

Biomodelos Hepáticos Impresos en 3D y Aprendizaje Basado en Problemas para la Enseñanza de la Anatomía Patológica Hepatobiliar.

3D-Printed Liver Biomodels and Problem-Based Learning for Teaching Hepatobiliary Pathological Anatomy.

Byron Geovanny Hidalgo-Cajo^{1,*}, Aitor Tejo-Otero², Marco Vinicio Moreno-Rueda³, Ángel Gualberto Mayacela-Alulema³, Washington Patricio Vasconez-Andrade³

¹ Facultad de Ciencias de la Salud, Carrera de Medicina, Universidad del País Vasco (UPV/EHU) – Universidad Nacional de Chimborazo (UNACH); bhidalgo@unach.edu.ec; <https://orcid.org/0000-0002-5526-1676>; Riobamba, Ecuador

² Departamento de Expresión Gráfica y Proyectos de Ingeniería, Escuela de Ingeniería de Bilbao, Universidad del País Vasco (UPV/EHU); aitor.tejo@ehu.eus; <https://orcid.org/0000-0003-2693-3696>; 48013, Bilbao, España

³ Facultad de Ciencias de la Salud, Carrera de Medicina, Universidad Nacional de Chimborazo (UNACH); mvmoreno@unach.edu.ec; <https://orcid.org/0000-0001-5899-3242>; Riobamba, Ecuador; <https://orcid.org/0000-0002-8373-0513>; wpatriciovasconez@unach.edu.ec; <https://orcid.org/0000-0003-3427-4117>.

* Correspondencia: bhidalgo@unach.edu.ec

Recibido: 6/9/26; Aceptado: 6/10/26; Publicado: 8/10/26

Resumen.

La enseñanza de la anatomía patológica enfrenta un acceso cada vez más limitado a material anatómico real, lo que ha impulsado a la incorporación de tecnologías de modelado digital e impresión 3D como recurso didáctico complementario. **Objetivo:** Evaluar el efecto de una estrategia didáctica combinada, que vincula el diseño y la elaboración de biomodelos hepáticos impresos en 3D por los propios estudiantes con su aplicación mediante el Aprendizaje Basado en Problemas (ABP), en comparación con la enseñanza expositiva tradicional. Adicionalmente se analizó la aceptación tecnológica del proceso de diseño y elaboración de los biomodelos y su relación con el rendimiento académico en estudiantes de cuarto semestre de Medicina de la Universidad Nacional de Chimborazo (Ecuador). **Métodos:** Se realizó un estudio cuasi-experimental pretest-posttest con un grupo experimental (n=40) y un grupo control (n=32), con 72 estudiantes en total. Bajo guía docente, los estudiantes del grupo experimental segmentaron y diseñaron, a partir de imágenes DICOM de un paciente con cirrosis hepática confirmada, el biomodelo del hígado cirrótico y, mediante posprocesamiento digital del mismo caso, el biomodelo del hígado sano; ambos se elaboraron por impresión FDM en PLA y se aplicaron en el aula bajo ABP. Se emplearon una Prueba de Conocimientos y el cuestionario del Modelo de Aceptación Tecnológica (TAM), este último referido específicamente al proceso de diseño y elaboración de los biomodelos 3D. **Resultados:** Los grupos no difirieron en el pretest (p=0,908). El grupo experimental mostró mayor ganancia de aprendizaje que el control (7,79 frente a 5,58 puntos) y una aceptación tecnológica alta hacia el proceso de diseño y elaboración, sin correlación significativa con el rendimiento académico, posiblemente por un efecto techo marcado en el posttest. **Conclusión:** La combinación de biomodelos hepáticos 3D y ABP se asoció con mejor rendimiento académico que la enseñanza tradicional, aunque la alta aceptación tecnológica no se relacionó con ese rendimiento. Como el diseño cuasi-experimental no permite separar el efecto del recurso tridimensional del de la metodología activa, la mejora no puede atribuirse de forma aislada a la impresión 3D, sino a ambos componentes en conjunto (3D-ABP).

Palabras clave: Impresión 3D; Modelado Anatómico Digital; Aprendizaje Basado en Problemas; Anatomía Patológica; Rendimiento Académico; Aceptación Tecnológica.

