre la necesidad de proteger y conservar el patrimonio.

A lo largo de la historia el patrimonio en general ha sido poco atendido o incluso abandonado o agredido. La preocupante situación de degradación en la que se encuentran requiere, entre otros, de la adopción de medidas adecuadas de índole técnica, administrativa y económica para su correcta protección y conservación. Esta nueva forma de entender el patrimonio ha dado lugar a políticas más activas de protección y revalorización, aunque, salvo contadas excepciones, estas políticas solo quedan reflejadas sobre documentos. La sola observación de nuestro patrimonio muestra el estado de abandono en el que se encuentra.

El Patrimonio cultural es una herencia común, una propiedad colectiva que se identifican con el ser mismo de un pueblo y por tanto, su protección ha de ser una labor que implica la participación de las administraciones y de la sociedad en su conjunto.

La mayor protección de las construcciones fortificadas recogida en la Ley 16/1985, que los declara BIC, solo ha servido para establecer una mera protección genérica de los mismos, pero no efectiva.

De acuerdo a la recomendación del Consejo de Europa del 11 de abril de 1991, la insuficiencia de los recursos públicos a la hora de patrocinar la conservación y la restauración de nuestro Patrimonio, obliga a emprender acciones de cooperación entre las administraciones estatales, regionales y locales, con la colaboración de entes privados mediante adecuadas medidas fiscales que incentiven su participación en la protección del patrimonio.

De igual manera, creemos muy importante la participación activa de la sociedad mediante el desarrollo de acciones culturales de colaboración entre los poderes públicos y a la sociedad civil.

El turismo constituye una importante fuente de financiación para la conservación y valorización del Patrimonio cultural. Posibilita conseguir beneficios sociales y laborales en los lugares donde su ubica. Pero, se debe establecer un equilibrio adecuado entre el valor cultural y el valor productivo de un Bien para su correcta protección.

El carácter destructivo de cualquier excavación arqueológica o intervención sobre el patrimonio provoca la pérdida irreparable de información histórica. El adecuado registro gráfico y documental mediante metodología arqueológica es la manera más eficaz para salvaguardar estos valores.

La documentación gráfica del patrimonio arquitectónico constituye la base fundamental sobre la que se apoyan otros trabajos de investigación, conservación y difusión.

Con el levantamiento se obtiene un conocimiento técnico, preciso y fiable del estado en el que se encuentra un Bien, tanto morfológico como dimensional. Su resultado debe consistir en un modelo tridimensional a través del cual se pueda analizar la obra y realizar una

lectura histórica, proyectual y constructiva del objeto de estudio.

Las nuevas tecnologías, laser escáner terrestre y sobre todo, fotogrametría multimagen han modificados los paradigmas en cuanto a captura de datos y obtención de resultados, ampliando sustancialmente sus posibilidades y mejorando la calidad y efectividad.

Mediante la generación de modelos digitales tridimensionales se consigue un adecuado y riguroso conocimiento de los Bienes Patrimoniales:

- *Sus cualidades geométricas y gráficas nos aportan un inventario georreferenciado de los elementos que lo constituyen y de su entorno, permitiéndonos identificar y valorar de forma objetiva el estado en que se encuentran.*
- *Permite el análisis geométrico de la definición constructiva, estructural y de materiales que lo forman, así como de sus lesiones o patologías.*
- *Permite la obtención de una documentación gráfica donde recoger los diferentes estudios o investigaciones (arqueológicas, artísticas, arquitectónicas, etc.) y en su caso, sirva de base para la elaboración del proyecto de intervención.*
- *Constituyen un instrumento importantísimo para la formación y difusión del conocimiento.*
- *Es un soporte de gran valor donde plantear hipótesis para su conservación, y gestión.*
- *Constituyen un registro permanente del estado de conservación en un momento. La comparación de estos modelos permite detectar las modificaciones y posibles patologías a las que puede estar afectado.*
- *Son una herramienta fundamental para la difusión, divulgación y socialización del conocimiento y, por tanto, para la contribución a su preservación.*

Pero no debemos olvidar que el estudio, conservación y difusión del patrimonio requiere algo más que su reproducción exacta, mediante imágenes o modelos tridimensionales. En este sentido, es necesario advertir que los levantamientos realizados con escáner laser, con fotogrametría o con cualquier otra técnica de medición no constituyen un fin en sí mismo, sino que son el soporte donde plasmar los distintos análisis que deben realizarse sobre el objeto de estudio.

Las investigaciones realizadas demuestran que la fotogrametría multimagen supera considerablemente en precisión, calidad gráfica, reducción de tiempos y economía de medios a los sistemas tecnológicamente más avanzados como el escáner laser. Además, su facilidad y automatización de los procesos permiten su uso por profesionales o investigadores sin alta especialización.

La fotogrametría multimagen es un método basado en imágenes que facilita de forma sencilla y precisa la generación de un modelo digital tridimensional hiperrealista de cualquier objeto, edificio o espacio que pueda ser fotografiado desde distintas posiciones consiguiendo la captura completa del objeto de estudio.

La buena calidad gráfica de los documentos obtenidos, tanto a nivel métrico como de imagen fotorrealista, constituye una herramienta muy potente para la interpretación e investigación de patrimonio arquitectónico y arqueológico.

El bajo coste del equipo, formado por cámara fotográfica convencional, equipo UAV básico, ordenador personal y programas, permite a cualquier profesional o equipo de trabajo su adquisición, democratizando el

proceso de documentación. Sin embargo, las aplicaciones de *software* libre para el procesamiento SFM no satisfacen, por el momento, las necesidades de calidad y rigor métrico exigidas en los trabajos de investigación.

La documentación gráfica es una de las herramientas imprescindibles para la preservación de los valores culturales materiales de los yacimientos arqueológicos y de los edificios históricos y constituye la base para su investigación, conservación y difusión. Sobre los documentos gráficos se podrá plasmar, coordinar o analizar las diferentes disciplinas de estudio, estableciendo las correspondientes relaciones entre ellas.

Los nuevos sistemas de registro gráfico permiten un considerable aumento de la precisión gráfica y métrica respecto de los métodos tradicionales, reduciendo la subjetividad y facilitando la obtención de una documentación cada vez más completa y exhaustiva. Pero, por el contrario, están causando cierto desconcierto en cuanto al tipo de documentación que se debe generar, sus formas de transferencia y comunicación o la forma de almacenamiento.

La complejidad geométrica y morfológica de un edificio o yacimiento hace que un adecuado levantamiento no se limite a la realización de unos cuantos planos de planta o alzados, necesitando el registro completo mediante la generación de modelos tridimensionales. Pero, la complejidad del manejo y gestión de datos sobre estos modelos requiere una simplificación y sistematización mediante la obtención de planos bidimensionales.

Por tanto, el flujo de trabajo a desarrollar será el siguiente:

- Obtención del modelo tridimensional completo a partir de las nuevas tecnologías (nubes de puntos o mallas texturizadas).
- Obtención de planos 2D geolocalizados a partir de modelo 3D;
- Análisis, dibujo y extracción de datos relevantes sobre los documentos 2D.
- Integración de los datos en su referencia tridimensional para un análisis en conjunto.

Es decir, la gestión de estos nuevos resultados gráficos (nubes de puntos, mallas texturizadas, etc.), consisten en obtener representaciones bidimensionales (planos de planta, alzados, secciones u ortofotografías) a partir de ellos.

Las ortofotografías digitales han supuesto un importante avance para la documentación del patrimonio pues unen, en un mismo documento, aspectos dimensionales y cualitativos. Disponen de una geometría equivalente a un plano donde las medidas lineales, angulares y superficiales a escala, se corresponden con las del elemento a documentar. A la facilidad de interpretación, incluso por usuarios no expertos, se une el poder de transmisión de las cualidades de los materiales y de su estado de conservación o de deterioro. De igual manera, las ortofotografías proporcionan información sobre el entorno donde se encuentra el bien a documentar.

En este sentido, la facilidad de manejo y operatividad de la herramienta PDF, la convierte en un instrumento ideal para la visualización y obtención de documentos gráficos, permitiendo a otros profesionales, investigadores y administraciones utilizarlos como fuente de información para futuras intervenciones o investigaciones. Consideramos que debe ser uno de los requisitos mínimos

exigidos por las administraciones para la gestión actual y futura de los bienes patrimoniales, pues a sus cualidades gráficas se une el requisito de estar georreferenciados en coordenadas universales.

La inmensa información que se genera de un Bien unido a la ya existente, hace que el propio investigador y más aún las administraciones competentes no sean capaces de gestionar o simplemente organizar todos los documentos de que se disponen, produciendo, en la mayoría de casos, un desconcierto sobre cuál es el documento a utilizar. Por ello, proponemos que se debe regular o normalizar el modo de registro patrimonial, exigiendo como mínimo a todo levantamiento:

- Estar georreferenciado y orientado en un sistema universal.
- Realización de una modelo tridimensional actualizado mediante nube de puntos o mallas texturizadas, y exportado en formato ASCII, WRL y PDF-3D
- Representaciones en documentos 2D mediante formatos de intercambio seguros (DXF, PDF) que incluyan todas las plantas, alzados y secciones necesarios para la perfecta definición de un bien
- Organización de capas normalizadas.
- Normalización del nombre de archivos y fecha de realización. Proponemos (aaaa-mm-dd-nºprovincia_nºmunicipio-ref catastral -signatura bien patrimonial-vista nºplano)
- **:(20170420-18500-7983401VG8278D0001KZ-ALC-PLANTA02)**. Permite un orden estricto por Bien patrimonial y de acuerdo a su fecha. En este sentido los sistemas SIG o BIM permiten interrelacionar de forma gráfica todos estos archivos.
- La incorporación de documentos guía que indiquen la organización seguida o las modificaciones no normalizadas.

La falta de materialidad de los modelos alámbricos o de malla queda solucionado mediante un modelado sólido adaptativo con herramientas BIM, permitiendo el registro de las características físicas y documentales de cada uno de sus componentes constructivos, o lo que es lo mismo en un gran contenedor de datos (documentos, gráficos, imágenes, etc.)

La asignación de atributos como material, fabricante, fecha, notas clave, etc., permiten una gestión gráfica similar a un SIG

La alcazaba de Guadix se encuentra en un lamentable estado de abandono por parte de las administraciones competentes, fundamentalmente el Ayuntamiento de Guadix, actual propietario del conjunto. Este abandono está provocando procesos de degradación evidentes, hasta el punto que no se acometen obras de consolidación de elementos en grave riesgo de destrucción. De igual forma, se producen actos vandálicos (destrucción provocada de algunos elementos, pintadas, incendios provocados, etc.) sin que se tome ninguna precaución para evitarlos.

