

ARQUEOLOGÍA Y TIFLODIDÁCTICA. IMPRESIÓN 3D PARA HACER ACCESIBLE EL PATRIMONIO

Archaeology and Tiflodidactics. 3D Printing to Make Heritage accesible

SANTIAGO SÁNCHEZ DE LA PARRA-PÉREZ * y SONIA DÍAZ-NAVARRO **

RESUMEN En los últimos años, la impresión 3D se ha convertido en un recurso de gran utilidad en las aulas, facilitando la comprensión de materias complejas, especialmente cuando los alumnos sufren discapacidad visual. En este trabajo se presentan los resultados de dos talleres sobre paleontología y arqueología con 51 alumnos de la ONCE, para los que se elaboraron 36 réplicas con una impresora 3D-FDM. Se realizaron encuestas para valorar el interés de los alumnos en los talleres y la utilidad de las réplicas y se han analizado los resultados teniendo en cuenta el sexo y la edad de los alumnos, su nivel educativo, su grado de ceguera, sus conocimientos previos sobre la materia y su experiencia en museos. Nuestros resultados demuestran que el uso de réplicas es un excelente apoyo al proceso de enseñanza-aprendizaje con personas invidentes. Por ello, discutimos la necesidad de introducir estos recursos en instituciones museísticas.

Palabras clave: Educación inclusiva, Ceguera, Réplicas 3D, ONCE, Museos.

ABSTRACT In recent years, 3D printing has become a very useful resource in the classroom, facilitating the understanding of complex subjects, especially when students have a visual impairment. This paper presents the results of two workshops on palaeontology and archaeology with 51 students from the ONCE Spanish organisation, for which 36 replicas were made with a 3D-FDM printer. Surveys were conducted to assess the students' interest in the workshops and the usefulness of the replicas, and the results have been analysed considering the gender and age of the students, their educational

* Universidad de Santiago de Compostela - Grupo Síncrisis. Investigación en Formas Culturais / Institut Ausonius - Université Bordeaux-Montaigne, Praza da Universidade, 1, 15704, Santiago de Compostela. santiago.sanchezdelaparra@usc.es <https://orcid.org/0000-0002-6996-7688>

** Universidad de Valladolid, Facultad de Filosofía y Letras, Plaza del Campus s/n, 47011 Valladolid. sonia.diaz@uva.es <https://orcid.org/0000-0001-6986-602X>

Fecha de recepción: 02-10-2023. Fecha de aceptación: 30-05-2024.

<http://dx.doi.org/10.30827/CPAG.v34i0.29132>

level, their degree of blindness, their previous knowledge of the subject and their experience in museums. Our results show that the use of replicas is an excellent support for the teaching-learning process with blind people. Therefore, we discuss the need to introduce these resources in museum institutions.

Key words: Inclusive Education, Blindness, 3D Replicas, ONCE, Museums.

INTRODUCCIÓN

Las tecnologías de Fabricación Aditiva surgieron en la década de 1980 (Campbell *et al.*, 2012). Comúnmente conocidas y agrupadas como “impresión 3D”, las primeras patentes pertenecieron a Charles Hull, primer presidente de *3D Systems*, por estereolitografía (SLA) (Kocovic, 2017), y a Scott Crump, fundador de *Stratasys Ltd.*, por el modelado por deposición fundida (FDM) (Savini y Savini, 2015). Estas tecnologías se hicieron más accesibles a principios del siglo XXI, gracias a la liberalización gradual de las patentes, que permitió reducir considerablemente los costes de las máquinas y equipos necesarios (Savini y Savini, 2015). Aunque desde entonces se han desarrollado nuevas tecnologías, todas se basan en el mismo principio básico: la creación de objetos en tres dimensiones depositando capas de material con una máquina robotizada que procesa la información codificada en un modelo digital.

Aunque los usos originales de la Fabricación Aditiva eran industriales, la reducción de costes ha permitido explorar otras aplicaciones para estas tecnologías. En el ámbito de la educación, su aparición proporcionó oportunidades para desarrollar nuevas formas de enseñanza en una serie de materias y entornos educativos (Ford y Minshall, 2019). Varios estudios han demostrado que las explicaciones apoyadas en réplicas 3D favorecen un entorno más motivador y atractivo que las copias 2D en tareas educativas en general (Santos *et al.*, 2003; Bento y Gonçalves, 2011; Ford y Minshall, 2019). Muchos investigadores han utilizado esta tecnología para facilitar a los estudiantes la comprensión de determinadas materias (McMenamin *et al.*, 2014; Horowitz y Schultz, 2014; AbouHashem *et al.*, 2015; Keaveney *et al.*, 2016; Smiar y Méndez, 2016; Thomas *et al.*, 2016; Wu *et al.*, 2018).

El uso de esta tecnología cobra aún más importancia cuando se trabaja con personas con discapacidad visual (Buehler *et al.*, 2016; Wonjin *et al.*, 2016; Ford y Minshall, 2019; Fortuna y Vandermolen, 2021). En este caso, el empleo de réplicas tiflológicas se convierte en la única manera de adquirir formas de conocimiento que son difíciles de imaginar a través de la descripción oral o escrita, como los procesos biológicos y químicos fundamentales (Lumadi y Maguvhe, 2012; Fraser y Maguvhe, 2008; Teshima, 2010; Kostakis *et al.*, 2014; Shi *et al.*, 2017; Frances, 2019; Gordy *et al.*, 2020; Singhal y Balaji, 2020; Smith *et al.*, 2020; Andić *et al.*, 2022), la anatomía del cuerpo humano (Teshima *et al.*, 2010) o la forma de los planetas, las ciudades y su geografía (Horowitz y Schultz, 2014; Giraud *et al.*, 2017; Hernández Sánchez *et al.*, 2020). Además, cada vez está más vinculado al patrimonio artístico, destacando exposiciones como ‘Hoy toca el Prado’ en el

Museo Nacional del Prado (Madrid, 21/12/2021 - 08/01/2023), ‘Said with feeling’ (10/03 - 29/04/1979) y ‘Beyond Appearances’ (13/04 - 12/05/1985) en el Palacio de Nottingham o la iniciativa ‘The Unseen Art’ en el Adventure Club (Finlandia).

Las réplicas en 3D también son una herramienta muy útil para comprender los cambios tipológicos y decorativos de los elementos de la cultura material arqueológica a lo largo de la historia, así como la evolución de la morfología craneal entre las diferentes especies humanas fósiles. En este sentido, desde hace dos décadas diversos autores emplean este tipo de recursos 3D en las aulas y los museos (Sutton *et al.*, 2001; Wilhite, 2003; Robertson, 2007; Jessen-Marshall y Lescinsky, 2011; Horowitz y Schultz, 2014; Di Franco *et al.*, 2015; Dardon *et al.*, 2016; Neumüller *et al.*, 2016; Burch, 2017; Ballarin *et al.*, 2018; Kwan y Butler, 2018; Cooper, 2019; Evelyn-Wright *et al.*, 2020; Chapinal-Heras *et al.*, 2024), aunque solo en los últimos años se ha prestado atención a la utilidad de estos materiales para acercar la disciplina arqueológica a las personas invidentes (Marqués, 2018; Marqués *et al.*, 2018; Díaz-Navarro y Sánchez de la Parra-Pérez, 2021; Maldonado *et al.*, 2021; Bustamante *et al.*, 2022; Kantaros *et al.*, 2023).

El presente estudio describe los resultados de dos talleres teórico-prácticos sobre evolución humana y patrimonio arqueológico, desarrollados entre 2019 y 2021, con 51 alumnos de la Organización Nacional de Ciegos Españoles (ONCE). Estas actividades contaron con el apoyo del programa de divulgación CAPACIÉN-CIATE de la Universidad de Valladolid y con la Unidad de Cultura Científica y de la Innovación (UCC+i) de la Universidad de Salamanca. Con este se pretende evaluar la utilidad de réplicas tiflológicas producidas por Fabricación aditiva en estos ambientes a la vez que se discute su introducción en los museos españoles dedicados a estas temáticas.

