

# Aplicación de fuentes de iluminación en modelos fotogramétricos para la diagnosis y restauración virtual de objetos en cera policromados

## Aplicação de fontes de luz em modelos fotogramétricos para o diagnóstico e restauro virtual de objectos em cera policromada

### Application of light sources on photogrammetric models for the diagnosis and virtual restoration of objects in polychrome wax

EMANUEL STERP MOGA<sup>1,\*</sup>  
ÓSCAR HERNÁNDEZ-  
MUÑOZ<sup>2</sup>  
ALICIA SÁNCHEZ-  
ORTIZ<sup>1</sup>

1. Universidad Complutense de Madrid, Facultad de Bellas Artes, Departamento de Pintura y Conservación-Restauración, Madrid, España  
2. Universidad Complutense de Madrid, Facultad de Bellas Artes, Departamento Diseño e Imagen, Madrid, España

\* [emasterp@ucm.es](mailto:emasterp@ucm.es)

#### Resumen

El objetivo de este trabajo es presentar un nuevo enfoque práctico de la fotogrametría digital en la diagnosis artística y la restauración virtual. El estudio se ha aplicado a un modelo anatómico de cera policromada, datado en el siglo XVIII. En el registro fotográfico, se ha utilizado la combinación de fuentes de iluminación (visible y ultravioleta) para obtener modelos 3D que sirven como herramientas de documentación para a la hora de mapear con exactitud el estado de conservación y de proyectar la restauración virtual. Se describen las etapas del proceso fotogramétrico junto con la estrategia de iluminación y la gestión del color empleados para solventar la problemática del registro virtual en superficies de objetos con acabados muy brillantes. Los resultados obtenidos son prometedores puesto que permiten obtener un modelo 3D con un óptimo registro de la morfología de la escultura sobre el que proyectar virtualmente soluciones dentro del modelo de toma de decisiones.

#### Resumo

O objectivo deste trabalho é apresentar uma nova abordagem prática da fotogrametria digital no diagnóstico artístico e no restauro virtual. O estudo foi aplicado a um modelo anatómico de cera policromada, datado do século XVIII. No registo fotográfico, a combinação de fontes de luz (visível e ultravioleta) tem sido utilizada para obter modelos 3D que servem como ferramentas de documentação para mapear com precisão o estado de conservação e para projectar o restauro virtual. As etapas do processo fotogramétrico são descritas juntamente com a estratégia de iluminação e gestão de cores utilizadas para resolver o problema do registo virtual em superfícies de objectos com acabamentos muito brilhantes. Os resultados obtidos são promissores, uma vez que permitem obter um modelo 3D com registo óptimo da morfologia da escultura para projectar soluções virtuais no âmbito do modelo de decisão.

#### Abstract

The objective of this work is to present a new practical approach to digital photogrammetry in artistic diagnosis and virtual restoration. The study has been applied to an anatomical model of polychrome wax, dated from the 18th century. In the photographic record, the combination of light sources (visible and ultraviolet) has been used to obtain 3D models that serve as documentation tools to accurately map the state of conservation and to project the virtual restoration. The stages of the photogrammetric process are described along with the lighting strategy and colour management used to solve the problem of virtual registration on surfaces of objects with very bright finishes. The results obtained are promising, because they make it possible to obtain a 3D model with optimal record of the morphology of the sculpture to project virtual solutions within the decision-making model.

#### PALAVRAS-CLAVE

Fotogrametría digital  
Fluorescencia visible  
inducida por UV  
Documentación 3D  
Restauración virtual  
Escultura de cera

#### PALAVRAS-CHAVE

Fotogrametria digital  
Fluorescência visível  
induzida por UV  
Documentação 3D  
Restauro virtual  
Escultura de cera

#### KEYWORDS

Digital photogrammetry  
UV Induced visible  
fluorescence  
3D documentation  
Virtual restoration  
Wax sculpture

## Introducción

Las universidades públicas europeas custodian un importante y variado patrimonio de enorme valor educativo, científico y cultural [1]. Dentro de él se encuentran las colecciones de ceroplástica anatómica, constituidas por artefactos de extraordinaria calidad técnica, que en sí mismos son fuentes primarias esenciales para comprender la historia de la medicina. La falta de reconocimiento del papel que este material didáctico tuvo en la construcción y avance del conocimiento, ha llevado a que muchas de estas colecciones estuvieran expuestas a una suerte incierta, resultado de una carencia de planes de conservación para preservar su legado que solo en los últimos años, con el despertar de un nuevo interés hacia ellas, se ha visto revertido [2-3].

Los artefactos en cera supusieron una estrategia pedagógica novedosa en el siglo XVIII al permitir una representación tridimensional de la anatomía humana, animal o botánica. Favorecieron el aprendizaje del estudiante a través de una experiencia sensorial activa al sustituir al cadáver diseccionado por un artefacto con el que se superaba los anteriores métodos bidimensionales, como los grabados e ilustraciones. Desde su desarrollo inicial, los modelos de cera médica han sido producidos con diversos fines: utilizados como instrumentos de investigación, como herramientas para la instrucción de los estudiantes y profesionales de la medicina, como medio para estimular el interés del público hacia la ciencia y como entretenimiento dentro de un contexto más amplio de la cultura popular. La función didáctica que tenían estos objetos conllevaba una constante manipulación de los mismos, lo que hizo que con el tiempo fuesen acumulando las huellas derivadas de su uso en las aulas. Este factor, unido a la extrema fragilidad del propio material céreo, ha provocado deterioros en muchos de los modelos artificiales cuyo alcance está determinado por las condiciones de exposición o almacenamiento a las que han estado sometidos. Para afrontar el reto de su conservación es esencial recurrir a técnicas de intervención que tengan el menor impacto posible, de modo que se cumplan los criterios básicos de la restauración moderna con el criterio de mínima intervención.

Para registrar el estado de conservación de una pieza es habitual recurrir a sistemas bidimensionales, como fotografías, fichas técnicas con notas y mapas gráficos. En las últimas décadas, la adquisición de modelos 3D mediante la fotogrametría digital o el escaneo láser, se ha convertido en uno de los métodos estándar para documentar, diagnosticar, conservar, restaurar y difundir el patrimonio cultural [4-9]. Al disponer de una malla poligonal, que replica al objeto real en todas sus características físicas, el conservador-restaurador puede visualizarlo en la pantalla del ordenador con la finalidad de estudiar sus características técnicas, diagnosticar deterioros que a simple vista no son detectables y realizar simulaciones virtuales que ofrezcan soluciones sin

que esto suponga una manipulación directa. Si bien el sector de la arqueología ha sido el pionero en aplicar esta técnica, en la actualidad existe una amplia literatura sobre su implementación en prácticamente todos los tipos de objetos patrimoniales [10].

A pesar de las ventajas que esta técnica tiene frente a métodos más tradicionales, son escasos los trabajos publicados referidos de manera específica a objetos de cera o a colecciones de ceroplástica. En anteriores trabajos, nuestro equipo analizó la utilidad de la fotogrametría, el escáner y la impresión 3D para implementar metodologías de restauración bajo la premisa de mínima intervención [11-14]. Algunos autores han enfocado la aplicación de las tecnologías digitales 3D hacia la documentación para asegurar la preservación y difusión de este tipo de patrimonio [15].

