

La digitalización 3D del patrimonio cultural en museos: documentación, conservación, restauración, divulgación y didáctica

3D digitization of cultural heritage in museums: documentation, conservation, restoration, dissemination and teaching

MARÍA ÁVILA-RODRÍGUEZ  0000-0001-6822-2660

Universidad Internacional de La Rioja. Logroño, La Rioja, España.

maria.avila@unir.net

INMACULADA DELAGE-GONZÁLEZ  0000-0002-2393-1495

Universidad Internacional de La Rioja. Logroño, La Rioja, España.

inmaculada.delage@unir.net

YOLANDA LÓPEZ-LÓPEZ  0000-0003-4516-7843

Universidad Internacional de La Rioja. Logroño, La Rioja, España.

yolanda.lopez@unir.net

PABLO CISNEROS-ÁLVAREZ  0000-0002-4875-9273

Universidad Internacional de La Rioja. Logroño, La Rioja, España.

pablo.cisneros@unir.net

Recibido: 2 de julio de 2024 · Aceptado: 20 de agosto de 2025

Contribuciones de autoría

Los cuatro autores fueron responsables de la revisión bibliográfica, sistematización y análisis de los resultados. La primera autora fue responsable de la conceptualización teórica y consolidación de los resultados. Todos los autores son responsables de la revisión final.

CÓMO CITAR ESTE TRABAJO | HOW TO CITE THIS PAPER

Ávila-Rodríguez, M., Delage-González, I., López-López, Y., & Cisneros-Álvarez, P. (2025). La digitalización 3D del patrimonio cultural en museos: documentación, conservación, restauración, divulgación y didáctica. *Cuadernos de Arte de la Universidad de Granada*, 56: 193-213.

Resumen

El empleo de tecnologías digitales se ha convertido en un recurso fundamental en el ámbito museístico para cumplir e innovar en sus funciones donde se destacan las tecnologías 3D, ya que cada vez son más empleadas para la digitalización 3D del patrimonio cultural. Por ello, el objetivo principal de esta publicación es investigar sobre las aplicaciones que la digitalización 3D presenta en los museos. La metodología seguida se ha centrado en la búsqueda y análisis de artículos de impacto relativos a museos y a tecnología 3D. Los resultados obtenidos afirman que, cada vez con más frecuencia, las instituciones museísticas registran sus bienes patrimoniales en tareas relacionadas con la documentación, conservación, restauración, divulgación y didáctica. Para ilustrar cada una de estas aplicaciones, se han seleccionado los ejemplos más significativos sobre actuaciones publicadas en los últimos cinco años. Se concluye que el desafío que queda por asumir es integrar la digitalización 3D en los protocolos de actuación de los profesionales dedicados al ámbito de la conservación y la restauración, ya que mejora significativamente las tareas anteriormente citadas.

Palabras clave: Digitalización 3D; Tecnologías 3D; Museos; Documentación; Conservación; Divulgación.

Abstract

The use of digital technologies has become a fundamental resource in the museum field to fulfill and innovate in its functions, with 3D technologies standing out, as they are increasingly used for the 3D digitization of cultural heritage. Therefore, the main objective of this publication is to investigate the applications that 3D digitization presents in museums. The methodology followed has been the search for impact articles related to museums and 3D technology. The results obtained confirm that, increasingly frequently, museum institutions register their heritage assets in tasks related to documentation, conservation, restoration, dissemination and teaching. To illustrate each of these applications, the most significant examples of actions published in the last five years have been selected. It is concluded that the challenge that remains to be assumed is to integrate 3D digitization into the action protocols of professionals dedicated to the field of conservation and restoration, since it significantly improves the aforementioned tasks.

Keywords: 3D digitization; 3D technologies; Museums; Documentation; Conservation; Divulgation.

Introducción

En los últimos veinte años, el empleo de tecnologías digitales se ha convertido en un recurso fundamental en los museos (Giannini & Bowen, 2019; Meier; Berriel; Nava, 2021; Farella, *et al.*, 2022), considerándose incluso imprescindibles para cumplir e innovar en sus funciones (Taormina & Baraldi, 2022). Se destaca, no obstante, la digitalización 3D del patrimonio cultural, ya que cada vez es más común. De hecho, el registro masivo de bienes por parte de las instituciones museísticas se ha convertido en el centro de atención de programas e iniciativas europeas, tal y como ocurre con la Estrategia Europea de Patrimonio Cultural para el siglo XXI dentro del marco de la Agenda Digital. Esto ha supuesto un aumento del empleo de tecnologías de digitalización 3D por la rapidez, eficacia y fidelidad que conllevan a la hora de trabajar con objetos del patrimonio cultural (Tausch *et al.*, 2020; Farella *et al.*, 2022).

Por ello, el objetivo principal de esta publicación es investigar sobre las aplicaciones que la digitalización 3D presenta en los museos. Las tecnologías empleadas para llevar a cabo este tipo de registros que sobresalen son, el escáner láser (Barszcz *et al.*, 2023), la fotogrametría *Structure from Motion* (Ávila-Rodríguez & Santos-Gómez, 2022) y para algunos trabajos las tomografías computarizadas (Vasilyev *et al.*, 2019). Sin embargo, no pueden dejar de mencionarse las impresoras 3D ya que suponen una herramienta revolucionaria porque en ocasiones los archivos 3D deben materializarse (Liva, 2021). Surge así un nuevo horizonte en el que la digitalización se emplea por parte de los museos para numerosas tareas.

Procedimientos metodológicos

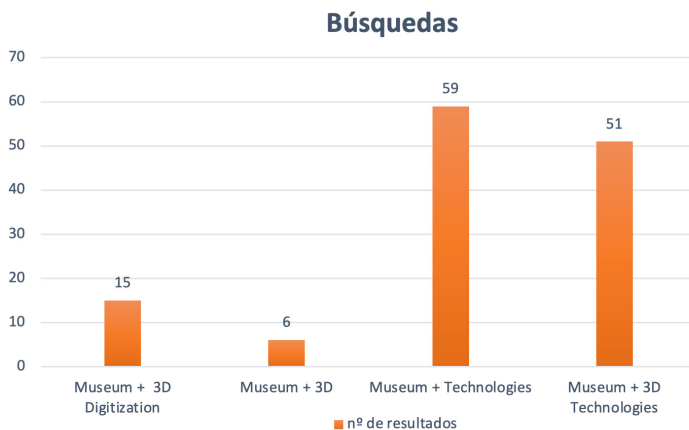
La metodología se ha centrado en la búsqueda de artículos de impacto relativos a museos y a tecnología 3D. Las revistas consultadas publicaron los trabajos entre el 2019 y el 2023. Se ha examinado la base de datos *Web of Science*, centrando la selección en las publicaciones con el factor de impacto *Journal Citation Reports*. Para la búsqueda booleana se ha usado como término principal la palabra “museum”, acompañada de otros cuatro “3D digitization”, “3D”, “technologies” y la combinación de estos dos últimos: “3D technologies”. También se ha incluido como parámetros de búsqueda que los términos apareciesen en el título o resumen, dando como resultado el siguiente número de publicaciones para cada una de las combinaciones de “museum” +:

“3D digitization” = 15;

“3D” = 6;

“technologies” = 59;

y “3D technologies” = 51.



Gráfica 1. Resultados de la búsqueda booleana en la base de datos *Web of Science*. Fuente: Elaborado por autores (2024).