MATERIAL Y MÉTODOS

Mediante la Fabricación Aditiva FDM/FFF, se han realizado réplicas de cráneos de las principales especies de la evolución humana y de materiales arqueológicos de diferentes cronologías y contextos (fig. 1). De este modo, se han obtenido objetos tridimensionales depositando capas de un poliéster termoplástico, el ácido poliláctico (PLA, de la marca *Winkle*), de 0,1 mm de espesor. Este poliéster se funde a 200°C y se solidifica rápidamente al enfriarse. Se utilizaron tres impresoras 3D de tipo cartesiano, una *Prusa MK3s*, una *Ender 3 Pro* de *Creality* y una *Sidewinder X1* de *Artillery*. Prácticamente todos los elementos se imprimieron a escala real utilizando relativamente poco material —como máximo 1 kg de filamento PLA— y se procesaron posteriormente (fig. 2). Aunque pudieron variar ligeramente según las características del modelo original, los parámetros básicos de impresión respondieron a una altura de capa y altura de capa inicial de 0,1 mm; relleno al 15%; una temperatura de impresión de 200°C homogénea durante todo el proceso; una velocidad de impresión de 50 mm/s; una velocidad de desplazamiento de 150 mm/s; una velocidad de capa inicial de 20 mm/s; con la retracción



Fig. 1.—Selección de réplicas empleadas en los talleres tras su posprocesado. a) *Homo habilis* KNM-ER 1813; b) *Homo erectus* KNM-WT 15,000; c) *Homo naledi* DH1-DH3; d) *Homo heidelbergensis* AT-700; e) *Homo neanderthalensis* La Chapelle-aux-Saints 1; f) *Homo floresiensis* LB-1; g) *Pan troglodytes*; h) *Sahelanthropus tchadensis* TM 266-01-0601; i) *Paranthropus boisei* KNM-ER 406; j) *Australopithecus afarensis* AL 288-1; k) Cerámica argárica PG.41.1.017 del Royal Museum of Art and History (Bruselas, Bélgica); l) Dama de Elche del Museo Arqueológico Nacional de Madrid; m) Disco de Festo del Museo de Heraklion (Creta, Grecia); n) Conjunto de cerámicas ibéricas; ñ) Urna de los guerreros del Museo Íbero de Jaén.

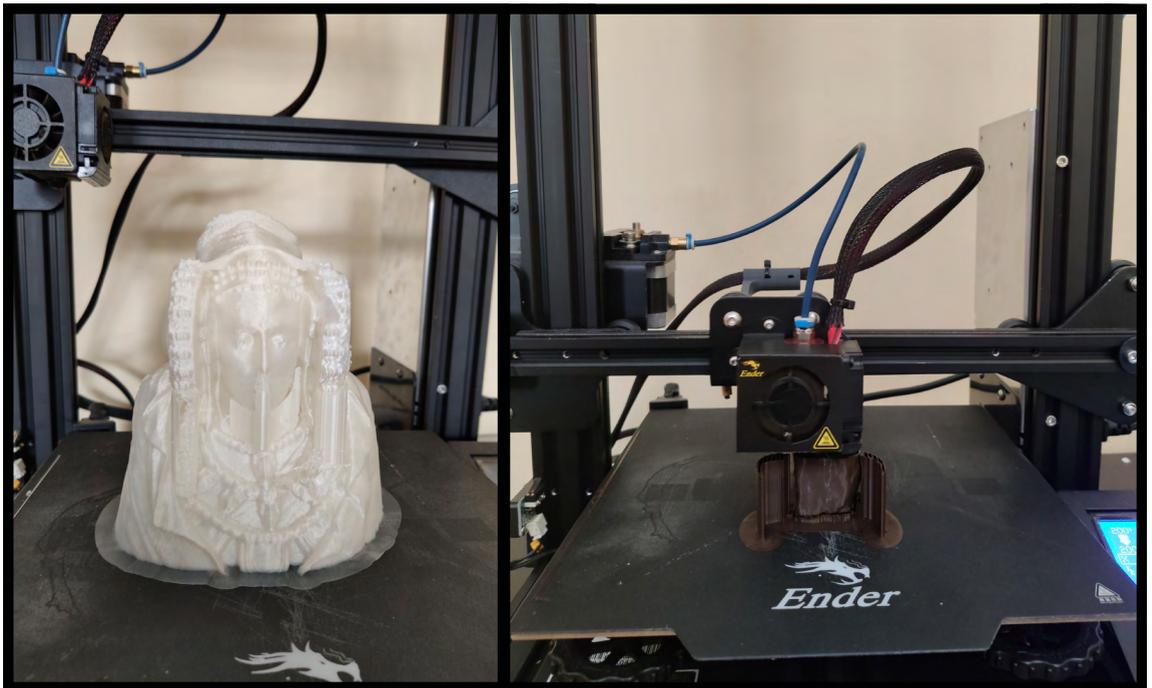


Fig. 2.—Proceso de impresión de las réplicas.

y la generación de soportes habilitadas, esta última con un ángulo de voladizo de 45°. Se aplicó resina epoxi de alta resolución y se lijó la superficie para cubrir las distintas capas creadas por la impresora, sin alterar la geometría del modelo digital. Posteriormente, se pintó cada réplica para expresar fielmente el original y poder identificar las partes conservadas y reconstruidas de cada uno. Además, en las réplicas de objetos cerámicos se aplicó textura acrílica de tipo arenoso de la marca *Vallejo* para garantizar que el tacto fuera lo más realista posible. Se trata de una pasta a base de resina acrílica, pigmento y microesferas.

Taller 1: Valladolid – 20 de junio de 2019

Se fabricaron 22 réplicas de cráneos de las principales especies de la evolución humana. Se seleccionaron once fósiles de los homínidos más significativos en el proceso evolutivo: *Pan troglodytes*, *Sahelanthropus tchadensis*, *Paranthropus boisei*, *Australopithecus afarensis* y *sediba*, *Homo habilis*, *H. erectus*, *H. naledi*, *H. heidelbergensis*, *H. floresiensis* y *H. neanderthalensis*. Los modelos digitales de los fósiles originales, ubicados en museos de todo el mundo, se obtuvieron gratuitamente de bibliotecas 3D en línea, como *Sketchfab*, *MyMiniFactory* y *African Fossils* (tabla 1). Se hicieron dos réplicas de cada espécimen para facilitar la interacción de los alumnos con todas las piezas. También se repartieron dos cráneos originales de *Homo sapiens*, uno masculino y otro femenino. Con ellos pudieron reconocer al tacto los rasgos que nos caracterizan como *H. sapiens*, las principales partes anatómicas que expresan el dimorfismo sexual en el cráneo y la textura real del hueso humano (fig. 3).

El 20 de junio de 2019, 25 alumnos, todos con discapacidad visual o ceguera total, asistieron al taller en el edificio de la ONCE en Valladolid. De dos horas y media de duración, consistió primero en una breve introducción al contexto geográfico y cronológico del proceso evolutivo. Posteriormente, a medida que se describía teóricamente cada especie, los alumnos podían sostener la réplica correspondiente e identificar mediante el tacto cada parte anatómica que se mencionaba en la explicación (fig. 3).

Algunas especies se agruparon en familias, basándose en criterios cronológicos o en su posición en la escala evolutiva, para dinamizar las explicaciones y ayudar a la comprensión de los alumnos. Por ejemplo, el cráneo de *Pan troglodytes* junto con *Sahelanthropus tchadensis*, los fósiles de *Australopithecus* junto con *Paranthropus boisei*; o los del género *Homo* —*H. habilis*, *H. erectus*, *H. naledi*, *H. heidelbergensis*, *H. neanderthalensis*, *H. floresiensis* y *H. sapiens*—. Desde el principio se destacaron una serie de rasgos anatómicos del cráneo como los que presentan mayor variabilidad en la evolución: el volumen encefálico o capacidad cerebral; el prognatismo facial, la forma de las órbitas, el *torus* supraorbitario, la dentición, la proyección del frontal y la presencia o ausencia de la cresta sagital. Una vez identificados estos rasgos, se pidió a los alumnos que propusieran hipótesis

TABLA 1
RELACIÓN DE MODELOS Y RÉPLICAS
(ÚLTIMA FECHA DE ACCESO A LOS ENLACES: 27/05/2024)

<i>SOPORTES ESCRITOS</i>	
Inscripción latina	https://sketchfab.com/3d-models/votive-altar-dedicated-to-hecule-saxanus-25a8d6d6f5b64da69d541b8724109f94
Altar romano	https://sketchfab.com/3d-models/altar-for-diana-goddess-of-hunt-9e1eb85433104b7c9caf961925a25a6e
Disco de Festo	https://sketchfab.com/3d-models/phaistos-disk-1aacb43b9b-694f048e89ecfce2b95e10
<i>ESCULTURA</i>	
Dama de Elche	https://sketchfab.com/3d-models/dama-de-elche-62815e6b9cdc4993ba398b11dfd1f19e
Cabeza de Diana	https://www.myminifactory.com/es/object/3d-print-diana-of-nemi-65046
Venus de Willendorf	https://www.myminifactory.com/es/object/3d-print-venus-of-willendorf-at-the-naturhistorisches-museum-vienna-austria-11455
Venus de Dolni Vestonice	https://sketchfab.com/3d-models/venus-of-dolni-vestonice-38e5c398cfcf4cabbcb0d107453335
<i>CERÁMICA</i>	
Cerámica argárica	https://sketchfab.com/3d-models/carinated-vase-with-flaring-rim-pg411017-53b0ab3c4dff4523be034f3cb706605a
Cerámica romana	https://www.myminifactory.com/es/object/3d-print-beaker-depicting-a-gladiator-fight-at-the-gallo-roman-museum-in-tongeren-belgium-22350
Cuenco neolítico	https://sketchfab.com/3d-models/cuenco-def0f9bc5f5d4c7f8575fa5b-c0ca1d9a
Urna cineraria	https://sketchfab.com/3d-models/caja-de-los-guerreros-a074a967a-894464999546faffcdffff
Vaso íbero	https://sketchfab.com/3d-models/ibero-roman-urn-castilla-la-mancha-spain-8518b25df39e48c4bf4804570ce12ed5
Kalathos íbero	https://sketchfab.com/3d-models/iberian-ceramic-kalathos-cerro-de-las-cabezas-d88d50c5c2c34c5381a601c07fd11c15
Oinochoe íbero	https://sketchfab.com/3d-models/oinochoe-iberico-jumilla-murcia-d944e0bf437f48ff95afd7b73298eda8
<i>HUESOS HUMANOS</i>	
Cráneo de <i>H. Sapiens</i>	Elaboración propia
<i>EVOLUCIÓN HUMANA</i>	
Pan troglodytes	https://sketchfab.com/3d-models/chimpanzee-skull-10a834c9f4cf4839b-67f630db1ec0e0b
Sahelanthropus Tchadensis	https://sketchfab.com/3d-models/sahelanthropus-tchadensis-cranium-fd44d410a4f94143b3de5ce582d2e600
Paranthropus boisei	https://africanfossils.org/hominids/knmer-406?o=1
Australopithecus afarensis	https://sketchfab.com/3d-models/australopithecus-afarensis-replica-b23a6d2543ed4bd79ff327551ea77d10
Homo habilis	https://africanfossils.org/hominids/knmer-1813?o=1
Homo erectus	https://africanfossils.org/hominids/knmwt-15000-c?o=1
Homo naledi	https://www.myminifactory.com/es/object/3d-print-complete-homonaledi-reconstructed-skull-46611
Homo heidelbergensis	https://sketchfab.com/3d-models/homo-heidelbergensis-8b07fb-8f41a74d589be05e7152a79612
Homo floresiensis	https://sketchfab.com/3d-models/lb1-homo-floresiensis-skull-4e424b65d4804a6f9be00215e5172128
Homo neanderthalensis	https://sketchfab.com/3d-models/scanned-neanderthal-skull-9930dd61decc49528615c8936cfc2f8e
<i>LÍTICA</i>	
Hacha pulimentada	Talla a mano
Hoces neolíticas	Talla a mano



