

Evaluación de fortificaciones rurales de tapia mediante técnica SfM de fotogrametría digital. Aplicación metodológica al Castillo de Alhonor (Écija, España)

Assessment of rural wall fortifications using SfM digital photogrammetry technique. Methodological application to Alhonor Castle (Ecija, Spain)

Resumen

Autores:
Giuseppe Carapellese*
g.carapellese@live.it
Jacinto Canivell*
jacanivell@us.es
Juan J. Martín-del-Río*
jjdelrio@us.es
Amparo Graciani-García*
agracianig@us.es
Elena Cabrera-Revuelta*
ecabrera2@us.es

*Universidad de Sevilla

España

Recibido: 01/Sep/2019
Aceptado: 02/Jun/2020

El Castillo de Alhonor, catalogado como Bien de Interés Cultural en 1985, es una de las fortalezas más importantes en el término municipal de Écija (Sevilla, España), resultando un enclave estratégico para las poblaciones asentadas en su entorno desde época protohistórica. A fin de contribuir en el avance del conocimiento de estos sistemas defensivos, y facilitar procesos de evaluación y diagnóstico de este tipo de estructuras, se ha implementado un procedimiento de modelado fotogramétrico digital basado en la técnica *Structure from motion* (SfM- Estructura desde el movimiento), como parte de una metodología testada ya por los autores. La aplicación de esta sencilla técnica, versátil y de baja especialización, ha permitido realizar una evaluación preliminar fiable para una toma de decisión por parte de los técnicos competentes.

Palabras clave: arquitectura militar, fotogrametría digital, construcción con tierra, lesiones, riesgos.

Abstract:

The Castle of Alhonor, catalogued as a heritage asset in 1985, is one of the most important fortresses in the municipality of Ecija (Seville, Spain), being a strategic site for the populations settled in its environment since protohistoric times. The aim of the study is to integrate the procedure of digital photogrammetric modelling based on the *Structure from Motion* (SfM) technique within a methodology already tested by the authors. By means of a simple technique, it is allowed to obtain straightforward information in order to evaluate and diagnose this type of structures, and also to contribute to the development of knowledge of these defensive systems. Implementing this versatile and low specialization methodology has enabled a reliable preliminary evaluation for decision making by competent technicians.

Keywords: military architecture, digital photogrammetry, rammed-earth construction, damage, risk.

1. Introducción

Aunque en la Península Ibérica hay constancia de la existencia de redes de defensa desde época prerromana, estas alcanzaron su mayor auge en los periodos romanos e islámico; dichas infraestructuras englobaban fortificaciones urbanas así como otras edificaciones (p.e. atalayas, castillos, fortalezas, entre otras) levantadas para controlar el territorio, las fronteras o enclaves de especial interés, razón por la que hoy han llegado tanto ligadas a núcleos urbanos de relevancia dispar como, en otros casos, aisladas en ámbitos rurales. Cuando a partir del siglo XI, con el avance de la Reconquista, las fortificaciones islámicas pasaron a los cristianos, unas mantuvieron su función defensiva y de control territorial, no sin que muchas de ellas fueran objeto de una intensa intervención (Molina Rozalem, 2016). A veces, como sucedió en las torres del valle de Segura de la Sierra (Jaén), estas se usaron no solo con fines defensivos sino también como espacio administrativo asociado a las comunidades del entorno (Quesada-García y García-Pulido, 2015). Sin embargo, por el desplazamiento de las fronteras, otras quedarán aisladas en el marco de su ámbito territorial, con lo que progresivamente perdieron su funcionalidad y cayeron en un gradual estado de abandono, llegando incluso a desaparecer, hasta el punto de que solo quedan evidencias toponímicas a estructuras militares preexistentes.

No es extraño que el patrimonio militar de carácter rural se encuentre en grave riesgo a pesar de que, como el resto de la arquitectura militar histórica, está protegido por la legislación nacional (Ley 16/1985 del Patrimonio Histórico Español). Su abandono y falta de uso han contribuido a ello, así como el carácter privado de muchas de estas arquitecturas, lo que en ciertos casos dificulta su documentación, mantenimiento y conservación, de modo que los restos arqueológicos suelen estar muy aislados, son muy vulnerables y están en grave peligro de desaparición, sin apenas haber sido documentados.

Pese a ello, en los últimos años han ido proliferando las investigaciones sobre los sistemas defensivos de diferentes áreas, entre los cuales cabe destacar los trabajos históricos territoriales de García-Dils, Márquez Pérez y Ordóñez Agulta (2000) sobre las fortificaciones ecijanas, y más recientemente el trabajo de Molina Rozalem (2016) sobre un grupo de fortalezas en la denominada Banda Gallega, que aplica metodologías y herramientas de catalogación integrales.

Sin embargo, aún siguen siendo muy contadas las intervenciones de restauración sobre construcciones rurales de carácter defensivo; entre ellas, el ejemplo más significativo, es la acometida sobre la Torre Bofilla de Betera (Valencia, España) que se fundamentó a tenor de unos detallados estudios previos (Mileto, Vegas y López, 2011).

El Antiguo Reino de Sevilla debió contar con un amplio número de fortificaciones rurales, a tenor de uno de los primeros registros efectuados mediante el catálogo arqueológico y artístico de Sevilla (Hernández Díaz, Sancho Corbacho y Collantes de Terán, 1955). Aunque Valor (2004) aborda de modo general el estudio de las fortalezas sevillanas posteriores al siglo XIII, aún siguen existiendo importantes lagunas cognitivas sobre las fortificaciones rurales e incluso son muy contados los estudios pormenorizados al respecto. Además, se requieren muchos esfuerzos para inventariar, catalogar y comprender el sistema defensivo.

Este trabajo pretende contribuir a este necesario avance en el conocimiento, proponiendo la aplicación de una técnica sencilla y accesible, el modelado tridimensional basado en la técnica fotogramétrica SfM, para inventariar y evaluar estructuras defensivas ejecutadas en tapia, técnica habitual en la arquitectura defensiva medieval de épocas islámica y cristiana, desde el convencimiento de que identificándolas y digitalizándolas se obtendrá un mejor conocimiento de ellas y se detectarán sus necesidades para la conservación preventiva (Achig, Jara, Cardoso y Van Balen, 2016).

En concreto, el estudio se centra en el Castillo de Alhonor (Figura 1), una fortaleza de Écija (Sevilla) que es una de las más relevantes en este ámbito. Como tantas construcciones defensivas de carácter rural, está en manos privadas, apenas ha sido documentada (Collantes de Terán, 1952), no ha sido intervenida, y se encuentra en un estado avanzado de degradación, lo que la hace especialmente vulnerable.

El castillo se levanta en un asentamiento poblado desde la prehistoria, que se mantuvo durante las ocupaciones musulmanas y cristiana, en las que probablemente tuvo un caserío asociado a la fortificación. Gracias a los estudios de García-Dils, Márquez y Ordóñez (2000), sabemos que dicho castillo, que hoy aparece aislado, debió formar parte de un complejo sistema defensivo conformado no solo por los elementos astigitanos que hoy se conservan (murallas urbanas, castillos ligados a alquerías y torres almenara) sino también por otras construcciones defensivas que permitían el control visual de la totalidad del entorno y de las que, en muchos casos, solo quedan vestigios de sus cimentaciones (García-Dils et al., 2000). A partir del siglo XV, el Castillo de Alhonor fue perdiendo su vecindario, reduciéndose a una fortaleza que, por su valor estratégico, conservó una guarnición de cuyo estado era responsable el Cabildo ecijano.