Por su parte, el castillo de Píñar fue restaurado y consolidado en 2014, por lo que se encuentra en buen estado de conservación. Sin embargo, necesita de un proyecto de puesta en valor, mediante visitas guiadas, que satisfagan las necesidades culturales de los visitantes.

8 FUTURAS LÍNEAS DE ACTUACION.

- En la actualidad, como miembro del proyecto PREFOTI (Metodología sostenible de conservación y mantenimiento de fortificaciones medievales de tierra del sudeste de la Península Ibérica), estamos realizando levantamientos sistemáticos mediante fotogrametría multimedial capturada mediante *drone*, de las fortificaciones realizadas en tapial en las provincias de Granada, Almería y Murcia, al objeto de realizar un inventario mediante modelos digitales tridimensionales que informen de sus características y del estado de conservación de estas construcciones.
- Entre las futuras líneas de actuación nos proponemos realizar un inventario documentado mediante modelos 3D de aquellos elementos patrimoniales catalogados como BIC, que estén en situación de riesgo, que informen de su estado de conservación y que permita a los investigadores desarrollar sus intervenciones y a las administraciones competentes programar actuaciones. La disposición de estos modelos se realizará a través del repositorio de la Universidad de Granada.
- Formar a profesionales y alumnos en las técnicas de documentación de patrimonio.
- En base a las experimentaciones realizadas sobre la gestión de modelos 3D en archivos PDF nos proponemos difundir las posibilidades que aporta esta herramienta para la documentación y registro del patrimonio y plantear a las administraciones la exigencia de este tipo de archivos como uno de los requisitos para la gestión actual y futura de los bienes patrimoniales
- Profundizar en la investigación sobre el registro gráfico y gestión de unidades estratigráficas y artefactos de las excavaciones arqueológicas y análisis sobre las transformaciones históricas de los edificios mediante herramientas BIM.

—

9 BIBLIOGRAFIA

- ACKERMANN, F. (1984) Digital image correlation: performance and potential application in photogrammetry. *The Photogrammetric Record*, 1984, vol. 11, no 64, p. 429-439.
- ADAM, J. P. (1988) L'arte di costruire presso i Romani. Materiali e tecniche. Longanesi & C. ISBN 88-304-0855-7, Milan, Italy (in Italian), 1988.
- AGARWAL, S, et al. (2011) Building rome in a day. *Communications of the ACM*, vol. 54, no 10, p. 105-112.
- AGUIRRE DE MATA, J. (2016). Calibración geométrica de cámaras no métricas. Estudio de metodologías y modelos matemáticos de distorsión *Doctoral dissertation, Topografía*.
- ALBERTZ, J. (2002) Albrecht Meydenbauer-Pioneer of photogrammetric documentation of the cultural heritage. *International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 34, no 5/C7, p. 19-25.
- ALMAGRO GORBEA, A. (2004). Levantamiento arquitectónico. Universidad de Granada.
- ALMAGRO GORBEA, M., 2002. La Real Academia de la Historia y la arqueología española. S. Quero Castro, A. Pérez Navarro (d.), *Historiografía de la arqueología española*. Las instituciones, Madrid, Museo de San Isidro, pp. 47-81
- ALMAGRO GORBEA, A. (1991). La torre de Romilla. Una torre nazarí en la Vega de Granada. *Al-Qantara*, 12(1), 225.
- ALMAGRO, A., et al. (1999) Verso la "Carta del Rilievo Architettonico": testo di base per la definizione dei temi.
- ALVAREZ GONZALEZ, I., LOPETEGI GALARRAGA, A. L., MESANZA MORAZA, A., RODRÍGUEZ MIRANDA, Á., VALLE MELÓN, J. M., VICENTE ESPINA, I. (2003). Diferentes propuestas para la representación geométrica de edificios históricos. *Arqueología de la Arquitectura*, (2), 9-12.
- ANGÁS PAJAS, J A; SERRETA OLIVÁN, A.(2012) Métodos, técnicas y estándares para la documentación geométrica del patrimonio cultural. *Virtual Archaeology Review*, 2012, vol. 3, no 5, p. 38-42.
- ANGULO FORNOS, R. (2012). Construcción de la base gráfica para un sistema de información y gestión del patrimonio arquitectónico: Casa de Hylas. *Arqueología de la Arquitectura*, (9), 11-25.
- ARÉVALO, F. (2003) La representación de la ciudad en el Renacimiento. Levantamiento urbano y territorial, Barcelona, Fundación Caja de Arquitectos.
- ARGAN, Giulio Carlo; CONTARDI, Bruno.(1984) Historia del arte como historia de la ciudad.
- ARÓSTEGUI, Julio.(1995) La Investigación Histórica teoría y método.
- ASENJO SEDANO, C. (1983). Guadix la ciudad musulmana del siglo XV y su transformación en la ciudad neocristiana del siglo XVI. Granada: Diputación Provincial.
- ASENJO SEDANO, C. (2000). Arquitectura religiosa y civil de la ciudad de Guadix. Siglo XVI.
- ÁVAREZ GONZÁLEZ, I., E LOPETEGI GALARRAGA, A., MESANZA MORAZA, A., MIRANDA, Á. R., VALLE MELÓN, J. M., & ESPINA, I. V. (2003). Diferentes propuestas para la representación geométrica de edificios históricos. *Arqueología de la Arquitectura*, (2), 9-12.
- AZUAR, R. (2004). Las técnicas constructivas y la fortificación almohade en al-Andalus. Los almohades. Su patrimonio arquitectónico y arqueológico en el Sur de al-Ándalus, Sevilla, 57-74.
- BALTSAVIAS, E. P. (1999). A comparison between photogrammetry and laser scanning. *ISPRS Journal of photogrammetry and Remote Sensing*, 54(2), 83-94.
- BALZANI, M., PELLEGRINELLI, A., PERFETTI, N., & UCCELI, F. (2002). A terrestrial 3d laser scanner-accuracy tests. *International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 34(5/C7), 445-453.
- BARBER, D., & MILLS, J. (2007) WWW, ENGLISH_HERITAGE 3D Laser Scanning for Heritage, Advice and Guidance to users on laser scanning in archaeology and architecture.
- BARBER, D., MILLS, J AND BRYAN, P, (2003) Towards a standard specification for terrestrial Laser scanning of cultural heritage. in *CIPA International Archives for Documentation of Cultural Heritage*.
- BARRERA VERA, J. A. (2006). Aplicación de tecnologías innovadoras en la documentación geométrica del Patrimonio Arquitectónico y Arqueológico.
- BARRERA VERA, J. A., PEREZROMERO, A., ORTIZ MARÍN, R., & COBO GUTIÉRREZ, C. (2011). Nuevas tecnologías en levantamientos aplicadas a la restauración: "El Giralddillo". *Virtual Archaeology Review*, 2(3), 115-120.
- BENAVIDES LOPEZ, J. A., BARRERA VERA, J. A., & MARTÍN CIVANTOS, J. M. (2012). Documentación gráfica del patrimonio: Un paso adelante. In *XI Congreso Internacional de Expresión Gráfica aplicada a la Edificación*, Valencia. 29, 30 de noviembre y 1 de diciembre de 2012 (pp. 590-594).
- BENAVIDES LOPEZ, J. A., ESQUIVEL JIMENEZ, F., & ESQUIVEL GUERRERO, J. A. (2015). Nuevas aportaciones al estudio métrico y geométrico del dolmen de Viera (Antequera, Andalucía). *Menga: Revista de prehistoria de Andalucía*, (6), 201-208.

- BENAVIDES LOPEZ, J., ARANDA JIMENEZ, G., SANCHEZ ROMERO, M., ALARCON GARCIA, E., FERNANDEZ MARTIN, S., LOZANO MEDINA, A., & ESQUIVEL GUERRENRO, J. (2016). 3D modelling in archaeology: The application of Structure from Motion methods to the study of the megalithic necropolis of Panoria (Granada, Spain). *Journal of Archaeological Science: Reports*, 10, 495-506.
- BIOSCA TARONGER, J. M., NAVARRO TARIN, S., & LERMA GARCIA, J. L. (2007). Modelado tridimensional de una bóveda barroca mediante la combinación de láser escáner y fotogrametría. *7 Setmana Geomàtica*, 20-23.
- BONNEVAL, H. (1972) Photogrammétrie générale. 1. Enregistrement photographique des gerbes perspectives. Eyrolles.
- BRAVO DEL FRESNO, I. (2010). Transformaciones urbanas y arquitectónicas en una ciudad andalusí tras la conquista cristiana: El caso de Guadix. *Arqueología y Territorio*, (7), 119-133.
- BRINKER, Russell C.; WOLF, Paul R. (1982) Topografía moderna. Harla,
- BROGIOLO, G P; CAGNANA, A (ed.).(2012) Archeologia dell'architettura-metodi e interpretazioni. *All'Insegna del Giglio*, 2012, pag7.
- CABALLERO ZOREDA, L. (2002) Sobre límites y posibilidades de la investigación arqueológica de la arquitectura. De la estratigrafía a un modelo histórico. *Arqueología de la Arquitectura*, no 1, p. 83-100.
- CABALLERO ZOREDA, L. (2006). El dibujo arqueológico1.
- CABALLERO ZOREDA, Luis. (1996) El análisis estratigráfico de construcciones históricas. En *Arqueología de la arquitectura: el método arqueológico aplicado al proceso de estudio y de intervención en edificios históricos: actas. Consejería de Educación y Cultura*, p. 55-74.
- CABRELLES, M., & LERMA GARCÍA, J. L. (2013). Documentación 3D de abrigos rupestres a partir de láser escáner y de procesos fotogramétricos automatizados. *Virtual Archaeology Review*, 4(8), 64-68.
- CANIVELL, J., & GARCÍA, A. G. (2015). Caracterización constructiva de las fábricas de tapia en las fortificaciones almohades del antiguo Reino de Sevilla. *Arqueología de la Arquitectura*, (12), 025.
- CARANDINI, A. (1997). Historias en la tierra: manual de excavación arqueológica.
- CARPICECI, Marco, et al. (1986) Leonardo: la misura e il segno. Edizioni Kappa.
- CARRASCO, J., PACHÓN, J. A., ADROHER, A., & LÓPEZ, A. (2002). Taller metalúrgico de fines del bronce en Guadix (Granada): contribución a la contextualización de las fíbulas de codo tipo Huelva en Andalucía Oriental. *Florentia Iliberritana*, (13), 357-385.
- CHARQUERO, A. M., & LOPEZ, J. A. (2012). Registro tridimensional acumulativo de la secuencia estratigráfica. Fotogrametría y SIG en la intervención arqueológica de lo Boligni (Alacant). *Virtual Archaeology Review*, 3(5), 81-88.
- CHOAY, F., 1993. Alegoría del patrimonio: monumento y monumento histórico. *Arquitectura Viva*, no.33 (1993 nov.), p.15-21,
- CHUECA PAZOS, M., HERRÁEZ BOQUERA, J., & BERNÉ VALERO, J. L. (1996). Métodos topográficos. TOMO II Paraninfo SA MADRID.
- CIGNONI, P., CORSINI, M., & RANZUGLIA, G. (2008). Meshlab: an open-source 3d mesh processing system. *Ercim news*, 73(45-46), 6.
- CLAPUYT, F et al. (2016) Reproducibility of UAV-based earth topography reconstructions based on Structure-from-Motion algorithms. *Geomorphology*, 2016, vol. 260, p. 4-15.
- CORSINI, M, et al. (2013). Fully automatic registration of image sets on approximate geometry. *International journal of computer vision*, vol. 102, no 1-3, p. 91-111.
- CUNDARE, Cesare; CARNEVALI, Laura. (2000) Il rilievo dei beni architettonici per la conservazione. Edizioni Kappa, 2000
- DALLAS, R. W. A. (1996). Architectural and archaeological photogrammetry. *Close range photogrammetry and machine vision*, 283-303.
- DE REU, J, et al. (2013). Towards a three-dimensional cost-effective registration of the archaeological heritage. *Journal of Archaeological Science*, vol. 40, no 2, p. 1108-1121.
- DIAZ MORENO, F. (2014) Los diez libros de arquitectura de Vitruvio, en la traducción de José Ortiz y Sanz.
- DOCCI, M; MAESTRI, D (1993). Storia del rilevamento architettonico e urbano.
- DOCCI Y MAESTRI (2010), Manuale di rilevamento architettonico e urbano. *Nuova edizione ampliata*.220.
- DOMÍNGUEZ GARCIA-TEJERO, F. (1993). Topografía general y aplicada. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid.
- DOMINGUEZ I., VILLAVARDE, V., LOPEZ, E., LERMA, J. L., & CABRELLES M. (2013). Reflexiones sobre las técnicas de documentación digital del arte rupestre: la restitución bidimensional (2D) versus la tridimensional (3D). In *Cuadernos de arte rupestre (Vol. 6, pp. 21-32)*. Dirección General de Bienes Culturales de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia.
- DONEUS, M, et al. (2011). From deposit to point cloud—a study of low-cost computer vision approaches for the straightforward documentation of archaeological excavations. *Geoinformatics FCE CTU*, 2011, vol. 6, p. 81-88.

