

La restauración virtual. Aplicaciones a la conservación del patrimonio arqueológico

Dr. Francisco Javier Esclapés Jover

Profesor de Expresión Gráfica y miembro del Instituto Universitario de Investigación en Arqueología y Patrimonio Histórico y del grupo de Patrimonio Virtual de la Universidad de Alicante
javier.esclapes@ua.es

Dr. Jaime Molina Vidal

Profesor Titular de Historia Antigua y miembro del Instituto Universitario de Investigación en Arqueología y Patrimonio Histórico y del grupo de Patrimonio Virtual de la Universidad de Alicante
jaime.molina@ua.es

Javier Muñoz Ojeda

Arqueólogo y miembro del grupo de Patrimonio Virtual de la Universidad de Alicante
j.munoz@patrimoniovirtual.com

Laia Fabregat Bolufer

Arquitecta y miembro del grupo de Patrimonio Virtual de la Universidad de Alicante
l.fabregat@patrimoniovirtual.com

Daniel Tejerina Antón

Arqueólogo y Conservador de BB.CC. Miembro del grupo de Patrimonio Virtual de la Universidad de Alicante
d.tejerina@patrimoniovirtual.com

Resumen: La restauración virtual se perfila como una disciplina auxiliar dentro de la conservación del patrimonio cultural y ofrece al especialista un gran volumen de información acerca de cualquier objeto o estructura, además de proporcionarle herramientas específicas para realizar intervenciones que no tendrán impacto sobre la obra original y cuyo resultado podrá ser analizado y compartido mediante técnicas de visualización avanzadas, cumpliendo estrictamente los criterios fundamentales de la ética de la conservación y restauración. En el área específica de la preservación de objetos o yacimientos arqueológicos, la restauración virtual proporciona soluciones eficaces en diferentes fases de intervención.

En este artículo proponemos una revisión de las técnicas más empleadas actualmente en restauración virtual, las perspectivas de desarrollo a corto y medio plazo y el impacto que esta joven disciplina auxiliar está generando dentro de la conservación de bienes culturales.

Palabras clave: Restauración virtual, realidad virtual, patrimonio cultural, gráficos por computador, arqueología.

Abstract: Virtual restoration arises as an auxiliary discipline within the conservation of cultural heritage and offers the expert a large amount of information about any object or structure, as well as a set of specific tools for interventions that will have no impact on the original work.

The results can be analyzed and shared through advanced visualization techniques, strictly complying with the principles of heritage conservation. In the case of archaeological heritage conservation, virtual restoration provides effective solutions in different phases.

In this paper, we propose a review of the most commonly used techniques in virtual restoration, short and medium term perspectives and the impact that this new auxiliary discipline is generating within the conservation of Cultural Heritage.

Keywords: Virtual restoration, virtual reality, cultural heritage, computer graphics, archaeology.

Introducción y propuesta de definición terminológica

En este momento, las técnicas empleadas para generar contenidos de realidad virtual se aplican a numerosas disciplinas, como la arquitectura, la medicina o la ingeniería. En el campo de las ciencias más directamente relacionadas con el patrimonio cultural, como la arqueología, el impacto de estas técnicas ha generado la aparición de una rama de especialización, a la que se suele hacer referencia con diferentes términos (arqueología virtual, virtualización del patrimonio, ciberarqueología), actualmente consolidada y valorada al mismo nivel que otras subdisciplinas, como la Arqueometría o la Zooarqueología.

Contemporáneamente, también la conservación del patrimonio cultural se beneficia de técnicas que permiten intervenir en diferentes fases de la protección, recuperación y salvaguarda del patrimonio mueble e inmueble y que nos permitirían hablar de conservación y de restauración virtual.

Antes de describir el flujo de trabajo y algunas de las herramientas empleadas a la hora de llevar a cabo un proyecto de restauración virtual, es necesario reflexionar acerca del valor que posee un tipo de intervención que –con la excepción de la impresión 3D– no trasciende la barrera de lo digital, lo que genera no pocas dudas y controversia acerca de la idoneidad y coherencia del propio término «restauración virtual». Ello se debe a que solemos identificar el concepto de lo virtual como opuesto a la realidad física. En este sentido, entre los autores que han teorizado acerca del valor de lo virtual es fundamental la obra de Pierre Levy, que subraya la concepción de lo virtual como opuesto a lo actual, pero no a lo real, constituyendo ambas dos categorías diferentes de la realidad (Levy, 1995). Lo virtual, desde este punto de vista, no guarda ninguna relación con «lo falso, lo ilusorio o lo imaginario, sino que se convierte en uno de los posibles modos de ser alternativo no a la realidad, sino a la actualidad» (Limoncelli, 2012: 17). Recordemos que la conservación del patrimonio cultural persigue, como principal objetivo, su salvaguarda a través de medidas y acciones que deberán respetar el significado y las propiedades físicas del bien cultural en cuestión, asegurando la accesibilidad a generaciones presentes y futuras; una vez aceptado como inexorable el progresivo deterioro de los materiales que constituyen los objetos con valor histórico y/o artístico –deterioro que podemos ralentizar, pero no detener–, y una vez asumido que cualquier intervención sobre estos materiales es transformadora e, incluso, eventualmente destructiva, se aprecian las ventajas de emplear métodos de trabajo no intrusivos, reversibles y que permiten generar réplicas virtuales que perdurarán en el tiempo y que pueden ser percibidas y disfrutadas a través de nuestros sentidos. Réplicas que constituyen otro tipo de materialidad, compatible con aquella materialidad física de los objetos que nos rodean, a la que puede complementar e incluso –en determinados aspectos– enriquecer y mejorar.

