

Aplicación de tecnologías 3D para reproducciones museísticas: el cráneo de *Homo naledi* del MNCN

Aplicação de tecnologias 3D para reproduções museológicas: o crânio de *Homo naledi* do MNCN

Application of 3D technologies for museum reproductions: the skull of *Homo naledi* from the MNCN

MARÍA ÁVILA
RODRÍGUEZ ^{1*} 
SÓNIA SANTOS GÓMEZ ² 

1. Universidad Internacional de La Rioja, Av. De la Paz nº 137, 26006, Logroño, España

2. Universidad Complutense de Madrid, C/ Pintor El Greco nº 2, 28040, Madrid, España

*maria.avila@unir.net

Resumen

El trabajo que aquí se presenta ha tenido como objetivo fundamental desarrollar un planteamiento adecuado para la realización de una reproducción de un cráneo de homínido, en concreto de *Homo naledi*, cuyo original fue descubierto en el yacimiento de la cueva de Rising Star (Sudáfrica) y se encuentra expuesto en La Universidad de Witwatersrand, Johannesburgo (Sudáfrica), donde se conserva para su investigación. La fragilidad del cráneo imposibilitaba la realización de un proceso de moldeo directo sobre él y, por ello, se han aplicado técnicas de digitalización e impresión 3D y una segunda fase que implica la realización de un moldeo tradicional sobre la impresión. La copia de esta pieza forma parte en la actualidad de la exposición permanente del Museo Nacional de Ciencias Naturales de Madrid. Se pone de manifiesto la importancia del empleo de las tecnologías 3D en el campo de la investigación, difusión y conservación del patrimonio cultural.

Resumo

O principal objetivo do trabalho aqui apresentado foi desenvolver uma abordagem adequada para a realização de uma reprodução de um crânio de homínido, especificamente de *Homo naledi*, cujo original foi descoberto na gruta de Rising Star (África do Sul) e se encontra em exposição na Universidade de Witwatersrand, Joanesburgo (África do Sul), onde é conservado para investigação. A fragilidade do crânio impossibilitou a realização de um processo de moldagem direta e, por isso, foram aplicadas técnicas de digitalização e impressão 3D, bem como uma segunda fase de moldagem tradicional sobre a impressão. A cópia desta peça faz atualmente parte da exposição permanente do Museu Nacional de Ciências Naturais de Madrid. Destaca-se a importância da utilização das tecnologias 3D no domínio da investigação, divulgação e conservação do património cultural.

Abstract

The main objective of the work presented here has been to develop an appropriate approach for making a reproduction of a hominid skull, specifically of *Homo naledi*, the original of which was discovered at the Rising Star cave site (South Africa), and is on display at the University of the Witwatersrand, Johannesburg (South Africa) where it is kept for research. The fragility of the skull made it impossible to carry out a direct molding process on it and, for this reason, digitization and 3D printing techniques have been applied and a second phase that involved carrying out a traditional molding on the impression. The copy of this piece is currently part of the permanent exhibition of the National Museum of Natural Sciences in Madrid. He highlights the importance that 3D techniques present for the field of research, dissemination and conservation of cultural heritage.

PALABRAS-CLAVE

Conservación-restauración
Museos
Tecnologías 3D
Cráneo
Reproducción
Divulgación

PALAVRAS-CHAVE

Conservação e restauro
Museus
Tecnologias 3D
Crânio
Reprodução
Divulgação

KEYWORDS

Conservation-restoration
Museums
3D-Technologies
Skull
Reproduction
Dissemination

Introducción

Las tecnologías 3D han adquirido, ya en la actualidad, un papel protagonista en el ámbito de la conservación de bienes culturales. En el caso de la conservación de patrimonio paleontológico ese empleo es fundamental, ya que permite realizar un estudio completamente inocuo de las piezas más frágiles a través de la reproducción de los hallazgos y su difusión entre la comunidad científica y gran público [1-3].

El caso que se presenta a continuación es un ejemplo de este empleo. Se trata de la realización de una réplica de un cráneo de *Homo naledi* que forma parte un conjunto de fósiles encontrados en octubre de 2013 en el yacimiento de la cueva de Rising Star (Sudáfrica), concretamente en la cámara Dinaledi [4]. Los fósiles hallados constituyen los restos de un grupo de, al menos, 15 individuos de esta especie en diferentes etapas de desarrollo [5]. En este descubrimiento participó un equipo internacional de investigación constituido por científicos de diversas instituciones, como la Universidad de Witwatersrand de Johannesburgo en Sudáfrica, la Universidad de Nueva York en Estados Unidos o el Museo Nacional de Ciencias Naturales de Madrid (MNCN). El hallazgo fue registrado en la lista Top 10 de especies descubiertas en 2015 [6] y fue publicado en la revista *eLIFE* el artículo *Homo Naledi, a new species of the genus Homo from the Dinaledi Chamber, South Africa* [4]. Los fósiles se encuentran en la actualidad en la Universidad de Witwatersrand, Johannesburgo, Sudáfrica, y se exponen solo por motivos especiales ya que, generalmente, se encuentran bajo custodia y disponibles únicamente para la investigación. Se trata de piezas de extraordinario valor científico, de ahí que el Museo de Ciencias Naturales valorara su exhibición ante el público a fin de darlas a conocer, ya que hacía poco se había publicado el descubrimiento [7].

Así, se consideró la digitalización y posterior impresión del cráneo de *Homo naledi*, con fines de estudio y divulgativos, para que fuera expuesta en el Museo Nacional de Ciencias Naturales como parte de la exposición permanente del Museo, en el área correspondiente a la Evolución Humana de la Sala de Paleontología y Geología. Con el estudio de la pieza digitalizada y la exposición de la réplica se salvaguarda la pieza original en adecuadas condiciones de conservación y se evita su manipulación. Este tipo de planteamientos están siendo puestos en práctica en la conservación de bienes culturales frágiles, tal y como se indica en algunas investigaciones [8-11].

A continuación, se describe toda la metodología de trabajo, así como medios humanos, equipamiento y materiales utilizados durante la realización de la reproducción. Como se verá, fue un proceso complejo en el que hubieron de utilizarse medios de trabajo sofisticados junto a otras técnicas de trabajo de carácter manual. Se aprovecharon al máximo los recursos del Laboratorio de Morfología Virtual del MNCN a la hora de realizar la réplica. En el desarrollo de la metodología de trabajo se tuvieron en cuenta experiencias previas y trabajos científicos relativos al empleo de las tecnologías 3D en la reproducción y reconstrucción física del Patrimonio Cultural, como se ha indicado [11-14].

Proceso de digitalización del cráneo de *Homo naledi*

La digitalización de la pieza ha permitido que pueda ser estudiada detalladamente a través de la pantalla del ordenador sin ocasionarle ningún tipo de deterioro. Los huesos del cráneo y del esqueleto post-craneal (Figura 1) fueron escaneados en Sudáfrica con un escáner 3D de la compañía NextEngine con las siguientes configuraciones: Macro, 12 divisiones con rotación automática, HD 17k ppi. Los registros obtenidos serían también ajustados, alineados y unidos mediante el software *ScanStudio HD Pro*, a fin de obtener así el modelo tridimensional definitivo, con el que después se trabajó en Madrid. En este modelo, no obstante, faltaba la zona de la cara media, ya que no fueron hallados en el yacimiento, y hubo de realizarse una reconstrucción virtual a el fin de completar el modelo 3D.