- DONEUS, M. & NEUBAUER, W. (2005). Laser scanners for 3D documentation of stratigraphic excavations. In: International Workshop on Recording, Modeling and Visualization of Cultural Heritage, Ascona, Switzerland, May 22-27.
- DORE, C., & MURPHY, M. (2012, September). Integration of Historic Building Information Modeling (HBIM) and 3D GIS for recording and managing cultural heritage sites. In *Virtual Systems and Multimedia (VSMM), 2012 18th International Conference on* (pp. 369-376). IEEE.
- EL-HABROUK, H.; LI, X.P. Y FAIG, W. (1996). Determination of geometric characteristics of a Digital Camera by Self-Calibration. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXXI (B1)*, 60-64
- ESQUIVEL GUERRERO, J. A., MORENO ORTEGA, J. J., & ESQUIVEL SUÁREZ, F. J. (2009). Modelo 3D mediante laser-scanner del Teatro Romano de Acinipo.
- ESQUIVEL, J. A., BENAVIDES, J. A., & GONZÁLEZ, C. (2012). Utilización de un modelo digital mediante laser escáner 3D para la documentación y restauración del Castillo de Píñar (Granada, Andalucía). In *I Congreso Internacional "El patrimonio cultural y natural como motor de desarrollo: investigación e innovación"* (pp. 2171-2179). Universidad Internacional de Andalucía.
- ESQUIVEL, J. A., BENAVIDES, J. A., & ESQUIVEL, F. J. (2012). El análisis de la forma de onda de los escáneres terrestres aplicados a la investigación arqueológica. *Cuadernos de Prehistoria y Arqueología de la Universidad de Granada*, 22, 413-424.
- ESPINAR MORENO, M (2000). Materiales y sistemas constructivos de la provincia de Granada en los siglos XV y XVI. *Gaceta de Antropología*
- FORTE, M., DELL'UNTO, N., ISSAVI, J., ONSUREZ, L., & LERCARI, N. (2012). 3D archaeology at Çatalhöyük. *International Journal of Heritage in the Digital Era*, 1(3), 351-378.
- FONSTAD, M, et al. (2013) Topographic structure from motion: a new development in photogrammetric measurement. *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 38, no 4, p. 421-430.
- FRANCOVICH, R. (1985). Archeologia e restauro: da contiguità a unitarietà. *Restauro e città*, 1(2), 14-20.
- FRANCOVICH, R; PARENTI, R (ed.) (1988). Archeologia e restauro dei monumenti. All'Insegna del Giglio,
- FURUKAWA, Y, et al. (2009) Reconstructing building interiors from images. *En 2009 IEEE 12th International Conference on Computer Vision. IEEE*, p. 80-87.
- GAISECKER, T. (2005, November). Pinchango Alto—3D archaeology documentation using the hybrid 3D laser scan system of RIEGL. In *Recording, Modeling and Visualization of Cultural Heritage: Proceedings of the International Workshop, Centro Stefano Franscini, Monte Verita, Ascona, Switzerland, May 22-27, 2005* (p. 459). CRC Press.
- GARCIA CUETOS, M.P., 2012. El patrimonio cultural. Conceptos básicos. Universidad de Zaragoza.
- GARCÍA CUETOS, María Pilar. (2009) Humilde condición. El patrimonio cultural y la conservación de su autenticidad. Trea.
- GARCIA SOLER, G. (2013). Proyecto monográfico de Investigación "Documentación gráfica del Patrimonio mediante el uso de nuevas tecnologías". Universidad de Granada.
- GARCÍA-GÓMEZ, I., DE GOROSTIZA, M. F., & MORAZA, A. M. (2011). Láser escáner y nubes de puntos. Un horizonte aplicado al análisis arqueológico de edificios. *Arqueología de la Arquitectura*, (8), 25-44.
- GENTIL BALDRICH, J.M. (1992) Una relectura de la Carta sobre la Arquitectura a León X. En *Dibujo y Arquitectura. Investigación Aplicada. Actas del IV Congreso Internacional de Expresión Gráfica Arquitectónica*. p. 87-98.
- GOMEZ ROBLES, Lucía; QUIROSA GARCÍA, Victoria. (2015) Nuevas tecnologías para difundir el Patrimonio Cultural: las reconstrucciones virtuales en España. *e-RPH-Revista electrónica de Patrimonio Histórico*, no 4, p. 150-173.
- GONZÁLEZ-MORENO, A. (1995). Patrimonio arquitectónico: lo que el viento no se llevó. Actas de las I Jornadas sobre Catalogación del Patrimonio Histórico. Hacia una integración interdisciplinar, Sevilla, Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico
- GONZALEZ-VARAS IBAÑEZ, I., 2006. Conservación de bienes culturales: teoría, historia, principios y normas.
- GOPI, S. (2007). *Advanced Surveying: Total Station, GIS and Remote Sensing*. Pearson Education India.
- GRÖGER, G., & PLÜMER, L. (2012). CityGML—Interoperable semantic 3D city models. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 71, 12-33.
- GRÜN, A; REMONDINO, F; ZHANG, L. (2004) Photogrammetric reconstruction of the great Buddha of Bamiyan, Afghanistan. *The Photogrammetric Record*, vol. 19, no 107, p. 177-199.
- GUGAN, D. J.; DOWMAN, I. J. (1986) Design and implementation of a digital photogrammetric system. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 26, no 2, p. 100-109.
- GUTIÉRREZ, R. (1997). Las fuentes históricas y la heurística. In *Máster de restauración y rehabilitación del patrimonio* p. 172-179. Editorial Munilla-Lería.
- HARRIS, E. C. (ED.). (2014). *Practices in Archaeological Stratigraphy*. Elsevier.