Actualmente, la conservación del patrimonio cultural comprende tres tipos de intervención: la conservación preventiva, la conservación curativa y la propia restauración (VV. AA., 2008), dentro de la cual, como disciplina auxiliar, debería integrarse lo que entendemos como restauración virtual. Y la misma definición empleada para la restauración física –«todas aquellas acciones aplicadas de manera directa a un bien individual y estable, que tengan como objetivo facilitar su apreciación, comprensión y uso. Estas acciones solo se realizan cuando el bien ha perdido una parte de su significado o función a través de una alteración o un deterioro pasados. Se basan en el respeto del material original. En la mayoría de los casos, estas acciones modifican el aspecto del bien» (VV. AA., 2008)– se puede adaptar, en términos generales y con matices, a la de restauración virtual.

Revisión de las principales técnicas empleadas

Proponemos una clasificación en función del tipo de intervención, partiendo así de la fase inicial de documentación del estado de conservación, continuando con los tipos de intervención más habitualmente empleados en 2D y 3D y terminando con las opciones de visualización de los resultados obtenidos.

El paso previo: técnicas de documentación

Desde el origen de la propia arqueología como ciencia ha existido una preocupación por la documentación rigurosa de objetos y estructuras exhumados durante el proceso de excavación. Inicialmente, esta fase se llevó a cabo a través de la representación gráfica manual, que se vio complementada –desde el segundo tercio del siglo XIX– con la imagen fotográfica y el diseño asistido por ordenador (CAD). Solo en el último tercio del siglo XX se producen los primeros casos de aplicación al patrimonio cultural de tecnologías y dispositivos que permiten la obtención de modelos tridimensionales: la tomografía axial computerizada (TAC), el escáner 3D y la fotogrametría.

Es, sin embargo, a partir del cambio de siglo cuando asistimos a un uso creciente de técnicas de documentación 3D, principalmente a través de dos grandes familias que podemos clasificar en función del tipo de sensor empleado:

- Sensores activos sin contacto: emiten radiación sobre el objeto –sin necesidad de que exista contacto con el mismo– para medir la reflexión generada:
 - Escáneres de tiempo de vuelo.
 - Escáneres de diferencia de fase.
 - Escáneres de triangulación óptica.
 - Escáneres de luz estructurada.
 - Escáneres de luz modulada.
- Sensores pasivos: no emiten radiación, pero son capaces de captar la radiación ambiental reflejada en los objetos:
 - Cámara fotográfica + software SfM (*Structure from Motion*).

Este último grupo, que evoluciona a partir de los principios de la fotogrametría –prácticamente tan antigua como la propia técnica fotográfica– y se beneficia de los avances en visión por computador (*Computer Vision*) y en hardware (sensores para la captura de imágenes fo-

tográficas, CPU y GPU más sofisticados, potentes y veloces), es el que durante los últimos años ha vivido una mayor expansión, hasta el punto de constituir actualmente una herramienta plenamente integrada en la práctica totalidad de los proyectos de excavación arqueológica y, en general, de cualquier intervención sobre el patrimonio cultural que incluya una fase previa de documentación. Para un correcto levantamiento 3D es necesario seguir una sencilla metodología en la que aquí no nos detendremos. A modo de resumen, indicaremos que a través de la captura de imágenes con una amplia área de solape entre sí y su posterior procesado se obtiene un modelo 3D texturizado del objeto o estructura a documentar.

Entre los motivos que han llevado a la expansión en el uso de las técnicas SfM debemos destacar los siguientes:

- Coste reducido respecto a otro tipo de sensores y técnicas.
- Rápido aprendizaje y sencillez de uso.
- Versatilidad a la hora de documentar prácticamente cualquier tipo de superficie.

Para la documentación de grandes superficies y zonas de difícil acceso –como cubiertas de edificios– es necesario utilizar equipo de apoyo para la elevación y el transporte de la cámara, como pértigas o vehículos aéreos no tripulados (UAV, por sus siglas en inglés), y de cara a la correcta geolocalización de los modelos tridimensionales también es habitual la utilización de estación total y GPS diferencial.