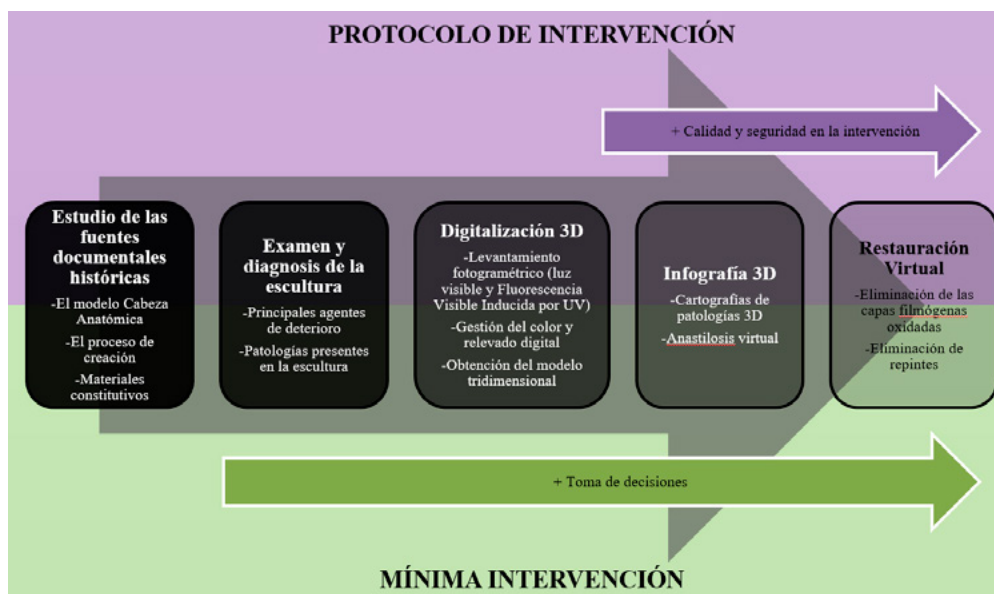
La parte novedosa del trabajo que se presenta se centra en la elaboración de modelos fotogramétricos mediante la aplicación de la técnica de la fluorescencia visible inducida por UV, cuyo fin es enriquecer y complementar la diagnosis y creación de cartografías digitales 3D. En paralelo, los modelos fotogramétricos con luz visible y gestión del color, son herramientas claves para obtener unos modelos digitales de alta calidad y fidelidad con la obra original de cara a la restauración virtual.

## Materiales y métodos

Como caso de estudio, se ha elegido una escultura en cera policromada que representa la anatomía de una cabeza humana (nº inventario: MAJPO00378), conservada en el Museo de Anatomía Humana “Javier Puerta” de la Facultad de Medicina. La figura fue elaborada en el gabinete anatómico del Real Colegio de Cirugía de San Carlos, en el siglo XVIII y actualmente forma parte de las colecciones científicas de la Universidad Complutense de Madrid. Las propias características del material escultórico, con una elevada fragilidad de la cera envejecida, y el estado crítico de conservación que presentaba el modelo debido a la fragmentación de la cabeza por la línea del cuello como consecuencia de una incorrecta manipulación, desaconsejaban moverla para su estudio. Se planteó entonces la necesidad de buscar una nueva estrategia que redujese al máximo la acción directa sobre el objeto a través un protocolo de intervención (Figura 1).

## Proceso de registro tridimensional

El primer paso para la digitalización de la escultura mediante fotogrametría consistió en la captura de las múltiples fotografías. Para la elección de la estrategia de captura se tuvieron en cuenta tanto las características físicas del modelo, tamaño y peso, como su composición material,



**Figura 1.** Esquema con las diferentes fases que componen el protocolo de intervención dentro del Modelo de Toma de Decisiones enfocado a la Restauración Virtual (E. Sterp Moga).

y, sobre todo, la capacidad de reflexión de su superficie barnizada. Asimismo, se consideraron las condiciones especiales de iluminación del entorno museístico en el que la obra está expuesta. El registro fotográfico se ha realizado con un equipo compuesto por una cámara digital modelo Canon EOS 5D Mark II, de 21,1 megapíxeles y un objetivo con lente multifocal de 50 mm. Para el registro del modelo con luz visible se eligieron como parámetros de sensibilidad ISO-100, diafragma  $f/8$  y obturador  $1/250$ . La captura de fotografías con fluorescencia visible inducida por UV se hizo ajustada a los siguientes parámetros: diafragma  $f/8$ , obturador  $1/10$  y sensibilidad ISO-100.

### Control de brillos

La mayor dificultad encontrada durante la planificación de esta fase del proceso fue la intensa reflexión de la luz que mostraba la superficie cerosa barnizada de la escultura. Dentro de los factores que pueden afectar a la calidad final del modelo obtenido mediante el levantamiento fotogramétrico, una de las problemáticas más comunes es la generación de faltas o deformaciones de la malla debido a la presencia de zonas muy blancas por la existencia de altos brillos. Esta cuestión es difícil de resolver debido a que la fotogrametría digital se fundamenta en la búsqueda de diferentes puntos homólogos entre dos o más imágenes. Al aparecer diversos reflejos blancos, estos se registran en diferentes posiciones en cada imagen y el *software* no es capaz de reconocer puntos en común para reconstruir el volumen fielmente en su espacio. En consecuencia, este actúa de una manera arbitraria y crea irregularidades sobre la superficie del modelo, a la vez que altera el color de la textura obtenida.

Para intentar reducir en lo posible este tipo de limitaciones, algunos autores recomiendan el uso de determinados productos que pueden modificar la refracción

del material. Uno de los más empleados es el ciclododecano [16], un hidrocarburo cíclico saturado ( $C_{12}H_{24}$ ) que al ser extendido sobre una superficie adquiere un acabado opaco y cuya principal propiedad es su capacidad de sublimar en horas. Sin embargo, el empleo de esta sustancia puede no ser lo más acertado cuando se trata de objetos con una morfología de superficie muy texturizada o que están contruidos con una gran variedad de materiales, como es el caso que nos ocupa.

Analizados todos los factores mencionados, se optó por utilizar una estrategia de captura para la toma de fotografías consistente en introducir el modelo en una caja de luz tipo *Newer* y hacerlo rotar mediante una plataforma giratoria, dotada de diferentes *targets* (Figura 2). Durante el tiempo que ha durado el proceso, la cámara se ha mantenido fija en el mismo punto y solo se ha variado su altura. Cabe mencionar que para la toma fotográfica se experimentó también otro método de abordaje alternativo basado en girar alrededor de la escultura con la cámara, pero quedó descartado debido a los altos brillos que reflejaban las superficies escultóricas provenientes de la iluminación ambiental.



**Figura 2.** Equipamiento preciso para la toma de datos fotogramétricos de la escultura Cabeza Anatómica con luz visible (E. Sterp Moga).

El control de los brillos provocados por la alta reflexión de la película filmógena presente en la superficie cérica de la escultura, pudo lograrse en gran parte gracias a la colocación de la escultura dentro de la caja de luz. Dicha caja tiene unas dimensiones de 80 × 80 × 80 cm y está fabricada con nylon blanco, lo que actuó como elemento difusor y redujo drásticamente los reflejos. Se prescindió del uso de polarizadores, pese a ser una estrategia habitual porque este tipo de filtros puede modificar en cierta medida el color registrado. Para conseguir una mayor difusión de la luz sobre el objeto y matizar los brillos, se optó por colocar un filtro de polietileno de alta densidad Tyvek en cada foco (Figuras 2 y 3).