- HARRIS, Edward C. (2014). Principles of archaeological stratigraphy. Elsevier.
- HERNÁNDEZ D. (2006) Introducción a la fotogrametría Digital. Universidad de Castilla La Mancha, p. 81-87.
- HERNANDEZ MARTNEZ, A., & ASWORTH, G. (1999). Documentos para la historia de la restauración Universidad de Zaragoza, Departamento de Historia del Arte.
- JALDÚN, I., & JALDÚN, I. (1977). Introducción a la historia universal (*Al-Muqaddimah*) (No. 04; D20, J3.). p. 721-722
- JIMÉNEZ MARTÍN, Alfonso; PINTO PUERTO, Francisco. (2003) Levantamiento y análisis de edificios. Tradición y Futuro, Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla. IUCC, Sevilla.
- KARRAS, G. E., & MAVROMMATI, D. (2002). Simple calibration techniques for non-metric cameras. *International archives of photogrammetry remote sensing and spatial information sciences*, 34(5/C7), 39-46.
- KERSTEN, T.; LINDSTAEDT, M. (2012) Automatic 3D object reconstruction from multiple images for architectural, cultural heritage and archaeological applications using open-source software and web services. *Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation*, vol. 2012, no 6, p. 727-740.
- KOPACIK, A. AND KORBASOVA, M. (2004) Optimal Configuration of Standpoints by Application of Laser Terrestrial Scanners. IN GEO 2004 and FIG Regional Central and Eastern European Conference on Engineering Surveying. Bratislava, Slovakia.
- LAHOZ, J. G., ET AL. (2006) Terrestrial laser scanning metric control: assessment of metric accuracy for cultural heritage modeling. *ISPRS Archives*, p. 25-27.
- LERMA, J. L.; BIOSCA, J. M. (2008) Teoría y práctica del escaneado láser terrestre. *3D Risk Mapping. Memorias*, p. 1-30.
- LICHTI, D., ET AL. (2000) Calibration and testing of a terrestrial laser scanner. in Int. Arch. Of Photogrammetry and Remote Sensing. 2000.
- LÓPEZ MARCOS, A. (2015). El teatro romano de Guadix. Guadix: Ayuntamiento de Guadix.
- LOPEZ MARTINEZ, F. J. (1999). Tapias y tapiales. *Loggia, Arquitectura & Restauración*, (8), p 74-89.
- LÓPEZ TRUJILLO, M.A., 2004. Las Comisiones Provinciales de Monumentos, Quijotes del pasado. *Zona arqueológica* (3), p. 363-370
- LOWE, D. (1999). Object recognition from local scale-invariant features. Computer Vision, The Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on,, (págs. 1150-1157 vol.2).
- LUQUE MARTÍNEZ, F. D. (2003). El castillo de Píñar: análisis arqueológico de las estructuras de superficie. Granada: José Javier Álvarez García.
- MALPICA CUELLO, A. (1998). Las técnicas constructivas en al-Ándalus. Un debate entre la Arqueología y la Arquitectura. In *Técnicas agrícolas, industriales e constructivas na Idade Media: curso de verão, Celanova, 8-12 de xullo de 1996* p. 277-336. Servicio de Publicaciones.
- MALPICA CUELLO, A. (1998). Los castillos en época nazarí: una primera aproximación. Granada: Athos-Pérgamos.
- MALPICA CUELLO, A. (2003). Los castillos en al-Andalus y la organización del territorio. Cáceres: Universidad de Extremadura.
- MALPICA CUELLO, A. (2008) La ciudad medieval de Guadix a la luz de la arqueología. Reflexiones a partir de la intervención arqueológica en su muralla y en el torreón del Ferro. En Homenaje a Antonio Domínguez Ortiz. Universidad de Granada.
- MALPICA CUELLO, A; RODRIGUEZ MORENO, M. (1996). Poblamiento y castillos en Granada. Fundación El legado andalusí.
- MANNONI, T. (1984) Metodi di datazione dell'edilizia storica. *Archeologia medievale*, vol. 11, p. 396.
- MANZINI, L., 2011. El significado cultural del patrimonio. *Estudios del patrimonio cultural*, (6), pp. 27-42
- MARTIN CIVANTOS, J M. (2009) "La alcazaba de Guadix: de fortaleza andalusí a cuartel militar Napoleónico". *Boletín del Centro de Estudios Pedro Suárez: Estudios sobre las comarcas de Guadix, Baza y Huéscar*. nº 22, p. 283-296.
- MARTIN CIVANTOS, J. M., & MARTIN GARCÍA, M. (2012). Analysis parameters for systematization of rammed earth walls in Granada and Almería (Andalucía, Spain). *Rammed Earth Conservation*, 175.
- MARTIN CIVANTOS, J.M. (2010) «Informe preliminar de la intervención arqueológica puntual de apoyo a la propuesta de parque arqueológico en la alcazaba de Guadix (Granada)». Informe de excavación. Granada: Junta de Andalucía. Consejería de Cultura.
- MARTIN CIVANTOS, J.M. 2010b. «La formación de la tierra de Guadix (Granada)». En Historia de Andalucía. VII Coloquio, editado por Antonio Malpica, Rafael Peinado, y Adela Fábregas, 49-64. Granada: Universidad de Granada.
- MARTÍN GARCÍA, M. (2009). La construcción del tapial calicastro en época nazarí. V Convención Técnica de la Arquitectura Técnica (CONTART'09). Albacete.
- MARTIN TALAVERANO, R. (2014). Documentación gráfica de edificios históricos: principios, aplicaciones y perspectivas. *Arqueología de la Arquitectura*, (11), 011
- MARTÍNEZ JUSTICIA, María José. (1996) Antología de textos sobre restauración.
- MARTINEZ RUIZ, J. (1989). Toponimia mayor y menor de Guadix y su tierra en los siglos XV y XVI: balance y perspectivas. Universidad de Granada.

- MASIERO, Roberto. (1988) Il vasaio e l'ingegnere. Lineamenti per la disciplina del Rilievo, no 6-7, p. 61-72.
- MAZZOLI-GUINTARD, C; DE LA TORRE, P. (2000) Ciudades de al-Ándalus: España y Portugal en la época musulmana (siglos VIII-XV).
- MERCANTI, F; LANDRA, P. I (2007) 'Ludi Matematici' di Leon Batista Alberti. 2007.
- MESA G, REGOT, J. M., NÚÑEZ, M. A., & BUILL, F. (2009). Métodos y procesos para el levantamiento de reconstrucción tridimensional gráfica de elementos del patrimonio cultural. La iglesia de Sant Sever de Barcelona. *EGA: revista de expresión gráfica arquitectónica*, (14), 82-89.
- MILETO, Camilla; VEGAS, Fernando. (2003) El análisis estratigráfico constructivo como estudio previo al proyecto de restauración arquitectónica: metodología y aplicación. *Arqueología de la Arquitectura*, no 2, p. 189-196.
- MOLERO, B., BARRERA, J., & CABRERA, E. (2013). Capiteles sevillanos. Técnicas avanzadas para su documentación gráfica. *Virtual Archaeology Review*, 4(8), p 117-124.
- MONTEROSO MONTERO, 2001) Juan M. Protección y conservación del Patrimonio. Principios Teóricos. Tórculo. Santiago de Compostela, 2001
- MORENO, I. (2006) Dioptra. En Nuevos elementos de ingeniería romana: III Congreso de las Obras Públicas Romanas. Consejería de Cultura y Turismo, p. 379-389.
- MURO MORALES, J I, et al. (2002) La fotogrametría terrestre en España (1914-1958). *Investigaciones geográficas*, nº 27,; p. 151-172.
- MURPHY, M., MCGOVERN, E., & PAVIA, S. (2009). Historic building information modelling (HBIM). *Structural Survey*, 27(4), p 311-
- ORDIERES, I., 1995. Historia de la restauración monumental en España.
- ORTEGA VIDAL, J, MARTINEZ DIAZ, Á., & MUÑOZ DE PABLO, M. J. (2011). El dibujo y las vidas de los edificios. *Revista EGA*
- ORTEGA VIDAL, J. (2011). El dibujo del patrimonio y su vida gráfica. Documentación gráfica del Patrimonio, (Publicación digital). Ministerio de Cultura, 46-63.
- PARIS, L., & WAHBEH, W. (2016). Rappresentazione delle geometrie parametriche per l'HBIM. *DISEGNARECON*, 9(16), p 12-1.
- PAVON MALDONADO, B. (1992) Ciudades hispanomusulmanas. Fundación MAPFRE, 1992.
- PAVON MALDONADO, B. (1999). Tratado de arquitectura hispanomusulmana, Tomo II: Ciudades y fortalezas.
- PAVON MALDONADO, B. (2005) Murallas de tapial, mampostería, sillarejo y ladrillo en el islam occidental
- PEREIRA UZAL, J. M. (2013). Modelado 3D en patrimonio por técnicas de structure from motion. *Ph investigación*, 79
- PEREIRA, J M. (2016) 3D modelling in cultural heritage using structure from motion techniques. *PH Investigación: revista del IAPH para la investigación del patrimonio cultural*, no 6, p. 49-60.
- PEREZ GARCÍA, J. L., MOZAS CALVACHE, A. T., CARDENAS ESCARCENA, F. J. , & LOPEZ ARENAS, A. (2011). Fotogrametría de bajo coste para la modelización de edificios históricos. *Virtual Archaeology Review*, 2(3), 121-125
- PEUCKER, T. K., FOWLER, R. J., LITTLE, J. J., & MARK, D. M. (1978). The triangulated irregular network. In Amer. Soc. Photogrammetry Proc. Digital Terrain Models Symposium (Vol. 516, p. 532).
- QUIRÓS CASTILLO, J A. (1996) Indicadores cronológicos de ámbito local: cronotipología y mensiocronología. En Arqueología de la arquitectura: el método arqueológico aplicado al proceso de estudio y de intervención en edificios históricos: actas. Consejería de Educación y Cultura, p. 179-187.
- RAYA DE CÁRDENAS, M A. (1987) Excavación arqueológica en la Alcazaba de Guadix: Granada.
- RAYA PRAENA, I. et alii (2003). Carta Arqueológica Municipal de Guadix, Colección Arqueología, Monografías Ciudad y Territorio.
- RIVERA BLANCO, J., (1997) Restauración arquitectónica desde los orígenes hasta nuestros días: conceptos, teoría, historia, Master de restauración y rehabilitación del patrimonio 1997, Editorial Muni-lla-Lera, p. 102-171
- RODRIGUEZ JORDANA, J.; NUÑEZ ANDRÉS, M A Núñez. (2008) Fotogrametría arquitectónica. Universitat Politècnica de Catalunya. Iniciativa Digital Politécnica.
- RODRIGUEZ NAVARO, P. (2012). Fotogrametría digital automatizada (SFM) con apoyo aéreo de proximidad. In *XI Congreso Internacional de Expresión Gráfica aplicada a la Edificación*, Valencia. 29, 30 de noviembre y 1 de diciembre de 2012 (p. 783-789).
- RODRIGUEZ NAVARRO, P. (2012). La fotogrametría digital automatizada frente a los sistemas basados en sensores 3d activos. *EGA. Revista de expresión gráfica arquitectónica*, 17(20), 100-111.
- RODRÍGUEZ-NAVARRO, P., VERDIANI, G., & PIQUERAS, T. G. (2015). Comprehensive Methodology for Documenting the Defense Towers of the Valencian Coast (Spain). *Defensive architecture of the mediterranean*, p 321.
- RODRÍGUEZ-NAVARRO, P., PIQUERAS, T. G., & VERDIANI, G. (2016) Drones for architectural surveying. Their use in documenting Towers of the Valencian Coast.
- ROSNELL, T; HONKAVAARA, E. (2012) Point cloud generation from aerial image data acquired by a quadcopter type micro unmanned aerial vehicle and a digital still camera. *Sensors*, vol. 12, 1, p. 453-480.