Fig. 3.—Fotografías del taller celebrado en Valladolid en 2019.

para su explicación, en función de factores geográficos o climáticos y ambientales, o de cambios en su dieta.

Al final del taller se realizó una encuesta anónima a cada uno de los alumnos para determinar la composición de la clase en cuanto a sexo y edad, su nivel de estudios, grado de ceguera, conocimientos previos sobre el tema, y la utilidad de las réplicas para comprender la lección. También completaron un breve test que ayudó a determinar la validez de enseñar a las personas invidentes utilizando estas réplicas (Díaz-Navarro y Sánchez de la Parra-Pérez, 2021). Las últimas cuestiones versaron sobre la presencia de réplicas tiflológicas en museos arqueológicos y la experiencia de cada alumno en sus visitas. La encuesta fue totalmente voluntaria, con el consentimiento de los participantes, de la ONCE y la UCC+i de la Universidad de Valladolid.

El profesorado estaba compuesto por los autores de este trabajo, que fueron apoyados por una profesional de la arqueología, S. Fernández Recio, y por B. Hernando Hernando, coordinadora sociocultural de la ONCE en Castilla y León. Estas personas se encargaron de la dinamización de los talleres y de la correcta distribución de las réplicas, así como de la realización de los cuestionarios al finalizar la clase.

Taller 2: Salamanca – 19 de marzo de 2021

Dos años después se organizó, en colaboración con la ONCE de Salamanca, otro taller en la sede de la organización en dicha ciudad. Debido a las limitaciones sanitarias del momento, la actividad se dividió en dos talleres síncronos repetidos a lo largo de una mañana completa (fig. 4). En total se llevaron a cabo 4 talleres de una hora de duración con grupos reducidos de asistentes, garantizando la menor exposición al virus SARS-COV-2.

El taller contó con 14 réplicas de diferentes objetos arqueológicos de época prehistórica o romana que se dividieron según su pertenencia a categorías previamente establecidas, como cerámica, soportes inscritos, lítica o restos humanos. A su vez, la explicación de los diferentes objetos se estructuró según su cronología, de más antigua a más moderna, incidiendo en los condicionantes culturales y geográficos en los que se produjeron originalmente. De esta manera, durante la explicación se resaltaron las características morfológicas obvias de cada uno de ellos, como la aplicación del torno para la cerámica, los diferentes retoques según su utilidad para la lítica o las formas y estilos de los elementos de arte mueble.

En total, se seleccionaron 14 modelos digitales, descargables de manera gratuita en *Sketchfab* y *MyMiniFactory* o elaborados por los autores (tabla 1), a los que se sumaron réplicas fabricadas por métodos tradicionales, como la talla lítica.

Tras la explicación, se realizó a cada asistente la misma encuesta que en el taller de Valladolid, con el fin de profundizar en el interés por el uso de este tipo de recursos en función del sexo, edad, nivel de estudios o el grado de ceguera. De nuevo, se contó con el apoyo y consentimiento de la ONCE, además del de todos los asistentes y de la UCC+i de la Universidad de Salamanca.



Fig. 4.—Fotografías de los talleres celebrados en Salamanca en 2021.

En esta ocasión, la actividad fue impartida por los autores de este trabajo en colaboración con A. Remigio Portabales, Coordinadora de Animación Sociocultural y Promoción Deportiva de la ONCE en Castilla y León.

Los cuestionarios estaban compuestos por 11 preguntas; 9 de ellas eran cerradas (C) y pretendían obtener información básica sobre cada participante o el tipo de experiencia que tenían sobre la materia impartida. Las dos preguntas abiertas (A) estaban destinada a recoger información acerca de los museos específicos que habían visitado previamente: ¿Cuál es su género? (C); ¿Qué edad tiene? (C); ¿Qué grado de visión conserva? (C); ¿Qué nivel de estudios ha superado? (C); ¿Ha tenido alguna dificultad para seguir la explicación? (C); ¿Considera útil el empleo de las réplicas durante la explicación? (C); ¿Cuántos museos arqueológicos o paleontológicos ha visitado? (C); En caso de que el participante haya visitado alguno de estos museos, ¿cuál era? (A); ¿Disponía de réplicas táctiles? (C); ¿Cómo fue la experiencia? (A), y; ¿Considera útil la inclusión de este tipo de réplicas en instituciones museísticas? (C).

Finalmente, los resultados de los cuestionarios de ambos talleres se procesaron estadísticamente con el programa SPSS (IBM SPSS Statistic 20.0). Tal y como

puede comprobarse *supra*, todas las variables eran categóricas o cualitativas. Por tanto, se analizaron las frecuencias de cada variable, así como su independencia, mediante la prueba χ^2 basada en un valor p al nivel de significación de 0,05.

RESULTADOS

La Fabricación Aditiva FDM permitió crear réplicas de elementos arqueológicos extremadamente realistas. Los fósiles exhibían a la perfección la variabilidad de la anatomía craneal entre especies, tanto visualmente como al tacto. Por su parte, las réplicas impresas para el taller de Salamanca suponían una muestra básica de los principales materiales arqueológicos que se pueden documentar en el proceso de excavación, creando una imagen esquemática de los elementos patrimoniales expuestos en un museo de esta naturaleza.

El primer resultado destacable de los talleres fue el gran número de alumnos que asistieron, teniendo en cuenta su edad y sus escasos conocimientos del tema, como se explicará más adelante. El componente teórico se complementó con el uso de las réplicas y los alumnos no sólo fueron capaces de seguir las explicaciones, sino que también interactuaron con el profesor, compartieron opiniones con sus compañeros y formularon sus propias hipótesis.

De un total de 51 alumnos, 27 (53%) eran hombres y 24 mujeres (47%) (fig. 5a); todos eran adultos y sólo nueve de ellos (18%) tenían menos de 50 años (fig. 5b). El 41% (21) padecía algún tipo de deficiencia visual, mientras que los otros 30 (59%) eran totalmente ciegos o sólo percibían la luz (fig. 5c). Del total, 32 (63%) habían completado la educación primaria, 12 (23,5%) habían alcanzado la educación secundaria y sólo siete (13,5%) había cursado estudios universitarios (fig. 5d).

El 92% de los alumnos afirmaron haber comprendido toda la explicación sin problemas (tabla 2). Cuando se compararon las variables de grado de ceguera y dificultad para seguir la explicación, no se encontraron diferencias estadísticamente significativas ($\chi^2=0,955$).