### Combinación de fuentes de iluminación

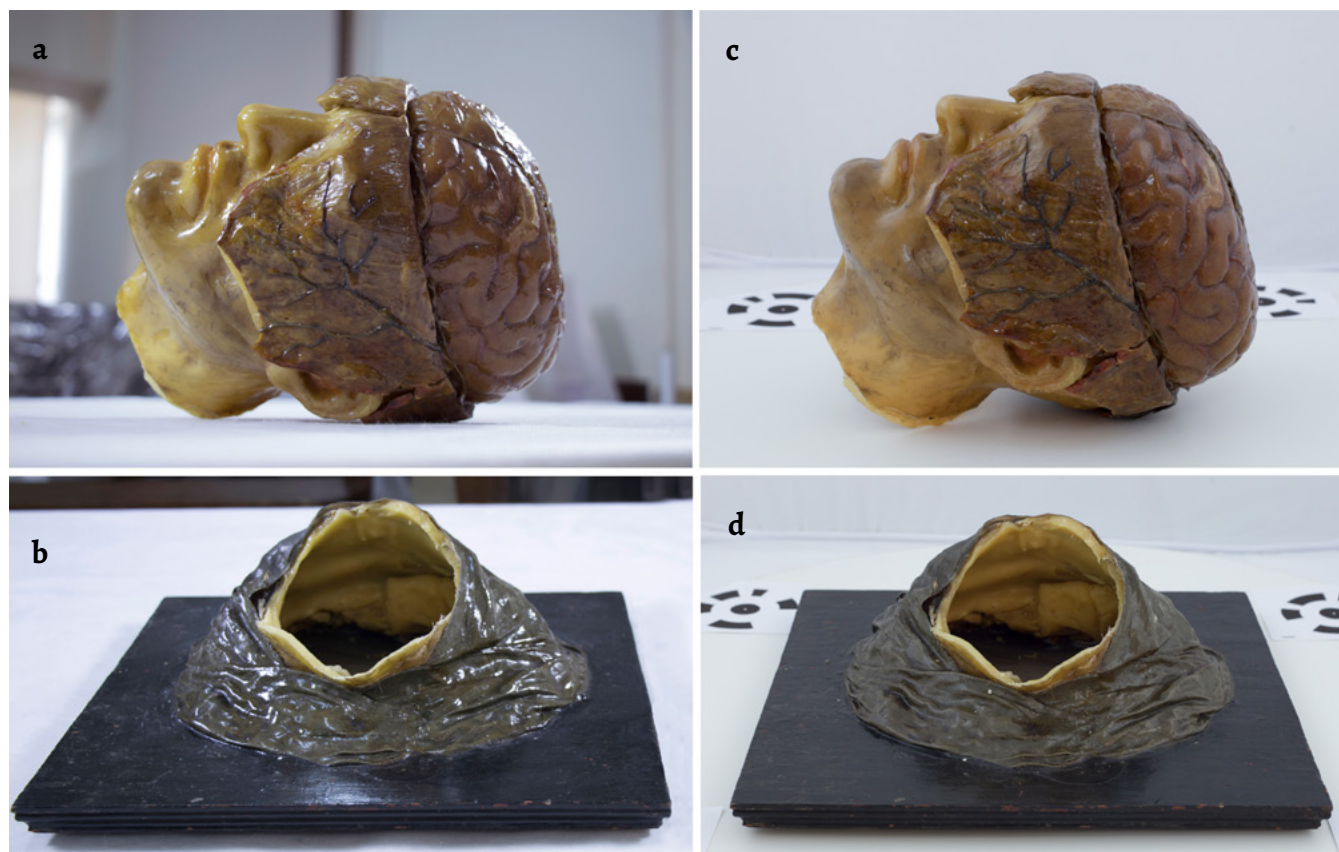
La adquisición por métodos tradicionales 2D de fotografías en la fase de documentación de obras de arte tridimensionales no permite una visualización completa en una única imagen capturada del conjunto de planos que componen el objeto, por lo que durante el proceso se pierde parte de la información. La fotogrametría 3D combinada con el uso de distintas fuentes de iluminación puede ser una herramienta de enorme valía para el restaurador [17].

Con el fin de enriquecer la documentación tridimensional de cara a la diagnosis artística se han realizado diferentes modelos fotogramétricos con fluorescencia visible inducida por UV. Esta técnica no invasiva posibilita identificar la presencia de determinados materiales en función de la

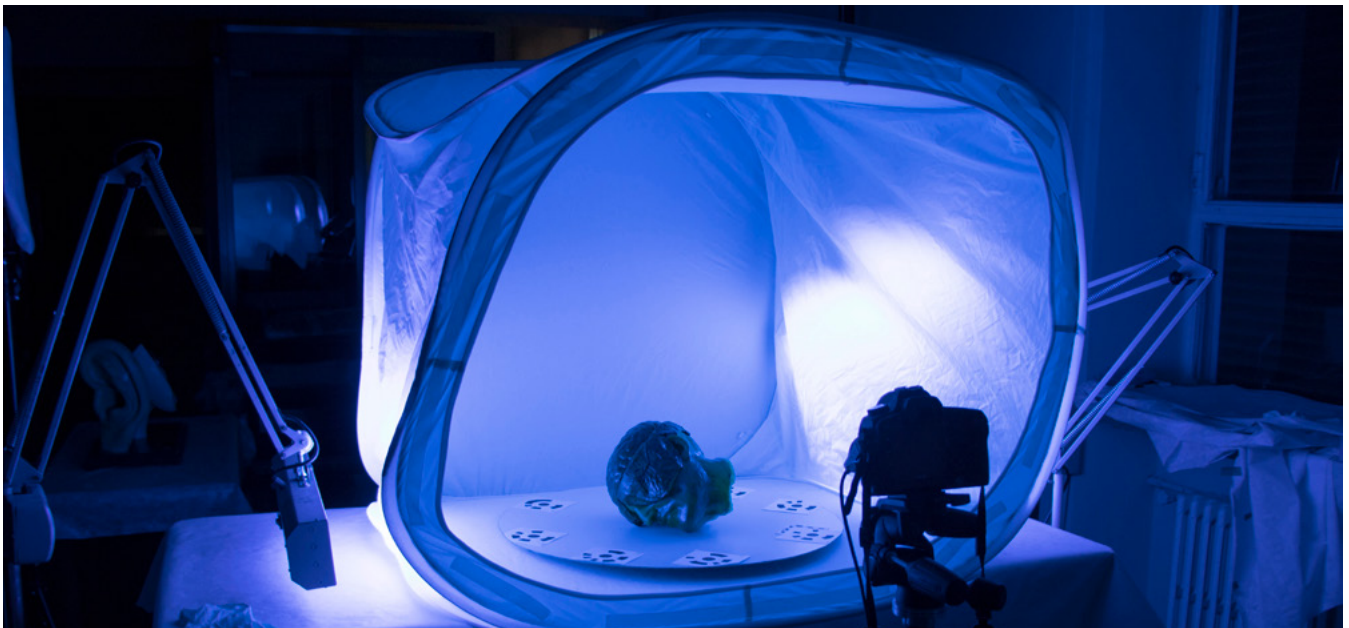
respuesta que cada uno de ellos muestra a la fluorescencia visible inducida por UV, teniendo presente que esta se verá también condicionada por el grado de envejecimiento alcanzado, desde menor respuesta (recientes) a mayor fluorescencia (antiguos) [18]. La fluorescencia es la luminiscencia que se observa durante la excitación de los materiales, con unos tiempos de vida generales de  $10^{-10}$  a  $10^{-7}$  s [19]. Los escultores que realizaron el modelo didáctico de la cabeza anatómica en cera utilizaron una paleta limitada de colores para recrear con verosimilitud las tonalidades de cada órgano corporal: tierras óxido de hierro, carmín, bermellón, laca roja, azul de Prusia, verdigris, carbón vegetal y blanco de plomo [20].

El registro fotogramétrico con fluorescencia visible inducida por UV se realizó con la escultura colocada en el interior de la caja de luz e iluminada con dos lámparas de UV, modelo CTS AET LUX 40, dispuestas a cada lado formando un ángulo de 90° respecto a la posición del objeto.

Se requiere de un entorno oscuro dado que se trabaja con ondas ultravioletas (UVA y UVB), comprendidas entre los 280-400 nm del espectro electromagnético. Este requerimiento complica el proceso ya que si no se logra una buena iluminación en el conjunto de la obra se producirán fallos en el registro fotográfico y en la posterior construcción del modelo fotogramétrico. Esta dificultad se solventó gracias al uso de la caja de luz y a la precisión con la que se han colocado los focos e iluminado la escena (Figura 4).



**Figura 3.** Cabeza Anatómica documentada con luz visible: a y b) toma fotográfica sin filtros; c y d) toma fotográfica del modelo utilizando la caja de luz y filtros en los focos (E. Sterp Moga).