- SAINZ, J., & AVIA, J. S. (2005). El dibujo de arquitectura: teoría e historia de un lenguaje gráfico (Vol. 6). Reverté.
- SALVADOR VENTURA, F. (1988). El poblamiento en la provincia de Granada durante los siglos VI y VII. *Antigüedad y Cristianismo*, (5).
- SANTERO SANTURINO, J. M. (1972). Colonia Iulia Gemella Acci. *Habis*, (3), p 203-222.
- SARR MARROCCO, B; REYES MARTÍNEZ, E. (2014) Intervención arqueológica de apoyo a la restauración del torreón sureste de la Alcazaba de Guadix (Granada, 2005). *Arqueología y Territorio Medieval*, 2014, vol. 13, no 2.
- SARR MARROCO, B. (2010) Algunas consideraciones sobre la evolución del Guadix islámico a la luz de las fuentes árabes y del registro arqueológico
- SARR, B., & MATTEI, L. (2011). De hisn a madina: la evolución del urbanismo en el surco intrabético: Guadix, Loja y otros espacios menores. Un estado de la cuestión.
- SCIANNA, A., GRISTINA, S., & PALIAGA, S. (2014, November). Experimental BIM applications in archaeology: a work-flow. In *Euro-Mediterranean Conference* (p. 490-498). Springer International Publishing.
- SLAMA, C. et al. (1980) Manual of photogrammetry. American Society of photogrammetry,
- SOUTO-VIDAL, M.; ORTIZ-SANZ, J.; GIL-DOCAMPO, M. (2015) Implementación del levantamiento eficiente de fachadas mediante fotogrametría digital automatizada y el uso de software gratuito. *Informes de la Construcción*, vol. 67, no 539, p. 107.
- STANCO, F; BATTIATO, S; GALLO, G. (2011) Digital imaging for cultural heritage preservation: Analysis, restoration, and reconstruction of ancient artworks. CRC Press.
- STUMPF, A, et al. (2015) Ground-based multi-view photogrammetry for the monitoring of landslide deformation and erosion. *Geomorphology*, 2015, vol. 231, p. 130-145.
- TABALES-RODRÍGUEZ, M. A. (1997). Análisis arqueológico de paramentos. Aplicación en el patrimonio edificado sevillano. *SPAL: Revista de prehistoria y arqueología de la Universidad de Sevilla*.
- TABALES RODRIGUEZ, M.A, T. (1999). Algunas notas sobre fábricas muráreas almohades de Sevilla. *Los almohades. Su patrimonio arquitectónico y arqueológico en el Sur de al-Andalus*, 75-90.
- TABALES-RODRÍGUEZ, M A. (2002) Sistema de análisis arqueológico de edificios históricos. Universidad de Sevilla.
- TAPIA GÓMEZ, M. (2001) Un lugar para el patrimonio. La conservación del patrimonio cultural en la red. *Ar@cne: revista electrónica de recursos en internet sobre geografía y ciencias sociales*, 2011.
- TORRES BALBÁS, L. (1949). Arte almohade; Arte nazari; Arte mudéjar (No. 4). Plus Ultra.
- TORRES BALBÁS, L. (1970). Ciudades hispanomusulmanas. Tomo II. Las defensas urbanas. Instituto hispano-árabe de cultura.
- VALLE MELÓN, J.M. (2006) La medida y representación del patrimonio: alternativas y criterios de selección. *Berceo*, 2006, no 151, p. 63-85.
- VALLE MELON, J.M., 2006. Reflexiones sobre la Documentación Geométrica del Patrimonio. *Papeles del partal*, (3), pp. 161-187
- VERHOEVEN, G. (2011) Taking computer vision aloft—archaeological three-dimensional reconstructions from aerial photographs with Photoscan. *Archaeological Prospection*, vol. 18, no 1, p. 67-73.
- WAISMAN, M. (1993) El interior de la historia. Escala, 1993.
- WALDHAEUSL, Peter.(1993) The 4th International Symposium for Architectural Photogrammetry of CIPA: 22–25 September, Bucharest and Sinaia, Romania. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1994, vol. 49, no 2, p. 38-40.
- WALDHÄUSL-OUGLEBY; CIPA-ICOMOS. (1994) 3X3 RULES
- WESTOBY, M. J., BRASINGTON, J., GLASSER, N. F., HAMBREY, M. J., & REYNOLDS, J. M. (2012). 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 179, p 300-314.
- WU, C, et al. (2011) Multicore bundle adjustment. *Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2011 IEEE Conference on. IEEE*, 2011. p. 3057-3064.
- WULFF, R; KOCH, R, (2011) Image-Based 3D Documentation of Archaeological Trenches Considering Spatial, Temporal and Semantic Aspects.

10 ANEXOS:

10.1 CARTA DEL LEVANTAMIENTO ARQUITECTÓNICO

(Traducida por Jiménez Martín et al en colaboración con Almagro Gorbea)³¹⁴

PREMISA

Requisito previo de cualquier intervención en el patrimonio cultural debe ser el conocimiento del bien arquitectónico y ambiental, considerado en su globalidad y en su completa articulación, como conciencia de que su ser es el resultado de una estratificación a lo largo del tiempo, de sucesivas intervenciones, realizadas muchas veces con criterios y técnicas constructivas diferentes. Por otra parte, en edificios de fuerte historicidad, cada parte está siempre ligada, por razones estructurales, estéticas y funcionales, a la totalidad. Se trata, en otras palabras, de reconstruir a través de una compleja acción de investigación (planimétrica, histórico-crítica, archivística, bibliográfica, técnica y tecnológica), los criterios, los procedimientos y los ritmos con los que se ha venido constituyendo el organismo a lo largo del tiempo. La salvaguarda del patrimonio cultural representa uno de los objetivos, y al mismo tiempo, uno de los mayores desafíos de nuestro tiempo, porque sólo ella puede garantizar la conservación de la memoria histórica documentada de nuestras culturas; así que esta salvaguarda, que consideramos bajo el aspecto científico, técnico y tecnológico, es ante todo un problema moral, social y educativo; y ciertamente presenta aspectos problemáticos, no sólo operativos y técnicos, sino también de programación y gestión, sociales y educativos.

El primer nivel de salvaguarda es, obviamente, el conocimiento; conocer quiere decir, de alguna manera y en

todo caso, documentar. La documentación, en efecto, constituye un soporte indispensable para la tutela del patrimonio cultural. En tiempos recientes, la evolución de los conceptos y el progreso de las tecnologías han hecho que el debate cultural y científico progresase en el examen de qué tipo de documentación sea la más adecuada.

En arquitectura este problema se ha superado conceptualmente con el levantamiento, operación compleja a la que se atribuye un significado preciso.

EL LEVANTAMIENTO ARQUITECTÓNICO.

Según las interpretaciones más avanzadas se debe entender por levantamiento arquitectónico la forma primigenia de conocimiento y por lo tanto el conjunto de operaciones, de medidas y de análisis necesarios para comprender y documentar el bien arquitectónico en su configuración completa, referida incluso al contexto urbano y territorial, en sus características dimensionales y métricas, en su complejidad histórica, en sus características estructurales y constructivas, así como en las formales y funcionales. En pocas palabras, se asume que levantar un episodio arquitectónico contribuye eficazmente a la verificación del recorrido crítico del proceso constructivo, y también proyectual, seguido para su realización, como forma de comprender las razones que llevaron a las decisiones así como las decisiones mismas adoptadas sucesivamente y documentadas materialmente en el edificio.

Un levantamiento adecuado permite acceder a una proyectación depurada y a una cuidadosa programación de costes y de la ejecución de las obras. Por otra parte, además de la finalidad práctica de la conservación del Bien Arquitectónico, el levantamiento debe ser

³¹⁴ JIMENEZ MARTÍN, A; PINTO PUERTO, F. *Levantamiento y análisis de edificios: tradición y futuro*. Universidad de Sevilla, 2003.

considerado, además, documento necesario y significativo para la catalogación del mismo, y por tanto del patrimonio histórico-artístico.

Un buen levantamiento general realizado sobre un bien cultural arquitectónico, debe esencialmente permitir:

- 1) El conocimiento, preciso, fiable y depurado críticamente, de la configuración morfológica y dimensional del objeto, en su estado físico actual.
- 2) El conocimiento técnico, tecnológico y material del objeto, que ayude a comprender tanto sus modalidades constructivas, como sus condiciones actuales de alteración y degradación.
- 3) La posibilidad de una ágil edición temática de la planimetría del levantamiento, para profundizar en el conocimiento histórico del propio objeto como primer documento de sí mismo, que sólo es descifrable gracias a una cuidadosa tarea de levantamiento y de observación directa.
- 4) Observaciones históricas procedentes tanto de una aproximación preliminar documentada y planificada sobre el objeto (comprensión crítica previa), indispensable para la conducción de un buen levantamiento, como de observaciones inéditas, fruto del contacto directo y frecuente con el monumento.

El levantamiento deberá contemplar también las relaciones entre el edificio y su contexto, permitiendo:

- La lectura histórica del edificio.
- Su entendimiento proyectual y constructivo.
- El adecuado proyecto de intervención y la estimación de los costos correspondientes.

DEFINICIONES DE:

-LEVANTAMIENTO ARQUITECTÓNICO, en el que, más allá de la definición genérica, se introduce el concepto de relación entre la representación y el contenido.

-LEVANTAMIENTO ARQUITECTÓNICO COMO DISCIPLINA, que se vale de todas las ciencias y todas las técnicas que puedan contribuir a la lectura, a la medida y al análisis de la arquitectura en sus aspectos morfológicos, materiales, y estructurales, patentes u ocultos.

-LEVANTAMIENTO ARQUITECTÓNICO COMO ACTIVIDAD DE INVESTIGACIÓN iconográfica, bibliográfica y archivística.

-LEVANTAMIENTO ARQUITECTÓNICO COMO SISTEMA ABIERTO DE CONOCIMIENTOS, que está dirigido al conocimiento más completo posible del organismo analizado y por tanto a la explicación, realizada y prolongada en el tiempo, de todos sus elementos.

TODO ORGANISMO ARQUITECTÓNICO ESTÁ EN RELACIÓN CON EL AMBIENTE.

Considerando que cualquier organismo arquitectónico vive en una constante relación con el contexto ambiental, en su levantamiento deberá tenerse en cuenta esta relación.

CRITERIOS REGULADORES PARA EL LEVANTAMIENTO
En la programación y realización del levantamiento arquitectónico hay que tener en cuenta los siguientes criterios:

- a) Prever el alcance general, lo que a menudo puede requerir un proyecto, una dirección de los trabajos y una evaluación final, según el nivel de dificultad del edificio.
- b) Considerar de forma contextualizada tanto la investigación métrica y técnica, como la bibliográfica, archivística e iconográfica.

c) Es necesario referir la ubicación del organismo arquitectónico respecto al Sistema Cartográfico Nacional y al de referencia local adoptado para el levantamiento a escala 1:500, si existe, del centro histórico al que pertenezca.

d) La información obtenida en los levantamientos puede ser considerada como componente parcial de una base de datos territorial más amplia, por lo que los levantamientos deben realizarse en soporte informático.

e) Los sistemas y métodos de medida, así como su tolerancia, serán adecuados a la escala de representación y a los contenidos previstos; cada elaboración gráfica deberá resultar homogénea bajo aspectos métricos y cualitativos.

f) El contenido de la representación debe guardar relación con la escala prevista o adoptada para la restitución y con la finalidad de la investigación.

g) Deben establecerse, del modo más claro posible, procedimientos congruentes para la realización del levantamiento directo, del topográfico y el fotogramétrico.