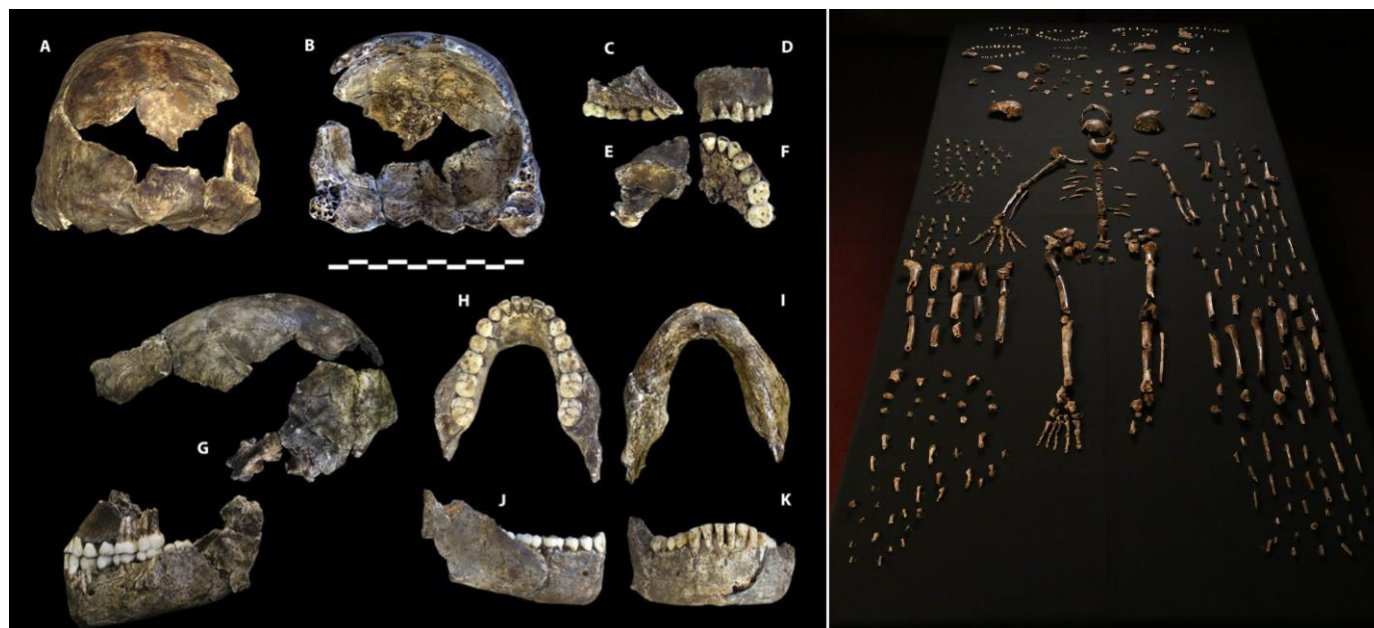


Figura 1. Fragmentos: a) de los fósiles del cráneo, de la maxila y de la mandíbula del individuo 1 de *Homo naledi* (DH1), vistos desde diversas perspectivas. (barra de escala = 10 cm); b) numerosos restos del esqueleto postcraneal, se trata del yacimiento que ha proporcionado la mayor colección de fósiles de una única especie en el continente africano [4].

Impresión y pátina del cráneo de *Homo naledi*

Metodología y resultados obtenidos

Debe indicarse que la bibliografía que aporta metodologías y resultados en la reproducción de bienes culturales mediante las tecnologías 3D pone de manifiesto que estos vienen condicionados por los fines perseguidos. Como indican algunos autores, algunas reproducciones realizadas en museos se realizan con el fin de obtener un modelo fiel fundamentalmente en cuanto dimensiones y textura de modo permita la manipulación y estudio de la pieza para fines científicos mientras. En otros casos, prima que la réplica recree un aspecto realista y presente un color muy similar al original [15] de cara a mostrar la pieza ante el público. En este trabajo se persigue una reproducción morfológica muy aproximada, pero también, la obtención de un modelo muy cercano al cráneo original con fines didácticos, ya que será expuesta en la Sala de Paleontología y Geología del Museo Nacional de Ciencias Naturales (Madrid).

En la realización del modelo materializado, puede optarse por diversas metodologías, equipos y materiales de trabajo y con todos ellos los resultados pueden ser absolutamente satisfactorios y adaptados a los objetivos perseguidos.

Por ejemplo, la empresa Factum Arte realiza habitualmente impresiones 3D intermedias, no definitivas, que sirven para estudiar el modelo obtenido, en cuanto a textura y dimensiones, y después, sobre este, realiza su molde tradicional y el positivo definitivo con resina, pigmentos y cargas que proporcionan a la reproducción un aspecto muy realista y fiel al original [16]. Otra metodología implica la impresión de la pieza en el material definitivo y el color final es aplicado *a posteriori* sobre la pieza [11]. También existe la opción de emplear una impresora 3D para la obtención de la réplica con su coloración final. No obstante, debe decirse que las impresoras que permiten la impresión fiel del color suelen ser costosas y, por otra parte, los resultados derivados de su empleo muestran algunas divergencias del color del modelo con respecto a la coloración del modelo original [15], aunque en ciertos casos se hayan obtenido buenos resultados [17]. Por último, también se puede optar por dejar la pieza impresa sin colorear, a fin de que sea diferenciable del original [18].

En el caso del equipo investigador que ha desarrollado el trabajo que aquí se presenta, se ha optado por optimizar al máximo los recursos de los que se disponía y se han realizado una serie de pruebas previas que han permitido acotar la decisión final. Esta, como se verá, ha consistido en imprimir la copia en un material intermedio para, a continuación, realizar un molde y ya su definitivo vaciado en resina pintando el molde con los pigmentos seleccionados a partir de la coloración que presenta el original. Pintando el molde se evita que la textura de la pieza sea cubierta por una pintura posterior.

Como se ha indicado, para la materialización del archivo 3D de la pieza, el Laboratorio de Morfología Virtual del MNCN contaba, con el archivo 3D del cráneo y la impresora Makerbot Replicator 2.

Este equipo fue desarrollado por la compañía 3D Hubs y presenta un chasis de acero, pantalla LCD con controles incorporados, conectividad de tarjeta SD y un volumen de construcción de 28,5 × 15,3 × 15,5 cm. Imprime con PLA (ácido poliláctico) u otros filamentos como ABS, y emplea tecnología FDM (modelado por deposición fundida). Cuenta con un cabezal extrusor y el diámetro de los filamentos de PLA son de 1,75 mm. La precisión de los ejes XY es de 11 µm y del Z es de 2,5 µm.

Antes de considerar una impresión definitiva, se realizaron ensayos con diferentes tipos de filamentos de PLA, que proporcionaron diferentes coloraciones a los fragmentos impresos: impresión A - filamento Warm Grey, impresión B - filamento Natural, impresión C - filamento Glow y impresión D - filamento Artic White (Figura 2).