TABLA 2
RESULTADOS SOBRE LA COMPLEJIDAD DE LOS TALLERES Y LA VALORACIÓN DE LAS RÉPLICAS POR PARTE DE LOS ALUMNOS

N	Dificultades para entender la explicación		Utilidad de las réplicas para entender la explicación		
	Sí (N/%)	No (N/%)	Nada útil (N/%)	Útil (N/%)	Indispensable (N/%)
51	5/10%	46/90%	0	17/33%	34/67%

Todos los asistentes afirmaron que las réplicas eran útiles (33%) o imprescindibles (67%) para hacer más comprensible un taller de este tipo (tabla 2). Cuando se compararon las variables grado de ceguera y utilidad de las réplicas en el taller, se

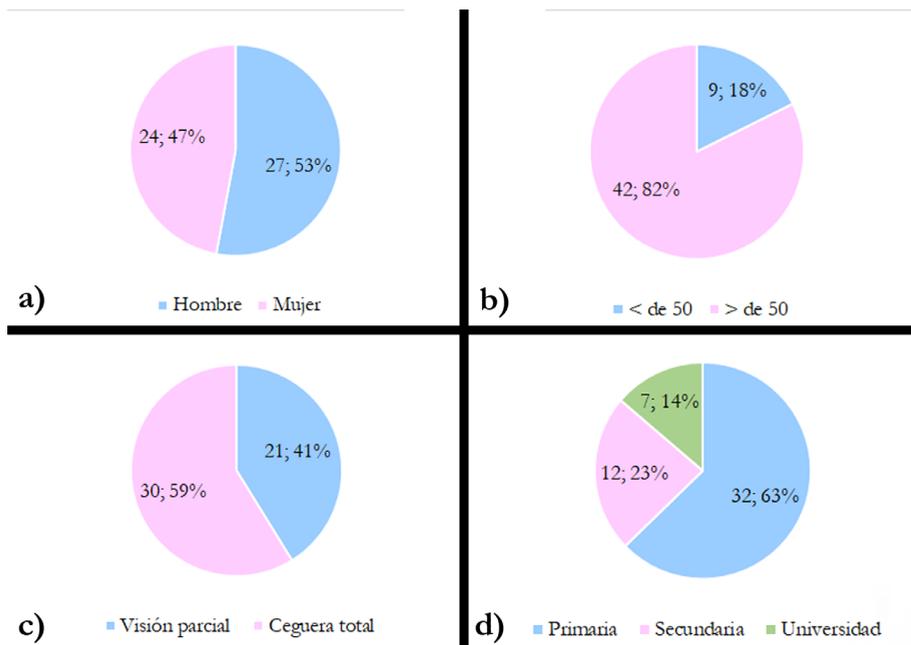


Fig. 5.—Gráficos circulares con la distribución de los asistentes por género (a), edad (b), grado de ceguera (c) y nivel de estudios completados (d).

obtuvo una diferencia estadísticamente significativa ($\chi^2=0,006$), ya que los alumnos con visión limitada las consideraron mayoritariamente útiles (57%), mientras que el 80% de los alumnos con mayor grado de ceguera las consideraron imprescindibles.

La mayoría había visitado al menos un museo arqueológico (84%) pero sólo el 57% afirmó tener acceso a réplicas tiflológicas durante su recorrido (tabla 3). Cuando se les preguntó sobre la utilidad de estos elementos en los museos, el grueso los valoró como imprescindibles (72,5%). La comparación de las variables grado de ceguera y utilidad de las réplicas en entornos museísticos arrojó diferencias estadísticamente significativas ($\chi^2=0,040$). En este caso fueron consideradas como indispensables independientemente del grado de ceguera (62% para los usuarios con visión parcial y 87% para los ciegos totales).

TABLA 3
RESULTADOS CUANTITATIVOS SOBRE LA RELACIÓN DE LOS ALUMNOS CON LOS MUSEOS ARQUEOLÓGICOS

N	¿Cuántos museos ha visitado?			¿El museo disponía de réplicas táctiles?			Utilidad de las réplicas en entornos museísticos		
	Ninguno (N/%)	1-3 (N/%)	> de 3 (N/%)	No ha visitado (N/%)	Sí (N/%)	No (N/%)	Nada útil (N/%)	Útil (N/%)	Indispensable (N/%)
51	8/16%	23/45%	20/39%	8/16%	29/57%	14/27%	0	14/27,5	37/72,5

Finalmente, las últimas preguntas versaron sobre su experiencia en entornos museísticos. De los 43 encuestados que pudieron visitar un museo previamente, 29 recordaban las instituciones concretas. Entre los más repetidos, enumeraron el Museo de Evolución Humana de Burgos, el Museo Arqueológico de Valladolid y el Museo Arqueológico de Salamanca. Todos pudieron conocer estas instituciones gracias a excursiones y salidas culturales organizadas por la ONCE. Otros mencionaron instituciones como el Museo de León, el British Museum, exposiciones temporales como Las Edades del Hombre, y exposiciones temáticas como la de Rodin-Giacometti —organizada en 2020 por la Fundación MAPFRE en la Sala Recoletos de Madrid— o sobre Egipto —sin mayor precisión—.

DISCUSIÓN

En las últimas décadas, las nuevas tecnologías se han convertido en herramientas muy valiosas en la educación para facilitar el aprendizaje y la comprensión de las lecciones (Inpland y Parra, 2009; Teshima, 2010; Teshima *et al.*, 2010; Kostakis *et al.*, 2014; Ford y Minshall, 2019). Cuando los alumnos son personas con discapacidad visual o ceguera total, el uso de estas tecnologías y, en especial, de las réplicas tiflológicas fabricadas en 3D cobra aún más valor, ya que el sentido del tacto es, junto con el oído, la principal vía por la que acceden a la información. El uso de réplicas fieles que complementen la explicación teórica oral es capaz de suplir esa falta de visión y facilitar la creación de representaciones mentales cercanas a la realidad, posibilitando una educación inclusiva a todos los niveles (Inpland y Parra, 2009; Ediyanto y Kawai, 2019; Martín-Blas, 2019).

La reacción a la lección y, sobre todo, a las réplicas fue extremadamente positiva. Algunos de los alumnos expresaron su sorpresa al tocar por primera vez objetos cuya morfología habían imaginado de forma abstracta, mientras que otros descubrieron algo que les era totalmente desconocido. Se ha demostrado que fabricar objetos a tamaño original es esencial para este tipo de alumnos, ya que les permite formarse en su imaginación una imagen fiel del objeto que tienen en sus manos. El caso de *H. floresiensis* es paradigmático, ya que el tamaño del cráneo llamó la atención de todos los alumnos. Si la mayoría de modelos no se hubieran impreso a su tamaño real, los asistentes habrían tenido dificultades para identificar las variaciones morfológicas. Asimismo, el tamaño del cráneo de *P. boisei* les permitió comprender las diferencias anatómicas entre esta especie y otros homínidos, condicionado por factores como el tipo de dieta. En cambio, creemos que otro tipo de piezas deben producirse a una escala diferente del original. La presentación a tamaño real de algunos objetos, como la Dama de Elche o la cabeza de Diana de Nemi, no es recomendable debido a que no permite mantener una relación de referencia entre las dos manos (Corvest, 1994).

Otro aspecto importante es la precisión en el aspecto final de las réplicas. Dado que el 59% de los alumnos del taller eran totalmente ciegos o apenas podían ver, se realizó un posprocesado completo de cada una de las piezas. Esto garantizó una

forma fiel al modelo digital en 3D al ocultar las posibles marcas resultantes de las capas en la impresión. Además, la aplicación de texturas favoreció una mayor aproximación al objeto real. Las réplicas también se pintaron cuidadosamente para hacerlas más realistas y para que los alumnos con restos de visión pudieran reconocer su aspecto y diferenciar las partes originales y reconstruidas de cada elemento.

Llamó la atención la ausencia de alumnos jóvenes en el taller, aunque ambas coordinadoras socioculturales advirtieron del escaso número de afiliados de este rango de edad y de su reducida participación en estas actividades. Según los datos oficiales de afiliados a la ONCE en 2022 (ONCE, 2022), en toda España, el 46,4% son mayores de 65 años; el 42,1% tienen entre 31 y 64 años; y sólo el 11,5% son menores de esa edad. Precisamente en Castilla y León, el 54,12% son mayores de 65 años, mientras que el 45,87% tienen entre 19 y 64 años. Teniendo en cuenta estas cifras, la composición del taller parece haber reflejado la proporción de cohortes de edad de la propia organización.

Los talleres estaban compuestos por un 53% de hombres y un 47% de mujeres, cifras similares a los datos que arrojan la estadística publicada por la ONCE en 2022. En España, las mujeres (52,1%) son algo más numerosas que los hombres (47,9%), al igual que en Castilla y León (54,51% frente a 45,48%).

Cabe destacar la elevada participación de alumnos sin restos de visión en ambos talleres, ya que superaron en número a los que conservan visión. Las estadísticas de la ONCE muestran que sólo el 13,6% de sus afiliados son ciegos (ausencia de visión o sólo percepción de la luz), mientras que el resto padecen algún tipo de discapacidad visual que les impide realizar determinadas tareas cotidianas (ONCE, 2022). Esto indica el gran interés de las personas con discapacidad visual más severa por las actividades culturales-educativas, posiblemente porque no pueden obtener esos conocimientos y experiencias por otros medios (noticias, museos, clases, etc.). Esto está en consonancia con su satisfacción con las réplicas, ya que los alumnos con mayor deficiencia las consideraban imprescindibles.