2. Metodología

Para recopilar la información, así como para inspeccionar el estado de conservación del castillo y registro de los datos, se han seguido las indicaciones de la norma UNE-EN 16096:2016 (2016). Para el diagnóstico y evaluación de fábricas históricas de tapia se ha partido del marco metodológico de evaluación planteado por Canivell, Jaramillo-Morilla, Mascort-Albea y Romero-Hernández (2020), considerándose además otros trabajos similares

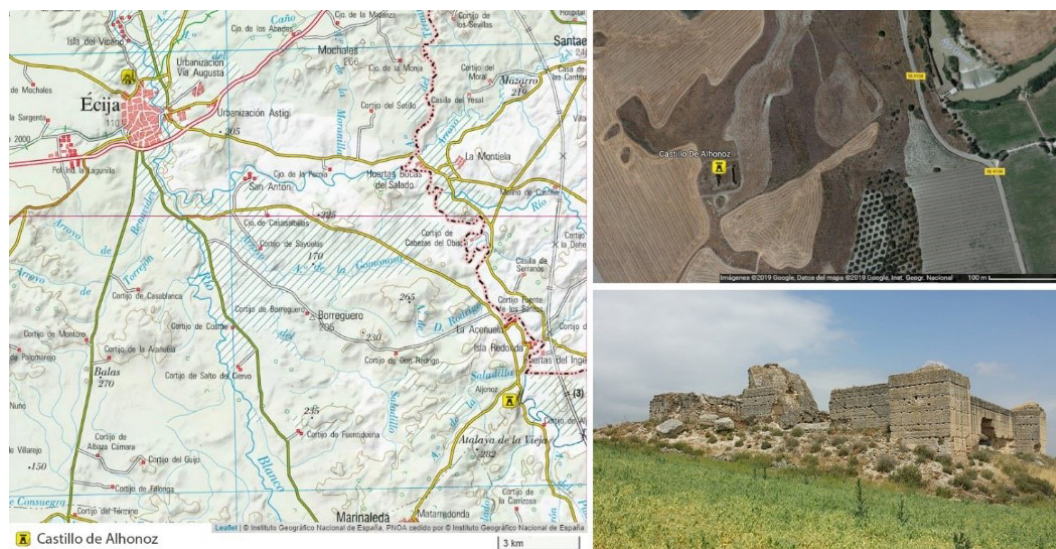


Figura 1: Plano de localización (Instituto Geográfico Nacional de España), ortofoto (Google) y vista general (fuente propia), del Castillo de Alhonz

Fuente: Propia

entre ellos la propuesta metodológica de García-Pulido, Ruiz Jaramillo y Alba Dorado (2017) y otros análisis particulares como el propuesto por López Osorio para la Torre de los Secretos Castillo de Baena (López Osorio, 2012).

El procedimiento propuesto constó de las siguientes fases:

1. Documentación y toma de datos. Inicialmente se recopiló información, tanto escrita como gráfica, para definir el estado de conocimiento del objeto de estudio por medio de fuentes de diversa naturaleza (documental y archivística). Posteriormente se recogieron datos y medidas in situ, así como muestras de las estructuras, para ser tratadas posteriormente. Estos datos se gestionaron a través de unas fichas de diagnóstico, cuyos parámetros siguieron las recomendaciones e indicaciones de las referencias antes citadas.
2. Generación del modelo 3D. A partir de la información recopilada en la fase anterior se realizó un modelo virtual de castillo mediante la técnica de fotogrametría digital denominada *Structure from Motion* (SfM).
3. Caracterización del modelo 3D. Se estableció una jerarquización por sectores homogéneos atendiendo a criterios técnicos, que sirvió para armar la base de datos. A partir del esquema de datos propuesto por Canivell (2012) y Canivell, Rodríguez-García, González-Serrano y Romero Girón (2020), se realizó una identificación de los datos constructivos, materiales, de lesiones y riesgo de cada elemento establecido en la fase anterior.
4. Análisis y evaluación. A partir de la caracterización de cada sector se emitió un diagnóstico y se desarrolló una propuesta de intervención.

2.1 Documentación y toma de datos

Una vez recopilada y analizada la escasa información referente al castillo, se procedió a realizar el trabajo de campo. La toma de datos, realizada en 2017, conllevó el registro y la documentación del castillo, en lo que se refiere a su estado de conservación, aspectos constructivos, materiales, de protección, legales, o sobre su situación e identificación general. Se recogieron además datos descriptivos del entorno geográfico inmediato, así como los referentes al propio registro.

Los datos manejados para esta inspección se elaboraron conforme a las normas de referencia (UNE-EN-16096, 2016) y con criterios similares a los que lo han sido en otros trabajos (Ramos et al., 2018). Para ello se confeccionaron unas fichas de diagnóstico que han servido para el trabajo de campo y que nutren la base de datos.

2.2 Generación del modelo 3D

La Fotogrametría se define como el arte, la ciencia y la tecnología para obtener información fiable sobre objetos físicos y el medio ambiente a través de procesos de grabación, medición e interpretación de imágenes fotográficas y patrones de energía electromagnética radiante registrada y otros fenómenos (Wolf y Dewitt, 2000).

La fotogrametría permite el levantamiento instrumental indirecto y la reconstrucción de la forma geométrica de un contexto territorial, urbano o arquitectónico, mediante una o más imágenes fotográficas (Bianchini, 2008). Desde hace más de 20 años, compañías como Eos System Inc. han ofrecido softwares, como por ejemplo Photomodeler, capaz de obtener modelos 3D a partir de fotografías. Sin embargo, en los últimos años se ha experimentado un avance muy significativo debido al desarrollo de nuevos algoritmos que han facilitado la

creación de modelos tridimensionales, aplicando la técnica *Structure from Motion* (SfM) (Rodríguez-Navarro, Gil-Piqueras y Verdiani, 2016).

La técnica SfM es considerada como un método fotogramétrico automatizado de alta resolución y bajo coste en relación a otras técnicas. Los principios en los que se basa son los mismos que los de la fotogrametría estereoscópica clásica: la estructura en 3D se resuelve gracias al solape entre imágenes obtenidas desde distintos puntos de vista. Esta técnica tiene sus orígenes en el campo de la visión artificial y difiere fundamentalmente de la fotogrametría convencional en que la geometría de la escena, las posiciones de cámara y la orientación y deformaciones de la misma se resuelven mediante cálculos computacionales (Tomás-Jover, 2016). La técnica SfM permite obtener modelos tridimensionales de gran exactitud y con texturas fotorrealistas, y es en la que se basan la mayoría de programas de generación de modelos fotogramétricos. En algunos estudios se considera como una ciencia diferente a la fotogrametría (Paris, 2012), sin embargo, las dos técnicas comparten los mismos fundamentos científicos.

Para la documentación del patrimonio arquitectónico, actualmente se usan también otras técnicas, como el escaneado mediante láser, así como el uso cada vez más frecuente de drones para la toma de imágenes desde zonas de difícil acceso y que hace unos años resultaba impensable.

Algunos trabajos interesantes se aproximan al modelado tridimensional a partir de imágenes mediante el aprovechamiento de sensores digitales terrestres de alta resolución para reconstruir y modelar el objeto mediante las imágenes independientes (Remondino y Menna, 2008). En el ámbito arquitectónico, la fotogrametría digital ha sido empleada en trabajos similares al que aquí se aporta, como el de la Torre Bofilla (Vegas, Mileto y Cristini, 2014) con el fin de estudiar el estado actual, las patologías y las técnicas constructivas. En estos casos se demuestra la viabilidad del uso de cámaras de bajo coste y software comercial para realizar los modelos 3D. Otros autores optan por las ventajas de combinar técnicas diferentes mezclando fotogrametría digital y láser escáner 3D (Peña-Villasenín, Gil-Docampo y Ortiz-Sanz, 2019).