Prescindiendo del tipo de sensor y técnica empleados, la obtención de un modelo tridimensional completo de objetos, estructuras o yacimientos arqueológicos en su estado original debe convertirse en el primer objetivo de cualquier intervención sobre el patrimonio cultural. Recordemos que «la excavación arqueológica constituye una herramienta fundamental para el estudio de la historia, pero es una acción destructiva» (Tejerina, 2016); la consolidación y puesta en valor de yacimientos y objetos arqueológicos, por su parte, es también, inevitablemente, transformadora. En España, por motivos que no abordaremos aquí, el patrimonio arqueológico suele ser objeto –sobre todo en el caso de yacimientos, pero también de piezas– de intervenciones que modifican visiblemente su aspecto y características originales. En este contexto y sin entrar a juzgar esta realidad, nos limitamos a subrayar el valor incalculable que adquiere el modelo tridimensional como testimonio del estado original del bien cultural y como herramienta insustituible de cara a estudios, análisis o intervenciones posteriores. Y aunque ya desde la redacción de la Carta de Venecia se recoge la obligación de documentar de manera precisa cualquier intervención sobre el patrimonio cultural (VV. AA., 1964: 3), sería de gran utilidad una actualización de las leyes de protección del patrimonio cultural, incorporando la obligatoriedad de aportar este tipo de información en la documentación que habitualmente ha de constar en la memoria de intervención.

Aunque nos hemos centrado aquí en las técnicas que permiten la obtención de modelos tridimensionales a partir de la utilización de diferentes sensores, existen otras técnicas de documentación, como la fotografía de alta resolución o, dentro de la teledetección, la utilización y análisis de imagen multispectral e imagen de bandas no visibles del espectro (infrarrojo o ultravioleta), también muy útiles en intervenciones de conservación y restauración virtual y particularmente eficaces en casos específicos como la documentación de pinturas rupestres, pero su aplicación al patrimonio cultural no es reciente (LIANG, 2012: 1) y cuenta con una extensa bibliografía.

Entre los principales beneficios que aporta la documentación 3D al conservador destacamos los siguientes (obviando aquellos otros más relacionados con la puesta en valor y la difusión):

- Obtención de una réplica virtual, útil en casos de desaparición, destrucción o modificación del objeto o estructura original por causas naturales o antrópicas. A partir de esta réplica es posible obtener otros productos derivados, como el levantamiento planimétrico completo o la elaboración de una cartografía tridimensional de alteraciones y patologías.
- Monitorización continua del estado de conservación: esta estrategia, a la que se suele hacer referencia con el concepto de 4D (al añadir la dimensión del tiempo al modelo 3D espacial), es fundamental para la conservación preventiva, al permitir comparar resultados en diferentes períodos de tiempo y realizar un diagnóstico más acertado del estado de conservación o el seguimiento de intervenciones anteriores.



Figura 1. Ejemplos de obtención de modelos 3D a través de la técnica *Structure from Motion*. Yacimiento arqueológico inca de Aypate (Perú). Grupo de Patrimonio Virtual, Universidad de Alicante.

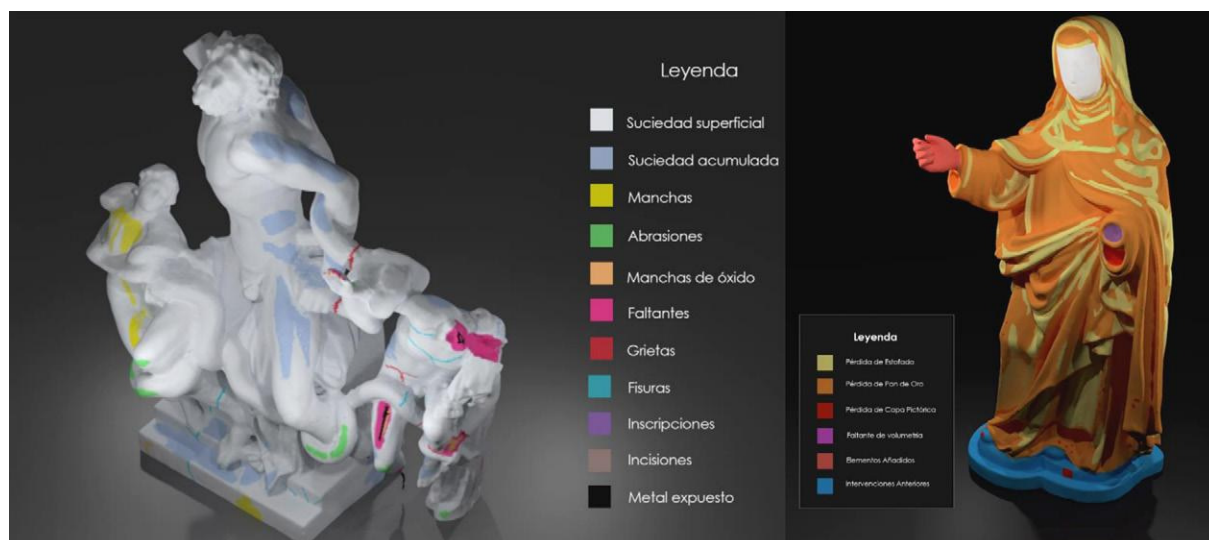


Figura 2. Creación de mapas de patologías sobre modelos 3D. Autora: Lorena Olazabal Furuya. Trabajo Fin de Máster en Patrimonio Virtual, Universidad de Alicante, 2016.