Parte del éxito del taller también puede explicarse por los limitados conocimientos de los alumnos sobre arqueología y paleontología, lo que parece relacionarse con su acceso a la educación formal. La mayoría no siguieron estudiando después de la escuela primaria debido a su discapacidad y al contexto en el que crecieron. El acceso universal garantizado a la educación superior es relativamente reciente en España (Paz-Maldonado, 2020). En el caso de la paleontología, los avances científicos de las últimas décadas han determinado la estructura general de nuestro origen evolutivo. Sin embargo, esta información no suele incluirse en la educación básica, o no de forma completa (DeSilva, 2004; Berkman *et al.*, 2008; Plutzer y Berkman, 2008; Mead y Mates, 2009; Ramírez-Ortiz, 2012; Pobiner, 2016). Algo similar sucede con las materias vinculadas a la Arqueología ya que, aunque en Secundaria se imparte un temario esencialmente histórico, la presentación y explicación de la cultura material no está presente o protagoniza una parte muy concreta y limitada de las asignaturas (Egea y Arias, 2015: 158; De Castro, 2020). Esta situación se ha complementado parcialmente con proyectos surgidos en los últimos años a medida que se consolida la opinión de que difundir los nue-

vos hallazgos, conocimientos y metodologías es esencial para seguir los criterios de la Arqueología Pública (e.g., Egea y Arias, 2013, 2015; Fernández Díaz *et al.*, 2014; García y Camacho, 2019; Díaz-Navarro *et al.*, 2021; Montoya y Egea, 2021; Serrano *et al.*, 2022). En Castilla y León, destacan tres proyectos desarrollados recientemente con alumnos de educación secundaria. Nos referimos al proyecto ‘MEDELTIA. La memoria de la tierra. El origen de la agricultura en perspectiva’ (Universidad de Valladolid); el desarrollado en el IES Los Sauces (Benavente, Zamora) sobre el estudio de los restos humanos de contextos arqueológicos; y el proyecto ‘Huesos en el patio’ llevado a cabo por A. Fraile Vicente en el IES de Guardo (Guardo, Palencia).

También es habitual que los departamentos universitarios cuenten con réplicas fundidas y moldeadas de elementos de la cultura material o de los fósiles de la evolución humana más representativos, comercializadas por diferentes empresas. Sin embargo, en muchas ocasiones estas colecciones no son lo suficientemente amplias o actualizadas, en parte debido a su elevado coste. Para ello, la impresión 3D FDM se revela como una excelente alternativa, puesto que permite crear amplias colecciones con elementos de la cultura material de cualquier cronología y región del mundo a un bajo coste, hasta diez veces menor que el de las réplicas comercializadas a molde (Díaz-Navarro y Sánchez de la Parra-Pérez, 2021). A este respecto, debemos subrayar el desarrollo en los últimos años de diferentes proyectos orientados a la creación de réplicas arqueológicas para alumnado universitario como “El patrimonio arqueológico en tus manos. Réplicas 3D para profundizar en el conocimiento de la Prehistoria”, desarrollado en la Universidad de Valladolid (Díaz-Navarro *et al.*, 2021); “El pasado desde una nueva dimensión (I y II)”, ambos liderados por I. García-Martínez de Lagrán en la UNED¹; o “Experimenta la Antigüedad Digital”, desarrollado en la Universidad Complutense de Madrid (Chapinal-Heras *et al.*, 2024).

Otro medio para familiarizarse con esta materia es la visita a museos e instituciones (Hetherington, 2000; Gari, 2015), aunque la implementación de tecnologías 3D en estas ha sido relativamente tardía en España. Los museos españoles suelen incorporar a sus colecciones réplicas de los materiales más famosos a nivel mundial, pero a menudo expuestos tras un cristal. En cambio, otros países europeos cuentan con una larga tradición en el desarrollo de exposiciones temporales totalmente adaptadas o incluso la fundación de museos orientados exclusivamente a personas con deficiencia visual (González *et al.*, 1994). En esta tradición ha sido frecuente la presentación de los objetos originales en las exposiciones táctiles, suponiendo un riesgo para su preservación. De hecho, aunque en origen estuvieron reservadas únicamente a personas con deficiencia visual, acabaron siendo abiertas al público general (Pearson, 1994). Esto implica una selección de los materiales mejor conservados con la consiguiente pérdida de información expositiva. La impresión 3D

1. Vide <https://www.uned.es/universidad/facultades/departamentos/prehistoria-y-arqueologia/investigacion/did%C3%A1ctica-y-aprendizaje-de-la-Prehistoria-mediante-r%C3%A9plicas-en-3D.html>.

garantiza, a un bajo coste (Díaz-Navarro y Sánchez de la Parra-Pérez, 2021), la protección del objeto original a la vez que permite salvar estos condicionantes. No se debe olvidar que, según el artículo 27.1 de la Declaración Universal de los Derechos Humanos, toda persona tiene el derecho a una plena integración cultural (Weisen, 1994).

Los resultados de la encuesta evidencian que, a pesar de que un 84% ha visitado alguna vez este tipo de instituciones, sólo el 57% ha podido disfrutar de réplicas tiflológicas que apoyen el discurso o explicación museística. De estos, la mayoría expresaron que pudieron manipular los objetos originales o réplicas tiflológicas durante excursiones organizadas por la ONCE, siendo extremadamente raro encontrar museos plenamente accesibles si los visitaban por cuenta propia. En este sentido, las réplicas y reconstrucciones de las que dispone el Museo de Evolución Humana de Burgos generalmente no son accesibles al tacto, mientras que los otros dos museos más visitados, el Museo de Salamanca y el de Valladolid no disponen de ningún tipo de apoyo en este sentido.

Aunque los alumnos con discapacidad visual severa expresaron sus malas experiencias al frecuentar estos lugares en el pasado, se debe tener en cuenta la progresiva inclusión de nuevas tecnologías en los últimos años en exposiciones temporales y talleres adaptados (Neumüller *et al.*, 2016; Horowitz y Schultz, 2014; Ballarin *et al.*, 2018; Marqués, 2018; Marqués *et al.*, 2018). Destaca el museo de la ONCE² (fig. 6e), en Madrid, que cuenta con salas dedicadas a maquetas de monumentos arquitectónicos, tanto nacionales —e.g., la cueva de Altamira o el Acueducto de Segovia, entre otros muchos— como internacionales —Coliseo de Roma, Partenón de Atenas, etc.—, y dedicadas a la exposición de material tiflológico. También merecen mención las exposiciones ‘En este museo sí puedes tocar’³ (19/05 - 15/07/2018) del Museu Manacor (Menorca) (fig. 6f) y ‘Esclavxs de la belleza’⁴ (01/06/2018 - 30/04/2020) en el Vilamuseu de Vila Joiosa (Alicante) (Fig. 6d), ambas con réplicas 3D; la exposición ‘Etruscos’ (01/08/2021 - 20/03/2022) del Museo de Arqueología de Alicante o su sala ‘Ciencia y Tecnología’, que contiene reproducciones de materiales arqueológicos con reseñas en braille⁵; las estaciones táctiles del Museo Arqueológico Nacional (fig. 6a-b); o las cada vez más frecuentes maquetas a gran escala de cascos históricos de diferentes ciudades —como Toledo o Segovia— y/o de monumentos emblemáticos —como las de Ávila, Málaga o Granada—. A pesar de ello, esta tendencia no está generalizada en el campo de la evolución humana. Destaca a este respecto la estación táctil de la exposición ‘Minerales, fósiles y evolución humana’ del Museo Nacional de Ciencias Naturales⁶ (fig. 6c) o el Museo Paleontológico de Lamata, Sobrarbe (Gari, 2015). Fuera

2. *Vide* <https://museo.once.es/>.

3. *Vide* <https://museudemanaacor.com/ca/activitats/aqui-si-que-pots-tocar>.

4. *Vide* <https://www.vilamuseu.es/actividad/exposicion-esclavxs-de-la-belleza/31>.

5. *Vide* https://acesibilidad.marqalicante.com/personas_ciegas/.

6. *Vide* <https://www.mncn.csic.es/es/visita-el-mncn/audiocuento/estacion-tactil-de-la-exposicion-minerales-fosiles-y-evolucion-humana>.



Fig. 6.—Museos nacionales con réplicas 3D o estaciones tiflológicas. a y b) Museo Arqueológico Nacional de Madrid (Fuente: <https://fundacionorange.es/accesibilidad-del-museo-arqueologico/> [Accedido el 30 de septiembre de 2023]); c) Museo Nacional de Ciencias Naturales (Fuente: J.M. Cazarra©, <https://www.mncn.csic.es/es/comunicacion/blog/iv-jornadas-de-la-vice-direccion-de-colecciones-y-documentacion-del-mncn-csic> [Accedido el 30 de septiembre de 2023]) d) Museo de Vila Joiosa (https://www.elconfidencial.com/espana/comunidad-valenciana/2023-02-14/vilamuseu-el-museo-interactivo-donde-lo-prohibido-es-no-tocar_3570703/ [Accedido el 30 de septiembre de 2023]); e) Museo de la ONCE (<https://www.religionenlibertad.com/cultura/299427485/El-Museo-de-la-ONCE-inaugura-un-recorrido-de-tematica-religiosa-para-los-ciegos.html> [Accedido el 30 de septiembre de 2023]); f) Museo de Manacor (Fuente: <https://museudemanaor.com/es/el-museo/accesibilidad> [Accedido el 30 de septiembre de 2023]).

de España, sobresalen las estaciones tiflológicas del Ashmolean Museum⁷, en Oxford; la creación de réplicas táctiles para el Museo Arqueológico del Pireo, en Grecia (Kantaros *et al.*, 2023); o las exposiciones del British Museum, en Londres; entre otras (Pearson, 1984, 1994; Ruysink y Van Raembonck, 1994; Prudhomme, 1994; Benaki, 1994).