**Figura 4.** Escena para la toma de datos fotogramétricos del modelo seleccionado con fluorescencia visible inducida por UV (E. Sterp Moga).

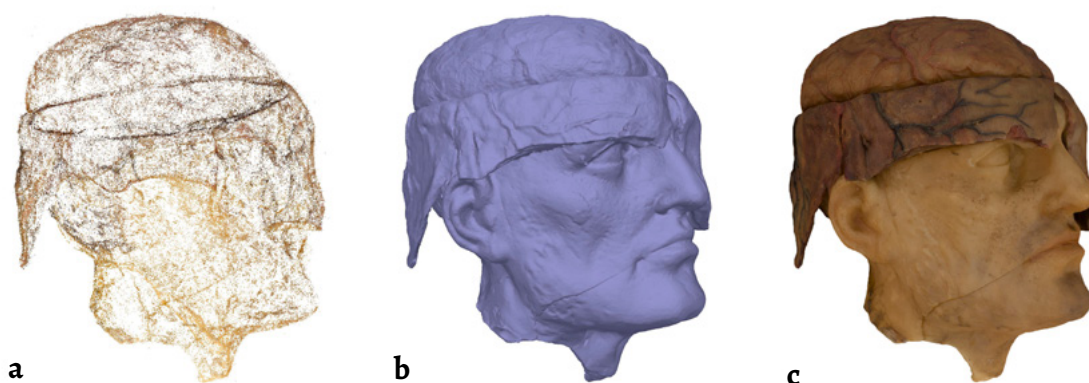
### Gestión del color y revelado digital

Para gestionar las características cromáticas de la imagen se ha utilizado una tarjeta *X-Rite ColorChecker Passport*. Este tipo de cartas están compuestas por una serie de parches de pigmentos de color, con alta pureza, ubicados en posiciones fijas, que se colocan en la escena para tomar una fotografía en la que la tarjeta será reconocida y analizada por el programa informático generando un perfil de color (Figura 2). Aunque existen también modelos de cartas de tinta impresa, se descartó su uso en este trabajo porque suelen dar una lectura espectral menos uniforme. Durante la toma fotográfica, se procedió a colocar la tarjeta junto al modelo científico a digitalizar y se capturó una fotografía de la escena con las mismas condiciones de iluminación que las empleadas para las capturas de la escultura desde múltiples puntos de vista. Cada una de las imágenes se registró en el formato RAW con el fin de recoger toda la información capturada por el sensor [21], sin procesar junto con todos los metadatos de la toma (modelo de cámara, fecha, distancia focal, velocidad de obturación, apertura del diafragma, etc.). La fotografía que contenía la imagen de la tarjeta *ColorChecker Passport* se convirtió al formato Adobe DNG para poderla abrir en el programa *ColorChecker Camera Calibration*. Este software sirve para obtener un perfil de cámara que permite corregir las dominantes de color durante el proceso de revelado RAW, logrando un equilibrio entre los canales de color [22]. El perfil de cámara generado se ha guardado de forma automática en el directorio donde *Adobe Cámara Raw* almacena este tipo de archivos. A continuación, se abrieron todas las fotografías del modelo anatómico en *Adobe Camera Raw 10.5* de *Photoshop*, se seleccionó el perfil de cámara creado con anterioridad y para establecer el balance de blancos se tomó como referencia el parche de color gris neutro de la tarjeta *ColorChecker* indicado por el fabricante.

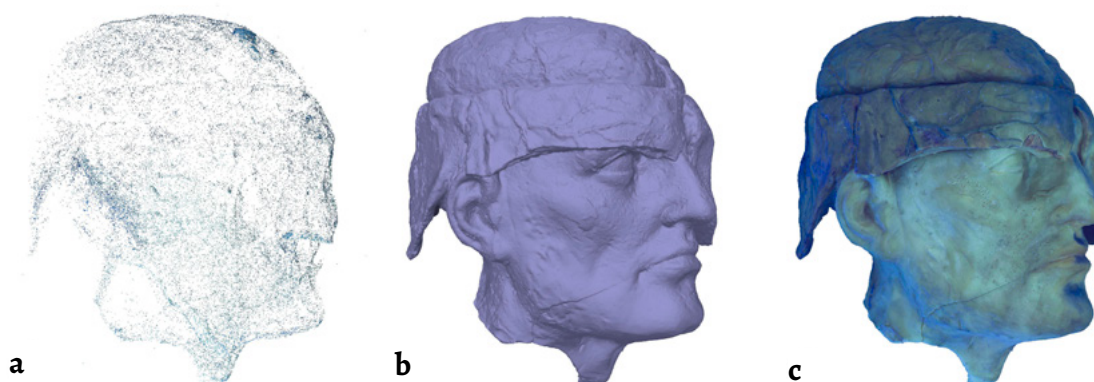
En cuanto al espacio de color, se optó por trabajar con ProPhotoRGB al abarcar un espectro de color o Gamut que alcanza el 90 % del representado en el modelo de referencia CIELAB, utilizado habitualmente para describir los colores del espectro visible en los seres humanos. Respecto a la gestión del color de las fotografías con fluorescencia visible inducida por UV este proceso es más complicado debido a la falta de un estándar de referencia oficial [23]. Por tanto, en este punto se ha procedido a ajustar el balance de blancos, como se ha mencionado anteriormente. Las imágenes así corregidas se exportaron en el formato TIFF para evitar la compresión de los datos y con ello generar posibles alteraciones en la reproducción del color. De otro modo, por ejemplo, con el formato JPEG, sería imposible ya que la imagen se comprime modificando los parámetros cromáticos.

### Obtención del modelo 3D

Las capturas fotográficas han sido procesadas mediante el software *Agisoft Metashape*. Con él se han corregido las deformaciones derivadas de la perspectiva y de la óptica del objetivo utilizado, se han restablecido la posición y la orientación de cada imagen y se ha ubicado sus vértices geométricos en el espacio hasta llegar a configurar la “nube de puntos”. Una vez importadas las imágenes en formato TIFF, se procedió a alinearlas con la máxima precisión hasta obtener una “nube de puntos” ordenados en el espacio; esta nube aporta una aproximación básica a la volumetría del objeto y permite la estimación de cada una de las posiciones desde las que se han realizado las fotografías (Figuras 5a y 6a).



**Figura 5.** Proceso fotogramétrico con luz visible: a) nube de puntos; b) malla; c) textura (E. Sterp Moga) (Ver modelo 3D).



**Figura 6.** Proceso fotogramétrico con fluorescencia visible inducida por UV: a) nube de puntos; b) malla; c) textura (E. Sterp Moga) (Ver modelo 3D).

Tras esta primera orientación, se realizó una limpieza manual de los puntos que no correspondían al modelo. A continuación, se calculó la malla 3D tomando como origen de datos los mapas de profundidad y seleccionando la opción de calidad *Extra alta* para lograr una gran precisión, obteniéndose un modelo final compuesto por 3.946.267 polígonos (Figuras 5b y 6b). Para crear la textura se eligió la opción *Genérico*; el software analiza automáticamente las fotografías y crea una imagen de mapa de bits tras establecer una correspondencia entre los píxeles que la componen y cada punto de la malla. De ese modo, se ha conseguido dotar de color al modelo 3D obtenido (Figuras 5c y 6c).

## Diagnóstico y restauración virtual

### Cartografías 3D

El uso de los mapas de daños digitales 2D es habitual en las prácticas de diagnóstico artística que realizan los profesionales del campo de la conservación del patrimonio. Sin embargo, este tipo de documentación no consigue recoger toda la información que se requiere para un estudio completo del estado de conservación de un objeto. El empleo de técnicas 3D ayuda en esta tarea al permitir ubicar con absoluta

exactitud cada una de las patologías existentes en cada una de las secciones registradas. La cartografía elaborada sobre el modelo 3D en el espacio virtual facilita que el restaurador estudie la pieza y pueda girarla 360° para contemplarla con detalle desde todos sus planos. Su desarrollo se ha realizado relativamente hace muy poco tiempo [13, 24].