Limpieza y reintegración volumétrica y cromática

a) Infografía 2D

Dentro de este epígrafe incluimos todas aquellas técnicas y herramientas que permiten la edición y modificación de una imagen, prescindiendo de si el objeto representado está realizado en un soporte bidimensional o tridimensional. Este tipo de intervenciones se llevan a cabo ya desde la última década del siglo xx y el motivo es la aparición y popularización de los primeros software de edición 2D, más temprana –década de 1990– respecto a la del software de edición 3D, así como una menor exigencia de recursos de hardware respecto a las técnicas de representación tridimensional.

En este apartado se integran todas aquellas herramientas destinadas a reproducir en un entorno digital algunas de las operaciones que se llevarían a cabo en una intervención física:

- Estudios previos:
 - Creación de mapas de patologías organizados y clasificados en capas de información (factores químico-físicos, antrópicos o biológicos).
 - Diferenciación de fases constructivas y caracterización de materiales empleados.
 - Análisis a través de la aplicación de filtros específicos.
- Intervención:
 - Limpieza selectiva.
 - Reintegración volumétrica.

b) Infografía 3D

Dentro de este término incluimos todos aquellos procesos que cubre el flujo de trabajo habitual en un proyecto de restauración virtual 3D:



Figura 3. Limpieza virtual de placa de marfil a través de la utilización de herramientas de infografía 2D. Autora: Mónica Sánchez. Extraído de Trabajo Fin de Máster en Patrimonio Virtual, Universidad de Alicante, 2016.

- Importación, limpieza decimación y retopología de mallas obtenidas previamente en un levantamiento 3D.
 - Estudio y análisis del objeto a través de la información que proporciona la réplica virtual y diagnóstico del estado de conservación; elaboración de la cartografía de la pieza y de mapas tridimensionales de patologías.
 - Anastilosis virtual en el caso de piezas fragmentadas durante el proceso previo de documentación.
 - Limpieza de la réplica virtual sobre las texturas proyectadas en el modelo 3D.
 - Identificación de lagunas, fisuras, grietas y partes faltantes y reintegración volumétrica y cromática de las mismas.
 - Optimización de la geometría y textura del modelo 3D en función de su uso posterior.
- Impresión 3D: se dará preferencia a la coherencia geométrica y topológica de la pieza de cara a su correcta impresión.
 - Visualización en tiempo real: se buscará obtener una copia a baja resolución (bajo número de polígonos) que mantenga, en la medida de lo posible, la apariencia del objeto original a alta resolución.
 - *Render* fotorrealista: se priorizará la fidelidad del modelo 3D respecto al objeto original, con geometrías y texturas a alta resolución y una cuidada estrategia de iluminación.

c) Camera mapping/projection mapping

Mediante estas dos denominaciones nos referimos a una técnica que permite el modelado de geometría a partir de una única imagen, proyectando esta –a modo de textura– sobre la geometría generada. Se trata de una técnica que –en el ámbito de la restauración virtual–

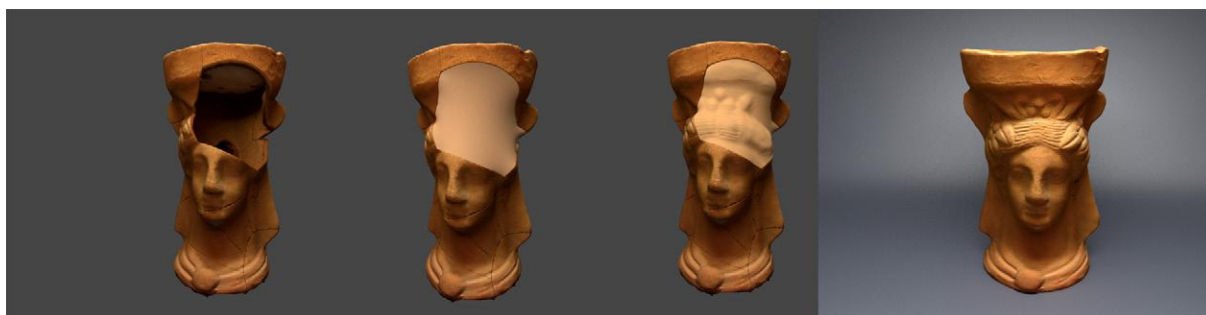


Figura 4. Ejemplo de reintegración volumétrica virtual a través de técnicas de modelado 3D. De izquierda a derecha: estado de conservación previo tras proceso de anastilosis virtual; reintegración volumétrica con prótesis no mimética; reintegración volumétrica con prótesis semimimética, y restauración integral con acabado mimético. Grupo de Patrimonio Virtual, Universidad de Alicante.