Los resultados obtenidos han demostrado la utilidad de este tipo de actividades para garantizar la participación directa de los alumnos con discapacidad visual. Las nuevas tecnologías, y en particular la impresión 3D, se revelan como herramientas excepcionales para lograr este objetivo a un bajo coste ya que facilitaron materializar la explicación teórica y dejar claros determinados conceptos en el imaginario de los alumnos. En el campo de la evolución humana y de la anatomía propiamente dicha, su uso está aún más justificado, ya que permiten analizar con gran precisión el funcionamiento de cada estructura anatómica para conocer cómo evolucionó nuestra propia apariencia. Por tanto, se debe insistir en la necesidad de introducir réplicas tiflológicas que apoyen la explicación de conceptos difíciles de comprender, tanto en entornos puramente educativos como también en contextos culturales, tal y como también han demostrado estudios previos (Dardon *et al.*, 2016).

CONCLUSIONES

La fabricación aditiva permite crear amplias colecciones actualizadas de elementos de la cultura material de todo el planeta, a un bajo coste y de forma rápida, a la vez que protege las piezas originales. La realización de dos talleres en colaboración con la ONCE ha puesto de manifiesto cómo la impresión 3D FDM de objetos arqueológicos es realmente útil cuando se trabaja con alumnos con problemas de visión. Esta tecnología permite al alumnado interactuar con los artefactos y desarrollar una comprensión y conexión más profunda con el patrimonio cultural que la que alcanzan generalmente en entornos físicos convencionales. A pesar de que en los últimos años se ha incluido de forma progresiva esta tecnología en instituciones museísticas, la experiencia del alumnado de la ONCE pone de manifiesto la necesidad de introducir réplicas tiflológicas accesibles al tacto —en forma de exposiciones temporales, estaciones táctiles permanentes y/o talleres adaptados— en el grueso de museos españoles, y especialmente en Castilla y León, que garanticen la accesibilidad y la plena inclusión cultural de estas personas.

7. *Vide* <https://www.ashmolean.org/article/sensing-culture>.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer a la Universidad de Valladolid por facilitar el desarrollo del primero de los talleres en el marco del programa *CAPACIÉNCIATE*; a la Universidad Salamanca y a su Unidad de Cultura Científica y de la Innovación por haberles permitido llevar a cabo las actividades en Salamanca, en el marco del proyecto *El patrimonio sí se puede tocar. Divulgación inclusiva con réplicas tiflológicas impresas en 3D*, seleccionado en la III Convocatoria de ayudas a la divulgación científica, tecnológica e innovadora (2021). También agradecen a Blanca Hernando Hernando, Antía Remigio Portabales y Sara Fernández Recio su apoyo en las actividades. Finalmente, hacen extensiva dicha expresión de gratitud al Consejo Editorial de *Cuadernos de Prehistoria y Arqueología de Granada* y a los revisores de este trabajo por sus enriquecedores comentarios.

BIBLIOGRAFÍA

- ABOUHASHEM, Y., DAYAL, M., SAVANAH, S. y ŠRTKALJ, G. (2015): "The Application of 3D printing in anatomy education", *Medical Education Online* 20, pp. 29847. <https://doi.org/10.3402/meo.v20.29847>
- ANĐIĆ, B., LAVICZA, Z., ULBRICH, E., CVJETIĆANIN, S., PETROVIĆ, F. y MARIČIĆ, M. (2022): "Contribution of 3D modelling and printing to learning in primary schools: a case study with visually impaired students from an inclusive Biology classroom", *Journal of Biological Education* 0, pp. 1-17. <https://doi.org/10.1080/00219266.2022.2118352>
- BALLARIN, M., BALLETI, C. y VERNIER, P. (2018): "Replicas in Cultural Heritage: 3D Printing and the Museum Experience", *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science* 42:2, pp. 55-62. <https://doi.org/10.5194/ISPRS-ARCHIVES-XLII-2-55-2018>
- BENAKI, I. (1994): "El museo táctil del faro en Atenas", *Museos abiertos a todos los sentidos. Acoger mejor a las personas minusválidas* (C. González, P. Lavado, R. Lluch y C. Pérez de Andrés, coords.), Ministerio de Cultura y ONCE, Salamanca.
- BENTO, J. J. F. y GONÇALVES, V. B. (2011): "Ambientes 3D no proceso de ensino e aprendizagem", *Eduser: Revista de Educação* 3, pp. 45-58. <https://doi.org/10.34620/eduser.v3i1.30>
- BERKMAN, M. B., SANDELL, J. y PLUTZER, E. (2008): "Evolution and Creationism in America in America's Classrooms: A National Portrait", *Plos Biology* 6:5, e124. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.0060124>
- BUEHLER, E., COMRIE, N., HOFMANN, M., MCDONALD, S. y HURST, A. (2016): "Investigating the Implications of 3D Printing in Special Education", *ACM Transactions on Accessible Computing* 8:3, pp. 1-28. <https://doi.org/10.1145/2870640>
- BURCH, S. (2017): "A Virtual Oasis - Trafalgar Square's Arch of Palmyra", *International Journal of Architectural Research* 11:3, pp. 58-77. <https://doi.org/10.26687/archnet-ijar.v11i3.1401>
- BUSTAMANTE ÁLVAREZ, M., DORADO ALEJOS, A. y MALDONADO RUIZ, A. (2002): "Del latín al Braille. Nuevas aplicaciones para la enseñanza inclusiva de la ceramología romana: el caso de los sigilla en la terra sigillata", *Investigación en comunicación inclusiva y multilingüe* (R. Arrojo González, E. Fernández-Lancho y D. Brao Serrano, eds.), Comares, Granada, pp. 329-336.
- CAMPBELL, I., BOURELL, D. y GIBSON, I. (2012): "Additive Manufacturing: Rapid Prototyping comes of age", *Rapid Prototyping Journal* 18:4, pp. 255-258. <https://doi.org/10.1108/13552541211231563>

- CHAPINAL-HERAS, D., DÍAZ-SÁNCHEZ, C., GÓMEZ-GARCÍA, N., ESPAÑA-CHAMORRO, S., PAGOLA-SÁNCHEZ, L., PARADA, M. y REY-ÁLVAREZ, M. E. (2024): "Photogrammetry, 3D modelling and printing: The creation of a collection of archaeological and epigraphical materials at the university", *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage* 33, e00341. <https://doi.org/10.1016/j.daach.2024.e00341>
- COOPER, C. (2019): "You Can Handle It: 3D Printing for Museums", *Advances in Archaeological Practice* 7, pp. 443-447. <https://doi.org/10.1017/aap.2019.39>
- CORVEST, H. (1994): "Las nuevas tecnologías al servicio de los deficientes visuales en los museos", *Museos abiertos a todos los sentidos. Acoger mejor a las personas minusválidas* (C. González, P. Lavado, R. Lluch y C. Pérez de Andrés, coords.), Ministerio de Cultura y ONCE, Salamanca.
- DARDON, U., VIEIRA, V., SERODIO, S. B., CUNHA, T., COTTS, L. y PAGLARELLI, L. (2016): "Two-Dimensional and Three-Dimensional Models Used for Teaching Human Evolution in Secondary Schools. Learning Proficiency Assessment. A Case Study", *Journal of Sedimentary Environments* 1:2, pp. 279-291. <https://doi.org/10.12957/jse.2016.23547>
- DE CASTRO MARTÍN, P. (2020): "¿Cómo lo hacen otros? Recorrido por las mejores prácticas en educación patrimonial", *Cómo educar en el Patrimonio. Guía práctica para el Desarrollo de actividades de educación patrimonial*, Comunidad de Madrid, Madrid, pp. 102-120.
- DESILVA, J. (2004): "Interpreting Evidence: An Approach to Teaching Human Evolution in the Classroom", *The American Biology Teacher* 66:4, pp. 257-267. <https://doi.org/10.2307/4451668>
- DI FRANCO, P. D. G., CAMPORESI, C., GALEAZZI, F. y KALLMANN, M. (2015): "3D Printing and Immersive Visualization for Improved Perception of Ancient Artifacts", *Presence: Teleoperators and Virtual Environments* 24, pp. 243-264. https://doi.org/10.1162/PRES_a_00229
- DÍAZ-NAVARRO, S. y SÁNCHEZ DE LA PARRA-PÉREZ, S. (2021): "Human evolution in your hands. Inclusive education with 3D-printed typhological replicas", *Journal of Biological Education* 57:2, pp. 295-307. <https://doi.org/10.1080/00219266.2021.1909635>
- DÍAZ-NAVARRO, S., SÁNCHEZ DE LA PARRA-PÉREZ, S., TEJEDOR RODRÍGUEZ, C. y ROJO GUERRA, M. (2021): "El patrimonio arqueológico en tus manos. Réplicas 3D para profundizar en el conocimiento de la Prehistoria", *Innovaciones Metodológicas con TIC en Educación* (O. Buzón-García, C. Romero-García y A. Verdú Vázquez, coords.), Dykinson, Madrid, pp. 2829-2851.
- EDIYANTO y KAWAI, N. (2019): "Science Learning for Students with Visually Impaired: A Literature Review", *Journal of Physics: Conference Series* 1227. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1227/1/012035>
- EGEA VIVANCOS, A. y ARIAS FERRER, L. (2013): "IES Arqueológico. La Arqueología como recurso para trabajar las competencias básicas en la educación secundaria", *Clio* 39, 21 pp.
- EGEA VIVANCOS, A. y ARIAS FERRER, L. (2015): "La Arqueología llega a las aulas. Objetos y otras fuentes primarias para la enseñanza de la historia", *II Seminário Internacional de Educação Patrimonial – Contributos para a construção de uma consciência patrimonial* (G. Solé, coord.), Universidade do Minho, pp. 153-169.
- EVELYN-WRIGHT, S., DICKINSON, A. y ZAKRZEWSKI, S. (2020): "Getting to grips with 3D printed bones: Using 3D models as 'diagrams' to improve accessibility of palaeopathological data", *Papers from the Institute of Archaeology* 29. <https://doi.org/10.14324/111.2041-9015.012>
- FERNÁNDEZ DÍAZ, A., VIZCAÍNO SÁNCHEZ, J., ROS SALA, M. M. y RAMALLO ASNESIO, S. F. (2014): "Arqueología y TIC. Hacia una enseñanza/aprendizaje transversal en Secundaria. Propuesta de Innovación Educativa del Grupo de Investigación en Arqueología de la Universidad de Murcia (España)", *Historia y Comunicación Social* 19, pp. 425-438.
- FORTUNA, J. y VANDERMOLEN, J. (2021): "3D Printing as a Teaching Tool for People Who Are Blind and Visually Impaired", *The American Journal of Occupational Therapy* 75. <https://doi.org/10.5014/ajot.2021.75S2-RP211>