La metodología propuesta permite obtener un modelo 3D empleando una logística sencilla que garantiza una precisión suficiente. Las razones del empleo de la técnica de la fotogrametría digital, frente a otras como el uso del escáner o de la estación total, se sustentan en (I) la disponibilidad en el mercado de una gama diversa de software especializado y su buena relación calidad/precio, (II) la idoneidad de los datos 3D obtenidos desde un punto de vista arquitectónico y constructivo (el modelo 3D permite evaluar pérdidas de masa, la presencia de irregularidades o deformaciones), que además es razonablemente similar a los generados por un láser escáner y (III) por la facilidad de acceso a dispositivos de uso cotidiano que, siendo consciente de sus limitaciones, permiten desarrollar trabajos de investigación en edificaciones que se encuentran en espacios rurales aislados y que presentan dificultades de accesibilidad.

La técnica empleada para la generación del modelo tridimensional se puede describir según la siguiente secuencia de procesos y herramientas:

- Toma de datos. En esta fase se realiza la toma de datos fotográficos, así como la toma de medidas. Mediante una cámara integrada en un dispositivo móvil, manteniendo la distancia focal, se realizan varios barridos de imágenes en planos medios y de detalle, procurando un solape entre cada una, aproximadamente de un 80%. También se realizan mediciones referenciadas con dispositivo láser portátil para escalar posteriormente el objeto y evaluar el error. Es importante tener en cuenta las recomendaciones proporcionadas por el software que se va a utilizar en la siguiente fase, Agisoft Metashape©.

En esta ocasión se ha escogido la utilización del software anteriormente mencionado, debido a los buenos resultados obtenidos con el mismo, así como por ofrecer tanto una interfaz amigable como un tiempo de procesamiento razonable. Otra de las ventajas que ofrece es la posibilidad de editar el modelo generado.

Sin embargo, se debe considerar la posibilidad de utilizar otros softwares que ofrecen soluciones similares, tanto gratuitos (AliceVision MeshRoom, Visual SfM) como de pago (Autodesk ReCap, RealityCapture).

- Tratamiento de imágenes. Primero se introducen todas las fotografías en el software Agisoft Metashape© para realizar una evaluación preliminar de la calidad de las imágenes y eliminar las que puedan generar problemas en el proceso de alineación. Posteriormente, se realizan las máscaras que sean necesarias, para eliminar las zonas no deseadas de las imágenes, como pueden ser elementos móviles u objetos no deseados. gratuitos (AliceVision MeshRoom, Visual SfM) como de pago (Autodesk ReCap, RealityCapture).
- Procesamiento de imágenes. El software elabora en primer lugar una alineación de las imágenes, cuyo resultado es una nube de puntos dispersa. A continuación, se obtiene la nube de puntos densa. Posteriormente se realiza el mallado con y sin texturas, que será escalado en función de las medidas tomadas in situ. El resultado es la obtención del modelo fotogramétrico tridimensional texturizado, el cual es usualmente exportado en formato OBJ.
- Caracterización del modelo 3D. El modelo se importa a Cinema 4D©, que es un software empleado para la generación de escenas 3D de alta calidad, y posibilita la manipulación del modelo 3D, el ajuste visual y la creación de imágenes fotorrealistas mediante un rendering offline. En esta ocasión, la malla del modelo no se ha editado, por lo que principalmente se ha empleado para realizar los renderizados 3D de mayor calidad de las diferentes vistas (plantas, alzados y secciones).

Este procedimiento permite establecer una base gráfica de calidad suficiente como para analizar un objeto arquitectónico sin requerir recursos especializados y con costes económicos muy ajustados. Una cámara digital asequible permite obtener imágenes de suficiente calidad para la capacidad de elaboración de un ordenador de gama alta. Una de las claves es el algoritmo del software de fotogrametría, que permite elaborar un modelo fotogramétrico preciso con un tiempo de cálculo asumible y apropiado a las prestaciones de casi cualquier hardware.

2.2.1 Implementación en el caso de estudio

En cuanto al caso de estudio considerado, se deben tener en cuenta determinadas circunstancias que hacen singular este trabajo. Alhonz se ubica sobre una meseta de difícil acceso y de topografía muy accidentada, lo que dificulta el uso de medios auxiliares (trípodes, escáner láser, estaciones totales). Por ello, se propuso el uso de un dispositivo móvil con cámara fotográfica incorporada (modelo Galaxy Note 3 con cámara de 12 megapíxeles) sin trípode. Aunque se trata de una instrumentación no profesional, permite alcanzar resultados fiables. Para ello, las siguientes medidas han sido consideradas:

- Conociendo los fundamentos de la fotogrametría (Lerma, 2002) y adaptándolos a la técnica SfM, la toma de los sets de imágenes se debe ajustar a la geometría del objeto y a las condiciones ambientales, para lo que se aconseja una luz difusa, con contrastes reducidos, de forma que la exposición sea homogénea en toda la superficie.
- Las imágenes han de presentar un solape de al menos un 80%, para permitir al software detectar las formas y la geometría del edificio y mejorar la calidad de los detalles y de la textura.
- Se deben revisar las secuencias de imágenes, eliminando aquellas que sean redundantes o cuya calidad puedan aportar problemas en la elaboración. Adicionalmente se eliminan los fondos y objetos en movimiento mediante máscaras, para evitar una interpretación errónea de la nube de puntos. De esta forma, se consigue un procesado más rápido, así como una concentración mayor de datos en la nube de puntos obtenida.

Para la realización del modelo se tomaron 570 fotos. En su mayoría fueron tomas generales, salvo aquellas en que los alzados no eran totalmente visibles, en cuyo caso se emplearon planos cercanos. Esta considerable cantidad de imágenes fue necesaria debido a las irregularidades del objeto. Durante la toma de fotos fue posible acceder a la cabecera de una torre. De esta forma se pudieron obtener algunos planos específicos de áreas que desde el terreno eran inaccesibles.

El software empleado permitió generar las mallas de las cabeceras de cada lienzo con una calidad suficiente, así que no fue necesario aportar alguna corrección en post producción que hubiera restado fidelidad al modelo. Una vez obtenido el modelo fotogramétrico (Figura 2), compuesto por una nube de puntos de unos

40 millones de vértices, este se escaló utilizando las medidas conocidas entre distintos puntos de control. Estas medidas fueron tomadas durante la fase de toma de datos en la torre suroeste, que es un elemento arquitectónico con un módulo que se repite en las otras torres. Escalando el modelo no se reducen los puntos que definen la malla, simplemente se asocian a los mismos unas medidas reales insertando los puntos de control en el modelo.

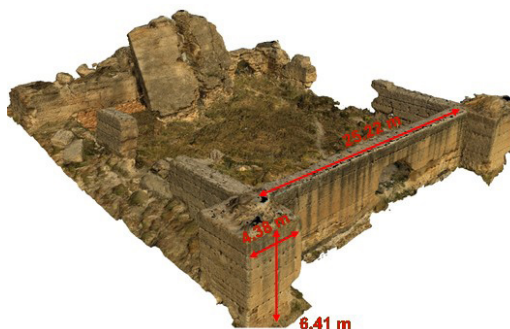


Figura 2: Imagen del modelo fotogramétrico de Aigsoft
Fuente: Elaboración propia

El error de aproximación del modelo ha sido calculado comparando las dimensiones de los lienzos en el modelo 3D con las dimensiones deducidas con medidor láser en fase de levantamiento. Se precisa que ha sido considerado en el cálculo el grado de error del medidor laser. El resultado arroja una diferencia entre las dos medidas de +/- 0,20 m sobre 25 metros, por lo que el error asciende a un 0,8 %.