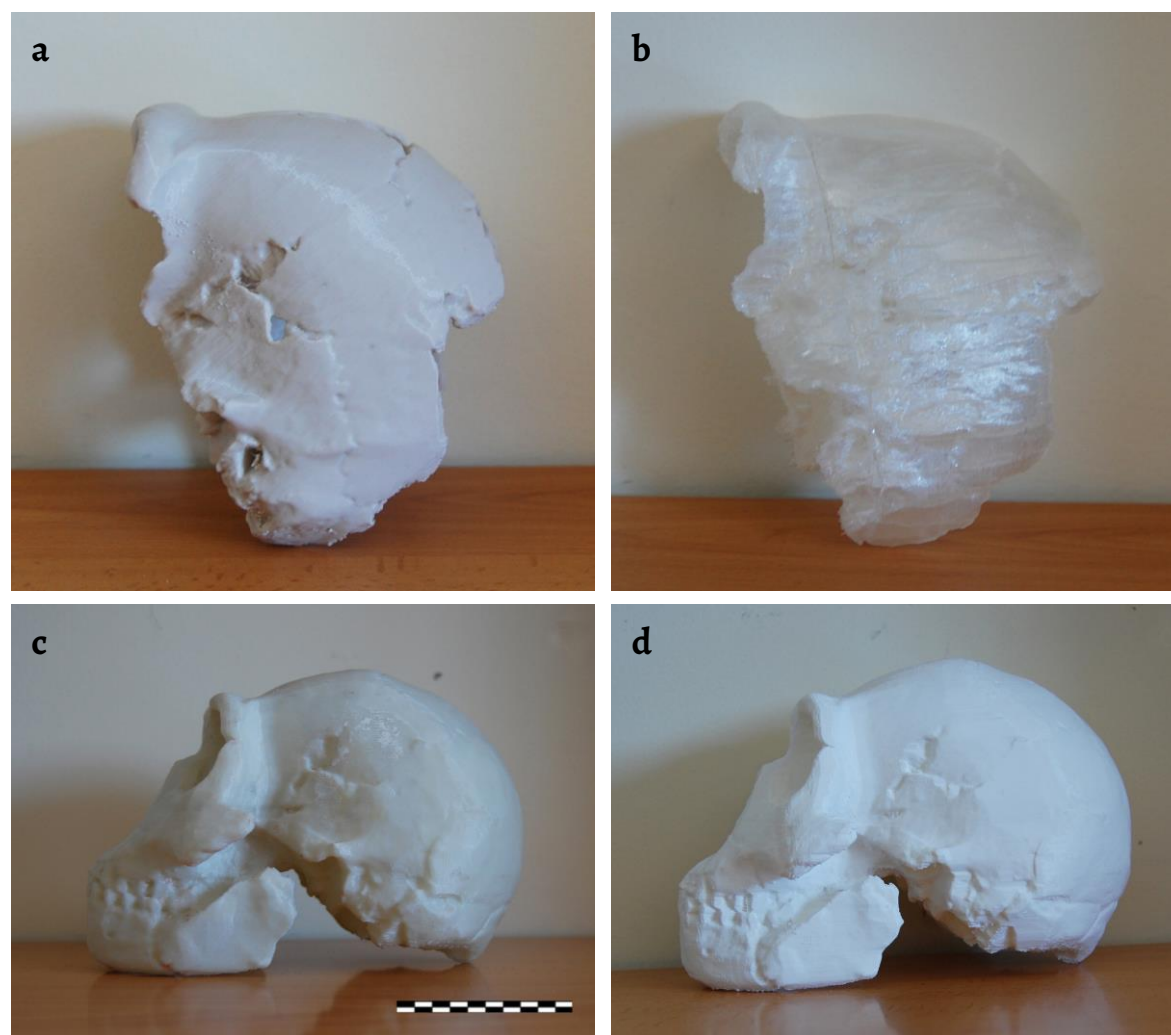


Figura 2. Impresiones escogidas para realizar pruebas de patinado: a) filamento Warm Grey; b) filamento Natural; c) filamento Glow Fill; d) filamento Artic White (barra de escala = 10 cm) (fotos: M. Ávila Rodríguez).

El espesor de capa que proporciona la impresora es de 100 μm buscando un compromiso entre calidad, tiempo de impresión y material.

Sobre estas impresiones fueron realizadas las pruebas de patinado, que determinaron además el tipo de filamento a utilizar en la impresión final.

Ensayos con la pátina sobre modelos

Para realizar las pruebas de color se preparó una pátina constituida por la mezcla de pigmentos aglutinados con el barniz mate Picture Varnish Matt Talens, es decir, barniz acrílico (0,1 g de pigmento marca Winsor & Newton por cada 150 ml de barniz). Los pigmentos utilizados fueron tierras, óxidos de hierro y blanco de titanio.

En las impresiones se seleccionaron las zonas concretas como referencia sobre las cuales se aplicarían capas de la mezcla de la pátina escogida. Las áreas seleccionadas fueron delimitadas con rotulador permanente. La pátina se aplicó en dos capas, dejando secar la primera durante 24 horas.