- FORD, S. y MINSHALL, T. (2019): "Invited review article: Where and how 3D printing is used in teaching and education", *Additive Manufacturing* 25, pp. 131-150. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.10.02>
- FRANCES, C. (2019): "See3D: 3D Printing for People Who Are Blind", *Journal of Science Education for Students with Disabilities* 23:1. <https://doi.org/10.14448/jseud.12.0006>
- FRASER, W. J. y MAGUVHE, M. O. (2008): "Teaching Life Sciences to Blind and Visually Impaired Learners", *Journal of Biological Education* 42:2, pp. 84-89. <https://doi.org/10.1080/00219266.2008.9656116>
- GARCÍA MARTÍNEZ, A. y CAMACHO VÉLEZ, G. (2019): "Arqueowiki: la arqueología como motor de aprendizaje de la historia en el aula de secundaria", *EDUNOVATIC 2019* (Madrid, 2019), pp. 25-29.
- GARI, A. (2015): "Reflexiones de la accesibilidad desde la ceguera y la movilidad reducida", *II Congreso Internacional de Educación y Accesibilidad. Museos y patrimonio en y con todos los sentidos: hacia la integración social en igualdad*, Tomo III (A. Domínguez, J.G. Sandoval y P. Lavado, eds.), Universidad de Zaragoza, Zaragoza, pp. 779-796.
- GIRAUD, S., BROCK, A. M., MACÉ, M. J. M. y JOUFFRAIS, C. (2017): "Map Learning with a 3D Printed Interactive Small-Scale Model: Improvement of Space and Text Memorization in Visually Impaired Students", *Frontiers in Psychology* 8:930, pp. 1-10. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2017.00930>
- GONZÁLEZ, C., LAVADO, P., LLUCH, R. y PÉREZ DE ANDRÉZ, C. (coords.) (1994): *Museos abiertos a todos los sentidos. Acoger mejor a las personas minusválidas*, Ministerio de Cultura y ONCE, Salamanca.
- GORDY, C. L., SANDEFUR, C. I., LACARA, T., HARRIS, F. R. y RAMIREZ, M. V. (2020): "Building the lac Operon: A Guided-Inquiry Activity Using 3D-Printed Model", *Journal of Microbiology & Biology Education* 21. <https://doi.org/10.1128/jmbe.v21i1.2091>
- HERNÁNDEZ SÁNCHEZ, A., DE LA TORRE, C. E., MEJÍA, J. M. y CÓRDOVA, L. G. (2020): "Maquetas hápticas en 3D para niños con discapacidad visual. Un acercamiento a la ciudad histórica", *Bitácora Urbano-Territorial* 30:2, pp. 47-60. <https://doi.org/10.15446/bitacora.v30n2.81771>
- HETHERINGTON, K. (2000): "Museums and the Visually Impaired: The Spatial Politics of Access", *The Sociological Review* 48, pp. 444-463. <https://doi.org/10.1111/1467-954X.00225>
- HOROWITZ, S. y SCHULTZ, P. (2014): "Printing Space: Using 3D Printing of Digital Terrain Models in Geosciences Education and Research", *Journal of Geoscience Education* 62, pp. 138-145. <https://doi.org/10.5408/13-031.1>
- INPLAND, J. y PARRA, D. (2009): "La formación de ciegos y discapacitados visuales: visión histórica de un proceso de inclusión", *El largo camino hacia una educación inclusiva: la educación especial y social del siglo XIX a nuestros días* (M.R. Berruero y S. Conejero, eds.), Universidad Pública de Navarra, Pamplona, pp. 453-462.
- JESSEN-MARSHALL, A. y LESCINSKY, H. L. (2011): "Origins: Team Teaching in the Sciences", *Team Teaching. Across the Disciplines, Across the Academy* (K. M. Plank, ed.), Stylus Publishing, Sterling, pp. 13-36.
- KANTAROS, A., SOULIS, E. y ALYSANDRATOU, E. (2023): "Digitization of Ancient Artefacts and Fabrication of Sustainable 3D-Printed Replicas for Intended Use by Visitors with Disabilities: The Case of Piraeus Archaeological Museum", *Sustainability* 15, 12689. <https://doi.org/10.3390/su151712689>
- KEAVENEY, S., KEOGH, C., GUTIERREZ-HEREDIA, L. y REYNAUD, E. G. (2016): "Applications for advanced 3D imaging, modelling, and printing techniques for the biological sciences", Ponencia presentada en el *22nd meeting for the International Conference on Virtual Systems and MultiMedia (Kuala Lumpur, 2016)*, pp. 1-8.
- KOCOVIC, P. (2017): "History of additive manufacturing", *3D Printing and its Impact on the Production of Fully Functional Components: Emerging Research and Opportunities* (P. Kocovic, ed.), Union Nikola Tesla University, Beograd, pp.1-24.
- KOSTAKIS, V., NIAROS, V. y GIOTITSAS, C. (2014): "Open source 3D printing as a means of learning: an educational experiment in two high schools in Greece", *Telematics*