Finalmente, se exporta el modelo fotogramétrico a otro software donde puede editarse y mejorar su visualización. Para ello, con Cinema 4D® se obtuvieron las ortofotos, que fueron empleadas como base gráfica en la fase de caracterización y evaluación (Figura 3).

2.3 Caracterización del modelo 3D

La fase de caracterización es clave para argumentar adecuadamente una toma de decisiones. Existen actualmente procedimientos y herramientas en este sentido (Stefani et al., 2014), aunque pocas adaptadas para el tipo concreto de fortificaciones militares de tapia.

Se estableció la caracterización del bien según tres perspectivas: constructiva, lesiones y riesgos, que serán expuestas pormenorizadamente en el apartado 3. Siguiendo la metodología establecida por Canivell et al. (2020a), se realizó una sectorización de los lienzos y torres, organizando todos los parámetros recogidos en las fichas de diagnóstico de la primera fase, y asignando un código alfanumérico compuesto por:

- Un código de identificación (ECICAS)
- Orientación del sector: N, S, E y O.
- Cara: Interior (I), Exterior (E).
- Sector: A-B, B-C, C-D, ...

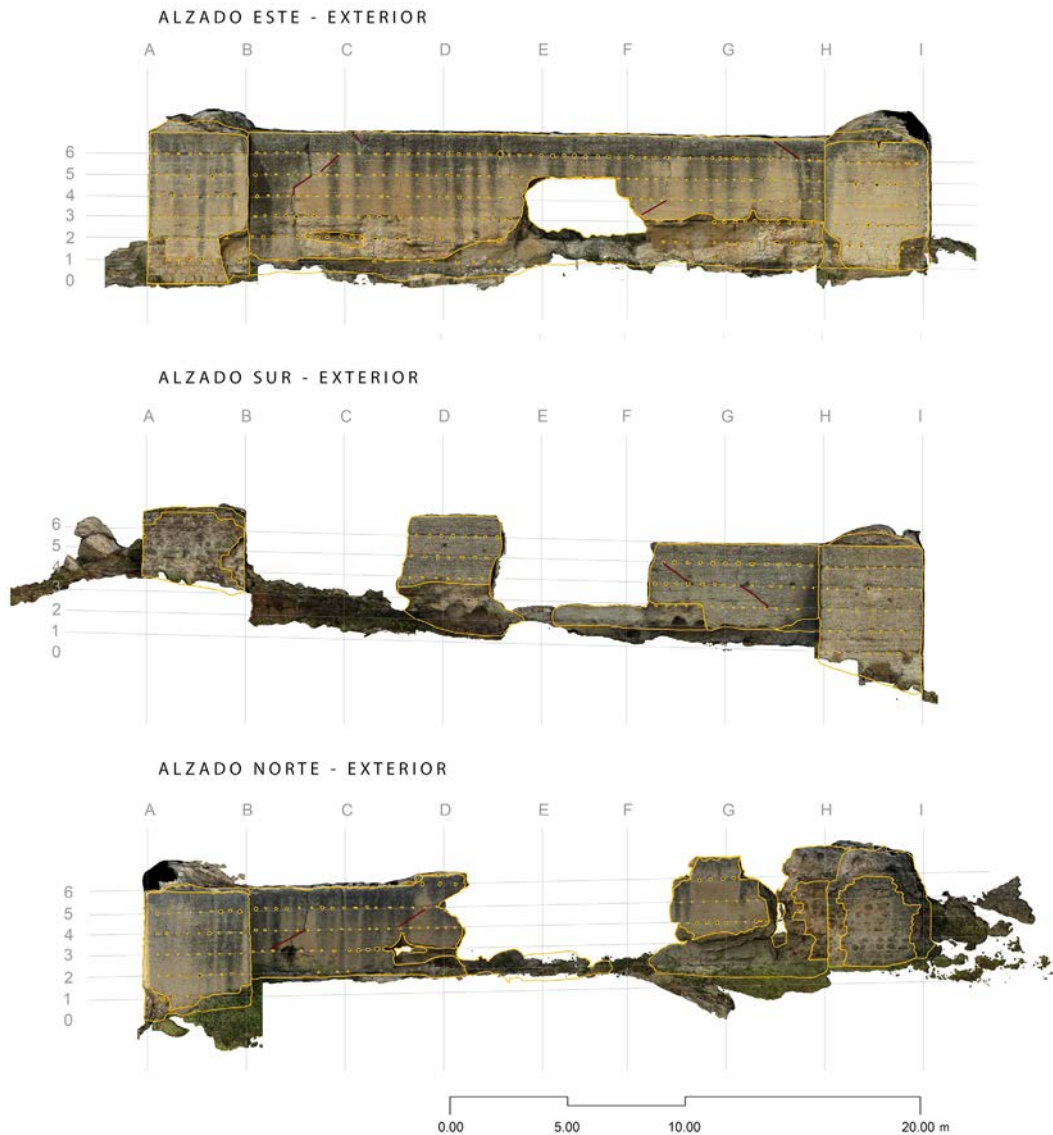


Figura 3: Ortofotos de los alzados exteriores del castillo
Fuente: Elaboración propia

La sectorización sigue criterios similares a los propuestos en otras edificaciones militares similares, que básicamente consideran secuencias de lienzos y torres, diferenciando caras interiores y exteriores (Canivell et al., 2020a). Se consideraron las caras de los lienzos y torres como objetos de estudio a sectorizar, las que se dividieron en sectores verticales. La longitud de cada sector responde al codo mamuní, que presumiblemente se empleó como módulo en la construcción, correspondiendo los lados de las torres a 10 codos –aproximadamente 4,5 metros– quedando los lienzos sectorizados en 6 módulos enteros de esta longitud (Figura 3). La sectorización se replanteó en las ortofotos (Figura 3), donde se enumeraron los hilos de tapia en cada alzado interior o exterior.

3. Resultados y discusión

A continuación, se exponen las aportaciones procedentes de la fase IV que engloba todas las diferentes aproximaciones a la evaluación del objeto de estudio: constructiva, material, estado de conservación y riesgos.

3.1 La evaluación constructiva

A cada sector se asociaron varios tipos de fichas de diagnóstico que recogían los datos tomados en la fase II y otros que se extrajeron del análisis del modelo 3D, para lo que se procedió a vectorizar las ortofotos para identificar las juntas, mechinales, agujas o refuerzos. Los datos generales se volcaron en la ficha 1 (Figura 4a), y los rasgos constructivos en la ficha 2 (Figura 4b), que se subcategorizó en aspectos del sistema constructivo, sobre la métrica de sus partes o sobre la caracterización de los materiales analizados.

La técnica del sistema constructivo se realizó conforme a las tipologías establecidas por Graciani y Tabales (2008), considerando además otros parámetros como el tipo de mechnal, su terminación y su ritmo, la existencia de juntas verticales o inclinadas, o de refuerzos en las caras, como los calicostrados. La métrica del hilo de tapia o del cajón se detalló con sus dimensiones básicas, siendo el alto o módulo de la tapia la más característica. Adicionalmente se tomaron medidas de las improntas de los encofrados, y en su caso de las agujas, incidiendo en su morfología, sección, posición respecto a las juntas y separaciones. Las determinaciones constructivas se completaron con datos de los materiales constituyentes, que posteriormente se expondrán.