De los artículos encontrados, se han seleccionado únicamente aquellos en los que museos de distintas especialidades y diversos ámbitos temáticos y geográficos han digitalizado en 3D su patrimonio. Tras analizar los resultados obtenidos se establece que la esta digitalización se emplea en el ámbito museístico para tareas de documentación, conservación, restauración, divulgación y didáctica (Fig. 1). Con el fin de ilustrar cada una de estas, a continuación, se han seleccionado los ejemplos más significativos. Además, se han añadido, de forma excepcional, otros casos por su relevancia para el artículo y al inicio de cada apartado se ha incluido una tabla para mostrar la relación de los casos citados atendiendo a la institución museística, país, tipo de colección/patrimonio, tecnología 3D empleada y patrimonio digitalizado.



Fig. 1. Usos y aplicaciones de la digitalización 3D del patrimonio cultural en museos. Fuente: Elaborado por autores (2024).

Documentación y conservación

INSTITUCIÓN MUSEÍSTICA	PAÍS	TIPO DE COLECCIÓN/ PATRIMONIO	TECNOLOGÍA 3D EMPLEADAS	PATRIMONIO DIGITALIZADO
Museu Nacional do Brasil	Brasil	Paleontológico, arqueológico y etnográfico	Fotogrametría SMF, ecografía, escáner 3D láser e impresora 3D	Cráneo de fósil Luzia
Museo Olavide de Madrid	España	Modelos dermatológicos	Escáner 3D de luz estructurada e impresora 3D	Molde de escayola
Museo Arqueológico Éolien de Lipari	Italia	Arqueológico	Escáner 3D láser, fotogrametría SMF e impresora 3D	Máscaras de arcilla
Museo Arqueológico Nacional	España	Arqueológico	Escáner 3D de luz estructurada e impresora 3D	Arco arquitectónico
Museo de la Casa de la Moneda de Segovia	España	Industrial	Fotogrametría SMF e impresora 3D	Escultura

Tabla 1. Relación de los casos citados en el apartado Documentación y conservación atendiendo a la institución museística, país, tipo de colección/patrimonio, tecnología 3D empleada y patrimonio digitalizado. Fuente: Elaboración propia, 2024.

Tal y como establece el *Código de deontología del ICOM para los Museos* (ICOM, 2017), estos han de asegurar que sus colecciones estén correctamente documentadas, cuestión que en la actualidad supone una de las principales funciones de los museos: crear bases de datos que sirvan para investigadores y público en general (Ávila-Rodríguez, 2018). La digitalización se ha convertido en una herramienta eficaz que complementa y apoya las actividades de estudio tradicionales (Giuffrida, 2019), por ello, en el ámbito de la documentación y la conservación, cada vez cobra más relevancia la obtención de registros digitales 3D en alta resolución.

Estos registros también adquieren un especial protagonismo a la hora de evitar trasladar objetos de arte o hallazgos desde el lugar de conservación a laboratorios específicos, ya que puede ser complicado, entre otros, por la fragilidad, el gran tamaño, la exposición a daños o la falta de autorizaciones (Giuffrida, 2021b). Con esta documentación se crea una referencia muy precisa que permite obtener bases de datos que sirven, entre otras, para evaluar el proceso de degradación y el tipo de riesgos a los que una obra se expone. Se posibilita así la detección de alteraciones al comparar diferentes registros para supervisar atentamente los bienes culturales. Por ello posibilita que numerosos daños se desvelen sin realizar otras pruebas que implican la toma de muestras invasi-

vas. Una rigurosa documentación permite también convertirse en un medio esencial con el que, tanto investigadores como público en general, analicen y contemplen un bien documentado que haya cambiado radicalmente o incluso desaparecido tras su digitalización. En este último caso, constituye la única forma de acceder a su valiosa información (Ávila-Rodríguez, 2018; Santana, 2014).

Timothy P. Whalen (2007) resaltaba en los primeros años del 2000 la importancia de documentar el patrimonio antes que desaparezca dado que el mundo está perdiendo su patrimonio cultural. Casi veinte años después esta afirmación se corrobora ya que tras el incendio que sufrió en 2019 la Catedral de *Notre-Dame*, en París, se empleó para su restauración un levantamiento 3D realizado en 2015 por el fallecido Andrew Tallon (García, 2019). Desde esta perspectiva, cabe destacar el análisis de las estrategias digitales tras un desastre o catástrofe aplicadas al patrimonio del Museo Nacional de Brasil. También el fuego afectó a gran parte de su estupenda colección que cuenta con cerca de veinte millones de piezas. Concluyeron que en situaciones en las que edificaciones y colecciones históricas se dañan, las tecnologías digitales resultan muy útiles en el proceso de reconstrucción de este patrimonio (Mott & da Silva, 2020). También fue fundamental la digitalización 3D en el Museo Olavide de Madrid, que conserva una de las colecciones de modelos tridimensionales dermatológicos realizados en cera de abeja policromada¹ más destacadas del mundo. Hernández-Muñoz *et al.* (2022) explicaron un método para la recuperación de un modelo desaparecido del que solo queda el molde de escayola original, para lo que lo escanearon e imprimieron en 3D. Esta impresión se vació, mediante metodología tradicional, para obtener su positivo, es decir, la reproducción deseada (Fig. 2). Se concluyó que era posible recrear un modelo a partir de su molde, sin utilizar el original, un hallazgo vital pues se evitaría de ese modo cualquier riesgo de deterioro.

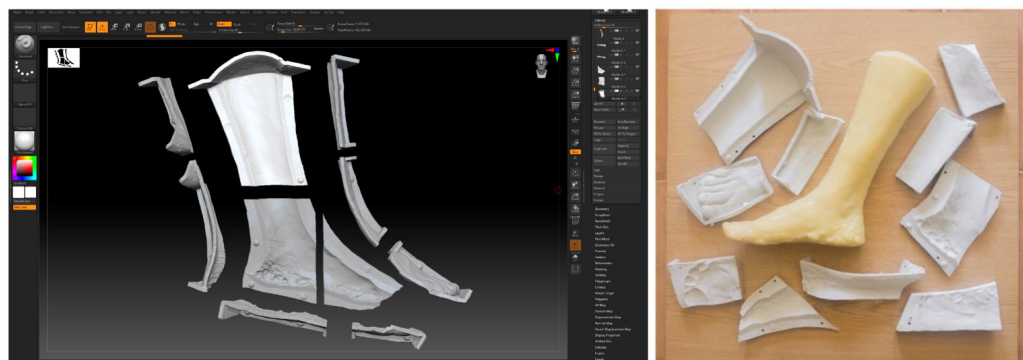


Fig. 2. A la izquierda, archivo 3D de las piezas del molde en ZBrush 2021® y, a la derecha, una vez desmolado, el positivo en cera de abeja, junto a las piezas de los moldes digitalizados impresas en PLA. Fuente: <https://doi.org/10.3390/heritage5020039>

1 Estos modelos constituían importantes recursos en la formación de pasadas generaciones de dermatólogos en España. Hernández-Muñoz *et al.* (2022)

Por su parte, Giuffrida *et al.* (2021a) mostraron las ventajas de la digitalización 3D en el Museo Arqueológico Éolien de Lipari (Italia) con el estudio de una máscara de arcilla muy peculiar. La pieza, descubierta en 1973 en la necrópolis griega homónima resultaba única al fusionar dos medias caras de personajes diferentes. Esta condición se descubrió en 2018 gracias a un proceso de restauración en la que se sacó a la luz media cara sonriente junto con la antigua. En 2019, la máscara fue escaneada en 3D para producir un modelo de alta resolución que, dada la ausencia de evidencia a simple vista por su estado de conservación, resultaba especialmente útil para mejorar la lectura de ambas mitades. Gracias a este método, se realizó con éxito la generación de una réplica digital que favoreció su difusión y sirvió de soporte para la hipotética reconstrucción de los dos prototipos (Fig. 3).