- and Informatics* 32, pp. 118-128. <https://doi.org/10.1016/j.tele.2014.05.001>
- KWAN, A. y BUTLER, K. (2018): "3D-printed facsimiles as classroom primary sources: a comparative review", *Agora* 53, pp. 4-15.
- LUMADI, M. W. y MAGUVHE, M. O. (2012): "Teaching Life Sciences to Blind and Visually Impaired Learners: Issues to Consider For Effective Learning Mediation Practice", *The Anthropologist* 14, pp. 375-381. <https://doi.org/10.1080/09720073.2012.11891260>
- MALDONADO, A., ROUCO, J. y MARTÍNEZ, C. (2021): "Arqueología, impresión 3D y tiflología. La accesibilidad del patrimonio arqueológico como forma de difusión", *Cuadernos de Prehistoria y Arqueología de la Universidad de Granada* 31, pp. 421-441. <https://doi.org/10.30827/cpag.v31i0.15430>
- MARQUÉS, N. (2018): "Nuevas realidades: tecnología al servicio del patrimonio cultural", *Patrimonio cultural y marketing digital* (M. C. Fernández y J. R. Sarmiento, eds.), Dykinson, Madrid, pp. 97-112.
- MARQUÉS, N. F., VELÁZQUEZ, M. J., BONMATÍ, C. y MARCOS, A. (2018): "Virtualización e impresión 3D aplicadas a la accesibilidad del patrimonio cultural. De la planificación a los acabados y los contenidos accesibles", *Actes 5è Congrés Internacional d'Educació i Accessibilitat a museus i patrimoni*, vol. 2, Institut de Cultura de Barcelona, Institut Municipal de Persones amb Discapacitat i Museu Marítim de Barcelona, Barcelona, pp. 251-264.
- MARTÍN-BLAS, A. D. (2019): "La impresión de figuras en 3D como incentivo a la lectura para personas con discapacidad visual", *Integración: Revista Digital sobre Discapacidad Visual* 75, pp. 184-203.
- MEAD, L. S. y MATES, A. (2009): "Why Science Standards are Important to a Strong Science Curriculum and How States Measures Up", *Evolution: Education and Outreach* 2, pp. 359-371. <https://doi.org/10.1007/s12052-009-0155-y>
- MCMENAMIN, P. G., QUAYLE, M. R., MCHENRY, C. R. y ADAMS, J. W. (2014): "The production of anatomical teaching resources using three-dimensional (3D) printing technology", *Anatomical Science Education* 7, pp. 479-486. <https://doi.org/10.1002/ase.1475>
- MONTOYA MARTÍNEZ, F. J. y EGEA VIVANCOS, A. (2021): "La arqueología experimental como estrategia educativa: realidad y posibilidades", *Investigación en la escuela* 103, pp.139-152. <https://doi.org/10.12795/IE.2021.i103.10>
- NEUMÜLLER, M., REICHINGER, A., RIST, F. y KERN, C. (2016): "3D Printing for Cultural Heritage: Preservation, Accessibility, Research and Education", *3D Research Challenges in Cultural Heritage II. How to Manage Data and Knowledge Related to Interpretative Digital 3D Reconstructions of Cultural Heritage* (S. Münster, M.P. Kuroczyński y M. Ioannides, eds.), Springer, Berlin, pp. 119-134.
- ONCE (Organización Nacional de Ciegos Españoles) (2022): "Datos visuales y sociodemográficos de los afiliados a la ONCE". <https://www.once.es/dejanos-ayudarte/afiliacion/datos-de-afiliados-a-la-once/> [Acceso el 28 de septiembre de 2023].
- PAZ-MALDONADO, E. (2020): "Inclusión educativa del alumnado en situación de discapacidad en la educación superior: una revisión sistemática", *Teoría de la Educación. Revista Interuniversitaria* 32:1, pp. 123-146. <https://doi.org/10.14201/teri.20266>
- PEARSON, A. (1984): "Please Touch. An Exhibition of Animal Sculptures at the British Museum", *The International Journal of Museum Management and Curatorship* 3, pp. 373-378.
- PEARSON, A. (1994): "Las exposiciones táctiles en el Reino Unido", *Museos abiertos a todos los sentidos. Acoger mejor a las personas minusválidas* (C. González, P. Lavado, R. Lluch y C. Pérez de Andrés, coords.), Ministerio de Cultura y ONCE, Salamanca.
- PLUTZER, E. y BERKMAN, M. (2008): "Trends: Evolution, Creationism, and the Teaching of Human Origins in Schools", *The Public Opinion Quarterly* 72:3, pp. 540-553. <https://doi.org/10.2307/25167646>
- POBINER, B. (2016): "Accepting, Understanding, Teaching, and Learning (Human) Evolution: Obstacles and Opportunities", *Yearbook of Physical Anthropology* 159, pp. 232-274. <https://doi.org/10.1002/ajpa.22910>
- PRUDHOMME, J. (1994): "La acogida de los niños ciegos y deficientes visuales en el Museo de Historia Natural de Burdeos", *Museos abiertos a todos los sentidos. Acoger mejor a las perso-*

- nas minusválidas* (C. González, P. Lavado, R. Lluch y C. Pérez de Andrés, coords.), Ministerio de Cultura y ONCE, Salamanca.
- RAMÍREZ-ORTIZ, M. (2012): *Contribución de la prensa escrita española a la divulgación de la evolución humana y a la obra de Darwin (2006-2010)*, Tesis Doctoral Inédita, Universidad Complutense de Madrid.
- ROBERTSON, J. C. (2007): "Investigating Human Evolution Using Digital Imaging and Craniometry", *The American Biology Teacher* 69:3, e37-e41. [https://doi.org/10.1662/0002-7685\(2007\)69\[37:IHEUDI\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1662/0002-7685(2007)69[37:IHEUDI]2.0.CO;2)
- RUYSSINK, M. y VAN RAEMBONCK, M. (1994): "El museo para ciegos de Bruselas", *Museos abiertos a todos los sentidos. Acoger mejor a las personas minusválidas* (C. González, P. Lavado, R. Lluch y C. Pérez de Andrés, coords.), Ministerio de Cultura y ONCE, Salamanca.
- SANTOS, E. T., MAFALDA, R., KAWANO, A., CHENG, L., PETRECHE, J. R. D., LEITE, B. C. C., FERREIRA, S. L. y CARDOSO, L. R. A. (2003): "Da geometria cotada ao modelamento 3d: projeto didático", Ponencia presentada en *Graphica2003, V International Conference on Graphics Engineering for Arts and Design (Santa Cruz do Sul, 2003)*, pp. 8-11.
- SAVINI, A. y SAVINI, G. G. (2015): "A short history of 3D printing, a technological revolution just started", *2015 ICOHTEC/IEEE International History of High-Technologies and their Socio-Cultural Contexts Conferences (HISTELCON)*, IEEE, Tel-Aviv, pp. 1-8.
- SERRANO ARNÁEZ, B., DORADO ALEJOS, A., PEINADO ESPINOSA, M.ª V., RUIZ VIVAS, C. M. y GARCÍA GARCÍA, M. (2022): "Aprender Historia a través de la Arqueología. El proyecto de innovación docente Didacteca", *Universidad, Escuela y Sociedad* 13, pp. 124-136. <https://doi.org/10.30827/unes.i13.25318>
- SHI, L., ZHAO, Y. y AZENKOT, S. (2017): "Designing Interactions for 3D Printed Models with Blind People", *Proceedings of the 19th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility*, Association for Computing Machinery, New York, pp. 200-209.
- SINGHAL, I. y BALAJI, B. S. (2020): "Creating Atom Representations Using Open-Source, Stackable 3D Printed Interlocking Pieces with Tactile Features to Support Chemical Equation Writing for Sighted and Visually Impaired Students", *Journal of Chemical Education* 97, pp. 118-124. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.9b00255>
- SMIAR, K. y MENDEZ, J. D. (2016): "Creating and Using Interactive, 3D-Printed Models to Improve Student Comprehension of the Bohr Model of the Atom, Bond Polarity, and Hybridization", *Journal of Chemical Education* 93, pp. 1591-1594. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.6b00297>
- SMITH, D. W., LAMPLEY, S. A., DOLAN, B., WILLIAMS, G., SCHLEPPENBACH, D. y BLAIR, M. (2020): "Effect of 3D Manipulatives on Students with Visual Impairments Who Are Learning Chemistry Constructs: A Pilot Study", *Journal of Visual Impairment & Blindness* 114, pp. 370-381. <https://doi.org/10.1177/0145482X20953266>
- SUTTON, M. D., BRIGGS, D., SIVETER, D. J. y SIVETER, D. J. (2001): "Methodologies for the Visualization and Reconstruction of Three-Dimensional Fossils from the Silurian Hereforshire Lagerstätte", *Paleontologia Electronica* 4:1, pp. 1-17.
- TESHIMA, Y. (2010): "Three-Dimensional Tactile Models for Blind People and Recognition of 3D Objects by Touch: Introduction to the Special Thematic Session", *Computers helping people with special needs* (K. Miserberger, J. Klaus, Z. Zagler y A. Karshmer, eds.), Springer, Berlin, pp. 513-514.
- TESHIMA, Y., MATSUOKA, A., FUJIYOSHI, M., IKEGAMI, Y., KANEKO, T., OOUCHI, S., WATANABE, Y. y YAMAZAWA, K. (2010): "Enlarged skeleton models of plankton for tactile teaching lecture notes in computer science", *Computers helping people with special needs* (K. Miserberger, J. Klaus, Z. Zagler y A. Karshmer, eds.), Springer, Berlin, pp. 523-526.
- THOMAS D. B., HISCOX, J. D., DIXON, B. J. y POTGIETER, J. (2016): "3D scanning and printing skeletal tissues for anatomy education", *Journal of Anatomy* 229, pp. 473-481. <https://doi.org/10.1111/joa.12484>
- WEISEN, M. (1994): "Arte y discapacidad visual; un cometido para las asociaciones de ciegos, asociaciones de arte y de museos y los organismos

- de cultura oficiales”, *Museos abiertos a todos los sentidos. Acoger mejor a las personas minusválidas* (C. González, P. Lavado, R. Lluch y C. Pérez de Andrés, coords.), Ministerio de Cultura y ONCE, Salamanca.
- WILHITE, R. (2003): “Digitilizing Large Fossils Skeletal Elements for Three-Dimensional Applications”, *Palaeontologia Electronica* 5:1, pp. 1-10.
- WONJIN, J., JANG, H. I., HARIANTO, R. A., SO, J. H., LEE, H., LEE, H. J. y MOON, M. W. (2016): “Introduction of 3D Printing Technology in the Classroom for Visually Impaired Students”, *Journal of Visual Impairment & Blindness* 110, pp. 115-121. <https://doi.org/10.1177/0145482X1611000205>
- WU A. M., WANG, K., WANG, J. S., CHEN, C. H., YANG, X. D., NI, W. F. y HU, Y. Z. (2018): “The addition of 3D printed models to enhance the teaching and learning of bone spatial anatomy and fractures for undergraduate students: a randomized controlled study”, *Annals of Translational Medicine* 6:20, pp. 403. <https://doi.org/10.21037/atm.2018.09.59>