Del análisis realizado a partir de los datos constructivos, se extraen a modo de resumen los aspectos más característicos de las fábricas analizadas (Tabla 1). Se observa que todos los sectores analizados presentan una gran homogeneidad constructiva, ya que se repiten reiteradamente los mismos parámetros, lo que evidencia que, salvo la Torre del Homenaje y el lienzo norte, todo corresponde a una única fase constructiva. Las fábricas son de tipo monolítico, sin refuerzos, estando los hilos contruidos mediante cajones corridos, ya que solo aparecen juntas inclinadas. Se puede deducir de la disposición de esas juntas que posiblemente los hilos 3, 4 y 5 (Figura 3) se fueron elaborando desde dos puntos –uno desde la esquina suroeste y otro desde la noroeste– confluyendo en la torre sureste. El hilo 6 muestra juntas inclinadas en el otro sentido, por lo que se cambiaría el sentido de la ejecución, por ser una fase de ampliación posterior o por un ajuste para evitar coincidencias entre

juntas, como se argumenta en la Torre Bofilla (Vegas et al., 2014). Respecto a la caracterización métrica (Tabla 1) se detecta que la distancia entre los mechnales corresponde aproximativamente a un codo mamuni (Martínez Enamorado, Martínez Salvador y Bellón Aguilera, 2007), como también describen estudios anteriores para fortificaciones similares (Canivell y Graciani, 2015). El módulo del cajón es alto (90 cm o dos codos mamunies) mientras que la agujas son planas y están casi alineadas a las juntas horizontales. Todos estos rasgos son evidencias compatibles con fábricas islámicas.

3.2 Caracterización material

Se han estudiado cinco muestras, dos de ellas correspondientes a muestras de mortero (M1 y M2) y las otras tres muestras correspondientes a la propia tapia (T1-T3). En este trabajo se presentan los resultados de algunos de los ensayos de caracterización química, física y mecánica (Tabla 2). Los resultados de los análisis químicos y mineralógicos, realizados según procedimientos ya establecidos (Martín-del-Río, Flores-Alés, Alejandro-Sánchez y Blasco-López, 2018), muestran rasgos similares a tapias y morteros confeccionados con una fracción caliza importante y donde se descarta el empleo de yeso como conglomerante en favor de la cal.

El método empleado para la determinación de las propiedades físicas (densidad real, aparente y porosidad abierta), siguió la norma EN-1936:2007. Los resultados obtenidos de porosidad oscilan entre el 38% y 50 %.

Figura 4: Fichas de diagnóstico 1 de datos generales (a) y de datos constructivos (b)
Fuente: Elaboración propia

SISTEMA CONSTRUCTIVO			
Monolítico	Por cajón corrido	Calicostrado	Ritmo de agujas y mechinales: constante
MÉTRICA DEL CAJÓN			
Espesor: 150 cm		Modulo: alto 85 cm < H < 95 cm	
MÉTRICA DEL MECHINAL / AGUJA			
Separación agujas: 40 cm – 50 cm		Posición de la aguja: En línea con la junta horizontal	

Tabla 1: La caracterización constructiva. Parámetros constructivos representativos

En general, las tapias históricas suelen presentar unos valores de porosidad elevados, habitualmente superiores al 35%, por lo que se puede afirmar que los resultados obtenidos son habituales y típicos de materiales muy porosos. Para la determinación de la resistencia mecánica a compresión se ha seguido la norma UNE-EN 1015-11:2000, procediendo al tallado de siete probetas, de geometría aproximadamente cúbica y esbeltez 1. Los valores de resistencia obtenidos (tabla 2) para las muestras han sido bajos si se comparan con el rango habitual para una muestra de tapial (20-80 kg/cm²).

En una primera fase, el estudio de la granulometría de las tapias se realizó mediante el ataque de las muestras con ácido clorhídrico concentrado, eliminando de esta forma la matriz de cal carbonatada que actúa como conglomerante de las partículas y granos de la tapia, lo que puede inducir a imprecisiones en las curvas granulométricas obtenidas. Al analizar los finos, teniendo en cuenta las recomendaciones de finos (Walker, 2001), se puede observar que el contenido es bastante elevado, lo que unido a la considerable diferencia entre el módulo granulométrico y el correspondiente de Fuller (Tabla 2), sugiere la baja compacidad del árido empleado.

3.3 Evaluación de lesiones

A continuación, se registraron las lesiones desde un punto de vista cualitativo. Estas se clasificaron en estructurales –las que afectan a la estabilidad estructural-, materiales –ligadas a la cohesión del material y el grado de erosión- y superficiales, que corresponden a alteraciones de la

capa más superficial. Metodológicamente es importante señalar que el modelo 3D –con y sin textura (Figura 5)– y las ortofotos, suponen un recurso valioso para determinar datos de fábricas en edificaciones poco accesibles. Se evidencia además facilidad para identificar ciertas lesiones (grietas o pérdidas de masa) cuando la textura está desactivada. Partiendo de las ortofotos vectorizadas, se generaron nuevas capas vectoriales para cada categoría de lesiones, obteniendo los alzados de las figuras 6, 7 y 8. El siguiente paso fue evaluar el grado de afección de cada lesión y sus posibles causas, para así poder emitir un diagnóstico del estado actual.

Las causas fueron clasificadas en físicas, aquellas originadas por fenómenos externos, meteorológicos, humanos o animales; químicas, relacionadas con reacciones químicas entre materiales que alteran las propiedades físico-mecánicas originales; y mecánicas, que se relacionan con la sollicitación estructural de las fábricas, ya sea por variación de cargas, de temperatura o alteraciones del firme.

Los lienzos del castillo presentan importantes grietas pasantes (Figura 6), a veces asociadas a grandes pérdidas de masa que debilitan la integridad estructural, como ocurre en el lienzo este, sectores DE, EF y FG. Estas grietas presentan cierta inclinación, por lo que es posible que sean debidas a tensiones excesivas de tracción provocadas por la oquedad existente en el centro del vano. Abundan también grietas verticales que suelen aparecer por retracciones de muro, por variación de temperatura, o incluso originadas en la ejecución durante el secado del muro.

	PROPIEDADES	M1	M2	T1	T2	T3
	Sector	ECICAS-O-E-HI	ECICAS-O-E-BC	ECICAS-E-E-FG	ECICAS-N-E-FG	ECICAS-O-E-FG
PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS	Finos (%) (63µ)	32,10	45,92	17,10	47,48	41,59
	Mód. Granulométrico	1,67	0,99	2,15	1,06	1,62
	Módulo de Fuller	3,00	3,88	3,88	3,88	3,88
	Densidad aparente (gr/cm ³)	1,33	1,26	1,50	1,53	1,33
	Porosidad (%)	47,60	50,93	38,76	38,71	49,18
	R. Compresión (MPa)	0,86	1,87	2,57	2,21	1,10
PROPIEDADES QUÍMICAS	CaCO ₃ (%)	57,35	69,00	78,03	56,90	72,59
	SO ₃ (%)	0,33	0,26	-	0,33	-
	YESO (%)	0,71	0,56	-	0,71	-
	Cl (PPM)	5655	5883	3694	3480	140

Tabla 2: Resumen de las principales propiedades químicas, mecánicas y físicas



Figura 5: Modelo de Cinema 4D© sin texturas (izquierda) y con las texturas (derecha).