Para elaborar las cartografías 3D de la escultura de cera, se ha utilizado el software de código abierto *Blender 2.81*. Cada tipo de alteración ha sido marcado sobre la textura del modelo virtual con ayuda del pincel *Draw*, herramienta de pintura digital disponible en el modo *Texture Paint* del programa. Esta herramienta ofrece una serie de propiedades que pueden configurarse, tales como el radio o la fuerza, así como diferentes opciones de fusión (*Mix*, *Darken*, *Screen*, *Overlay* o *Luminosity*), que se han ido empleando según ha sido necesario (Figura 7). Con el fin de utilizar siempre el mismo valor cromático y tonal para representar las alteraciones, se ha desarrollado en *Photoshop* una paleta de colores elegidos en función de las características colorimétricas de la obra, de tal modo que puedan resultar claramente legibles en la identificación de las diferentes patologías. El conjunto de muestras de colores seleccionados se ha introducido en el visor 3D del software *Blender* y se han asignado a los pinceles disponibles en el programa.

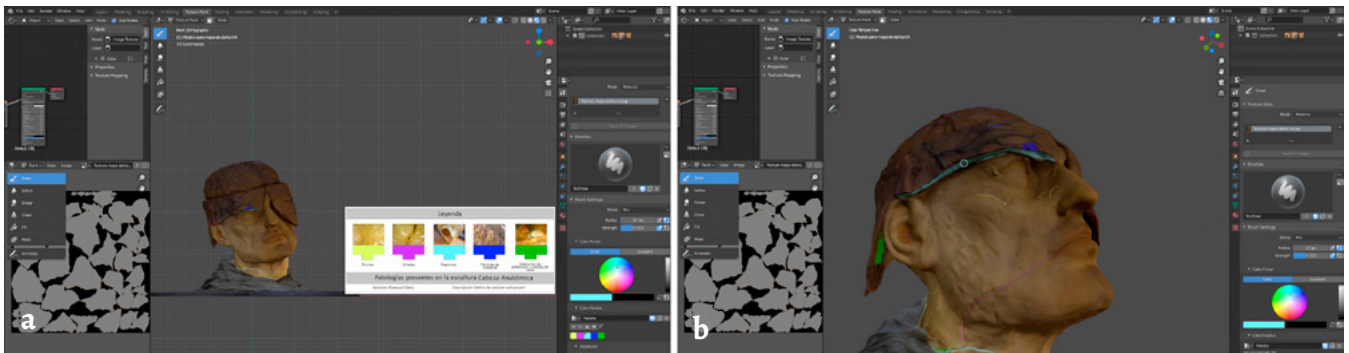
### Reconstrucción formal

El objetivo de la restauración virtual es la restitución de la formalidad de la obra por medio de diversas fases de simulación para mostrarla con el aspecto que tendría después de una restauración física. Con el fin de planificar lo más rigurosamente posible las actuaciones, se consideró fundamental realizar una anastilosis virtual que implica la recolocación de los fragmentos obtenidos por digitalización a partir de las piezas originales conservadas (Figura 8).

Para la unión virtual de los fragmentos se han realizado diferentes desplazamientos y rotaciones en los ejes X, Y, Z, hasta lograr la perfecta orientación de cada uno de ellos en

relación a su posición original en el conjunto de la obra. En este proceso ha resultado de gran utilidad la función *Snap*, que fija el cursor sobre los vértices de la malla y con ello facilita la unión de los dos bordes de fractura (Figura 9). Esta misma técnica se ha empleado en la unión de la cabeza con el cuello y del fragmento de los tejidos blandos con la cabeza.

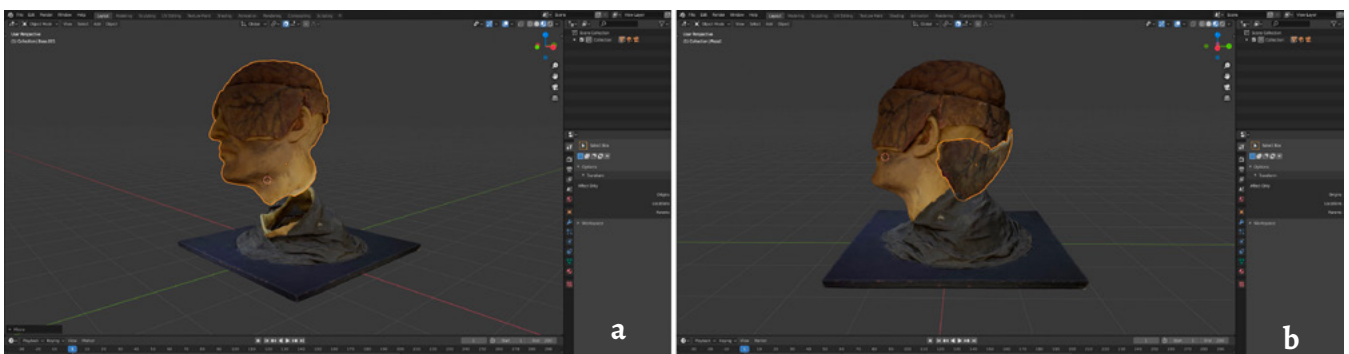
Durante el análisis virtual del modelo para estudiar cómo se podría llevar a cabo la adhesión de los fragmentos en la obra real, se consideró oportuno realizar algún tipo de elemento de apoyo que posibilitase mantener fijos en su posición exacta los bordes a unir hasta el completo curado del adhesivo. Para alcanzar este objetivo, se han modelado en



**Figura 7.** Elaboración de cartografías de patologías en 3D: a) referencia de color para la representación de las patologías; b) señalización de los daños estructurales (E. Sterp Moga).



**Figura 8.** Cabeza Anatómica. Estado de conservación del modelo original con partes del mismo fragmentadas por manipulaciones incorrectas realizadas en el pasado (E. Sterp Moga).