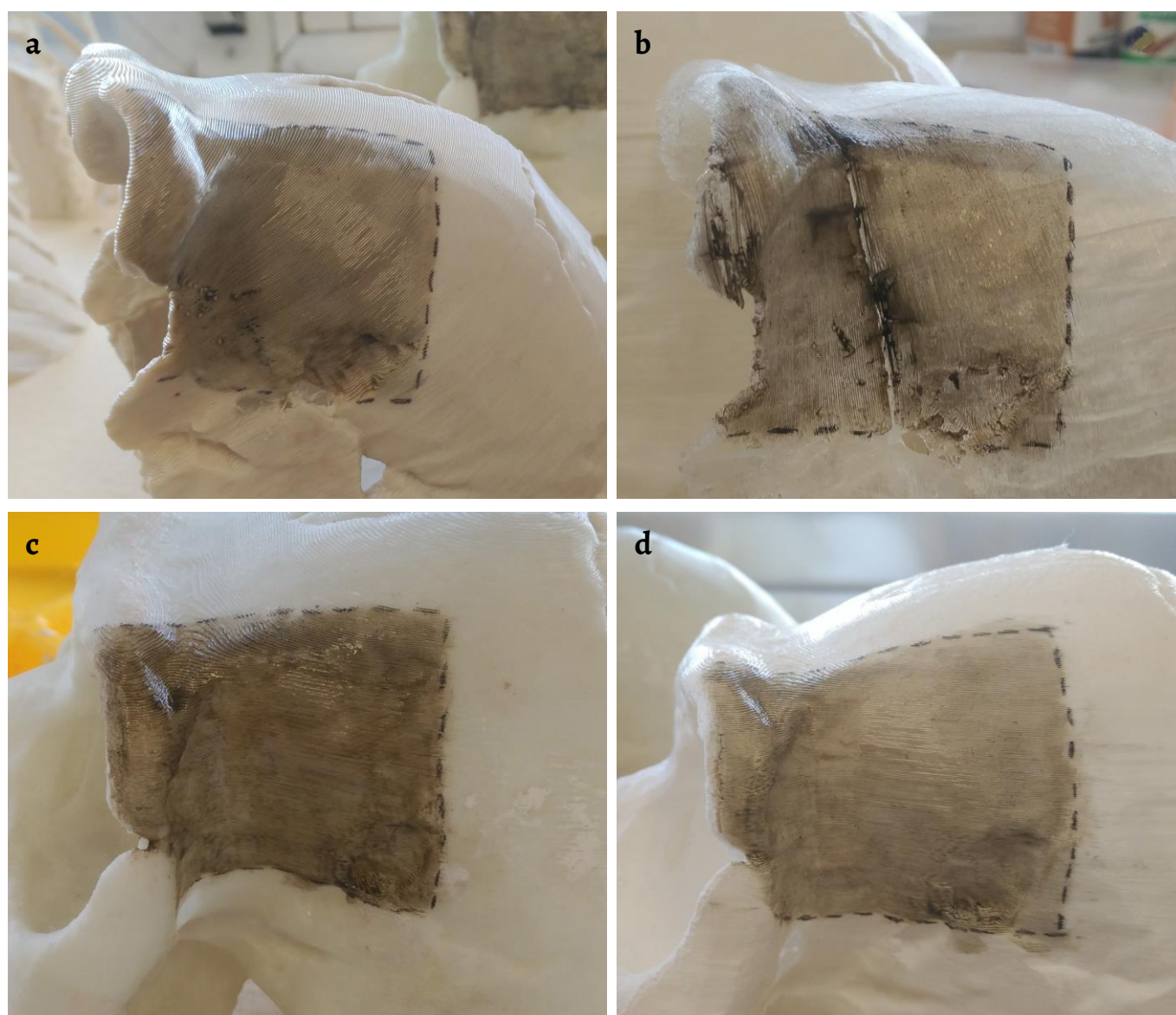


Figura 3. Las pruebas realizadas muestran que cada material se comportó de un modo distinto al recibir la pátina: *a)* prueba A, realizada con filamento Warm Grey; *b)* prueba B, realizada con filamento Natural; *c)* prueba C, realizado con filamento Glow Fill; *d)* prueba D, realizada con Artic White (fotos: M. Ávila Rodríguez).

Se obtuvieron resultados diferentes en las diversas impresiones. La prueba A (Figura 3a), realizada en la impresión con filamento Warm Grey, resultó excesivamente brillante, debido al brillo de la propia pieza, sumado al brillo del barniz aplicado. Este exceso de brillo resulta totalmente desaconsejable cuando se trata de realizar una reproducción de un fósil, puesto que la superficie ósea del fósil original jamás presentaría brillos tan acusados. La prueba B (Figura 3b), realizada con filamento Natural, fue la que peores resultados ofreció, puesto que la pátina quedó excesivamente oscura. La prueba C (Figura 3c), correspondiente al filamento Glow Fill, funcionó bien en cuanto a color. La última prueba, la D (Figura 3d), realizada con Artic White fue también relativamente satisfactoria, debido a que el filamento proporcionó un color blanco a la pieza, que combinado con el de la pátina, dio lugar a un tono natural.

Pruebas de eliminación de la pintura estratificada

A pesar de que podría haberse realizado la impresión final con las pruebas C y D, se consideró también llevar a cabo, previamente, la eliminación de la textura que la impresora deja en la pieza debido a que trabaja por deposición y, por tanto, estratificación del material. Dado que el objetivo de este trabajo era lograr la recreación lo más fiel y realista posible de la pieza impresa, de acuerdo también a los medios materiales con que cuenta el Museo Nacional de Ciencias Naturales (CSIC), la aplicación de la pátina ponía aún más de manifiesto estas estratigrafías, con lo que se consideró esa eliminación.

Se buscaron entonces soluciones comerciales y se hallaron productos, como XTC-3D, que se encarga de eliminar las estratificaciones de las piezas impresas.

Para la realización de estas pruebas solo se emplearon las impresiones C y D, ya que se disponía de una mayor superficie para realizarlas.

El producto XTC-3D es, en esencia, una resina epoxídica y se presenta en forma de dos componentes líquidos (A) y (B) que se mezclan en las proporciones indicadas por el fabricante (2A:1B), hasta obtener una mezcla homogénea que se aplicaba a pincel.

Se decidió probar también la aplicación del producto con un tono base que aportase coloración a la pieza, añadiendo para ello pigmentos sombra natural y tostada comercializados por Manuel Riesgo.

Por tanto, finalmente se realizaron diversas aplicaciones: una capa del producto (sin añadir pigmento) en una zona concreta del cráneo c y del cráneo d, y con tres diferentes concentraciones de pigmento (en otras tres zonas). En cada una de las capas se fue añadiendo más pigmento, con el fin de obtener tres tonos en escala de claro a oscuro, tal y como se indica en la Tabla 1 (% p/p).

Tabla 1. Proporciones de XTC-3D y pigmento que se aplicaron en las muestras del cráneo c y d.

Muestras cráneo	Proporción XTC-3D (%)	Proporción pigmento (%)
1c y 1d	100	0
2c y 2d	99,93	0,06
3c y 3d	99,86	0,13
4c y 4d	99,80	0,19

Tras dejar pasar el tiempo de curado que el fabricante establece para la resina epoxídica (2 horas a temperatura ambiente), los resultados obtenidos (Figura 4) determinaron que:

- 1) El producto aportaba un brillo que era contraproducente para el tipo de acabado exigible para la pieza. Como ya ha sido indicado, un cráneo, y menos aún un fósil, no puede presentar brillo puesto que su materia constitutiva, el hueso, constituye un material mate. Este problema podría probablemente subsanarse con la realización de un lijado manual de la superficie, lo que apagaría dicho brillo a costa de que la pieza no presentara un registro fidedigno.

- 2) La aplicación del producto no eliminó completamente la estratificación producida por la impresora, pero sí interfería en su textura, restando detalle a la información de la superficie que fue correctamente escaneada y posteriormente impresa.
- 3) Por otra parte, se pudo apreciar que el producto no había curado completamente. La mezcla fue correctamente medida y mezclada, por lo que puede ser que al aplicarse sobre determinados materiales se produzcan reacciones que impidan el correcto curado de la resina. Como consecuencia, tres meses después de la aplicación del producto, este se encontraba aún mordiente.