El uso de métodos y técnicas de diversos tipos deberá estar referido al proyecto general de la investigación.

LA ORGANIZACIÓN DE LAS BASES DE DATOS

Las informaciones derivadas de la actividad de documentación y levantamiento relativa a cada organismo arquitectónico podrán organizarse en bases de datos para permitir, después, la formación de redes de bases de datos.

LA INTEGRACIÓN DE LAS DIFERENTES TÉCNICAS DE LEVANTAMIENTO.

El problema de la integración y de la interrelación de las diferentes técnicas se debe resolver asumiendo como parámetro de referencia, pues no sería legítima una elección distinta, el problema de la documentación y de la representación de la arquitectura, que es simultáneamente análisis figurativo, forma de comprensión histórico-crítica y atenta observación de materiales y técnicas constructivas.

Esta elección determina de forma decisiva tanto la definición de criterios para el uso de las distintas técnicas como la determinación de los requisitos cualitativos indispensables. Esto lleva a considerar que la parcela del levantamiento arquitectónico es, como el proyecto, multidisciplinar, y conlleva, en casi todos los casos, el concurso integrado de varias competencias profesionales, aunque con tareas diferenciadas.

En efecto, el levantamiento de un determinado organismo arquitectónico exige, cada vez más el uso específicamente programado de técnicas distintas en función de sus características formales, morfológicas y tecnológicas, cosa que es muy difícil que pueda acometer una sola persona, por lo que debe ser el resultado de la concurrencia de especialistas, de cuyo trabajo cabe esperar, según las previsiones, el conocimiento completo y adecuado del edificio.

De todo ello se deduce inevitablemente que cualquier levantamiento debe ser proyectado previamente, su reelaboración debe ser directa, y sus resultados deben estar sujetos a comprobación. Los profesionales que desarrollen las distintas tareas deberán estar capacitados para utilizar las respectivas técnicas, pero sobre todo deben ser capaces de comprender la arquitectura. A tal fin se debieran promover iniciativas adecuadas para formar y poner al día a los arquitectos e ingenieros en los problemas del levantamiento arquitectónico.

LA CALIDAD DEL LEVANTAMIENTO DEBE SER VERIFICABLE.

El levantamiento debe ser fiable tanto en lo que concierne a la lectura e interpretación del organismo arquitectónico, como en lo que respecta a las medidas y la representación. Para ello deberá ser proyectado, su realización deberá ser directa, y los resultados verificados, tanto en lo relativo a los métodos como a los contenidos. Con este fin se propone, por una parte, que se lleven a cabo las iniciativas didácticas pertinentes y por otro que se definan las figuras profesionales necesarias.

EL LEVANTAMIENTO ARQUITECTÓNICO PRECISA DEL USO INTEGRADO DE PROCEDIMIENTOS DISTINTOS.

El levantamiento arquitectónico presupone el uso integrado de métodos de documentación y medición capaces de obtener la representación correcta, y métricamente exacta, del organismo en cuestión.

EL LEVANTAMIENTO COMO SISTEMA ABIERTO DE CONOCIMIENTOS.

En general es necesario prever:

- *La realización del levantamiento general, o básico, y del levantamiento temático, cubriendo la totalidad del organismo arquitectónico y sus temas significativos, en todo lo concerniente a su valor y su conservación; así como el levantamiento, diferenciado por tipos, de elementos decorativos y mobiliario permanente.*
- *El desarrollo de una campaña de mediciones suficientemente extensa, para definir adecuadamente el modelo geométrico del organismo arquitectónico y representarlo en todas sus partes.*
- *La referencia de todas las medidas a un sistema único, convenientemente preseleccionado.*

- *Representaciones en escalas variables, de acuerdo con la dimensión del objeto, sus características y los objetivos del levantamiento.*
- *Que todas las elaboraciones gráficas estén provistas de escala gráfica.*
- *Garantizar que las medidas tengan una precisión general compatible, por un lado, con el error del grafismo y con la finalidad del levantamiento y, por otro, con las posibilidades que ofrecen los instrumentos informáticos.*
- *Adoptar todas las prevenciones necesarias para garantizar la estabilidad métrica de las representaciones gráficas.*
- *Realizar una documentación fotográfica exhaustiva y científicamente adecuada, además de las investigaciones de tipo bibliográfico, archivístico e iconográfico que resulten adecuadas al fin buscado.*

Es esencial que el levantamiento temático se extienda, con la participación donde convenga de los especialistas sectoriales, a la totalidad del organismo.

El primer tema a considerar es el estructural. En este sentido es importante advertir que los levantamientos estructurales tienen un doble objetivo: sobre todo definir y documentar la configuración general del modelo estructural, pero, además, profundizando en las investigaciones, documentar las características geométricas de lo material que precisa el calculista para su evaluación y verificación.

Es éste un campo de investigación muy amplio, todavía por explorar y por experimentar en el futuro, tanto en lo que concierne a la representación y codificación gráfica, como a la integración de los métodos y técnicas del levantamiento con la investigación no destructiva para la lectura de las estructuras, cuando éstas aparecen revestidas.

El levantamiento podrá variar de un edificio a otro, en función de sus características; no obstante, el esquema general puede ser el siguiente:

- a) Levantamiento arquitectónico, incluida la dedicación a los distintos usos.*
- b) Levantamiento de la estructura y del correspondiente cuadro de fisuras.*
- c) Levantamiento de los elementos arquitectónicos de valor y de relevancia tipológica, con formación del correspondiente inventario.*
- d) Levantamiento de los pavimentos y de los techos.*
- e) Levantamiento de los paramentos y los revestimientos, con sus materiales constituyentes, así como sus estados y grados de conservación.*
- f) Cuadro e inventario de elementos constitutivos.*
- g) Levantamiento de las instalaciones con el inventario de su utilidad.
y sobre la base de las aportaciones de la investigación documental*
- h) La cronología de las fases constructivas.*

LA ARQUITECTURA COMO SÍNTESES DE FORMAS, MATERIALES ESTRUCTURALES Y ACABADOS.

Puesto que cualquier obra de arquitectura es el resultado orgánico de elementos estructurales, estilísticos, de materiales y de revestimientos, cualificados por el tratamiento de las superficies y los colores, el levantamiento deberá documentar todos estos aspectos.

EL LEVANTAMIENTO COMO FORMACIÓN DE ARCHIVOS OPERATIVOS.

Considerando que un mismo organismo arquitectónico es frecuentemente objeto de sucesivas intervenciones de levantamiento y documentación, con objeto de evaluar la evolución de sus cambios, además de evitar la

repetición de operaciones similares, se debe proceder a la constitución de archivos especializados para cada una de las técnicas de medición y documentación utilizadas.

LOS PROTOCOLOS DE REPRESENTACIÓN.

Será oportuno observar ciertas formalidades en la ordenación y la confección de las distintas tareas gráficas, tanto para el levantamiento básico, como para los temáticos, con el fin de asegurar la eficacia métrica y para precisar, mediante una memoria, y en cada tipo o subtipo de levantamiento (básico, temáticos, de la estructura, de los revestimientos, etc.), los criterios que se han seguido en su realización, el grado de precisión que se ha pretendido y el criterio con el que se han determinado el número y los tipos de dibujos.

REPRESENTACIONES Y CONTENIDOS.

Como un levantamiento puede ser puesto en marcha y desarrollado con objetivos distintos y también en momentos diferentes, dará lugar, por lo tanto, a representaciones que se diferenciarán en escala, contenidos y finalidad.

LA DOCUMENTACIÓN DEL LEVANTAMIENTO.

Los trabajos de levantamiento y documentación estarán siempre acompañados por una memoria que informe de la finalidad de la actuación y de los criterios con los que se han utilizado las diversas técnicas; en la misma se enumerarán también todas las tareas y los resultados producidos. La memoria, los resultados y las tareas informarán siempre de la fecha de realización.

REPRESENTACIÓN E INFORMACIÓN.

El levantamiento es la expresión primaria de elaboraciones y percepciones del texto o bien del conjunto de signos ligados a nexos funcionales, y por tanto de informaciones encaminada al conocimiento, la comprensión y la valoración del proyecto gráfico de conservación y tutela del bien analizado.

LA DIFUSIÓN DEL LEVANTAMIENTO Y LA DOCUMENTACIÓN PARA LA GESTIÓN

Proponemos algunos otros aspectos de especial relevancia en el campo de la documentación, como es su difusión y organización en el marco de la gestión del bien cultural, entendida ésta no tanto, ni sólo, como actividad económica, sino como regidora de los ritmos de todas las acciones, pues tienen, en primer lugar, un punto de encuentro en las crecientes posibilidades de las realizaciones multimedia y, en segundo lugar, en la organización de sistemas específicos de información. Para ambos se propone una cuidadosa validación experimental, capaz de asegurar que la información tenga la necesaria calidad, sea del tipo que sea.

LA REPRESENTACIÓN DEL LEVANTAMIENTO.

Es conveniente que las representaciones gráficas del organismo arquitectónico levantado estén coordinadas, aunque se dibujen a escalas diferentes. Es útil, por otra parte, que en lo posible, éstas no se limiten sólo a las proyecciones tradicionales de plantas, secciones y alzados, sino que, por un lado, documenten del modo más completo y general posible el organismo arquitectónico en todas sus partes visibles y, por otro, que las integren representaciones axonométricas también seccionadas. Los eventuales modelos de síntesis que puedan construirse a partir de los datos del levantamiento no podrán nunca sustituir a las representaciones convencionales (planta, secciones, alzados o axonometrías), mientras la técnica de elaboración no pueda garantizar una fidelidad absoluta respecto al organismo real.

HACIA SISTEMAS INFORMATIVOS LOCALIZADOS.

El levantamiento de cualquier organismo arquitectónico se concebirá, en lo posible, para que pueda trans-

formarse en un sistema de información capaz de asumir los diversos datos que, con el tiempo, se le puedan ir añadiendo.