encuentra aplicación en la utilización de cualquier tipo de imagen representada en un soporte bidimensional –una fotografía o una obra pictórica, por ejemplo– de espacios que ya no existen o cuyo aspecto ha sido modificado o alterado. En primer lugar se analiza la información espacial de la que disponemos en la imagen para, a continuación, editarla en 2D, seleccionando y aislando todos y cada uno de los elementos que posteriormente se verán afectados por el desplazamiento de la cámara virtual. Una vez importada la información en un software de infografía 3D, se genera un espacio virtual tridimensional, en el cual se procede a ubicar y orientar cada uno de los elementos previamente aislados. Para simular una profundidad que en la imagen original no existe, esta fase también incluye la utilización de herramientas habituales, como el clonado de formas y texturas existentes o la generación de otras nuevas si disponemos de información o hipótesis de restitución; de este modo será posible cubrir y rellenar los espacios no visibles en la imagen original, pero sí en el recorrido de cámara final.

En este caso, el proceso de restauración virtual se puede llevar a cabo indistintamente durante la fase de trabajo en 2D o 3D.

d) Camera tracking/motion tracking/match moving/camera solving

Esta técnica, a la que se hace referencia con cualquiera de estas cuatro denominaciones y ampliamente utilizada en la industria del cine digital, permite integrar contenido sintético –generado por ordenador– 2D/3D en una secuencia de vídeo real, generando además una cámara virtual (y su correspondiente movimiento). Su funcionamiento se basa en los principios de la fotogrametría –la determinación de puntos en el espacio a partir de dos o más imágenes que comparten un área de solape entre sí– y el paralaje –si observamos un paisaje desde un punto y nos desplazamos hacia un lado, los objetos más cercanos a nosotros parecerán desplazarse más deprisa respecto a los más lejanos–, y se hace especialmente útil en restauración virtual como complemento al fotomontaje 2D, al que supera en volumen de información y sensación de profundidad y perspectiva, puesto que con esta técnica se incluye desplazamiento.

Al igual que en la documentación 3D a través de fotogrametría o SfM, la creación de un proyecto de rastreo o seguimiento de cámara (*camera tracking*) exige ciertos requisitos, como la planificación de la grabación de la secuencia o la presencia en la escena de elementos característicos (*features*) naturales o artificiales (dianas) que el software pueda posteriormente rastrear y en los que nos podamos apoyar para la reconstrucción 3D del espacio. Dependiendo de la complejidad del proyecto y de las características del vídeo real grabado, el proceso

será más o menos automático (en la fase de creación y rastreo de *trackers* por parte del software) o manual (será el usuario el que deba realizar esta tarea). También es necesario disponer de información acerca de la geometría de la lente y el tamaño del sensor que hemos empleado para corregir la distorsión del vídeo y determinar el movimiento de la cámara y la posición espacial de cada objeto de la escena por proyección inversa. Una vez generado con éxito el espacio tridimensional a partir del vídeo, se integran en él los objetos 2D o 3D previamente diseñados y texturizados, junto con la iluminación adecuada. Para que esta integración sea correcta, debe completarse con una fase de composición (*compositing*) antes de la representación (*render*) final. Por último, añadiremos que en este tipo de proyectos suele ser habitual llevar a cabo máscaras de selección dinámicas para aislar y recortar elementos de la escena, lo que se conoce como *rotoscopy*.

La multiplicación de software –algunos de ellos gratuitos, como Blender– capaces de llevar a cabo proyectos de *camera tracking*, el auge de vehículos aéreos no tripulados (UAV o drones), o la miniaturización y abaratamiento de sensores de imagen de alta resolución (full HD, 4K e incluso superiores) han convertido esta técnica en una herramienta que ya se aplica con cierta frecuencia en arqueología virtual de cara a la difusión y puesta en valor de yacimientos arqueológicos y edificios y monumentos históricos. Consideramos, sin embargo, que existen posibilidades interesantes en el ámbito más específico de la restauración virtual, con numerosas aplicaciones de las que destacamos aquí una: su utilización para mostrar –en el propio proyecto de actuación– el resultado de intervenciones de consolidación en yacimientos arqueológicos; es decir, antes de que esta se lleve a cabo y como parte de la documentación aportada para su valoración, lo que en muchos casos podría ayudar a prevenir y evitar resultados no deseados. Porque es cierto que la reversibilidad de las intervenciones sobre yacimientos arqueológicos, un tema siempre complejo, es –desde un punto de vista teórico– posible, pero será siempre costosa, compleja y traumática para los restos originales conservados.

Visualización de los resultados

a) Visualización no interactiva

Dentro de este epígrafe incluimos aquellas técnicas que no permiten al usuario una interacción en tiempo real con la información representada.