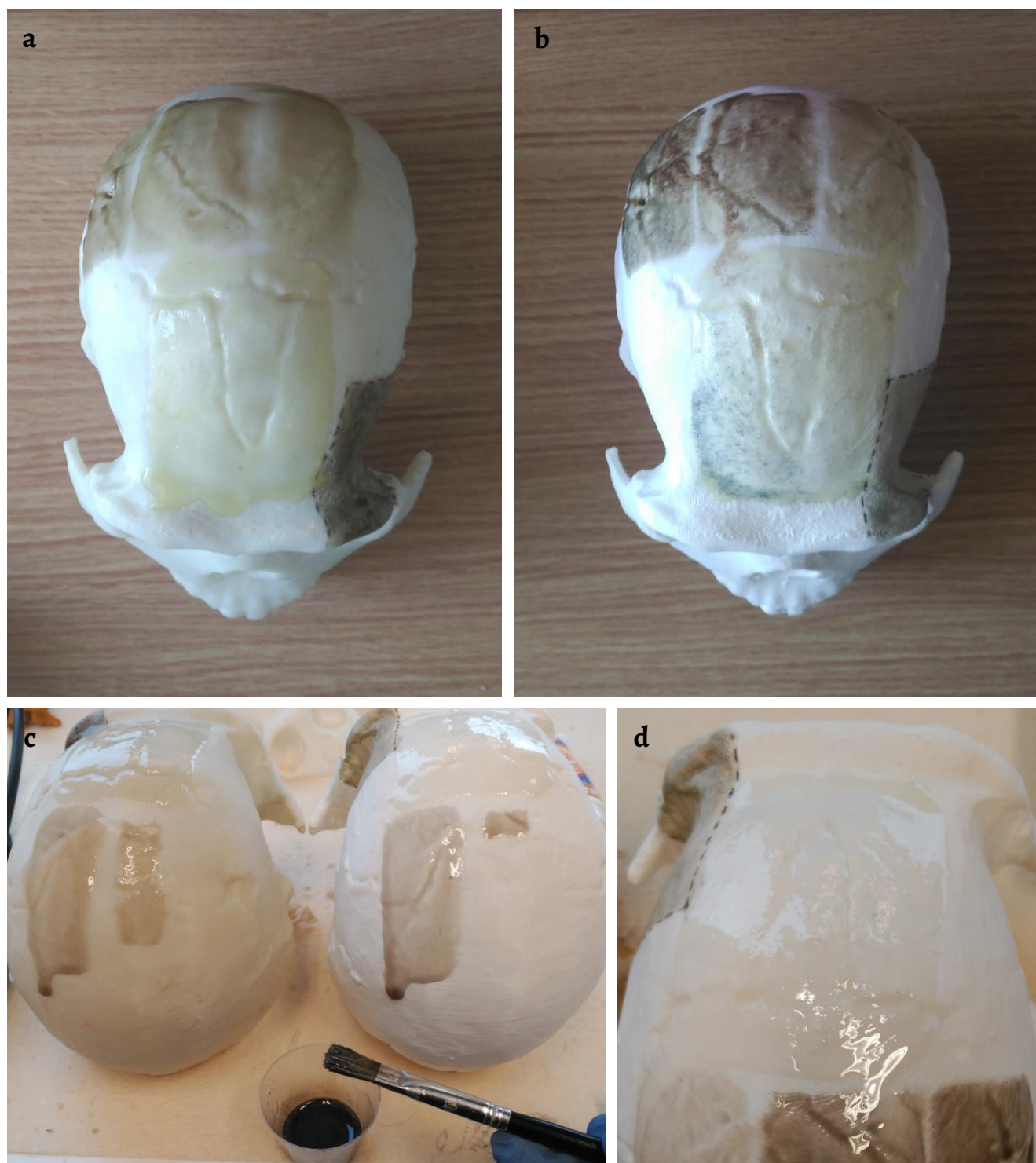


Figura 4. Aplicación de las pruebas: *a)* producto recién aplicado (aún no secado); *b)* tres meses después la muestra ha atrapado pelusas y polvo ambiental y el pigmento fluido se ha introducido en la textura de la pieza; *c)* goteo del producto sobre la superficie de la pieza; *d)* ejemplo de los brillos que el producto proporcionó a la pieza (fotos: M. Ávila Rodríguez).

Ante la gran cantidad de inconvenientes que conlleva la utilización del producto, se decidió descartar su uso, puesto que no aportó mejoras al proyecto. No obstante, se valoró que el producto ensayado podría resultar útil en otro tipo de modelos en los que no importase tanto el registro de la superficie de la pieza, ni el brillo que aporta y solo sea imprescindible ocultar la estratificación generada por la impresora. Finalmente, se planificó otra metodología que incluyó la realización de un molde manual.

Realización del molde y vaciados tradicionales

Para realizar un molde, la metodología tradicional normalmente implica el empleo de silicona aplicada directamente sobre el modelo a reproducir. En los fósiles, dadas las características que suelen presentar, de porosidad y habitual fragilidad, se presenta como no recomendable trabajar directamente sobre ellos, sobre todo cuando se cuenta con otras tecnologías. Por ello, el procedimiento seguido en este caso consistió en realizar un molde de la pieza impresa, para posteriormente vaciarlo, pero de modo que la pieza saliera del molde ya pintada. Con ello, se evita el patinado directo y la posibilidad de que el arrastre de la pátina con la brocha o el pincel sobre la superficie del modelo impreso se introdujera entre las líneas paralelas de la estratificación. Por tanto, con la realización del molde y el posterior vaciado, se eliminarían los anteriormente citados inconvenientes derivados de aplicar una pátina directa sobre la impresión. Aun así y, como se ha indicado, se tuvo en cuenta que el molde obtenido registraría la estratificación de la pieza.

Una vez seleccionado el modelo sobre el que trabajar, correspondiente al que presentaba una mejor calidad de impresión (Figura 5), se procedió al moldeo de la pieza.



Figura 5. Cráneo escogido desde diferentes vistas: a) superior b) inferior c) perfil derecho y d) perfil izquierdo (fotos: M. Ávila Rodríguez).

El proceso incluyó tres fases:

- 1) Realización del molde de silicona, para obtener el registro de la superficie.
- 2) Realización del contramolde de escayola, que aportaría rigidez al molde flexible, a fin de que este mantenga el registro de la silicona convenientemente.
- 3) Realización del vaciado de la pieza, con resina, pigmentos y cargas, dando lugar a diferentes acabados.

Cuando la pieza se encontraba lista para su moldeo, se diseñó el molde y decidieron las piezas de las que este se compondría. Lo ideal en la realización de un molde es que este tenga el menor número de piezas posible ya que, de este modo, el vaciado tendrá un menor número de juntas que habrán de ser repasadas. La morfología compleja de este modelo obligó a realizar tres piezas. Se decidió que la parte 1 del molde fuese la zona del neurocráneo, con lo que la base del cráneo sería el punto de apoyo que se emplearía en la construcción del molde.

En este caso se han realizado encofrados de plastilina con colas de milano y empleado silicona bicomponente de condensación con una viscosidad de 25000 mPa.s., lo suficientemente baja como para que tuviese una alta capacidad de registro de la textura de la superficie de la pieza. Como agente de curado se utilizó un derivado del estaño, con un tiempo de trabajo de 90 a 120 minutos y de curado de 24 horas [7]. En concreto fue empleada la silicona comercializada por Feroxa S.A., Silastic 3481 y su agente de curado 81. Ambos componentes se mezclaron tal y como indica el fabricante, en proporción 100:5, (silicona base: agente de curado).

Se dejó curar esta primera capa y aplicó una segunda para engrosar el molde y que este tuviera 3 o 4 mm de grosor, añadiendo agente tixotrópico a la mezcla, con el fin de aumentar la viscosidad de la silicona.