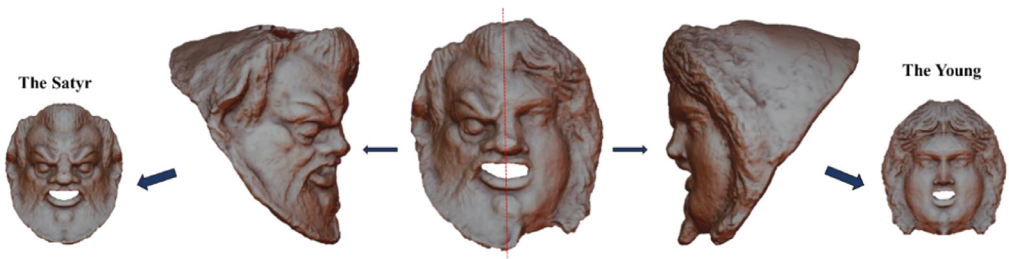


Fig. 3. Reconstrucción 3D de la máscara e hipotética reconstrucción virtual de los dos personajes. Fuente: <https://doi.org/10.4995/var.2021.13916>

En el año 2019 el Museo Arqueológico Nacional, junto a la empresa ACCIONA, dio a conocer la primera pieza arquitectónica de patrimonio cultural reproducida a escala real mediante impresión 3D: una réplica exacta del Arco de San Pedro de las Dueñas, del siglo XII. De esta manera, por motivos de conservación, la obra original se trasladó a los almacenes del Museo, pero los visitantes siguen contemplando el arco, ubicado en los jardines del acceso principal al museo (Ministerio de Cultura, 2019). También para conservar el original, en 2019 el Ayuntamiento de Segovia, la Fábrica de La Moneda y Timbre y la Comisión de Patrimonio de la Junta de Castilla y León comenzaron un proyecto con el que realizaron una reproducción de La Virgen del *Acueducto* de Segovia empleando tecnologías 3D. La Virgen original fue depositada en el museo de la Casa de la Moneda de Segovia y la réplica es la que se exhibe actualmente (Marqués, 2023).

La digitalización 3D del patrimonio supone, pues, un hecho imparable e indispensable, mediante el cual el objeto se preserva a lo largo del tiempo. El registro 3D ha visto muy mejoradas sus prestaciones con las nuevas formas de representación de datos y contenidos, no obstante, la documentación debe ser fiel al original. Por ello existen ya guías prácticas donde pueden verse trucos y sugerencias tanto para abordar proyectos de digitalización de museos (Farella *et al.* 2022) como para gestionar y administrar los datos, como los Principios FAIR (Secretaría General de Administración Digital, 2023).

Restauración

INSTITUCIÓN MUSEÍSTICA	PAÍS	TIPO DE COLECCIÓN/ PATRIMONIO	TECNOLOGÍA 3D EMPLEADAS	PATRIMONIO DIGITALIZADO
Museo de la Farmacia Hispana de la UCM	España	Histórico, artístico, científico y técnico	Fotogrametría SMF e impresora 3D	Relieves decorativos arquitectónicos
Museo de Veterinaria de la UCM	España	Histórico y científico-técnico	Escáner 3D de luz estructurada e impresora 3D	Modelo anatómico
Museo Colle del Duomo	Italia	Artístico y cultural	Fotogrametría SMF	Capitel de mármol medieval
Museo Archeologico Nazionale di Venezia	Italia	Arqueológico	Fotogrametría SMF e impresora 3D	Esculturas
Museo Estatal de Bellas Artes de Pushkin	Rusia	Histórico-artístico	Escáner 3D láser	Escultura
Chifeng Museum	China	Histórico y arqueológico	Escáner 3D láser e impresora 3D	Cuenco
Musei Capitoli	Italia	Histórico-artístico y arqueológico	Fotogrametría SMF, escáner LIDAR e impresora 3D	Escultura
Metropolitan Museum of Ner York	Estados Unidos	Histórico-artístico	Fotogrametría SMF e impresora 3D	Escultura

Tabla 2. Relación de los casos citados en el apartado Restauración atendiendo a la institución museística, país, tipo de colección/patrimonio, tecnología 3D empleada y patrimonio digitalizado. Fuente: Elaboración propia, 2024.

Las tecnologías 3D se emplean también ampliamente en las intervenciones de restauración de bienes culturales. La disponibilidad de dispositivos de digitalización 3D permite realizar el proceso de digitalización de un número creciente de diversas piezas de museo. En su mayoría, los objetos procedentes de excavaciones arqueológicas se presentan como artefactos más o menos dañados, o incluso, conservados solo de modo parcial. Su estado de conservación, el conocimiento arqueológico especializado y el uso de tecnologías informáticas 3D adecuadas permiten su completa reconstrucción digital.

La yesería estrellada de la Farmacia Hispanoárabe expuesta en el Museo de la Farmacia Hispana de la Colección de Patrimonio Histórico-Artístico de la Universidad Complutense de Madrid (en adelante UCM) presenta numerosas pérdidas volumétricas. Con el fin de establecer protocolos de intervención para obras semejantes, tres de las estrellas fueron restauradas con tecnologías 3D: se digitalizaron mediante fotogrametría (Fig. 4) y se imprimieron en 3D. Se evitó así la realización de un proceso de moldeado

directo con los riesgos que hubiera supuesto al original. Los archivos 3D de las piezas digitalizadas constituyen una herramienta que podrá ser empleada en el futuro cuando fuera preciso para reconstruir otros fragmentos de la yesería (Ávila-Rodríguez & Santos-Gómez, 2022).