Render

Con este término hacemos referencia a la representación de una escena 3D como resultado del cálculo de la interacción entre las fuentes de iluminación generadas y los objetos presentes en dicha escena (y en función también de los parámetros definidos y configurados previamente por el usuario). Esta representación puede ser en formato de imagen o de secuencia de imágenes (vídeo) y constituye el tipo de representación más habitual de contenidos –a través de pantallas y paneles impresos– en museos y yacimientos arqueológicos por la relativa sencillez y bajo coste de creación respecto a otras técnicas de visualización.

Video mapping/projection mapping

El *video mapping* es actualmente una de las técnicas con mayores posibilidades de aplicación en el campo de la restauración virtual y si su utilización en este campo es aún testimonial es debido principalmente al alto coste de adquisición o alquiler de proyectores con las características y calidad requeridas para este tipo de proyectos. Como hemos señalado en el caso de otras técnicas digitales, también aquí es necesario diferenciar claramente entre aquellas

intervenciones destinadas a la difusión y a la puesta en valor de un monumento o edificio histórico, que resultan de una gran utilidad para dar a conocer y ayudar a comprender el patrimonio cultural, respecto de aquellas en las que podamos emplear, de un modo riguroso, el término de «restauración virtual».

El motivo de haber clasificado esta técnica dentro del apartado de visualización de los resultados se debe a que, si bien comprende la utilización de técnicas de infografía 2D y 3D para llevar a cabo la restauración virtual de objetos o estructuras, se trata fundamentalmente de una herramienta orientada a la visualización de los resultados. Un proyecto de videomapping incluye la obtención previa de un modelo tridimensional del soporte original, utilizando cualquiera de las técnicas mencionadas en el punto 1 de este documento. Sobre este modelo es posible llevar a cabo una intervención de restauración virtual 2D/3D, tanto de la estructura (pilares, muros o bóvedas, entre otros), como de los elementos ornamentales (escultura y pintura). Paralelamente a este proceso, se lleva a cabo una compleja planificación que incluye el cálculo del número de proyectores, su posición y la distribución –por cada proyector– de la información a proyectar.

Aunque existen casos bien documentados de utilización de *video mapping* aplicado a la visualización del patrimonio cultural (Martin *et al.*, 2014; Peral *et al.*, 2005), el ejemplo paradigmático de su aplicación a la restauración virtual lo constituye la magnífica intervención sobre el ábside mayor y el presbiterio de la nave central de la iglesia de Sant Climent de Taüll (Taüll, Lleida) en 2013. La propia morfología de la estructura, así como la localización de los frescos originales –arrancados para su preservación a principios del siglo xx y expuestos en el MNAC– entre otros, planteaban un reto de gran complejidad, solventado gracias a una estrategia integral que incluyó no solo la documentación tridimensional del espacio, sino también la obtención de imágenes a alta resolución de los frescos originales, sobre los que se llevó a cabo un minucioso trabajo de restauración y reconstrucción virtual y que fueron finalmente proyectados como textura sobre el modelo 3D. También es necesario destacar –aunque trascienda los límites estrictos de la restauración virtual y, por tanto, de este artículo– el trabajo de puesta en valor y difusión, que incluyó el repintado de los frescos, la elaboración de didácticas animaciones que toman como protagonistas las figuras y personajes representados y el laborioso proceso de creación de una particular banda sonora. Como resultado, esta intervención obtuvo el premio al mejor proyecto multimedia en el congreso Museums and the Web, celebrado en Baltimore y que premia cada año los mejores ejemplos mundiales de proyectos digitales en el sector de museos y patrimonio cultural.

b) Visualización dinámica: entornos de realidad aumentada y realidad virtual

Este segundo apartado comprende aquellas técnicas que permiten al usuario una interacción en tiempo real con la información representada, en un entorno completamente sintético (realidad virtual) o con elementos agregados a la realidad física (realidad aumentada). Ambos tipos de entorno proporcionan una experiencia más inmersiva respecto al *render* o la proyección, con la ventaja de que podemos interactuar en tiempo real con el entorno o con determinados elementos del mismo, obteniendo a cambio información.

Se trata de una técnica menos empleada que las representaciones o *render* de imágenes o vídeos, debido a la mayor complejidad de este tipo de proyectos y los requisitos necesarios para la creación de este tipo de contenidos:

- Hardware: dispositivos de percepción (vista, tacto, oído) y movimiento.
- Software: habitualmente se emplean motores de juego (*game engine*) para la creación de la física, la lógica y la interacción del entorno generado.

A pesar de ello, los avances en hardware (la miniaturización y ergonomía de dispositivos) y en software (mayor interacción, inmersión y realismo dentro del espacio generado) la convierten en una herramienta fundamental para la visualización en tiempo real de cualquier tipo de información.

c) *La impresión 3D*

La impresión 3D, por sus propias características y el tipo de resultados que proporciona, constituye en sí una categoría específica. En sentido estricto, sería más correcto hablar de tecnologías de fabricación por adición, dentro de cuya categoría se encontraría la impresión 3D; sin embargo, la mayor disponibilidad, menor coste y sencillez de uso han convertido la impresión 3D en la opción más empleada a la hora de generar una réplica física de un objeto virtual.