Una vez la silicona estuvo curada, se eliminaron las colas de milano de plastilina y se procedió a aplicar la escayola que constituiría la parte rígida de esta primera parte del molde. Se cubrió la silicona, hasta llegar al límite de la pista (Figura 6a).

Cuando la escayola hubo endurecido por completo y fue repasada con escofinas, se dio entonces la vuelta al molde (Figura 6b) para realizar siguiente parte, la pieza 2 del molde.

Se construyó también para esta segunda parte un encofrado de plastilina con colas de milano y, antes de aplicar la silicona, se cubrieron con vaselina todas las colas de milano y la silicona y los márgenes de la escayola de la primera parte del molde, para que no se adhiriesen a esta segunda parte. Se aplicaron entonces las dos capas de silicona siendo la primera de ellas de registro y la segunda para engrosar el molde, dejando transcurrir 24 horas entre la aplicación de una y otra. Con las dos capas de silicona curadas se retiraron las colas de milano de plastilina y se realizó otra parte de la carcasa.

Para la realización de la tercera parte del molde, se siguió la misma metodología seguida en las dos partes anteriores (Figura 7).

Finalmente, se abrió el molde y extrajo la pieza del interior para realizar el vaciado.

En la realización del vaciado se empleó una resina epoxídica para laminados, Epofer EX402 y su endurecedor E-430, con filtro UV a fin de favorecer la estabilidad de la reproducción y evitar su amarilleamiento. Además, se utilizó bentonita, en concreto Bentone SD, como espesante de la mezcla que permitiría aplicarla sobre la pared del molde con espátula y que esta no descolgase. Se incluyeron además con en mezcla pigmentos en polvo, tierras, blanco de titanio, negro de marte y ocre, comercializados por Manuel Riesgo escogidas para conseguir los tonos adecuados para de un fósil recién extraído de una excavación.

Antes de aplicar la mezcla sobre el molde, se dio una pátina de pigmento en polvo mediante la utilización de pincel directamente sobre la silicona, con el fin de aportar tonalidad a la pieza de un modo más natural.



Figura 6. Realización del contramolde de escayola, carcasa de escayola de la primera parte del molde vista desde: *a*) la parte posterior y *b*) de frente; (fotos: M. Ávila Rodríguez).



Figura 7. Proceso de realización de la última parte del molde: *a*) partes 1 y 2 del molde ya terminadas - la pieza de la parte inferior es la parte 1 mientras que la de la parte superior correspondía a la parte 2, en medio, el hueco libre, correspondía a la base del molde, sería la parte 3 del mismo; *b*) las colas de milano de plastilina listas para recibir la silicona; *c*) el molde ya completo (fotos: M. Ávila Rodríguez).

Pintando el molde y extrayendo la pieza ya pintada se evita pintar de nuevo el vaciado una vez extraído del molde y de este modo no se pierde el registro de la silicona. Cuando los pigmentos se aplican en seco con un pincel sobre la silicona para posteriormente añadir la resina, esta atrapa el color y lo fija cuando cura. Por otra parte, el hecho de aplicar el pigmento en polvo sobre el molde, reduce el efecto de acumulación de este en las estratificaciones (Figura 8). Como se ha indicado cuando se hizo referencia a la aplicación de la pátina, cuando el pigmento se aplica aglutinado con barniz tiende a acumularse más el color de la pátina en las líneas paralelas de la pieza.

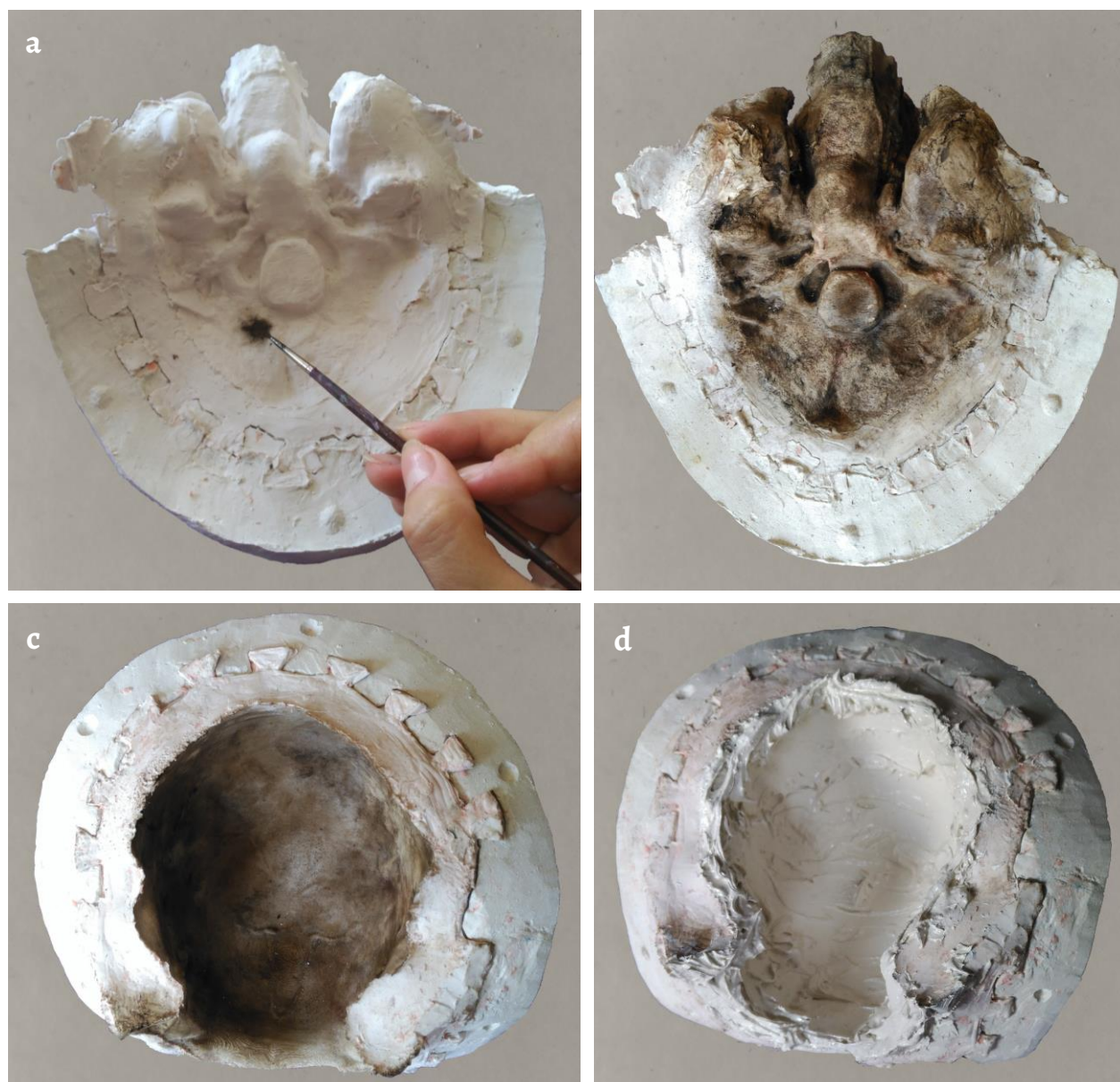


Figura 8. Pintura del molde: *a) - c)* aplicación del color; *d)* la resina y el cordón de sellado han sido aplicados en toda la pieza 1 del molde (fotos: M. Ávila Rodríguez).