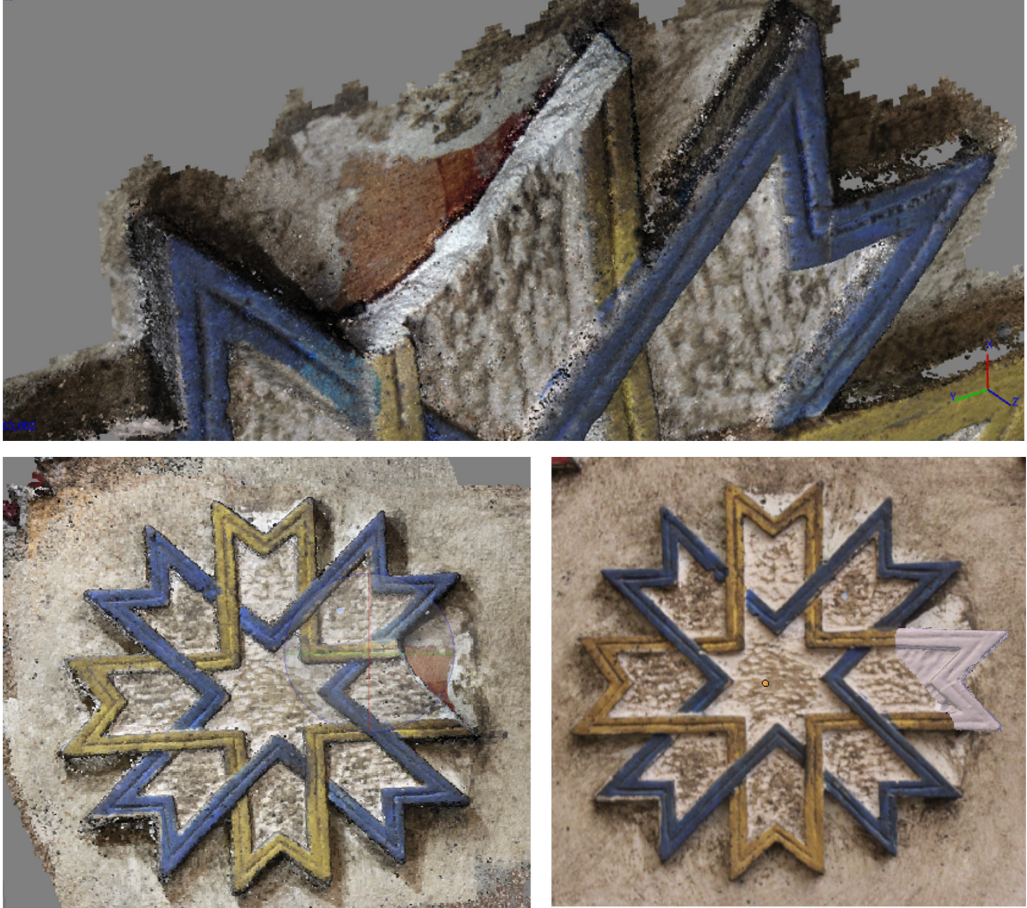


Fig. 4. En la imagen superior vemos el detalle, digitalizado en 3D, de la pérdida volumétrica de una de las estrellas. En la parte inferior, a la izquierda, el modelo 3D de la estrella y a la derecha, su restauración virtual. Fuente: Elaborado por María Ávila Rodríguez (2018).

También en la UCM, en el Museo de Veterinaria, se estabilizó un modelo de cera de abeja²: la cabeza de un caballo. Esta había sufrido la pérdida de algunas partes y presentaba importantes grietas y fracturas debido al colapso parcial de la estructura metálica interna. A partir de una copia virtual obtenida mediante escaneado 3D, se diseñó un so-

2 Entre los siglos XVII y XX, los modelos anatómicos de cera de abeja policromada desempeñaron un importante papel en la transmisión de los conocimientos anatómicos por su alto grado de precisión y realismo que conseguían mostrar las estructuras más delicadas del organismo (Hernández-Muñoz, Moga y Sánchez-Ortiz, 2023).

porte específico que se ajustaba perfectamente a la superficie de la figura (Hernández-Muñoz, Moga, Sánchez-Ortiz, 2023).

En ocasiones, estas técnicas constituyen el único modo de dar a conocer el aspecto original del bien, puesto que la intervención no puede realizarse por el momento y la obra queda restaurada de manera virtual a la espera de poder llevarse a cabo físicamente. Sindoni y Sorrentino (2020) muestran un ejemplo en el capitel medieval de mármol encontrado en 1987 en la iglesia románica de San Silvestre en Viterbo, Italia. El objeto, actualmente expuesto en el Museo Colle del Duomo de dicha localidad, debía contar con tres lados esculpidos, pero uno de ellos está completamente perdido. El análisis histórico-artístico y la realización de modelos 3D, comprobaron su relevancia para la comparación estilística del artefacto y propusieron algunas hipótesis sobre el aspecto de ese lado del capitel desaparecido.

Liva (2021) publicó una investigación del Museo Arqueológico Nacional de Venecia, sobre estatuaría antigua con la aplicación de tecnologías 3D. La fotogrametría permitió restaurar la forma de los cuerpos y se generaron réplicas digitales en las que se intervino de un modo no invasivo virtualmente. Se concluyó que el soporte digital era capaz de ampliar el campo de la investigación histórico-artística y prefigurar soluciones apropiadas de conservación o de restauración. También se favorecía su apreciación y exposición a través de innovadoras muestras que exhibían réplicas físicas obtenidas mediante digitalización y posterior impresión 3D. A su vez proporcionó en su conjunto información útil para futuras estrategias de conservación y restauración, precisas y reflexivas.

Del mismo modo, la reconstrucción de la estatua de Gudea, el gobernante de Lagash, fue llevada a cabo a partir de los seis fragmentos originales que se conservan en el Museo Estatal de Bellas Artes de Pushkin, Rusia. Estos se escanearon en 3D, así como los moldes de escayola de la estatua y la cabeza de Gudea procedentes del Museo de Didáctico de Arte Ivan Tsvetaev, para conseguir una escultura “base”, en la que incrustar los fragmentos y obtener el modelo completo (Iasenovskaia, 2021).

En el campo de la restauración, la tecnología 3D se emplea cada vez más cuando son necesarias tareas de anastilosis, ya que las piezas digitalizadas son catalogadas y organizadas física y virtualmente. Se facilitan así los trabajos posteriores de reconstrucción. Actualmente se pueden juntar fragmentos incluso con programas que ayudan en estas uniones, por lo que favorecen el emparejamiento y agrupamiento. La manipulación de los originales para juntar las piezas en la anastilosis física puede limitarse entonces a la fase final una vez se haya estimado digitalmente que las piezas encajan correctamente (Ávila-Rodríguez, 2018).

Liu *et al.* (2022) combinaron digitalización 3D, anastilosis virtual, reconstrucción virtual e impresión 3D con el fin de obtener una prótesis reversible transparente para la restauración de un cuenco *Black Ding* custodiado por el Museo Chifeng de Mongolia (Fig. 5). Al completar la intervención física, se siguieron al máximo los principios de conservación-restauración de integridad y autenticidad del patrimonio cultural, intervención mínima y reversibilidad.

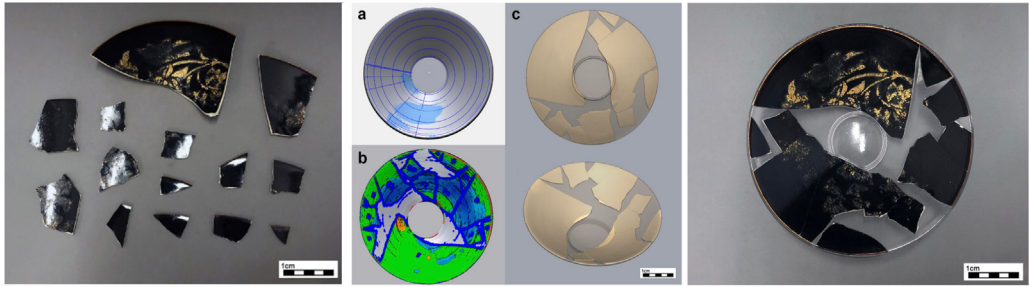


Fig. 5. En la imagen de la izquierda vemos los fragmentos del cuenco; en el centro su digitalización e hipótesis de restauración; a la derecha la prótesis con el cuenco restaurado. Fuente: <https://doi.org/10.1186/s40494-022-00646-0>

Otro proyecto que no puede dejar de mencionarse lo constituye el *Coloso de Constantino*. La Fundación Factum trabajó con los *Musei Capitolini* y la *Fondazione Prada* en un ambicioso trabajo de reconstrucción de la escultura (313-324) para la exposición *Reciclando la belleza* (17 de noviembre de 2022 - 27 de febrero de 2023). Digitalizaron cada uno de los fragmentos (ubicados en distintas localizaciones) para poder realizar un facsímil físico al imprimir estos datos (Factum Foundation, 2022).