Fuente: Elaboración propia

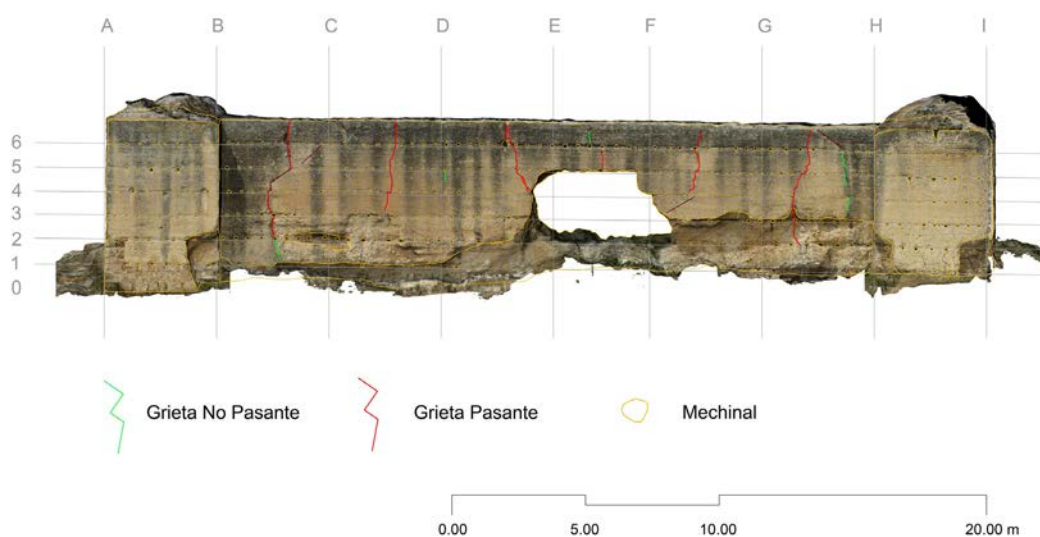


Figura 6: Alzado este con indicación de las lesiones estructurales

Fuente: Elaboración propia

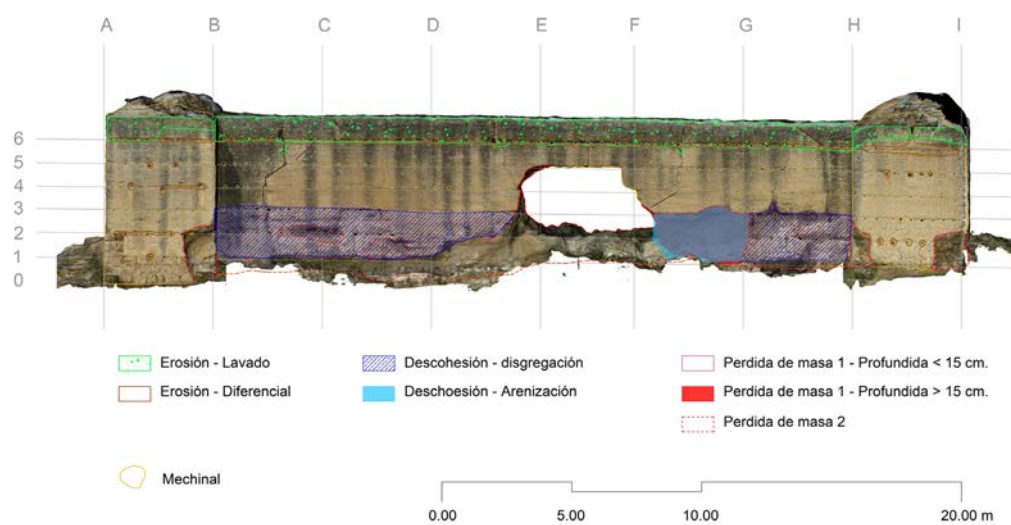


Figura 7: Alzado este con indicación de las lesiones materiales.

Fuente: Elaboración propia

El estado de degradación frente a las lesiones materiales (Figura 7) es en general muy deficiente, habiéndose perdido sectores completos por colapso de la estructura. Casi todos los sectores presentan importantes pérdidas de masa en la base, algunas producidas por acción antrópica y otras por la descohesión originada por el ascenso de humedad capilar unida a la acción de la erosión. La cabecera de los muros, al quedar expuesta al lavado continuo, es otro foco importante de lesiones. La erosión diferencial está generalizada y se produce cuando el agua que se acumula en juntas, mechinales o grietas, debilita el material y lava zonas internas del muro que son más susceptibles, a su vez, de retener humedad, por lo que se entra en un peligroso ciclo de lesiones.

Los daños superficiales (Figura 8) son de menor impacto en la integridad estructural. Se observa que en todas las superficies menos expuestas al sol y al viento y en los rincones, el nivel de ensuciamiento es más elevado. Estas suciedades abundan aún más cuando se produce el mencionado lavado diferencial, ya que la acumulación y el lento lavado de agua tiende a retener partículas de suciedad en los poros, intensificando así las manchas y costras.

3.4 Evaluación de riesgos

Una vez detectadas las causas de las lesiones, se establecieron las vulnerabilidades más relevantes para la tapia. En lo concerniente al aspecto estructural, es bien conocida la debilidad mecánica ante la acción del sismo (Ortega et al., 2015; Silva et al., 2018). La acción de la humedad por capilaridad y filtración suele ser un factor de degradación importante (Becerra, Camacho Pérez y Gomez-Villalba, 2013). Además, un exceso de humedad altera la resistencia mecánica y la estabilidad (Champiré, Fabbri, Morel, Wong y McGregor, 2016). Por último, la pérdida de cohesión y la erosión son otros factores decisivos en una tapia. Por lo tanto, se considera la vulnerabilidad frente a la estabilidad estructural el sismo, mediante el nivel de riesgo ante el sismo (NR-S), ante las

humedades por capilaridad –mediante el nivel de riesgo frente a la capilaridad (NR-C)-, ante la filtración de agua –mediante la evaluación de niveles de riesgo frente a la filtración (NR-F)-, y ante a la erosión –mediante el nivel de riesgo frente a la erosión (NR-E). Cada vulnerabilidad se define por un grupo de factores de riesgo. A continuación, se caracterizó el riesgo por medio de estos factores preestablecidos, según el procedimiento propuesto por Canivell (2012), y con la finalidad de establecer una jerarquía de niveles de urgencia, que corresponde con el nivel de riesgo (NR), a fin de diseñar un programa de actuación adecuado (UNE-EN-16096, 2016).

La evaluación se completó sumando los valores de NR de las dos caras de cada sector (tabla 3). Con el fin de obtener una evaluación del nivel de riesgo total (NRT), por cada tramo que permitiera un análisis comparativo se consideró una suma de los niveles de riesgo, otorgando igual peso a cada riesgo. Así, se puede comprobar cómo los tramos más críticos corresponden a la zona central del lienzo este (sectores DE-EF-FG) (Tabla 3), que, aunque tiene niveles de deterioro similares a otros sectores, su vulnerabilidad es la más elevada por las graves consecuencias de un probable colapso del arco (Figura 3). No obstante, la caracterización material (tabla 2), atribuye a este tramo la mayor densidad aparente y resistencia a compresión, así como la mejor compacidad del árido, razones por las que presentando tal deterioro y riesgo se mantiene en pie.

Ante este escenario, se categorizaron diferentes rangos de prioridad para la intervención. Se considera un NRT ≥ 33 como la máxima prioridad, que corresponde con los sectores antes mencionados (tabla 3). Prioridad alta cuando NRT ≥ 30 , y prioridad diferida en el resto de los casos. Por ello, las medidas correctoras, que serán diseñadas según las deficiencias detectadas, pueden ser programadas en el tiempo incluso en distintas fases temporales, si fuera necesario.