Abstract.

The teaching of pathological anatomy is facing increasingly limited access to real anatomical material, which has led to the incorporation of digital modelling and 3D printing technologies as a complementary teaching resource. Objective: To evaluate the effect of a combined teaching strategy, which links the design and production of 3D-printed liver biomodels by the students themselves with their application through Problem-Based Learning (PBL), compared with traditional lecture-based teaching. In addition, the study analysed the technological acceptance of the process of designing and producing the biomodels and its relationship with academic performance among fourth-semester medical students at the National University of Chimborazo (Ecuador). Methods: A quasi-experimental pre-test–post-test study was conducted with an experimental group (n=40) and a control group (n=32), comprising 72 students in total. Under the guidance of a tutor, students in the experimental group segmented and designed, using DICOM images from a patient with confirmed liver cirrhosis, a biomodel of the cirrhotic liver and, through digital post-processing of the same case, a biomodel of the healthy liver; both were produced using FDM printing with PLA and were used in the classroom within a problem-based learning (PBL) context. A Knowledge Test and the Technology Acceptance Model (TAM) questionnaire were used, the latter relating specifically to the process of designing and producing the 3D biomodels. Results: There was no difference between the groups in the pre-test ($p=0.908$). The experimental group showed greater learning gain than the control group (7.79 versus 5.58 points) and a high level of technological acceptance of the design and fabrication process, with no significant correlation with academic performance, possibly due to a marked ceiling effect in the post-test. Conclusion: The combination of 3D liver biomodels and PBL was associated with better academic performance than traditional teaching, although high technological acceptance was not related to that performance. As the quasi-experimental design does not allow the effect of the three-dimensional resource to be separated from that of the active methodology, the improvement cannot be attributed in isolation to 3D printing, but rather to both components together (3D-ABP).

Keywords: 3D printing; digital anatomical modelling; problem-based learning; pathological anatomy; academic performance; technology acceptance.

1. Introducción

La enseñanza de la anatomía humana constituye uno de los pilares fundamentales en la formación de profesionales de la salud, porque proporciona el sustento estructural necesario para comprender la fisiopatología de las enfermedades y sostener el razonamiento clínico. Durante décadas, este aprendizaje se ha apoyado en la disección cadavérica, el estudio de piezas anatómicas conservadas y el uso de atlas bidimensionales (1). Sin embargo, factores como la escasez de cadáveres para fines docentes, los costos de conservación del material biológico y las exigencias crecientes de bioseguridad en los laboratorios de anatomía han limitado progresivamente el acceso de los estudiantes a especímenes reales (2). Frente a estas restricciones, el desarrollo de las tecnologías de modelado digital e impresión tridimensional (3D) ha abierto una vía complementaria para la enseñanza anatómica. La impresión 3D permite transformar datos anatómicos digitales, habitualmente derivados de imágenes DICOM segmentadas, en objetos físicos manipulables que reproducen con fidelidad la morfología de una estructura concreta y que pueden multiplicarse sin desgaste del espécimen original (3,4). La evidencia internacional respalda de forma consistente su valor didáctico, es así que una revisión sistemática con metaanálisis de ensayos controlados aleatorizados concluye que los modelos impresos en 3D facilitan la visualización espacial, mejoran la comprensión de las relaciones anatómicas y se asocian a un mayor rendimiento académico frente a métodos exclusivamente bidimensionales, sin que se haya identificado ningún estudio que reporte su inferioridad como recurso didáctico (5).

La aplicación de estas tecnologías a la anatomía patológica reviste un interés particular, porque, a diferencia de la anatomía normal, el estudio de las lesiones patológicas exige interpretar variaciones morfológicas heterogéneas: un hígado cirrótico, por ejemplo, no presenta la misma superficie nodular ni la misma consistencia en todos los pacientes, lo que dificulta su representación fiel mediante fotografías o esquemas (1). Estudios centrados en piezas hepáticas, renales, pélvicas y cardíacas coinciden en que la manipulación de réplicas impresas mejora la comprensión de procedimientos, la confianza clínica y el acceso equitativo a especímenes con espectro completo de patología, con independencia del tamaño o los recursos del programa formativo (6-9).