Por su parte, el Departamento de Imagen del *Metropolitan Museum of New York*, digitalizó en 2021 la esfinge del monumento funerario griego de Megakles con fotogrametría. Estos datos fueron procesados e impresos para posteriormente reconstruir la esfinge en su forma y color originales. El resultado pudo contemplarse en la exposición *Chroma: Ancient Sculpture in Color* (5 de julio de 2022-26 de marzo de 2023) (Brinkmann *et al.*, 2022).

La digitalización 3D ha demostrado ser un enfoque prometedor para permitir reconstrucciones precisas de objetos (Ávila-Rodríguez & Santos-Gómez, 2022; Tausch *et al.*, 2020) tanto física como virtualmente. Por ello, las tareas de restauración de bienes culturales en los museos apoyadas con las técnicas 3D ven incrementadas sus prestaciones. Sin el empleo de estas la intervención material sobre el bien es, cuanto menos, muy complicada.

Divulgación y didáctica

INSTITUCIÓN MUSEÍSTICA	PAÍS	TIPO DE COLECCIÓN/ PATRIMONIO	TECNOLOGÍA 3D EMPLEADAS	PATRIMONIO DIGITALIZADO
Museo Estatal de Bellas Artes de Pushkin	Rusia	Histórico-artístico	Tomografía computarizada e impresión 3D	Momia
Museo Nacional de Ciencias Naturales	España	Histórico-natural	Escáner 3D láser e impresora 3D	Cráneo
Coleção Herpetológico de la Universidade Federal de Sergipe	Brasil	Histórico-natural	Fotogrametría SMF	Especímenes de anfibios
Florida Museum Of Natural History	Estados Unidos	Histórico-natural	Escáner 3D láser, fotogrametría SMF, tomografía computarizada e impresión 3D	Especímenes fósiles y yacimientos geológicos
National Museum of Health and Medicine	Estados Unidos	Científico-cultural	Escáner 3D láser, escáner 3D luz estructurada, tomografía computarizada e impresión 3D	Especímenes esqueléticos humanos
Musée d'Histoire naturelle de Strasbourg	Francia	Histórico-natural	Escáner 3D e impresora 3D	Especímenes históricos de huesos de ballena

Tabla. 3 – Relación de los casos citados en el apartado Divulgación y didáctica atendiendo a la institución museística, país, tipo de colección/patrimonio, tecnología 3D empleada y patrimonio digitalizado. Fuente: Elaboración propia, 2024.

Los museos han sido los principales centros de difusión del patrimonio cultural a lo largo de la historia (Meier; Berriel; Nava, 2021). Con las tecnologías 3D la accesibilidad y la transmisión son cada vez mayores, por lo que, en la actualidad, los modelos 3D de objetos de museo han ganado una gran popularidad (Barszcz *et al.*, 2023). Las colecciones de Historia Natural son un claro ejemplo, ya que proporcionan cada vez más información a medida que la digitalización pone los registros de los especímenes al alcance de diferentes investigadores. Se posibilita así la recopilación de datos a mayor escala y los profesionales de distintos museos disponen de ella. Como consecuencia aumenta su accesibilidad cuando físicamente no es posible (Giuffrida *et al.* 2021a; Medina *et al.*, 2020), ya sea por motivos de conservación, restauración, falta de permisos, localización u otros.

Como ejemplo, cabe mencionar el modelo tridimensional del esqueleto de una antigua momia egipcia de la colección del citado Museo Estatal de Bellas Artes de Pushkin. Fue creado para estudiar la posibilidad de segmentar con precisión las estructuras óseas, separarlas de los tejidos blandos momificados circundantes y reconstruir los fragmentos destruidos de acuerdo con la forma conservada. Con ayuda de tomografía computarizada e impresión 3D se fabricaron todos los fragmentos del esqueleto, de modo que el material obtenido puede utilizarse para investigaciones posteriores, fines informativos y educativos, o incluso servir de complemento a los objetos originales del museo (Vasilyev *et al.*, 2019). Junto a este se halla el cráneo del homínido *Homo naledi*, cuyo original fue descubierto en el yacimiento de la cueva de Rising Star, Sudáfrica, y en la actualidad se expone en la Universidad de Witwatersrand en Johannesburgo, donde se conserva para investigación. La fragilidad del fósil imposibilitaba aplicar la silicona directamente, por lo que se aplicaron técnicas de digitalización e impresión 3D para reproducirlo (Fig. 6). Actualmente, forma parte de la exposición permanente del Museo Nacional de Ciencias Naturales de Madrid (Ávila-Rodríguez & Santos-Gómez, 2023).



Fig. 6. A la izquierda en la impresión 3D del cráneo digitalizado y a la derecha su preproducción lista para exponer en el museo. Fuente: Elaborado por María Ávila Rodríguez (2016).

Los registros 3D no solo son esenciales para los investigadores, sino que se presentan claves para el aprendizaje y la motivación de los estudiantes (Ziegler *et al.*, 2020; Castro *et al.* 2022). Cada vez se analiza más la utilidad de los modelos 3D en la faceta divulgativa de los museos, ya que son una herramienta fundamental cuando no hay una sencilla accesibilidad al museo o las piezas están custodiadas o en intervención. El estudio de Castro *et al.* (2022) analizaba si el uso de modelos 3D podría ayudar en la motivación y el aprendizaje del alumnado en zoología. En sus conclusiones comprobaron que los grupos que contaban con modelos 3D mostraron un aumento significativo ($p < 0,001$) en el rendimiento del aprendizaje en comparación con el grupo de control.

En esta línea, el Museo de Historia Natural de Florida propuso el proyecto *iDigFossils* que tenía por objetivo expandir la comprensión de la paleontología con aprendizaje

STEM para K-12, (educación primaria y secundaria). Para ello trabajaron con escáner 3D láser, fotogrametría SMF, tomografía computarizada e impresión 3D con fines de investigación científica, educación formal y divulgación informal. Crearon modelos de alta fidelidad de especímenes fósiles (Fig. 7) y yacimientos geológicos y los emplearon para conseguir planes de estudios de primaria y secundaria. De este modo evaluaron la motivación y el interés de los estudiantes por la ciencia, la tecnología, la ingeniería y las matemáticas. Además, los mismos modelos 3D se utilizaron en eventos divulgativos del Museo para atraer a un público más amplio con exposiciones y actividades prácticas. Estos también se almacenan en repositorios en línea. Se concluyó que la aplicación de la tecnología 3D al estudio de los fósiles y la paleontología ampliaba la repercusión de los descubrimientos científicos en la investigación básica y en la sociedad en general (Ziegler *et al.*, 2020).