10.2 Características técnicas de los escáneres utilizados en la investigación

	RIEGL LMS Z420i Fuente: www.riegl.com	LEICA ScanStation 2 Fuente: www.leicageosystems.com
		
Principio de medición	Pulso-tiempo de vuelo	Pulso-tiempo de vuelo
Clase del láser	Clase 1 (IEC 60825-1 y 21 CFR)	Clase 3R (IEC 60825-1)
Alcance	350-1.000m (según la reflexión)	300m con un 90% de reflexión
Campo de visión	80° vertical 360° horizontal	270° vertical 360° horizontal
Definición de las dianas de los puntos de referencia	Intensidad de la reflexión (cilíndricas o planas)	Geométricas (esféricas o planas)
Desviación estándar	10mm a 50m	--
Precisión en la distancia	Precisión: 10mm a 50m Repetibilidad 8mm a 50m (un pulso) 4mm a 50m (promedio)	Posición=6mm a 50m Alcance= 4mm a 50m
Resolución máxima	7mm a 100m (70μrad; 0.004°)	< 1 mm
Diámetro del spot del láser / Divergencia del haz	12.5mm a 50m	4mm a 50m (FWHH) 6m a 50m (Gausiano)
Velocidad máxima de escaneado	11.000 Pt/s (espejo oscilante)	50.000 Pt/s
Cámara	Externa	Integrada
Eje vertical inclinable	Cualquier posición deseada	no
Software para gestión del escáner	RiScan PRO v6	Cyclone 5.5

10.3 INFORME Y RESUMEN DE LA FICHA DE INVENTARIO DE LA ALCAZABA DE GUADIX REALIZADO POR EL INSTITUTO ANDALUZ DE PATRIMONIO HISTORICO.



Granada | Guadix

1

IDENTIFICACIÓN

Denominación: Alcazaba
Código: 01180890003
Caracterización: Arqueológica, Arquitectónica
Provincia: Granada
Municipio: Guadix
Códigos relacionados:



Pertenece a	
Código	Denominación
01180890023	Sitio arqueológico de Guadix

DESCRIPCIÓN

Tipologías

Tipologías	Actividades	P. Históricos/Etnias	Cronología	Estilos
Alcazabas	Actividad militar	Edad Media -Árabes		
Infraestructuras hidráulicas		Edad Media -Árabes		

Descripción

Esta alcazaba tiene una planta ligeramente rectangular, redondeada en su ángulo sur. Todas las murallas del conjunto están construidas con tapial, levantadas sobre muros de nivelación de mampostería que disponen de zarpas.

De los tres recintos que la formaban, el tercero tenía su acceso desde la medina por el lienzo Noroeste, a través de un portillo que aún se conserva, aunque muy transformado. Este recinto con forma de "L", abriga al primero y más elevado por los lados Noroeste y Noreste, teniendo comunicación ambos por el ángulo Norte. Sus dos lienzos de muralla de mayor longitud, con orientaciones también Noroeste y Noreste, carecen de torres para la defensa, al encontrarse en contacto con el interior de la medina. Sólo posee una gran torre hacia el exterior en el ángulo Oeste.

El segundo recinto rodearía al primero por los lados Sur y Sureste, disponiendo de un total de tres torres, dos pequeñas que salen de la parte redondeada que da al sur y otra, la de mayor tamaño de las exteriores, situada en el ángulo Este. Esta última, de planta rectangular, con los muros exteriores ataluzados y construida en tapial de cal y canto debió tener varias plantas, ya que se encuentra rellena de escombros, si bien en su parte superior hay un receptáculo con muros de hormigón de cal que parece un aljibe.

El primer recinto, ubicado en el interior del conjunto, dispone de cuatro torres. La única que se asoma a la muralla exterior está situada en el lienzo Suroeste, es maciza, construida en tapial y tiene un aljibe en su terraza, al que le falta la bóveda. Otras dos torres, unidas entre sí por un paño de muralla con su adarve,

Granada | Guadix**2**

están situadas al sur y son de planta rectangular. Son macizas y están construidas con tapial, conservando grandes trozos de paramento enlucido con motero de cal original, apreciándose en algunas zonas esgrafiados en forma de espiga.

En este recinto y en el centro de la Alcazaba, se alza una gran torre de homenaje, de planta cuadrada y construida con tapial, de la que quedan restos importantes. Se desconoce su distribución primitiva, ya que lo que hoy se aprecia es el producto de una pésima restauración.

Datos históricos

La alcazaba de Guadix, actualmente restaurada y reconstruida, comenzó a edificarse en el siglo XII, sobre otra fortaleza anterior que los musulmanes habían levantado en este mismo lugar en los primeros años de la ocupación de la zona (siglo VIII). En su momento de mayor esplendor, la alcazaba ocupaba casi el doble de la extensión que hoy tiene, ya que en el siglo XVI se cegaron sus fosos, destruyéndose también todo el complejo palaciego que albergaba la alcazaba en su interior.

Un aspecto curioso de esta alcazaba granadina es su característico color rojizo. Este color se debe al material utilizado para su construcción: el tapial. Este material era muy usado en las obras defensivas musulmanas. En las posteriores restauraciones realizadas al edificio se aprecian con más claridad, debido a la utilización de otro tipo de materiales.

Se encuentra situado en el ángulo Noroeste del recinto amurallado que rodea la ciudad. Su estructura es muy simple, constituyendo un perfecto ejemplo de arquitectura militar islámica edificada en tapial y con un característico color anaranjado semejante al de las fortalezas musulmanas del Norte de África. Su recinto exterior construido por torres cuadradas coronadas por almenas, presenta distintas alturas. Las torres son macizas, sin ningún adorno superfluo, siendo el único espacio aprovechable de ellas la terraza superior. En una de estas torres, la de mayor altura gracias a un segundo cuerpo de menores dimensiones que se alza sobre ella, se ha instalado una figura del Sagrado Corazón de Jesús.

La zona de la Hoya de Guadix contó con una población estable ya desde época prehistórica, siendo la misma ciudad de Guadix centro de gran importancia durante la época visigoda. Pero su mayor auge lo vivió a raíz de la invasión musulmana de la Península, ya que desde los primeros años de aquella contó con un puesto fortificado. Hasta el siglo XV, permaneció en poder islámico, excepto una breve temporada durante 1154, cuando Alfonso VIII tomó la ciudad y su castillo, aunque no consiguió mantener su propiedad, pues en 1232, se convirtió en un reino independiente de Granada al proclamarse sultán Muhammad Abu Yusuf.

Aunque conoció hechos militares, los Reyes Católicos la tomaron por pacto en 1489. En el siglo XVI conoció la decadencia como puesto fortificado y residencia palaciega al mismo tiempo, siendo entonces cuando se destruyeron la mayor parte de los salones y estancias que se encontraban en su interior, por lo que su recinto disminuyó considerablemente. Anteriormente ocupaba la zona en la que ahora se encuentran el palacio de las Banadas, el Seminario y las iglesias de San Agustín y Santiago. Fue declarado Monumento Nacional en 1931 y restaurado a partir de entonces.



Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico
CONSEJERÍA DE CULTURA

BASE DE DATOS DEL PATRIMONIO INMUEBLE DE ANDALUCÍA

Granada | Guadix

3

PROTECCIÓN

Régimen	Estado	Tipología Jurídica	Publicado en	Fecha	Número	Página
BIC	Inscrito	Monumento	GACETA	04/06/1931		

FUENTES DE INFORMACIÓN

Información bibliográfica

ASENJO SEDANO, Carlos. Guadix, la ciudad musulmana del siglo XV y su transformación en la ciudad neocristiana del siglo XVI. Diputación Provincial. 1983. 345 p. 84-500-9035-0.

BLEDA PORTERO, Jesús; MARTÍN CIVANTOS, José María; MARTÍN GARCÍA, Mariano. Inventario de arquitectura militar de la provincia de Granada. Siglos VIII al XVIII. Diputación de Granada. 1999. 447p. 84-7807-269-1.

Información documental

Archivo de la Delegación Provincial de la Consejería de Cultura de Granada, Memoria de la excavación de urgencia en la Alcazaba de Guadix. Alcazaba. 1986.

Archivo Central de la Consejería de Cultura, Inventario de yacimientos arqueológicos de la Provincia de Granada. Alcazaba. 1989.

10.4 INFORME Y RESUMEN DE LA FICHA DE INVENTARIO DEL CASTILLO DE PÍÑAR REALIZADO POR EL INSTITUTO ANDALUZ DE PATRIMONIO HISTORICO.



Granada | Piñar

1

IDENTIFICACIÓN

Denominación: Castillo
Código: 01181590001
Caracterización: Arqueológica, Arquitectónica
Provincia: Granada
Municipio: Piñar



DESCRIPCIÓN

Tipologías

Tipologías	Actividades	P. Históricos/Etnias	Cronología	Estilos
Castillos	Defensa	Edad Media		

Descripción

Se trata de los restos de un castillo árabe enclavado en la cumbre del cerro que domina el pueblo de Piñar. Su acceso se realiza a partir del mismo, a través de un intrincado camino de tierra, que por no llegar a la cumbre obliga a realizar los últimos metros andando campo a través. El castillo presenta restos de ocho torres en muy mal estado de conservación, apenas unidos por restos de muralla. Presenta la peculiaridad de tener una torre de planta circular en el paño donde se encuentra la puerta de acceso, siendo las demás cuadradas. En el interior del recinto se encuentra un aljibe formado por dos bóvedas realizadas en piedra. Los restos del castillo se presentan realizados en mampostería de piedra e interior de tapial.

PROTECCIÓN

Régimen	Estado	Tipología Jurídica	Publicado en	Fecha	Número	Página
BIC	Inscrito	Monumento	GACETA	04/06/1931		

FUENTES DE INFORMACIÓN

Información documental

Archivo del Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico, Actualización y Revisión del Inventario de Yacimientos Arqueológicos de la provincia de Granada. Castillo de Piñar. LÓPEZ LÓPEZ, Manuel , PEÑA RODRÍGUEZ, José Manuel. 1998.

GLOSARIO.

3D: Tridimensional, caracterizado por las coordenadas cartesianas (x, y, z).

As-built: Describe la realidad física de un edificio.

Apoyo topográfico: Puntos con situación conocida que definen un marco de referencia (generalmente local) en el que se referencian otras mediciones.

CAD (Computer Aided Design): Uso del ordenador para el diseño de un producto.

CIPA: Comité internacional de fotogrametría arquitectónica

Datos crudos del escáner: Cualquier dato tomado por un escáner láser que esté sin procesar. Esto puede incluir diferentes fuentes de error y datos periféricos (que no pertenecen al objeto deseado) tomados durante la fase de escaneado.