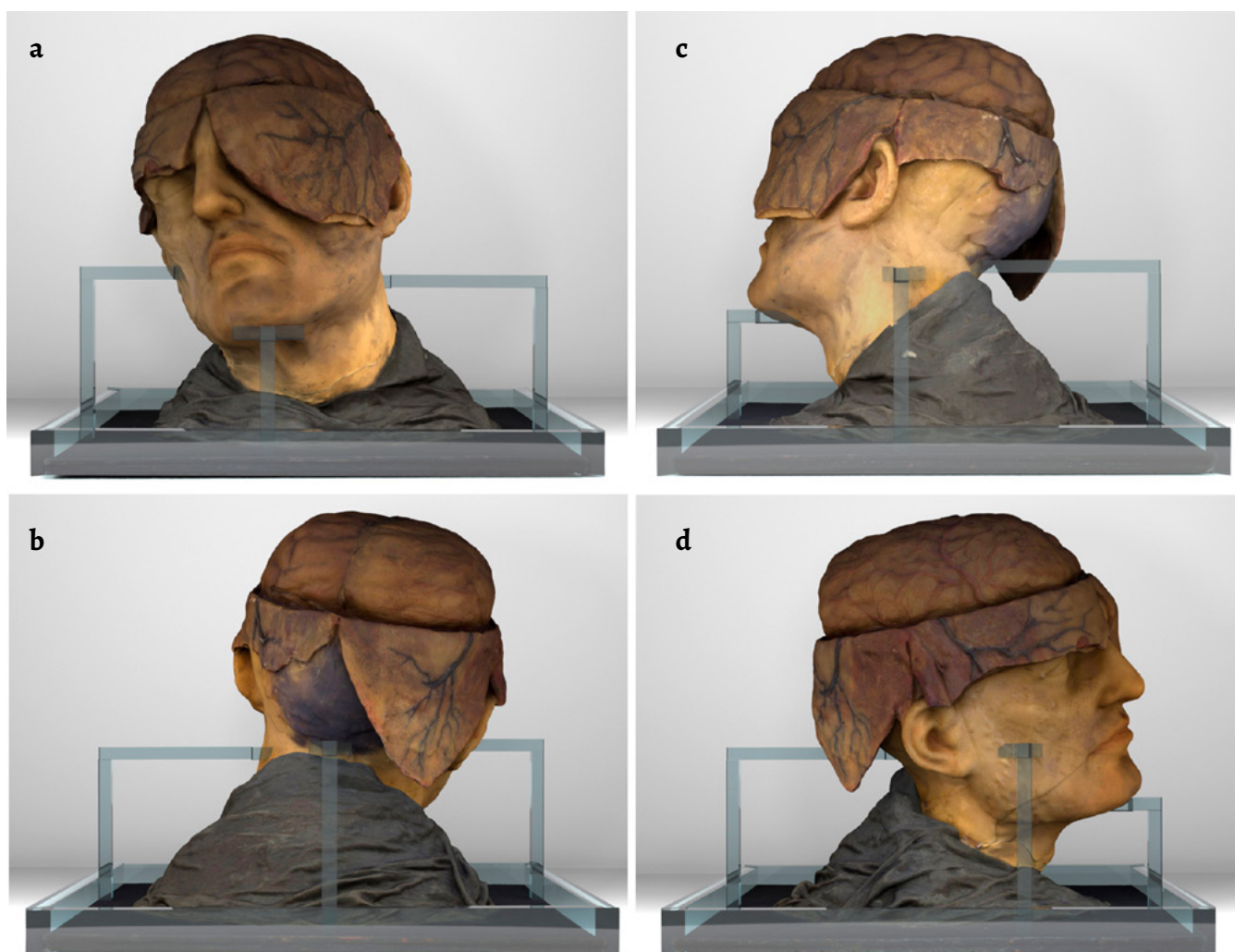
**Figura 9.** a) Proceso de anastilosis virtual de la Cabeza Anatómica; b) Recolocación de la pieza correspondiente a los tejidos blandos revertidos en Blender (E. Sterp Moga).

3D una serie de estructuras auxiliares y en su diseño se han tenido en cuenta la naturaleza delicada y frágil del material ceroso, así como las características formales del objeto real y las propiedades de curado de los posibles adhesivos a utilizar en el tratamiento. La mayoría de las fracturas, grietas y fisuras tienen una disposición horizontal y, por tanto, perpendicular a la fuerza de gravedad. Teniendo en cuenta estas características, las estructuras auxiliares se han diseñado en función de la ubicación y posición de los fragmentos. Un aspecto al que se ha prestado especial atención es el peso de cada uno de los elementos a unir. El elemento de sujeción debe tener una rigidez y dureza suficiente para el fin perseguido, pero también ser ligero y transparente con el fin de facilitar el control del proceso de adhesión permitiendo la visualización de las zonas a tratar. Entre las posibles opciones cabe destacar el Plexiglas que ha sido empleado con óptimos resultados por otros equipos internacionales para la creación de soportes fijos en restauración de colecciones de ceroplástica, tanto de anatomía humana como botánica [25-26].

La estructura de fijación temporal diseñada consiste en un marco o bastidor ubicado alrededor de la peana al que se han fijado cuatro brazos de soporte orientados en diferentes direcciones que sostienen la cabeza en una posición estable durante el proceso de curado del adhesivo. Los extremos de estos sustentáculos que están en contacto con el modelo se adaptan con exactitud a la superficie de la escultura al haber generado su forma como un negativo de ella mediante operaciones booleanas de sustracción (Figura 10).

#### Limpieza virtual

Con el fin de minimizar los efectos irreversibles que sobre la obra de arte tiene la operación de limpieza, se ha trabajado sobre el modelo 3D y en él se han proyectado distintas alternativas para valorar cuál se ajustaba más al resultado hipotético a alcanzar. Se ha optado por trabajar sobre la textura utilizando el modo *Texture Paint* del programa *Blender*, tal como se hizo en la elaboración de las cartografías digitales. Esta herramienta está diseñada para facilitar la edición de las texturas UV de manera muy sencilla y ofrece



**Figura 10.** Estudio de prototipo para la colocación de estructuras auxiliares que permitan ejercer la presión adecuada en la adhesión de los fragmentos de la escultura durante el proceso de curado del adhesivo, sin que se produzcan desplazamientos: a) vista frontal; b) vista posterior; c) vista lateral izquierda; d) vista lateral derecha (E. Sterp Moga).



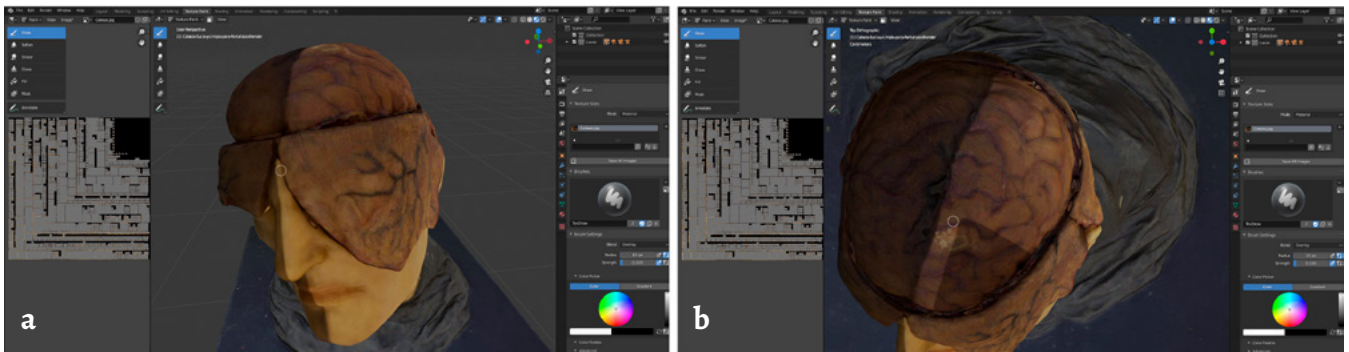


Figura 11. a) Toma de muestra de color para la limpieza virtual mediante la herramienta Clone; b) Proceso de limpieza virtual (E. Sterp Moga).



Figura 12. Restauración virtual del modelo Cabeza Anatómica: a y b) proceso de limpieza virtual para la remoción de la película de recubrimiento no original y de los repintes, efectuado con luz visible (Ver modelo 3D); c y d) mismo proceso llevado a cabo bajo la iluminación con fluorescencia visible inducida por UV (Ver modelo 3D) (E. Sterp Moga).

la posibilidad de actuar tanto en el visor 3D como en el editor de imagen 2D. En concreto, se han utilizado herramientas de pintura digital y de clonación de texturas.

En primer lugar, las áreas de barniz oscurecido se trataron con el pincel *Draw*, en los modos de fusión *Overlay*, *Soft* o *Luminosity*, que permiten aclarar el color al tiempo que se conservan los detalles (Figura 11).

En segundo lugar, la herramienta *Clone* se ha usado en pequeñas áreas donde la obra tenía un estrato grueso de depósitos de suciedad junto con la película filmógena parduzca por los procesos de oxidación no siendo posible aclarar esas zonas solo con el pincel *Draw* (Figura 12). Con ella se ha eliminado el repinte. El pincel de clonación ha servido para copiar los píxeles de una zona determinada de la imagen

en otra región diferente. Se han tomado como referencia las áreas del modelo no barnizadas para cubrir otras muy alteradas. Durante todo el proceso, se realizaron los ajustes de dureza y tamaño de pincel necesarios para adaptarlo a las necesidades de las diferentes estructuras a tratar.