Por lo que respecta a su aplicación a la restauración virtual, hoy en día –y en combinación con técnicas de modelado 3D– es posible imprimir cualquier tipo de geometría en diferentes materiales, inocuos y compatibles con el material arqueológico original, lo que representa una gran oportunidad a la hora de realizar reintegraciones volumétricas de cualquier tipo de pieza. En aquellos casos en los que la reintegración no vaya a cumplir un rol estructural, la posibilidad de imprimir sobre materiales con cierta deformabilidad permite además facilitar la colocación de los fragmentos impresos en la pieza original. En general, ya sea con materiales rígidos o flexibles, un correcto flujo de documentación 3D y modelado 3D facilitaría el montaje y desmontaje de manera sencilla y sin perjuicio de la pieza original, evitando la aplicación de sustancias para la protección de aristas.

La documentación del proceso de intervención

Al igual que en la restauración física de objetos y estructuras arqueológicas, también aquí es necesario documentar de manera exhaustiva la intervención en todas y cada una de las fases realizadas y de las decisiones tomadas, así como su justificación, por lo que se debe incluir la procedencia, características y grado de fiabilidad de las fuentes empleadas. Y es importante que esta información esté disponible para su consulta, evaluación y/o validación por parte de cualquier persona interesada. En este sentido existen ya algunas propuestas de creación de protocolos para su utilización en proyectos de arqueología virtual que pueden ser aplicados también en intervenciones de restauración virtual, como la *Extended Matrix* (Demetrescu, 2016), que propone un sistema de documentación equivalente a lo que se conoce como matriz de Harris, la herramienta más empleada para la documentación de excavaciones arqueológicas. Otra propuesta para la normalización en proyectos de este tipo lo constituyen las denominadas UR (unidades reconstructivas), basadas en la utilización de fichas «que contengan los datos básicos de referencia, descriptores, hipótesis fundamentadas, evidencias e hipótesis descartadas que sostengan la interpretación en la que se basa la reconstrucción virtual» (Molina y Muñoz, 2014). Por último, mencionamos también la escala de evidencia histórica (Aparicio, 2014), una herramienta que permite al ilustrador atribuir un grado de evidencia histórica –en función de una escala cromática– para cada elemento representado.

Conclusiones

En la Carta de Venecia se nos recuerda explícitamente –en el artículo n.º 2– que la conservación del patrimonio «se sirve de todas las ciencias y técnicas que puedan contribuir al estudio y a la salvaguardia del patrimonio monumental» (VV. AA., 1964: 1). Examinando con perspec-

tiva la evolución de esta disciplina, es fácil comprobar que así ha ocurrido, de tal modo que se han sabido incorporar los avances en diferentes áreas de conocimiento (biología, química, física o geología, entre otras) sin las cuales no sería posible comprender hoy la ciencia que protege nuestro patrimonio. En este momento y en la misma línea asistimos a un nuevo aporte de conocimientos, procedentes de técnicas que pueden ayudar a mejorar, agilizar y automatizar algunos procesos que aún hoy se llevan a cabo de un modo artesanal y que pueden llegar a provocar lesiones en los objetos sobre los que se está interviniendo: «La reintegración volumétrica sigue siendo uno de los aspectos más controvertidos entre arqueólogos, conservadores y restauradores, ya que son aún muchos los profesionales que defienden y abogan por la reintegración indiscriminada del objeto [...]» (Carrascosa, 2009: 141-142). En este sentido, las posibilidades que nos ofrece la combinación de técnicas de documentación, modelado o impresión 3D pueden cambiar y mejorar el modo en que los futuros especialistas llevarán a cabo este tipo de trabajos.

Como conservadores, la cada vez mayor sofisticación de las técnicas de creación y visualización de contenidos virtuales y la posibilidad de generar réplicas virtuales de gran fidelidad respecto a los objetos originales deben llevarnos a reflexionar sobre el verdadero valor de la obra de arte o del bien cultural, explorando nuevas opciones de análisis, intervención y visualización que protejan la obra original, respetando su integridad y evitando cualquier actuación innecesaria. Al mismo tiempo, restaurador y visitante deberán plantearse el valor de la réplica virtual, apreciando su apariencia –mímesis del objeto original– y su eficaz papel como transmisor de su intrínseco valor histórico y artístico.