La adopción de una tecnología, no obstante, no garantiza por sí misma su aprovechamiento pedagógico. El TAM, formulado por Davis, postula que la intención de utilizar una herramienta depende de la utilidad percibida y de la facilidad de uso percibida por el usuario (10). Estudios recientes que aplican el TAM y sus extensiones a entornos anatómicos digitales muestran que estas percepciones predicen la intención de uso con relativa independencia de la calidad técnica del recurso, lo que introduce la posibilidad de que la aceptación tecnológica actúe como una variable parcialmente disociada de la mejora efectiva del rendimiento académico (11).

El componente metodológico de la estrategia aplicada en este estudio es el Aprendizaje Basado en Problemas (ABP), que cuenta con una base de evidencia propia e independiente sobre su efecto positivo en el aprendizaje, más allá de su sinergia con los biomodelos 3D. Desde su caracterización original como una familia de métodos organizados en torno al problema clínico, y no a la exposición previa de contenidos (12), revisiones sistemáticas recientes asocian el ABP con mejoras en el pensamiento crítico y el razonamiento clínico de estudiantes de ciencias de la salud(13), y experiencias cualitativas en programas de Medicina de la región identifican la motivación del estudiante como su principal aporte al logro de aprendizajes significativos(14). Esta doble base de evidencia, tecnológica por un lado y metodológica por otro, resulta relevante para interpretar correctamente el alcance del presente estudio, en el que ambos componentes se aplicaron de forma conjunta y no pueden separarse estadísticamente (véase sección 2.4).

En América Latina, la incorporación de la impresión 3D en las carreras de medicina se encuentra en una fase de consolidación desigual. Revisiones sistemáticas recientes confirman puntuaciones más altas con modelos tridimensionales que con recursos bidimensionales equivalentes (15,16), y experiencias descritas desde carreras de medicina de la región documentan una adopción creciente de recursos digitales y modelos impresos en la formación anatómica (17). A partir de la literatura revisada para el estudio, que no constituyó una revisión sistemática exhaustiva, no se identificaron publicaciones que evaluaran específicamente el efecto de biomodelos patológicos hepatobiliares impresos en 3D, aplicados mediante ABP, sobre el rendimiento académico en asignaturas de anatomía patológica de la carrera de Medicina en el contexto ecuatoriano; esta observación señala un vacío relativo a ese contexto específico y no debe leerse como una afirmación absoluta de inexistencia.

En este marco, el presente estudio se propuso evaluar el efecto de una estrategia combinada, como es el diseño, la elaboración y la aplicación didáctica mediante ABP de biomodelos hepáticos impresos en 3D, sobre el rendimiento académico y la aceptación tecnológica de estudiantes de la carrera de Medicina de la Universidad Nacional de Chimborazo (UNACH), tomando como caso de estudio la cirrosis hepática. Dado que la intervención integra dos componentes que varían de forma simultánea entre los grupos (el recurso tridimensional y la metodología docente activa (ABP), el estudio no tuvo como objetivo aislar el efecto específico de cada uno, sino evaluar su efecto en conjunto frente a la enseñanza expositiva tradicional con apoyo de imágenes bidimensionales.

2. Métodos

2.1. Diseño y participantes

Se realizó un estudio empírico, de enfoque cuantitativo y alcance descriptivo-correlacional, con un diseño cuasi-experimental de estructura pretest-intervención-posttest. Los participantes correspondieron a dos grupos intactos (paralelos) de cuarto semestre de la carrera de Medicina de la Universidad Nacional de Chimborazo (UNACH, Riobamba, Ecuador), matriculados en la asignatura de Anatomía Patológica durante el período 2026-1S. El muestreo fue no probabilístico, de tipo censal por conveniencia: se incluyó a la totalidad de los estudiantes de ambos paralelos que cumplieron los criterios de inclusión (matrícula regular, asistencia a las sesiones correspondientes y firma del consentimiento informado), sin registrarse casos de exclusión por repitencia. La muestra final quedó constituida por 72 estudiantes: 40 en el grupo experimental (paralelo A) y 32 en el grupo control (paralelo B). Al tratarse de grupos intactos y no de una asignación aleatoria individual, el diseño favorece la validez ecológica pero no permite descartar por completo variables de confusión asociadas al paralelo de origen, limitación que se retoma en la discusión.