## Resultados

El registro 3D de la escultura de cera mediante fotogrametría ha permitido elaborar diferentes modelos virtuales de alta calidad que contienen el conjunto de detalles presentes en el modelo anatómico. El desarrollo específico de las estrategias de iluminación tanto con luz visible como con fluorescencia visible inducida por UV durante el registro fotográfico para los modelos 3D han sido claves para poder registrar fielmente y con una alta calidad la superficie, evitando la generación de brillos sobre la textura colorimétrica y capturando el detalle en zonas de difícil acceso en los detalles anatómicos del artefacto.

Las cartografías digitales 3D obtenidas recogen el conjunto de los deterioros existentes en la obra, clasificados

en dos grandes grupos de patologías. La primera contiene las alteraciones que afectan a los valores formales y estéticos: depósitos de agentes contaminantes, abrasiones superficiales, película de recubrimiento y repintes. La segunda, recoge las alteraciones que comprometen su estabilidad estructural: fisuras, grietas, fracturas, pérdida matéricas y anteriores intervenciones (Figura 13). Toda esta información ha servido para obtener unos resultados fidedignos en la restauración virtual (Figura 14) y ha contribuido en la planificación del proceso de restauración, tanto en lo que se refiere a la anastilosis como a la limpieza.

## Difusión de resultados

Los modelos 3D elaborados en este estudio se han optimizado para reducir el tamaño de los archivos y se han publicado en la plataforma Sketchfab, donde es posible explorarlos de forma interactiva, tanto en dispositivos de pantalla, en realidad virtual y en realidad aumentada. El enlace de acceso a cada uno de ellos puede encontrarse en el pie de las figuras correspondientes.

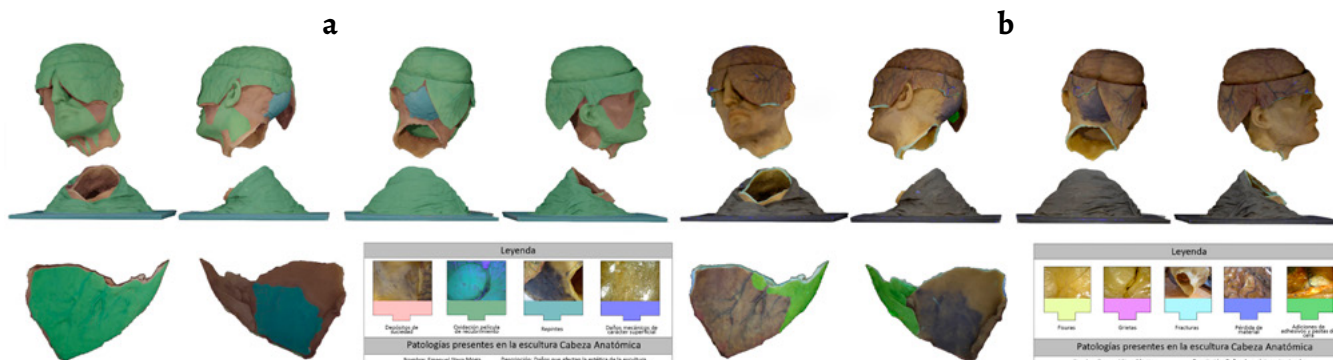


Figura 13. Secuencia del modelo virtualizado para el estudio de las patologías: a) daños superficiales; b) daños mecánicos y estructurales (E. Sterp Moga).

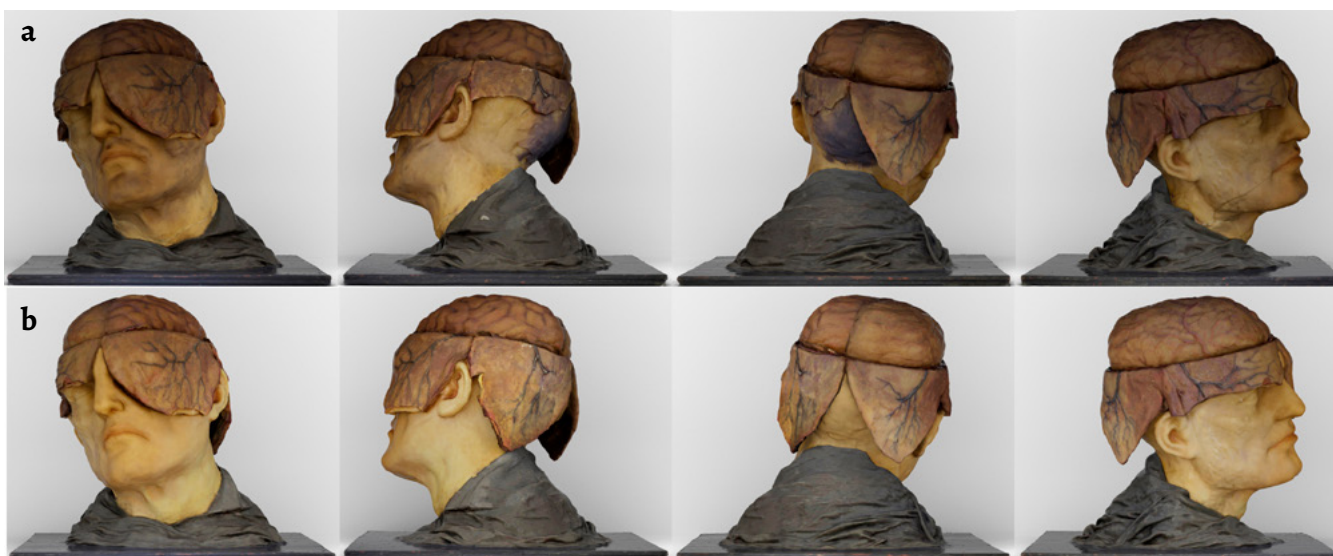


Figura 14. Secuencia de imágenes de la Cabeza Anatómica: a) estado inicial de conservación de la escultura; b) resultados obtenidos con la restauración virtual (E. Sterp Moga) (Ver modelo 3D).

## Conclusiones

El desarrollo específico de las estrategias de iluminación, tanto con luz visible como con fluorescencia visible inducida por UV durante el registro fotográfico para los modelos 3D, han sido claves para poder registrar fielmente y con una alta calidad la superficie del objeto. Se ha conseguido minimizar los problemas derivados de la presencia de brillos y capturar con exactitud cada detalle en zonas de difícil acceso.

El conjunto de las restauraciones virtuales realizadas ha posibilitado alcanzar un resultado que muestra el aspecto que tendría la escultura si se llevase a cabo una intervención real.

Las herramientas utilizadas en este trabajo pueden ayudar al conservador-restaurador a reducir las manipulaciones que implica el estudio de la obra durante su diagnosis artística, facilitándole una mejor comprensión de la técnica constructiva y del estado de conservación, esencial para la elaboración de diferentes estrategias de conservación.

## Agradecimientos

Los resultados de este trabajo forman parte de la investigación desarrollada gracias al proyecto, ref. PGC2018-098396-B-I00: *Metodologías innovadoras en conservación de colecciones científicas con modelos didácticos de Botánica, Anatomía humana y animal basadas en tecnologías 3D*. Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades dentro del Programa Estatal de Generación del Conocimiento y Fortalecimiento Científico y Tecnológico del Sistema de I+D+i, 2018. Los autores forman parte del Grupo de Investigación UCM, ref. 970923: *Arte, Tecnología, Imagen y Conservación del Patrimonio Cultural* y quieren expresar su agradecimiento al profesor Fermín Viejo Tirado, director del Museo de Anatomía "Javier Puerta" de la Facultad de Medicina, así como al Vicerrectorado de Extensión Universitaria, Cultura y Deporte de la Universidad Complutense de Madrid por la colaboración prestada.