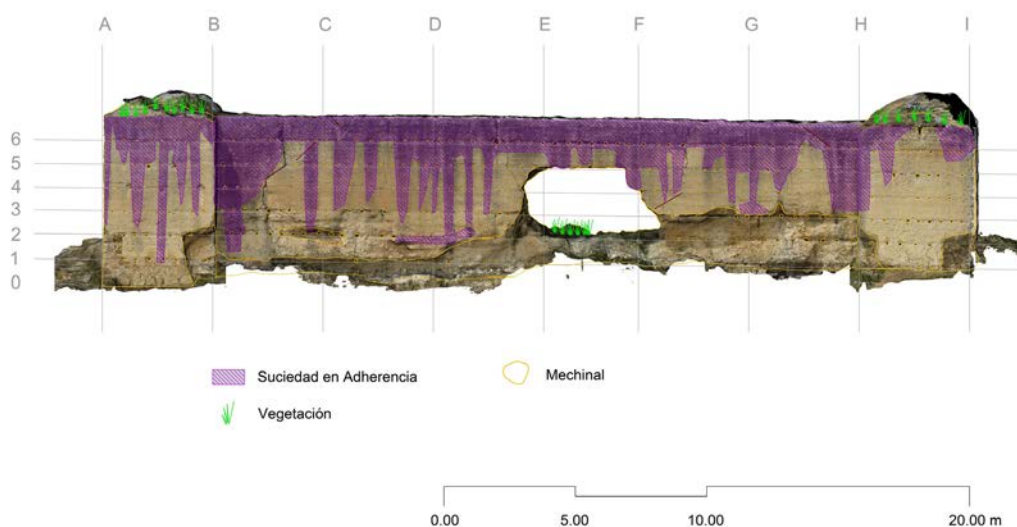


Figura 8: Alzado este con indicación de las lesiones superficiales.

Fuente: Elaboración propia

CÓDIGO	NR - S	NR - C	NR - F	NR - E	NRT
ECICAS-N-BC	8	7	7	6	28
ECICAS-N-CD	10	8	7	6	31
ECICAS-N-DE	10	8	7	6	31
ECICAS-N-FG	8	8	8	6	30
ECICAS-N-GH	8	8	8	6	30
ECICAS-N-HI	4	2	4	2	12
ECICAS-S-CD	10	8	8	6	32
ECICAS-S-DE	10	8	8	5	31
ECICAS-S-EF	10	8	8	6	32
ECICAS-S-FG	8	6	7	6	27
ECICAS-E-BC	8	6	7	6	27
ECICAS-E-CD	8	6	9	6	29
ECICAS-E-DE	9	7	10	8	34
ECICAS-E-EF	10	6	10	8	34
ECICAS-E-FG	10	8	10	8	36
ECICAS-E-GH	8	7	7	6	28

Tabla 3: Niveles de riesgo los sectores más desfavorables

4. Conclusiones

Se ha descrito un procedimiento integral de documentación gráfica y técnica de un tipo singular de fortificaciones construidas en tapia. La metodología abarca desde aspectos previos de documentación, toma de datos, levantamiento de un modelo 3D y la evaluación de su estado actual y de su proyección a futuro. En el Castillo de Alhonz, se ha planteado una metodología de baja especialización y versátil que posibilite una evaluación preliminar fiable para una toma de decisión posterior, demostrando su efectividad y fiabilidad.

Respecto a la representación gráfica, el procedimiento propuesto permite realizar, con pocos recursos, un modelado tridimensional de resolución limitada, que reduce exponencialmente los tiempos de cálculo, obteniendo una precisión razonable para una evaluación preliminar. Además, este procedimiento se puede emplear en lugares accidentados, donde equipos más complejos requerirían más recursos o mano de obra especializada. Sin embargo, existen algunas limitaciones, como unas condiciones de iluminación óptimas o la necesidad de cuidar la posición relativa de la cámara y el objeto, todas ellas cuestiones fácilmente asumibles. Se demuestra además que el error producido es asumible para el tipo de estudios, y aunque se ha podido representar el modelado completo del castillo, existen zonas –fundamentalmente la cabecera de los lienzos y torres– que presentan defectos en la malla al disponer de un menor número de imágenes.

La sectorización propuesta divide el castillo en unidades lógicas con contenidos teóricos parametrizables. Esta topología espacial se ajusta a la métrica de base del castillo –el codo mamuni– y permite graduar el nivel

de precisión deseado del análisis en función de su longitud de cada tramo o del número de paramentos implicados. Se establece así una base para futuros trabajos en los que se articule un sistema paramétrico de datos georreferenciados del bien patrimonial, también denominado *heritage Building Information Modeling* (hBIM). Sin embargo, el nivel de detalle adquirido complica el manejo de un modelo digital pesado, por lo que es posible que para este fin sea necesario redimensionar la nube de puntos. Considerando que entre los requisitos iniciales estaba el uso de un hardware sin prestaciones altas gráficas y de procesamiento, trabajar con una nube de 40 millones de puntos en hBIM podría suponer un inconveniente, por lo que sería recomendable reducir la densidad de los puntos.

Se han analizado tres categorías de parámetros (datos constructivos, lesiones y riesgos) para lo que desarrollar un modelo 3D se revela de especial importancia cuando no se disponen de recursos especializados, la documentación previa es escasa y la accesibilidad al objeto de estudio está restringida. Esta experiencia puede hacerse extensiva a un número mayor de bienes patrimoniales poco estudiados y con un riesgo alto de desaparecer. Por ejemplo, la red defensiva de Écija y su extensión en territorios colindantes, requiere de un estudio pormenorizado para su documentación y para establecer criterios de conservación objetivos que permitan prolongar su vida útil.