En este momento se tuvo en cuenta la zona que había sido reintegrada virtualmente, destacándola del resto del molde por ser más clara, sin aplicarle pigmento, con el fin de diferenciar claramente aquellos huesos que sí pudieron digitalizarse a partir del modelo real, respecto de lo que es una reintegración virtual.

Una vez pintado el molde (Figura 8a-c), se aplicó la resina, cubriendo toda la superficie con la mezcla (Figura 8d) y se cerró.

Transcurridas 72 horas, tiempo de endurecimiento de la resina indicado por el fabricante, se abrió el molde y extrajo la pieza. Se eliminaron entonces con un bisturí las rebabas de la resina sobrante.

El resultado alcanzado finalmente fue muy satisfactorio, ya que no se aprecia la estratificación generada por la impresora en el modelo reproducido (Figura 9). En este sentido, debe indicarse que la metodología desarrollada se aproxima a la practicada por Factum Arte en sus proyectos tridimensionales [16], si bien en este caso se ha optado por pintar directamente el molde para mantener dentro de lo posible, la textura registrada por la silicona, evitando la aplicación posterior de capas de pintura.

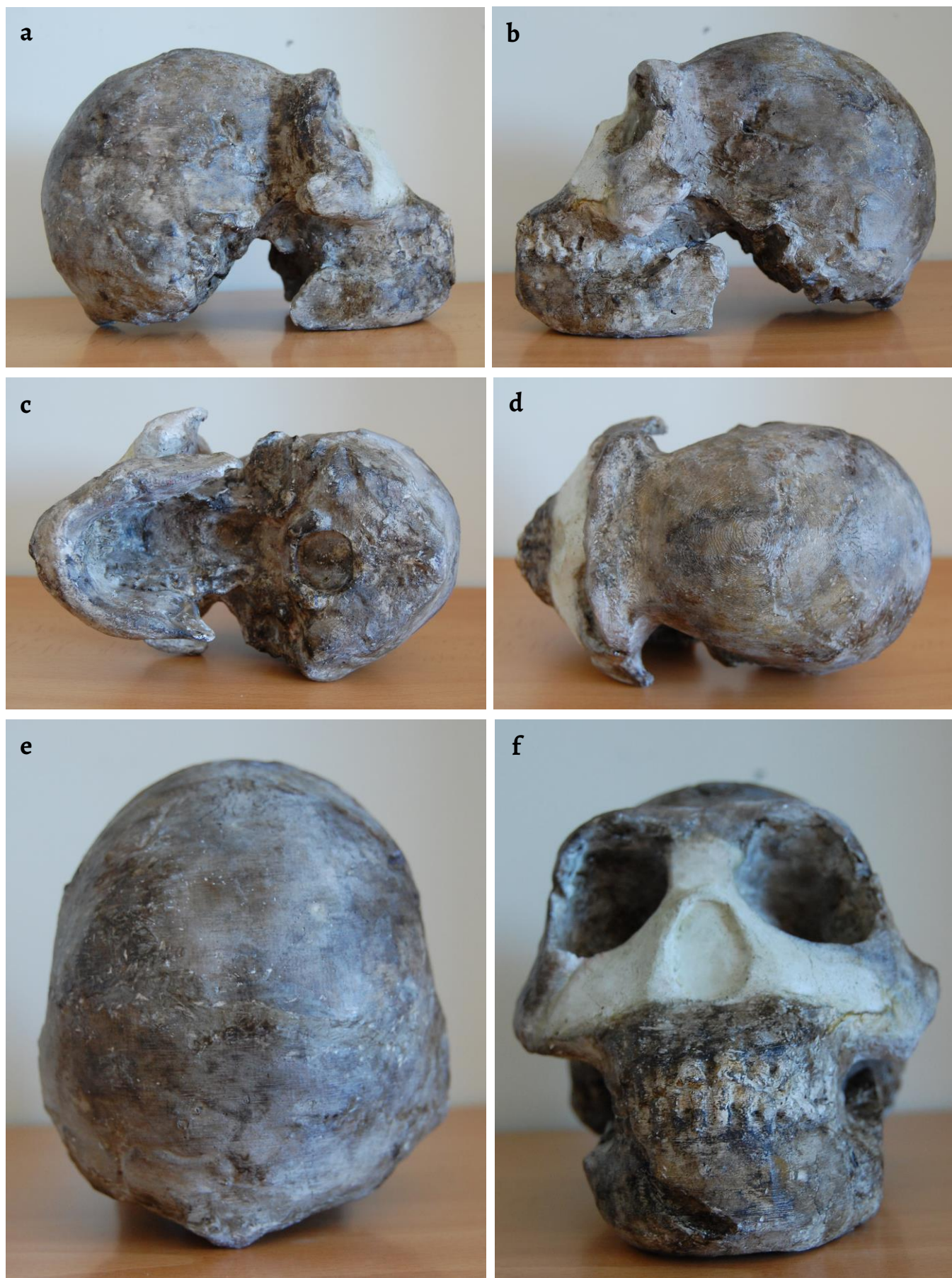


Figura 9. Resultado final del cráneo, desde diferentes vistas: *a)* perfil derecho, *b)* perfil izquierdo, *c)* vista inferior, *d)* vista superior, *e)* vista trasera, *f)* vista frontal (fotos: M. Ávila Rodríguez).



Figura 10. Cráneo expuesto en el Museo Nacional de Ciencias (foto: C. Rosillo).

Finalmente, la reproducción fue ubicada en junio del 2016 en el MNCN, en la zona de Evolución Humana del Museo de la Sala de Paleontología y Geología, donde forma parte de su exposición permanente (Figura 10).

Conclusiones

Hoy en día, la posibilidad de la utilización de las herramientas 3D para digitalizar e imprimir patrimonio paleontológico permite la investigación de las piezas por parte de la comunidad científica y la exposición de sus réplicas para su difusión entre el gran público, a la vez que se salvaguarda la estabilidad material de los originales.

El caso que se ha presentado en este trabajo hace referencia a un cráneo de *Homo naledi*. Constituye esta una pieza de especial relevancia científica que se conserva en La Universidad de Witwatersrand, Johannesburgo, en Sudáfrica. Su digitalización ha supuesto la actuación del proyecto Rising Star (University of the Witwatersrand, National Geographic) de modo que se pudiera estudiar la pieza por parte de la comunidad científica, a la vez que se garantizaba su conservación.

La decisión del Museo Nacional de Ciencias Naturales de realizar una réplica responde a esa idea de salvaguarda del original a la vez que se difunde entre el público. La realización de la reproducción ha contado con las limitaciones que existían en cuanto a equipamiento tecnológico más o menos sofisticado, pero han podido ser salvadas mediante la combinación de la impresora 3D y un moldeo tradicional y la realización de numerosas pruebas, hasta encontrar la metodología adecuada para lograr una reproducción fiel al original y unos resultados altamente satisfactorios.