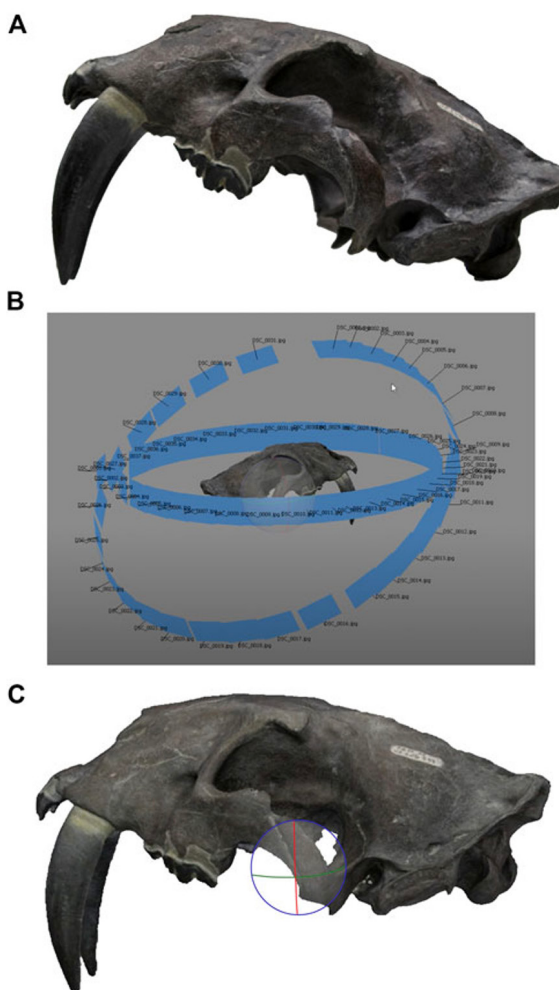


Fig. 7. (A). Imagen fotográfica de un cráneo de *Smilodon gracilis*; (B). Agisoft Photoscan que muestra la orientación y el número de fotografías digitales tomadas alrededor del espécimen fósil después de procesar los datos 3D sin procesar (C). Modelo fotogramétrico del espécimen fósil listo para ser compartido digitalmente o impreso en 3D. Fuente: <https://doi.org/10.3389/feart.2020.600696>

Las colecciones anatómicas del Museo Nacional de Salud y Medicina en Linden, Estados Unidos, contienen especímenes esqueléticos y conserva más de 6400 ejemplares óseos brutos. Estos consisten principalmente en huesos individuales patológicos o anómalos que muestran una variedad de condiciones patógenas. Con el fin de aumentar el acceso a estas muestras, el Museo colabora con la Universidad de la Mancomunidad de Virginia y la División de Laboratorios de la Oficina Federal de Investigación para digitalizar y difundir modelos 3D de alta calidad a través de portales en línea. De este modo, se permite a los académicos y educadores manipular, analizar e imprimir en 3D los modelos desde cualquier parte del mundo. Esta actuación es fundamental ya que muchas instituciones que imparten cursos de paleopatología y antropología forense no disponen de colecciones de referencia, ni de acceso a colecciones de museos para impartir clases prácticas. Este repositorio digital es, por tanto, un recurso único y sin precedentes que mejora el conocimiento histórico y las capacidades de diagnóstico en los campos de la medicina y la antropología (Pearlstein *et al.*, 2021).

Del mismo modo, el Museo de Zoología de Estrasburgo analizó trece especímenes históricos de huesos de ballena para aclarar la información faltante sobre la procedencia y la identificación de diversas especies de estos cetáceos. Utilizaron un enfoque multidisciplinario que combinó investigación de documentos históricos, osteología y zooarqueología mediante espectrometría de masas (ZooMS). El estudio permitió identificar elementos de ballenas de siete clases diferentes: cinco barbadas y dos dentadas. Uno de estos esqueletos fue digitalizado mediante un escáner 3D y se puede ver en línea. La identificación y digitalización de estos especímenes, algunos amenazados y en peligro de extinción cuyas historias pasadas aún no se conocen completamente, cuenta con gran valor y garantiza que su disponibilidad para futuras investigaciones (Wagner, *et al.* 2020).

También cabe citar que cada vez es más habitual encontrar museos virtuales que pueden ser una representación de una institución museística existente que ha sido digitalizado o bien de un museo diseñado solo en formato digital (Baloian, *et al.*, 2021; Meier; Berriel; Nava, 2021). Si nos ceñimos a la digitalización 3D, objeto de este artículo, vemos como además de estos espacios museísticos virtuales creados a partir de la digitalización de objetos reales, un gran número de ellos exponen artefactos de forma interactiva. Utilizan modelos digitales en 3D para difundirlos entre el mayor número posible de usuarios permitiendo la fiel reproducción de los artefactos. También se exponen virtualmente aquellos que son demasiado delicados y/o preciosos para ser presentados en el mundo real. Se fomentan, por tanto, nuevas formas de interacción con las colecciones y se estimula la realización de exposiciones más atractivas e interactivas (Carvajal, Morita, Bilmes, 2020; Apollonio *et al.*, 2021; Barszcz *et al.*, 2023; Farella *et al.*, 2022; Hernández-Muñoz, 2023).

Aunque la conservación y la preservación sigue suponiendo una de las principales prioridades para la mayoría de los museos, la necesidad de que el público vea, toque y sienta el objeto de interés no debe ser subestimada. Además, las impresiones 3D se han

convertido en medidas de inclusión para personas con necesidades específicas, sobre todo invidentes.

Mann y Fryazinov (2019) presentaron a los visitantes de museos una nueva forma de interactuar con réplicas realistas impresas en 3D. Estas se combinaron con la realidad aumentada y tenían la apariencia de los originales. Se creó así un nuevo nivel de interactividad en los museos para educar a través de experiencias digitales de moda en lugar de métodos tradicionales. Las impresiones 3D se acompañaron de una aplicación de realidad aumentada instalada en un dispositivo propiedad del museo para evitar que los visitantes instalasen software en sus propios dispositivos. Conseguían así que necesariamente estuviesen presentes dentro del Museo. Cuando se colocaba la réplica impresa en 3D frente a la cámara del dispositivo, la aplicación reconocía y rastreaba su código en blanco y negro. Entonces se visualizaba una versión digital del artefacto sobre él mismo, a través de la pantalla, por lo que el visitante podía interactuar con él.

Se constata que la digitalización 3D es realmente útil para obtener datos virtuales con fines de estudio y accesibilidad (Cooper, 2020; Richetti; da Silva & Roldo, 2022). Por su parte, las impresoras 3D pueden ofrecer innovadoras y atractivas experiencias táctiles con objetos de colecciones que no pueden manipularse, en ocasiones ni tan siquiera exponerse. Los grandes museos encargan ya impresiones con regularidad, pues es posible la obtención de modelos de gran precisión.

Conclusiones

Atendiendo a los resultados de la búsqueda (ver tabla 1, 2 y 3), resaltamos que en Europa se está digitalizando, sobre todo, patrimonio artístico-cultural y arqueológico. También se emplean estas tecnologías en patrimonio histórico-natural, aunque fuera de Europa en mayor medida. Se destaca también que el escáner 3D es, junto con la fotogrametría, las técnicas de digitalización más empleadas. Observamos que en ocasiones el museo trabaja con el archivo del bien digitalizado, con motivo de una exposición temporal o de una investigación, mientras que en otras es el propio museo el que digitaliza la pieza que custodia.