Señalamos, para concluir, algunas de las líneas en las que consideramos que deberían realizarse progresos para una mayor consolidación de esta joven disciplina:

- La mejora de procesos de automatización en la documentación 3D de objetos arqueológicos: actualmente es posible llevar a cabo la documentación de una pieza arqueológica en tiempos relativamente cortos que, sin embargo, continúan resultando inviables de cara a la documentación masiva de los fondos presentes en los museos arqueológicos (y que constituyen en muchos casos un auténtico *tesoro oculto* aún por explotar de estas instituciones). Únicamente la unión y automatización de los dos procesos que intervienen en la documentación 3D por técnicas SfM –la captura fotográfica y el procesamiento de imágenes– harán posible su viabilidad en proyectos de documentación a media y gran escala.
- El avance en los procesos de automatización en infografía 3D aplicada a la restauración virtual, fundamentalmente en dos líneas:
 - La retopología de mallas procedentes de escáner 3D y SfM.
 - Actualmente es posible detectar y seleccionar de un modo automático lagunas en un objeto 3D. La fase posterior de reintegración de estas partes faltantes, en cambio, necesita aún desarrollarse para ser satisfactoria.
- La búsqueda de nuevos materiales y sistemas de impresión 3D, basada en el estudio y caracterización de los principales materiales empleados para la fabricación de objetos a lo largo de la historia. El estudio de sistemas de adhesión y unión entre las piezas impresas en 3D y las piezas originales.
- Por último, mencionamos también la necesidad de incorporar formación específica en restauración virtual para los futuros conservadores, algo hoy prácticamente inexistente, lo que obstaculiza un cambio sustancial en los procesos de trabajo actuales y obliga al especialista a buscar una formación no específica para después intentar adaptarla a su propio flujo de trabajo.

Bibliografía

- CARRASCOSA, B. (2009): *La conservación y restauración de objetos cerámicos arqueológicos*. Madrid: Tecnos.
- DEMETRESCU, E. (2015): «Archaeological stratigraphy as a formal language for virtual reconstruction. Theory and practice» [en línea]. *Journal of Cultural Heritage*, vol. LVII, pp. 42-55. Disponible en: <<http://osiris.itabc.cnr.it/extendedmatrix/index.php/downloads/>> [consulta: 10 de noviembre de 2016].
- LEVY, P. (1995): *Qu'est-ce que le virtuel?*. París: La Découverte.
- (2001): *Cyberculture*. University of Minnesota Press.
- LIANG, H. (2012): «Advances in multispectral and hyperspectral imaging for archaeology and art conservation». *Appl Phys A*, 106: 309-323.
- LIMONCELLI, M. (2012): *Il restauro virtuale in archeologia*. Roma: Carocci editore.
- MAPPING SANT CLIMENT DE TAÜLL/PANTOCRATOR (2013): [en línea]. Lugar de publicación: [Internet] Disponible en: <<http://pantocrator.cat/es/>> [consulta: noviembre de 2016].
- MARTÍN, P.; LLAMAS, J.; GÓMEZ-GARCÍA-BERMEJO, J.; ZALAMA, E., y CASTILLO, J. (2014): «Using 3D digital models for the virtual restoration of polychrome in interesting cultural sites» [en línea]. *Journal of Cultural Heritage*, vol. XV, pp. 196-198. Disponible en: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1296207413000927>> [consulta: 20 de noviembre de 2016].
- MOLINA, J.; ESCLAPÉS, J.; FABREGAT, L.; MUÑOZ, J., y TEJERINA, D. (2012): Sitio web oficial del programa de estudios en Patrimonio Virtual de la Universidad de Alicante [en línea]. Lugar de publicación: [Internet] Disponible en: <www.patrimoniovirtual.com> [consulta: diciembre de 2016].
- MOLINA, J., y MUÑOZ, J. (2014): «Normalización de proyectos en virtualización del patrimonio: UR - Unidades de Reconstrucción» [en línea]. Blog del sitio web del Grupo de Patrimonio Virtual de la Universidad de Alicante. Disponible en: <<http://www.patrimoniovirtual.com/2014/11/27/normalizacion-de-proyectos-en-virtualizacion-ur-unidades-de-reconstruccion/>> [consulta: diciembre de 2016].
- PERAL, R.; SAGASTI, D., y SILLAUREN, S. (2005): «Virtual restoration of Cultural Heritage Through Real Time 3D Models Projection» [en línea]. *The 6th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage VAST*. Pisa: The Eurographics Association. Disponible en: <<http://public-repository.epoch-net.org/publications/VAST2005/shortpapers/short2002.pdf>> [consulta: 3 de diciembre de 2016].
- TEJERINA ANTÓN, D. (2016): «La restauración virtual y su aportación a la conservación y restauración de bienes culturales I» [en línea]. Blog del sitio web del Grupo de Patrimonio Virtual de la Universidad de Alicante. Disponible en: <<http://www.patrimoniovirtual.com/2016/11/02/la-restauracion-virtual-y-su-aporacion-a-la-conservacion-y-restauracion-de-bienes-culturales-i/>> [consulta: diciembre de 2016].
- VV. AA. (2008): «Terminología para definir la conservación del patrimonio cultural tangible» [en línea]. Biblioteca Virtual FAHUSAC. Disponible en: <<http://bvhumanidades.usac.edu.gt/items/show/1806>> [consulta: 27 de noviembre de 2016].
- VV. AA. (1964): «Carta de Venecia» [en línea]. Instituto del Patrimonio Cultural de España. Disponible en: <http://ipce.mcu.es/pdfs/1964_Carta_Venecia.pdf> [consulta: 3 de noviembre de 2016].