Datos periféricos: Datos adicionales al escaneado tomados durante el proceso de captura, pero no definidos explícitamente en el informe del proyecto.

Densidad de puntos: Número de puntos por unidad. Normalmente cuanto mayor sea la densidad, mejor se representan los elementos.

Dron: Vehículo aéreo no tripulado.

Escaneado: Hace referencia a una única sesión de toma de datos desde un origen y orientación concretos del escáner.

Escáner láser: Desde el punto de vista del usuario, un escáner 3D es cualquier instrumento que toma automáticamente coordenadas 3D de una región de un objeto o superficie de forma automática con una alta velocidad (cientos o miles de puntos por segundo) consiguiendo resultados en (casi) tiempo real.

Exactitud geométrica: Caracteriza la cercanía de una medición respecto a su valor real. Normalmente se describe mediante el error medio cuadrático (EMC).

GPS (Sistema de Posicionamiento Global): El sistema de posicionamiento global –un sistema de posicionamiento por satélite norteamericano utilizado para efectuar levantamientos sobre el terreno. Rusia dispone del sistema GLONASS y Europa están trabajando en el sistema GALILEO.

HDS (High-Definition Survey) documentación gráfica de alta definición

ICOMOS: Consejo Internacional de Monumentos y Sitios Histórico-Artísticos

Láser (acrónimo de *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*): Haz intenso de luz que produce imágenes con impulsos electrónicos.

LiDAR (acrónimo de *Light Detecting and Ranging*): Término usado frecuentemente para referirse a escaneados láser aerotransportados pero que también se aplica a algunos sistemas terrestres.

MDE (Modelo Digital de Elevaciones): Modelo tridimensional de puntos XYZ de una superficie almacenados digitalmente.

MDS (Modelo Digital de Superficies): Modelo tridimensional de puntos XYZ almacenados digitalmente que cubren cualquier objeto en el espacio en su totalidad. En el caso de la superficie terrestre debe incluir objetos naturales (principalmente vegetación) y objetos hechos por el hombre como edificios y puentes.

MDT (Modelo Digital del Terreno): Modelo tridimensional de puntos XYZ de la superficie terrestre almacenados digitalmente. Por tanto, un MDT es un caso especial de los MDE (MDT = MDE de la superficie terrestre).

Metadatos: Datos utilizados para describir otros datos. Es una componente vital en el proceso de gestión de los datos.

Modelado: Proceso de creación de un modelo o una forma tridimensional, como pueden ser modelos 3D, NURBS o sólidos.

Modelo: Expresión que debería ser cualificada por el tipo de modelo, como por ejemplo modelo geométrico. Un modelo geométrico es, típicamente, una representación de una forma tridimensional.

Modelo 3D: Subdivisión poligonal de la superficie de modelo geométrico, también referido como modelo poligonal o modelo triangulado.

Nube de puntos: Conjunto de coordenadas XYZ en un sistema de coordenadas tridimensional. También puede incluir información adicional, como los valores de color y de reflectividad.

Orientación del escáner: Orientación del escáner en un sistema de coordenadas euclídeo tridimensional.

Origen del escáner: Origen de un sistema de coordenadas arbitrario en el que se realizan los escaneados estáticos. Cuando el origen del escáner se transforma al sistema de coordenadas local, se convierte en la posición del escáner

PADA: Plan de Arquitectura Defensiva de Andalucía.

PNAD: Plan Nacional de Arquitectura Defensiva

Posición del escáner: Situación, en un sistema de coordenadas conocido, desde el que se realiza un escaneado. Si el sistema no realiza un escaneado completo de 360 grados, pueden requerirse varios escaneados desde la misma posición del escáner, pero con diferentes orientaciones.

Precisión Geométrica: Mide el grado de dispersión de un conjunto de mediciones sobre la media, que normalmente se describe como la desviación estándar. Si n es el número de mediciones y v los residuos (es decir, la diferencia entre una cantidad medida y el valor más probable para esa cantidad), la precisión de un

conjunto de datos se puede representar por la desviación estándar:

$$S = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i^2}{n-1}}$$

Todas las referencias a la desviación estándar de un valor deben ir acompañadas de la probabilidad del error. Por ejemplo: ± 3 mm (con un 67% de probabilidad de error).

Puntos de referencia o de control: Punto geométrico del objeto escaneado que es altamente distinguible y puede localizarse con precisión gracias a su forma. También se le conoce por punto de detalle o diana natural.

Registro: Proceso de transformación de las nubes de puntos a un sistema de coordenadas común. Este proceso también se conoce con el nombre de alineación o consolidación.

Renderizado: Proceso de generar imágenes a partir de un modelo 3D informático. El modelo es una descripción de objetos tridimensionales en un lenguaje o estructura de datos estrictamente definidos. Debería contener la geometría, los puntos de vista, la textura, y la información de iluminación y sombreado.

Resolución: Distancia media entre las coordenadas XYZ en una nube de puntos. Normalmente se representa de dos maneras, resolución espacial y resolución angular.

- La distancia media 3D entre puntos a una cierta distancia del escáner (asumiendo que se mide entre los centros de las huellas de los puntos): 30 mm x 30 mm (a 50 m)
- El incremento angular de los dos ejes: $0.25^\circ \times 0.25^\circ$

La distancia media 3D entre puntos en el objeto es, probablemente, más clara para un usuario que no sea técnico. La densidad de puntos de un escaneado debe

verse como la densidad mínima de puntos en el objeto, sin tener en cuenta los datos periféricos (puntos sobre objetos no deseados).

Ruido del escáner: Nivel de desviación de una nube de puntos respecto de una superficie real, provocado por el ángulo de inclinación, el tamaño de la huella del punto, la reflectividad, las condiciones atmosféricas, etc.

SFM (Structure from Motion): Técnica de procesamiento de imágenes múltiples para el modelo tridimensional de objetos a partir fotografías no estructuradas.

SIG (Sistema de Información Geográfica): En el sentido estricto de la palabra, es un sistema de información capaz de gestionar, integrar, almacenar, editar, analizar, compartir y visualizar información geográficamente referenciada.

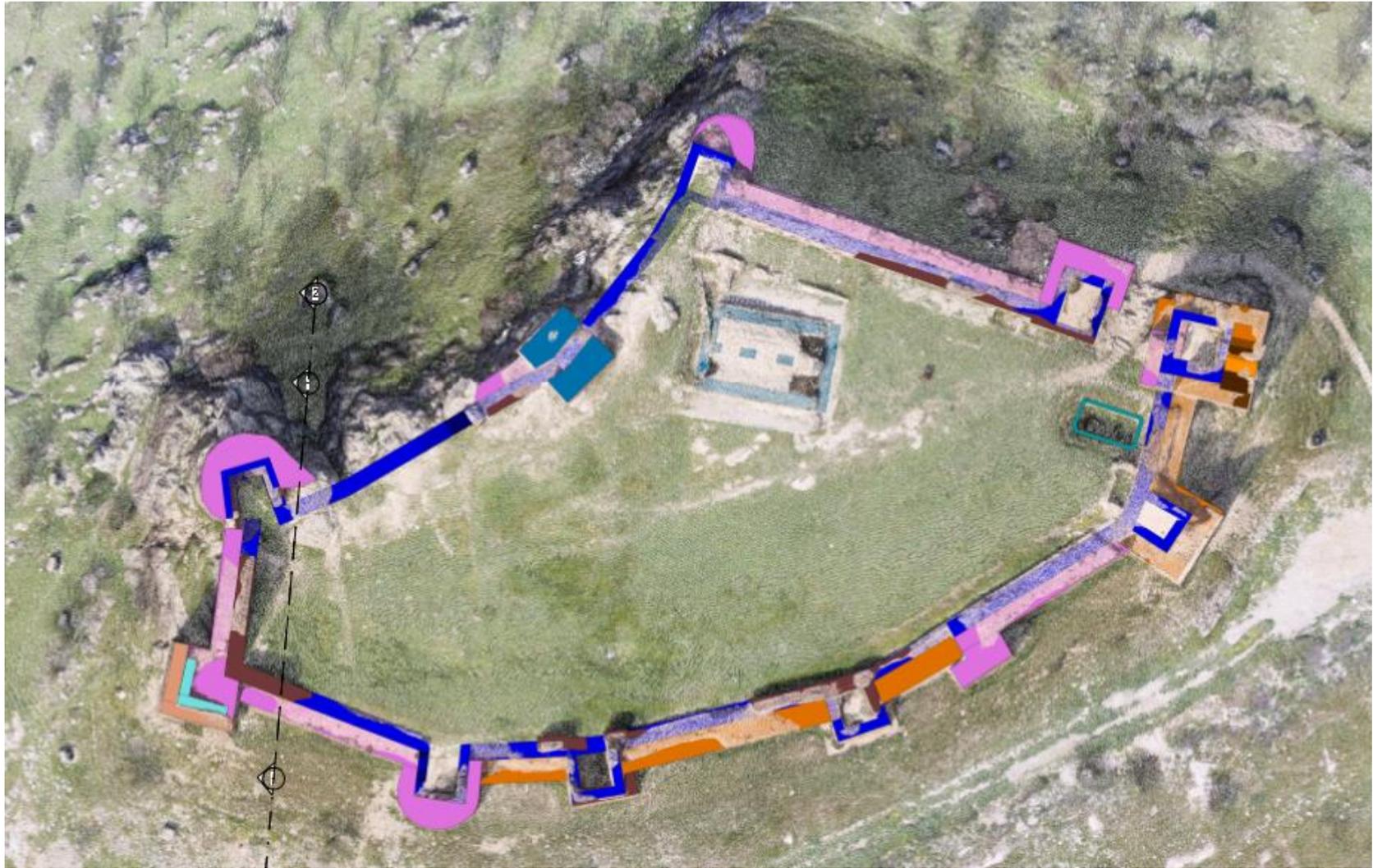
Tamaño del haz: Diámetro del haz láser emitido por el escáner, también conocido como huella.

TIN (Triangulated Irregular Network, Red Irregular de Triángulos): Representación de una superficie organizada en forma de red de triángulos sin solape.

UAV: Unmanned Aerial Vehicle (vehículo aéreo no tripulado), también denominado *Drone*

UEs: Unidades estratigráficas

Vacíos de datos: Secciones en la nube de puntos que no contienen datos.



Portada: alzado sur del alcazaba de Guadix con fases constructivas
Contraportada: planta del castillo de Píñar con fases constructivas

José Antonio Benavides López

Universidad de Granada