Puede por tanto afirmarse que realmente comienza a generalizarse la demanda, por parte de los museos, de digitalizar en 3D sus bienes para distintos fines. A pesar de ello, la literatura científica aún no es tan amplia como debiera, ya que muchos proyectos quedan únicamente reflejados en las páginas web de las empresas encargadas de la digitalización o bien del propio museo. Además, cabe destacar que resulta complejo clasificar y situar los casos porque cada intervención suele conllevar intrínsecamente varias aplicaciones ya que una réplica empleada para conservar el original está al mismo tiempo incrementando su difusión, del mismo modo que la documentación de un bien favorecerá su conservación.

No obstante, todos los casos expuestos permiten demostrar que, gracias al empleo de la digitalización 3D, los museos han visto ampliamente mejoradas sus aplicaciones

en lo que a documentación, conservación, restauración, divulgación y difusión se refiere. Así, cada vez es más común la obtención de registros digitales 3D en alta resolución, pues facilitan la creación, cuantitativa y cualitativamente, de bases de datos, así como la evaluación del grado y tipo de riesgos a los que una obra se expone. Con ello, además, se aumenta la detección de alteraciones. El archivo 3D es aún más importante si cabe, cuando el bien ha sufrido daños o incluso ha desaparecido. Se evita también el traslado de las obras o los hallazgos y se permite la creación de museos virtuales. Su nacimiento ha incrementado, considerablemente, la difusión y ha conseguido que las exposiciones sean más interesantes e, incluso, más interactivas.

La digitalización 3D facilita la formulación de hipótesis de restauración por parte de los especialistas y se mejoran las tareas de reconstrucción de objetos ya que las piezas se digitalizan, se manejan virtualmente y se reducen tiempos de trabajo, riesgos y costes. Llega incluso en ocasiones a ser el único modo de mostrar el aspecto original del bien, puesto que la intervención no puede actualmente llevarse a cabo. Las réplicas, virtuales o físicas, favorecen, notablemente, la difusión de los bienes y se hacen más accesibles para investigadores y público en general. A consecuencia de incrementar el interés de los estudiantes, se mejora también su aprendizaje. A su vez vemos cómo los objetos materializados pueden ofrecer atractivas experiencias táctiles. Y, además, todo esto potenciado por el hecho de que los modelos 3D digitalizados permiten documentar, analizar e intervenir las obras sin manipularlas.

De este modo, por parte de las instituciones museísticas cada vez es más común la digitalización de bienes culturales en 3D en tareas referentes a la exposición, la creación de museos virtuales e, incluso, de réplicas y facsímiles físicos. Por ello se considera urgente la necesidad de integrar la digitalización 3D en los protocolos de actuación de los profesionales dedicados al ámbito de la conservación y la restauración, ya que mejora significativamente las labores de documentación, conservación, restauración, divulgación y didáctica en los museos.

Bibliografía

- Apollonio, F. I. *et al.* (2021). Photogrammetry-Based Workflow for the Accurate 3D Construction and Visualization of Museums Assets. *Remote Sensing*, 13 (3). Doi: <https://doi.org/10.3390/rs13030486>
- Ávila Rodríguez, M. (2018). *Aplicación de la tecnología 3D a las técnicas de documentación, conservación y restauración de bienes culturales*. Tesis (Doctorado en Bellas Artes) – Universidad Complutense de Madrid. Disponible en <https://docta.ucm.es/entities/publication/b1185ce2-b588-451f-ba98-d471d2395ec8>
- Ávila Rodríguez, M. & Santos Gómez, S. (2022). Aplicación de las tecnologías 3D en la conservación de la Farmacia Hispanoárabe de la UCM. *RdM. Revista de Museología: Publicación científica al servicio de la comunidad museológica*, 84, 111-124.

- Ávila Rodríguez, M. & Santos Gómez, S. (2023). Application of 3D technologies for museum reproductions: the skull of *Homo naledi* from the MNCN. *Conservar Patrimonio*, 43, 78-92. Doi: <https://doi.org/10.14568/cp26858>
- Baloian, N. et al. (2021). Designing, Realizing, Running, and Evaluating Virtual Museum—a Survey on Innovative Concepts and Technologies. *Journal of Universal Computer Science*, 27(12), 1275-1299. Doi: <http://dx.doi.org/10.3897/jucs.77153>
- Barszcz, M. et al. (2023). 3D scanning digital models for virtual museums. *Computer Animation and Virtual Worlds*, 34(3-4). Doi: <https://doi.org/10.1002/cav.2154>
- Brinkmann, V.; Koch-Brinkmann, U. y Piening, H. (2022). Reconstructing the Archaic Greek Sphinx. Perspectives. *Metropolitan Museum of New York*, agosto. <https://www.metmuseum.org/perspectives/articles/2022/8/archaic-greek-sphinx>
- Carvajal, D.; Morita, M.; Bilmes, G. (2020). Virtual museums. Captured reality and 3D modeling. *Journal of Cultural Heritage*, 45, 234-239. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.culher.2020.04.013>
- Castro, K. M. D. A. et al. (2022). Studying natural history far from the museum: the impact of 3D models on teaching, learning, and motivation. *Journal of Biological Education*, 56(85), 598-608. Doi: <https://doi.org/10.1080/00219266.2021.1877774>
- Cooper, C. (2020). You Can Handle It: 3D Printing for Museums. *Advances in Archaeological Practice*, 7(4), 443-447. Doi: <https://doi.org/10.1017/aap.2019.39>
- Factum foundation. (2022). Re-creating the colossus of Constantine. *Factum Foundation*. Recuperado el 1 de febrero de 2024, de <https://factumfoundation.org/our-projects/3d-sculpting/re-creating-the-colossus-of-constantine/>
- Farella, E. M. et al. (2022). Analysing Key Steps of the Photogrammetric Pipeline for Museum Artefacts 3D Digitisation. *Sustainability*, 14(9), 5740. Doi: <https://doi.org/10.3390/su14095740>
- García, R. (2019) El papel de la tecnología en la reconstrucción de Notre-dame de Paris. *Metalocus*. Recuperado el 18 de febrero de 2024, de <https://www.metalocus.es/es/noticias/el-papel-de-la-tecnologia-en-la-reconstruccion-de-notre-dame-de-paris>
- Giannini, T. & Bowen, J. P. (2019). Transforming Education for Museum Professionals in the Digital Age. En T. Giannini y J.P. Bowen, *Museums and Digital Cultura. New Perspectives and Research* (pp. 457-480). Nueva York: Springer. Doi: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-97457-6_23
- Giuffrida, D. et al. (2019). Combined 3D Surveying and Raman Spectroscopy Techniques on Artifacts Preserved at Archaeological Museum of Lipari. *Heritage*, 2 (3), 2017-2027. Doi: <https://doi.org/10.3390/heritage2030121>
- Giuffrida, D. et al. (2021a). A Theatrical Double-Faced Mask Preserved at the Museum of Lipari (Messina): Study and 3D Reconstruction Through Portable Equipment. *Virtual Archaeology Review*, 12(24), 39-48. Doi: <https://doi.org/10.4995/var.2021.13916>