5. Referencias bibliográficas

- Achig Balarezo, M. C., Jara Ávila, D., Cardoso Martínez, F. y Van Balen, K. (2016). Hacia un plan piloto de conservación preventiva basado en la campaña de mantenimiento de San Roque. *Estoa. Revista de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad de Cuenca*, 3(5), 37–50. doi: 10.18537/est.v003.n005.05
- Becerra, J., Camacho Pérez, N. y Gomez-Villalba, L. (2013). Diagnóstico de patologías, caracterización mineralógica y estructural de la tapia pisada del Paredón de los Mártires (Bien de Interés Cultural colombiano) para trabajos de restauración. En *3er Congreso Iberoamericano y XI Jornada "Técnicas de Restauración y Conservación del Patrimonio."* La Plata, Argentina: Laboratorio de Entrenamiento Multidisciplinario para la Investigación Tecnológica- LEMIT.
- Bianchini, M. (2008). *Manuale di rilievo e di documentazione digitale in archeologia*. Roma, Italia: Aracne.
- Canivell, J. (2012). Characterization methodology to efficiently manage the conservation of historical rammed-earth buildings. En C. Mileto, F. Vegas y V. Cristini (Eds.), *Rammed Earth Conservation* (pp. 283–288). London, UK: Taylor & Francis Group.
- Canivell, J., Rodríguez-García, R., González-Serrano, A. M. y Romero Girón, A. (2020). Assessment of heritage rammed-earth buildings. The Alcázar of King Don Pedro I (Spain). *Journal of Architectural Engineering*, 26 (2). doi: 10.1061/(ASCE)AE.1943-5568.0000400
- Canivell, J., Jaramillo-Morilla, A., Mascort-Albea, E. J. y Romero-Hernández, R. (2020a). Methodological framework to assess military rammed-earth walls. The case of Seville city ramparts. En *Science and Digital Technology for Cultural Heritage* (pp. 83–87). London, UK: Taylor & Francis Group.
- Canivell, J. y Graciani, A. (2015). Caracterización constructiva de las fábricas de tapia en las fortificaciones almohades del antiguo Reino de Sevilla. *Arqueología de la Arquitectura*, 12, e025. doi: 10.3989/arq.arqt.2015.003
- Champiré, F., Fabbri, A., Morel, J. C., Wong, H. y McGregor, F. (2016). Impact of relative humidity on the mechanical behavior of compacted earth as a building material. *Construction and Building Materials*, 110, 70–78. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.01.027
- Collantes de Terán, F. C. (1952). *Los Castillos del Reino de Sevilla*. Sevilla, España: Diputación Provincial de Sevilla.
- García-Dils, S., Márquez Pérez, J. y Ordóñez Agulta, S. (2000). Sistemas de información geográfica aplicados al territorio de Écija: algunos ejemplos. En *III Congreso de Arqueología Peninsular Vol. VI, "Arqueología da Antiquidade na Península Ibérica"* (pp. 85–101). Oporto, Portugal: ADECAP. Associação para o Desenvolvimento da Cooperação em Arqueologia Peninsular.
- García-Pulido, L. J., Ruiz Jaramillo, J. y Alba Dorado, M. I. (2017). Heritage survey and scientific analysis of the watchtowers that defended the last Islamic kingdom in the Iberian Peninsula (thirteenth to fifteenth century). *En ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 26th International CIPA Symposium – Digital Workflows for Heritage Conservation* (Vol. XLII-2/W5) (pp. 259–265). Ottawa, Canadá. doi: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W5-259-2017
- Graciani, A. y Tabales, M. Á. (2008). El tapial en el área sevillana. Avance cronotipológico estructural. *Arqueología de la Arquitectura*, 5, 135–158. doi: 10.3989/arq.arqt.2008.93
- Hernández Díaz, J., Sancho Corbacho, A. y Collantes de Terán, F. (1955). *Catálogo arqueológico y artístico de la provincia de Sevilla*. Sevilla, España: Diputación Provincial de Sevilla.
- Lerma García, J. (2002). *Fotogrametría moderna: analítica y digital*. Valencia, España: Universidad Politécnica de Valencia.
- López Osorio, J. M. (2012). Restauración de la Torre de los Secretos. Castillo de Baena (Córdoba). *Loggia, Arquitectura & Restauración*, (24–25), 64-75. doi: 10.4995/loggia.2012.2999
- Martín-del-Río, J. J., Flores-Alés, V., Alejandro-Sánchez, F. J. y Blasco-López, F. J. (2018). New Method for Historic Rammed-earth Wall Characterization: The Almohade Ramparts of Malaga and Seville. *Studies in Conservation*, 64 (6), 363-372. doi: 10.1080/00393630.2018.1544429
- Martínez Enamorado, V., Martínez Salvador, C. y Bellón Aguilera, J. (2007). A vueltas con la cronología del edificio del Castillejo de Monteagudo, Murcia: estudio de un epígrafe con el lema de los nazaries y reflexiones sobre la metrología de sus tapias constructivas. *Verdolay. Revista del Museo Arqueológico de Murcia*, 10, 225–235.
- Mileto, C., Vegas, F. y López, J. M. (2011). Criteria and intervention techniques in rammed earth structures: The restoration of Bofilla tower at Bétera (Valencia). *Informes de la Construcción*, 63(523), 81–96. doi: 10.3989/ic.10.014
- Molina Rozalem, J. F. (2016). *Fortificaciones de la Banda Morisca en la provincia de Sevilla*. Sevilla, España: Diputación de Sevilla, Servicio de Archivo y Publicaciones.
- Ortega, J., Vasconcelos, G., Correia, M., Rodrigues, H., Lourenço, P. B., y Varum, H. (2015). Evaluation of seismic vulnerability assessment parameters for Portuguese vernacular constructions with nonlinear numerical analysis. In M. Papadrakakis, V. Papadopoulos, & V. Plevris (Eds.), *5th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake*. Crete Island, Greece.
- Paris, L. (2012). Fotogrametría e/o fotomodellazione. En *Geometria descrittiva e rappresentazione digitale. Memoria e innovazione*, II (pp. 55–62). Roma, Italia: Edizioni Kappa.

- Peña-Villasenín, S., Gil-Docampo, M. y Ortiz-Sanz, J. (2019). Professional SfM and TLS vs a simple SfM photogrammetry for 3D modelling of rock art and radiance scaling shading in engraving detection. *Journal of Cultural Heritage*, 37, 238-246. doi: 10.1016/J.CULHER.2018.10.009
- Quesada-García, S., y García-Pulido, L. J. (2015). El sistema de torres de origen medieval en el valle de Segura de la Sierra. La construcción de un paisaje. *Boletín del Instituto de Estudios Giennenses*, (212), 99-165.
- Ramos, L., Masciotta, M., Morais, M., Azenha, M., Ferreira, T., Pereira, E. y Lourenco, P. (2018). HeritageCARE: Preventive conservation of built cultural heritage in the South-West Europe. En *Innovative Built Heritage Models: Edited contributions to the International Conference on Innovative Built Heritage Models and Preventive Systems (CHANGES 2017)*. Leuven, Belgium: CRC Press. Taylor & Francis group.
- Remondino, F. y Menna, F. (2008). Image-based Surface Measurement for Close-range Heritage Documentation. En *The Int. Arch. of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. XXXVII-B Part B5 (pp. 199-206). Beijing, China.
- Rodríguez-Navarro, P., Gil-Piqueras, T. y Verdiani, G. (2016). Drones for Architectural Surveying. Their Use in Documenting Towers of the Valencian Coast. En E. Castaño y E. Echevarría (Eds.), *Architectural Draughtsmanship from analog to digital narratives*, (pp. 1555-1566). Cham, Switzerland: Springer.
- Silva, R. A., Mendes, N., Oliveira, D. V., Romanazzi, A., Domínguez-Martínez, O. y Miranda, T. (2018). Evaluating the seismic behaviour of rammed earth buildings from Portugal: From simple tools to advanced approaches. *Engineering Structures*, 157. doi: 10.1016/j.engstruct.2017.12.021
- Stefani, C., Brunetaud, X., Janvier-Badosa, S., Beck, K., De Luca, L. y Al-Mukhtar, M. (2014). Developing a toolkit for mapping and displaying stone alteration on a web-based documentation platform. *Journal of Cultural Heritage*, 15(1), 1-9. doi: 10.1016/J.CULHER.2013.01.011
- Tomás-Jover, R., Guill, A. J. R., González, M. C., Fernández, A. A. y Jordá, L. (2016). Structure from Motion (SfM): una técnica fotogramétrica de bajo coste para la caracterización y monitoreo de macizos rocosos. En *Reconocimiento, tratamiento y mejora del terreno: 10º Simposio Nacional de Ingeniería Geotécnica* (pp. 209-2016). A Coruña, España.
- UNE-EN-16096. (2016). *Conservación del patrimonio cultural. Inspección del estado e informe del patrimonio cultural construido*. Madrid, España: AENOR.
- Valor, M. (2004). Las fortificaciones de la Baja Edad Media en la provincia de Sevilla. *Historia, Instituciones, Documentos*, 31, 687-700.
- Vegas, F., Mileto, C. y Cristini, V. (2014). Constructive features and preservation work of rammed earth architecture: the Islamic tower of Bofilla (Valencia). *Journal of Architectural Conservation*, 20(1), 28-42. doi: 10.1080/13556207.2014.886377
- Walker, P. (2001). *The Australian Earth building handbook*. Sydney, Australia: Standards Australia International.
- Wolf, P. y Dewitt, B. (2000). *Elements of photogrammetry: with applications in GIS*. Nueva York, Estados Unidos: McGraw-Hill.