Los materiales de moldeo no entraron en contacto con el original y, por tanto, éstos no pudieron alterar aspectos como el brillo o color de la pieza original.

Esta metodología de trabajo podría ser utilizada en instituciones con medios materiales y necesidades similares.

Agradecimientos

Proyecto: *Materiales poliméricos para impresión 3D en la creación artística y la conservación del patrimonio. Propiedades físico-químicas y comportamiento a largo plazo*. Ref.: PID2020-114393RB-I00. Ministerio de Ciencia e Innovación. Doctor Markus Bastir, responsable científico del Laboratorio de Morfología Virtual del MNCN. Proyecto CGL2015-63648-P, MINECO, MNCN-CSIC.

REFERENCIAS

1. Bruner, E.; Bastir, M., 'Digital morphology: modelling anatomy and evolution', *Journal of Anthropological Sciences* **86** (2008) 3-5.
2. Weber, G. W., 'Virtual Anthropology (VA): A call for Glasnost in paleoanthropology', *The Anatomical Record (New Anat.)* **265** (2001) 193-201, <https://doi.org/10.1002/ar.1153>.
3. Cunningham, J. A.; Rahman, I. A.; Lautenschlager, S.; Rayfield, E. J., Donoghue, P. C. J., 'A virtual world of paleontology', *Trends in Ecology & Evolution* **29** (2014) 347-357, <https://doi.org/10.1016/j.tree.2014.04.004>.
4. Berger, L. R.; Hawks, J.; Ruitter, D. J.; Churchill, S. E.; Schmid, P.; Deleuzene, L. K.; Kivell, T. L.; Garvin, H. M.; Williams, S. A.; DeSilva, J. M.; Skinner, M. M.; Musiba, C. M.; Cameron, N.; Holliday, T. W.; Harcourt-Smith, W.; Ackermann, R. R.; Bastir, M.; Bogin, B.; Bolter, D.; Brophy, J.; Cofran, Z. D.; Congdon, K. A.; Deane, A. S.; Dembo, M.; Drapeau, M.; Elliott, M. C.; Feuerriegel, E. M.; Garcia-Martinez, D.; Green, D. J.; Gurtov, A.; Irish, J. D.; Kruger, A.; Laird, M. F.; Marchi, D.; Meyer, M. R.; Nalla, S.; Negash, E. W.; Orr, C. M.; Radovic, D.; Schroeder, L.; Scott, J. E.; Throckmorton, Z.; Tocheri, M. W.; VanSickle, C.; Walker, C. S.; Wei, P.; Zipfel, B., 'Homo naledi, a new species of the genus Homo from the Dinaledi Chamber, South Africa', *eLife* **4** (2015) e09560, <https://doi.org/10.7554/eLife.09560.001>.
5. 'Investigadores del MNCN participan en la descripción de *Homo naledi*, una nueva especie de homínido', in *Museo Nacional de Ciencias Naturales* (2015), <https://www.mncn.csic.es/es/Comunicaci%C3%B3n/investigadores-del-mncn-participan-en-la-descripcion-de-homo-naledi-una-nueva-especie> (acceso en 2023-05-19).
6. 'Anuncian las especies Top 10 descubiertas en 2015', in *Museo Nacional de Ciencias Naturales*, <https://www.mncn.csic.es/es/Comunicaci%C3%B3n/anuncian-las-especies-top-10-descubiertas-en-2015> (acceso en 2023-05-19).
7. Herrero-Cortell, M. A., 'Ars geminis pro ars. Las copias y reproducciones patrimoniales: usos, tendencias, percepción, y repercusión social', *RdM, Revista de Museología: Publicación científica al servicio de la comunidad museológica* **67** (2016) 11-20.
8. Santos, S.; Zurdo, L.; Ávila, M.; De Arriba, P.; Rodríguez, P.; Galán, M.; Tena, S.; Terrón, P.; Blanch, E.; Gil, R., 'Aplicación de la tecnología 3D en la restauración del conjunto escultórico Los Portadores de la Antorcha, de la Ciudad Universitaria de Madrid', *Arte, Individuo y Sociedad* **30** (1) (2018) 61-75, <https://doi.org/10.5209/ARIS.55743>.
9. Santos, S., 'El empleo de las tecnologías 3D en la conservación del patrimonio y su aplicación en la realización de reproducciones de bienes culturales', *Observar* **11** (1) (2017) 97-114, <https://www.observar.eu/ojs/index.php/Observar/article/view/78> (acceso en 2023-05-17).
10. Ávila Rodríguez, M., *Aplicación de la tecnología 3d a las técnicas de documentación, conservación y restauración de bienes culturales*, Disertación de doctorado, Departamento de Pintura y Conservación-Restauración, Universidad Complutense de Madrid, Madrid (2018).
11. Henriques, F.; Bailão, A.; Rocha, J.; Costa, J., 'Restoration of an 18th century frame: 3D modelling, printing and matching color of decorative flowers elements', *Ge-conservación* **18** (2020) 313-322, <https://doi.org/10.37558/gec.v18i1.854>.
12. Zhang, F.; Huang, X.; Fang, W.; Zhang, Z.; Li, D.; Zhu, Y., 'Texture reconstruction of 3D sculpture using non-rigid transformation', *Journal of Cultural Heritage* **16** (2015) 648-655, <https://doi.org/10.1016/j.culher.2014.11.004>.
13. Parfenov, V.; Igoshin, S.; Masaylo, D.; Orlov, A.; Kuliashou, D., 'Use of 3D Laser Scanning and additive technologies for reconstruction of damaged and destroyed cultural heritage objects', *Quantum Beam Science* **6** (2022) 11, <https://doi.org/10.3390/qubs6010011>.
14. Wachowiak, M. J.; Karas, B. V., '3d Scanning and replication for museum and cultural heritage applications', *Journal of the American Institute for Conservation* **48** (2009) 141-158, <https://doi.org/10.1179/019713609804516992>.
15. Ballarin, M.; Balletti, C.; Vernieri, P., 'Replicas in cultural heritage: 3D printing and the museum experience', *ISPRS International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLII(2)* (2018) 55-62, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-55-2018>.

16. *Factum Arte - Digitalisation and facsimiles*, <https://www.factum-arte.com/ind/559/digitisation-facsimiles> (acceso en 2023-05-19).
17. Malik, U. S.; Tissen, L. N. M.; Vermeeren, A. P. O. S., '3D reproductions of cultural heritage artifacts: evaluation of significance and experience', *Studies in Digital Heritage* **5** (1) (2021) 1-29. <https://doi.org/10.14434/sdh.v5i1.32323>.
18. Liu, S.; Tu, Y., Wang, X.; Qin, B.; Xie, Z.; Zhang, H.; Hu, D., 'Transparent reversible prosthesis, a new way to complete the conservation-restoration of a Black Ding bowl with application of 3D technologies', *Heritage Science* **10** (2022) 14, <https://doi.org/10.1186/s40494-022-00646-0>.

RECIBIDO: 2022.3.29

REVISTO: 2022.11.2

ACEPTADO: 2022.12.18

ONLINE: 2023.5.30



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons

AtribuciónNoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional.

Para ver una copia de esta licencia, visite

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