- Giuffrida, D. *et al.* (2021b). Testing a Mobile Laboratory at the Aeolian Museum of Lipari (Messina) for the 3D Survey and the Chemical Characterization of Archaeological Materials: Practice and Further Developments. *Archaeologia e Calcolatori*, 32(2), 237-248. Doi: <https://doi.org/10.19282/ac.32.2.2021.22>
- Hernández-Muñoz, O. *et al.* (2022). 3D Digital Technologies for the Elaboration of a Replica of a Dermatological Didactic Model Belonging to the Olavide Museum from the Original Mould. *Heritage*, v. 5(2), 702-715. Doi: <https://doi.org/10.3390/heritage5020039>
- Hernández-Muñoz, O. (2023). Analysis of Digitized 3D Models Published by Archaeological Museum. *Heritage*, 6(5), 3885-3902. Doi: <https://doi.org/10.3390/heritage6050206>
- Hernández-Muñoz, O.; Moga, E. S.; Sanchez-Ortiz, A. (2023). Stabilization of an Anatomical Wax Model of the Complutense Veterinary Museum with the Help of 3D Digital Technologies. *International Journal of Conservation Science*, 14(1), 45-56. Doi: <https://doi.org/10.36868/IJCS.2023.01>
- Iasenovskaia, A. (2021). 3D-Reconstruction of a Statue of Gudea from the Collection of the Pushkin State Museum of Fine Arts. *Istoriya-Elektronnyi Nauchno-Borazovatelnyi Zhurnal*, 12(4), art. 102. Doi: <https://doi.org/10.18254/S207987840015581-8>
- ICOM. (2017). *Código de deontología del ICOM para los Museos*. Recuperado el 28 de marzo de 2024, de <https://www.icom-ce.org/wp-content/uploads/2015/04/C%C3%B3digo-deontol%C3%B3gico-Es.pdf>
- Liu, S.; Tu, Y. *et al.* (2022). Transparent reversible prosthesis, a new way to complete the conservation-restoration of a Black Ding bowl with application of 3D technologies. *Heritage science*, 10, art.14. Doi: <https://doi.org/10.1186/s40494-022-00646-0>
- Liva, G. (2021). Digital identities. Technologies for the Conservation, Reconstruction and Fruition of the Sculptural Heritage. *Disegnarecon*, 14(27). Doi: <https://doi.org/10.20365/disegnarecon.27.2021.12>
- Mann, L. & Fryazinov, O. (2019). 3D Printing for Mixed Reality Hands-On Museum Exhibit Interaction. En *ACM SIGGRAPH 2019 Posters* (SIGGRAPH '19). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Article 22, 1-2. Doi: <https://doi.org/10.1145/3306214.3338609>
- Marqués, N. (2023). 500 años a sus pies: la réplica 3d de la virgen del acueducto de Segovia. *Néstor F. Marqués*. Recuperado el 20 de enero de 2024, de <http://nestormarques.com/replica-3d-virgen-del-acueducto-segovia/>
- Meier, C.; Berriel, I. S.; Nava, F. P. (2021). Creation of a Virtual Museum for the Dissemination of 3D Models of Historical Clothing. *Sustainability*, 13(22), art. 12581. Doi: <https://doi.org/10.3390/su132212581>

- Medina, J. J. *et al.* (2020). A rapid and cost-effective pipeline for digitization of museum specimens with 3D photogrammetry. *Plos One*, 15(8). Doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0236417>
- Ministerio de Cultura. (2019). El Museo Arqueológico Nacional y ACCIONA marcan un hito en la preservación del Patrimonio Histórico con la impresión 3D del Arco de San Pedro de las Dueñas. *Actualidad. Ministerio de Cultura*. Recuperado el 15 de mayo de 2024, de: <https://www.cultura.gob.es/actualidad/2019/04/20190408-man-accion.html>
- Mott, F. M. D. & da Silva, R. A. R. (2020). A adoção de tecnologias digitais na reconstrução do patrimônio: relato da experiência do Museu Nacional, Brasil. *Informação & Sociedade-Estudos*, 30(2), 1-16. Disponible en https://www.researchgate.net/publication/343753494_A_adocao_de_tecnologias_digitaes_na_reconstrucao_do_Patrimonio_relato_da_experiencia_do_Museu_Nacional_Brasil
- Pearlstein, K. E. *et al.* (2021). Modernizing Medical Museums Through the 3D Digitization of Pathological Specimens. En P.M. Rea (ed.) *Biomedical Visualisation. Advances in Experimental Medicine and Biology*, 1334 (pp. 181-204). Nueva York: Springer, Cham. 181-204. Doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-76951-2_9
- Richetti, A.; da Silva, F. P.; Roldo, L. (2022). 3D Scanning of Porto Alegre Museum Artifacts: The Crocker of the Rocco Bakery. *Muzeologia a Kulturne Dedicstvo-Museology and Cultural Heritage*, 10(3), 43-59. Doi: <https://doi.org/10.46284/mkd.2022.10.3.3>
- Santana, M. (2014). 3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage. En F. Redondino; S. Campana (eds.), *3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage. Theory and best practices* (pp. 7-12). Oxford: BAR International Series.
- Secretaría General de Administración Digital. (2023). Principios FAIR: buenas prácticas para la gestión y administración de datos científicos. *datos.gob.es*. Recuperado el 19 de agosto de 2025, de <https://datos.gob.es/es/noticias/principios-fair-buenas-practicas-para-la-gestion-y-administracion-de-datos-cientificos>
- Schoebel, A. (2018). Las profesiones del patrimonio en la Estrategia 21. En A. M. Galán-Pérez; D. Pard, D. (coords.). *Competencias, formación y transferencia del conocimiento: reflexiones y retos en el Año Europeo del Patrimonio Cultural 2018* (pp.56-59). Madrid: Grupo Español del IIC-ACRE.
- Sindoni, S. & Sorrentino, C. (2020). The Capital of 'Magister Guilelmus' Exposed in the Colle del Duomo Museum in Viterbo Historical-Artistic Analysis Through 3D Graphic Documentation. *European Journal of Science and Theology*, 16(3), 187-196.
- Taormina, F. & Baraldi, S. B. (2022). Museums and digital technology: a literature review on organizational issues. *European Planning Studies*, 30(9), 1676-1694. Doi: <https://doi.org/10.1080/09654313.2021.2023110>

- Tausch, R. *et al.* (2020). Towards 3D Digitization in the GLAM (Galleries, Libraries, Archives, and Museums) Sector – Lessons Learned and Future Outlook. *IPSI BGD Transactions on Internet Research*, 16(1), 45-53. Doi: <https://doi.org/10.24406/publica-fhg-261300>
- Vasilyev, S. V. *et al.* (2019). 3D Reconstruction of the Ancient Egyptian Mummy Skeleton from the Pushkin State Museum of Fine Arts (I, 1 1240). *International Workshop on Photogrammetric and Computer Vision Techniques for Video Surveillance, Biometrics and Biomedicine*, v. XLII-2, w. 12, 225-229. Doi: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W12-225-2019>
- Wagner, A. *et al.* (2020). Whale Bone Puzzles: Reconstructing and Identifying Historical Whale Skeletons Using Archive Records, Osteology, and Zooarchaeology by Mass Spectrometry (ZooMS). *Journal of conservation and museum studies*, 18(1). Doi: <https://doi.org/10.5334/jcms.196>
- Whalen, T. (2007). Foreword. En A. Escobar (ed.) *Recording, Documentation, and Information Management for the Conservation of Heritage Places guiding principles* (pp. 12-13). Los Ángeles, CA: The Getty Conservation Institute. Disponible en: http://www.getty.edu/conservation/publications_resources/pdf_publications/pdf/guiding_principles.pdf
- Ziegler, M. J. *et al.* (2020). Applications of 3D Paleontological Data at the Florida Museum of Natural History. *Frontiers in Earth Science*, 8. Doi: <https://doi.org/10.3389/feart.2020.600696>