## REFERENCIAS

- Sanz, N.; Bergan, S. (eds.), *The heritage of European universities*, Editions du Conseil de l'Europe, Strasbourg (2002).
- Aragón, S.; Péquignot, A.; Morille, C.H.; Dequaire, A.; Hornault, G., 'Las colecciones científicas universitarias, un patrimonio en proceso de recuperación', *Revista de Museología* **38** (2007) 72-80.
- Ferriot, D.; Lourenço, M., 'De l'utilité des musées et collections des universités', *La lettre de l'OCIM* **93** (2004) 4-16, [http://doc.ocim.fr/LO/LO093/LO.93\(1\)pp.04-16.pdf](http://doc.ocim.fr/LO/LO093/LO.93(1)pp.04-16.pdf) (acceso en 2020-02-12).
- Callieri, M.; Cignoni, P.; Ganovelli, F.; Impoco, G.; Montani, C.; Pingi, P.; Ponchio, F.; Scopigno, R., 'Virtualization and 3D Data Processing in David's Restoration', *Computer Graphics & Applications, Comp. Soc.* **24**(2) (2004) 16-21, <https://doi.org/10.1109/MCG.2004.1274056>.
- Callieri, M.; Dellepiane, M.; Scopigno, R., 'Modelli digitali 3D per il supporto al restauro: riassetto digitale e ricostruzione virtuale', in *La Madonna di Pietranico. Storia, restauro e ricostruzione di un'opera in terracotta*, eds. L. Arbace & E. Sonnino, Zip edizioni, Pescara (2011) 74-82.
- Fontana, R.; Greco, M.; Materazzi, M.; Pampaloni, E.; Pezzatia, L.; Rocchinib, C.; Scopigno, R., 'Three-Dimensional Modelling of Statues: The Minerva of Arezzo', *Cultural Heritage Journal* **4**(3) (2002) 325-331, [https://doi.org/10.1016/S1296-2074\(02\)01242-6](https://doi.org/10.1016/S1296-2074(02)01242-6).
- Geary, A.; Howe, E., 'Three dimensional documentation and virtual restoration of the Lichfield Angel', *Journal of the Institute of Conservation* **32**(2) (2009) 165-179, <https://doi.org/10.1080/19455220903059875>.
- Riccardelli, C.; Morris, M.; Wheeler, G.; Soutanian, J.; Becker, L.; Street, R., 'The Treatment of Tullio Lombardo's Adam: A New Approach to the Conservation of Monumental Marble Sculpture', *Metropolitan Museum Journal* **49** (2014) 48-116, <https://doi.org/10.1086/680027>.
- Scopigno, R., 'Sampled 3D models for Cultural Heritage: Which uses beyond visualization?', *Virtual Archaeology Review* **3**(5) (2012) 109-115, <https://doi.org/10.4995/var.2012.4537>.
- Balletti, C.; Ballarin, M., 'An Application of Integrated 3D Technologies for Replicar in Cultural Heritage', *International Journal of Geo-Information* **8**(6) (2019) 285, <https://doi.org/10.3390/ijgi8060285>.
- Hernández-Muñoz, O.; Sánchez-Ortiz, A., 'Digitalización e impresión 3D para la reconstrucción de pérdidas volumétricas en un modelo anatómico de cera del siglo XVIII', *Conservar Património* **30** (2018) 59-72, <https://doi.org/10.14568/cp2018003>.
- Hernández-Muñoz, O.; Sánchez-Ortiz, A.; Matia Martín, P., 'Anatomía animal. Técnicas digitales para la reconstrucción escultórica de la apariencia original de un modelo de cera del siglo XIX', *Intervención* **1**(19) (2019) 64-76, <https://doi.org/10.30763/Intervencion.2019.19.209>.
- Sterp, E., 'Aplicación de técnicas digitales 3D en una propuesta de conservación restauración para un modelo anatómico en cera (siglo XVIII) Venus de Medici', Trabajo Fin de Grado, Universidad Complutense, Madrid (2017), <https://eprints.ucm.es/43800/> (acceso en 2020-01-20).
- Sterp Moga, E., 'Aplicación de técnicas digitales 3D: protocolo de conservación y restauración de un modelo anatómico en cera del siglo XVIII', Trabajo Fin de Master, Universidad de Alicante, Alicante (2019).
- Niquet, D. N.; Mas-Barberà, X., 'El registro 3D como medio para el análisis y difusión del patrimonio escultórico. El caso de la escultura en cera del Écorché', *Ge-conservación* **13** (2018) 5-16, <https://doi.org/10.37558/gec.v13i0.551>.
- Díaz Martín, M. C., 'Desarrollo Metodológico para la Aplicación de Técnicas de Arqueología e Impresión 3D en Conservación y Restauración de Vidrio Arqueológico, y Caracterización de Materiales Relacionados con la Fase de Reconstrucción', Dissertação doutoramento, Departament de Conservació i Restauració de Béns Culturals, Universidad Politècnica de Valencia, Valencia (2017) <https://riunet.upv.es/handle/10251/90472> (acceso en 2020-02-12).
- Mikhail, E.; Bethel, J.; McGlone, J.C., *Introduction to Modern Photogrammetry*, Wiley, New York (2001).
- Pereira, L. B., 'UV Fluorescence photography of works of art: replacing the traditional UV cut filters with interference filters', *International Journal of Conservation Science* **1**(3) (2010) 161-166, <http://ijcs.ro/pub/IJCS-10-16-Bravo.pdf> (acceso en 2020-01-19).
- Bacci, M., 'Aspectos clave en la teoría de los fenómenos luminiscentes', in *UV-Vis Luminescence Imaging Techniques / Técnicas de imagen de luminiscencia UV-Vis*, ed. M. Picollo, M. Stols-Witlox & L. Fuster-López, Colección Conservation 360, no. 1, Editorial Universitat Politècnica de València, Valencia (2019) 29-34, <http://hdl.handle.net/10251/138517> (acceso en

- 2020-04-3).
20. Sánchez-Ortiz, A.; Matia Martín, P., 'Modelos plásticos o simulacros de carne. Procedimientos tecnológicos en la creación de esculturas en cera', *De Arte* **15** (2016) 310-326, <http://dx.doi.org/10.18002/da.v0i15.3677>.
21. Schewe, J., *The Digital Negative: Raw image processing in Lightroom, Camera Raw, and Photoshop*, Peachpit Press, San Francisco (2013).
22. Sánchez-Ortiz, A.; Castelo Sardina, L., 'The Application of Colour Management to a Photographic Record for the Conservation of Scientific Collections: Anatomical Wax Model', *e-Conservation Journal* **5** (2017), <http://dx.doi.org/10.18236/econs5.201705>.
23. Cosentino, A., 'Practical notes on ultraviolet technical photography for art examination', *Conservar Património* **21** (2015) 53-62, <https://doi.org/10.14568/cp2015006>.
24. Esclapés Jover, F.J.; Molina Vidal, J.; Muñoz Ojeda, J.; Fabregat Bolufer, L.; Tejerina Antón, D., 'La restauración virtual. Aplicaciones a la conservación del patrimonio arqueológico', in *La Ciencia y el Arte VI*, ed. M. Bueso, Ministerio de Educación, Cultura y Deporte, Madrid, (2017) 152-164.
25. Afra, S.; Speranza, L.; Tattini, F., 'Il Grande Scheletro di Clemente Susini datato 1805. Restauro e montaggio di una scultura monumentale in cera del Museo della Specola di Firenze', *OPD Restauro* **25** (2013) 297-303, <https://www.jstor.org/stable/24398143?seq=1> (acceso en 2020-01-25).
26. Gabbriellini, C.; Pradier, I.; Rossi, F.; Rossignoli, G.; Dallatana, D.; Porro, A.; Speranza, L.; Toni, R., 'Il restauro dello Spellato del Museo dipartimentale S.Bi.Bi.T. dell'Università di Parma. Biomateriali e tecnologie innovative per la valorizzazione della ceroplastica settecentesca', *OPD Restauro* **25** (2013) 37-52, <https://www.jstor.org/stable/24398121?seq=1> (acceso en 2020-03-18).

RECIBIDO: 2020.4.25

REVISTO: 2020.8.14

ACEPTADO: 2020.9.15

ONLINE: 2020.11.4



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons

Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional.

Para ver una copia de esta licencia, visite

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>.