2.2. Instrumentos y variables

Se emplearon dos instrumentos. La Prueba de Conocimientos, de 13 ítems sobre anatomía normal y patológica hepatobiliar (puntuación dicotómica en cada ítem, con calificación total transformada a una escala de 0 a 10), se aplicó en pretest y posttest a ambos grupos, con aleatorización del orden de ítems y opciones entre ambas aplicaciones para reducir el efecto de memorización. El instrumento fue sometido a la validez de contenido, establecida mediante juicio de expertos del área de salud y de pedagogía, alcanzó un coeficiente V de Aiken de 0,953 (validez muy alta)(18), y su fiabilidad, estimada mediante KR-20 en una prueba piloto, fue de 0,971 (19).

El segundo instrumento fue un cuestionario adaptado del Modelo de Aceptación Tecnológica (TAM), formulado originalmente por Davis y ampliado por Davis, Bagozzi y Warshaw con las subescalas de facilidad de uso percibida (PEOU) y utilidad percibida (PU) (20). La versión aplicada en el estudio se tradujo y se adaptó al español el contenido de ambas subescalas, ampliándolas a 8 ítems cada una (16 ítems en total) en escala Likert de 7 puntos, con un rango posible de 8 a 56 puntos por subescala; a diferencia de otros estudios, el cuestionario se redactó para evaluar específicamente la percepción de los estudiantes sobre el proceso de diseño digital y elaboración de los biomodelos 3D descrito en la sección 2.3, y no sobre su aplicación posterior en el aula. El cuestionario se aplicó únicamente al grupo experimental al finalizar dicho proceso, dado que evalúa la percepción sobre una experiencia a la que solo este grupo estuvo expuesto; su fiabilidad en esta muestra, mediante el alfa de Cronbach, fue de 0,987 (21). En relación con el segundo instrumento fundamentado en el TAM, no se efectuó un nuevo análisis de validez de constructo, dado que esta ha sido previamente corroborada en múltiples estudios que respaldan su solidez teórica y psicométrica(10,20). Sin embargo, se evaluó la consistencia interna del instrumento en la muestra analizada para garantizar la confiabilidad de las puntuaciones obtenidas.

En cuanto a las variables de estudio, la variable independiente fue la estrategia didáctica combinada (biomodelos 3D diseñados y fabricados por los estudiantes y aplicados mediante ABP, frente a enseñanza tradicional con imágenes bidimensionales); el rendimiento académico fue la variable dependiente; y la aceptación tecnológica hacia el proceso de diseño y elaboración, la variable de asociación exploratoria.

2.3. Diseño y elaboración de los biomodelos 3D por los estudiantes

Se partió de un estudio de tomografía computarizada abdominal contrastada de un paciente con diagnóstico confirmado de cirrosis hepática, con autorización para uso académico y anonimización

previa de los metadatos DICOM. Bajo la guía directa del docente responsable, los propios estudiantes del grupo experimental, organizados en equipos pequeños, procesaron las imágenes con el software 3D Slicer, donde segmentaron el parénquima hepático patológico mediante umbralización de intensidad y corrección manual corte a corte. La estructura segmentada se exportó en formato STL y se refinó con Meshmixer (suavizado de superficies, reparación de mallas y ajuste de espesor de pared), obteniéndose el biomodelo del hígado cirrótico. El biomodelo del hígado sano no procedió de un estudio DICOM independiente ni de una plantilla genérica prediseñada, sino que los mismos estudiantes lo generaron mediante posprocesamiento digital de la malla segmentada del caso cirrótico: bajo supervisión docente, suavizaron la superficie nodular, regularizaron el contorno y normalizaron el espesor parenquimatoso hasta aproximarlos a la morfología hepática de referencia descrita en la literatura anatómica, de modo que ambas configuraciones compartieran el mismo tamaño y forma basal y la comparación entre ambas fuera atribuible a la diferencia morfológica patológica y no a diferencias anatómicas individuales entre pacientes distintos. Los estudiantes fabricaron ambos modelos a escala 1:1 mediante impresión FDM con filamento PLA, con altura de capa de 0,2 mm, densidad de relleno de 15 %, cama de superficie texturizada y velocidad reducida en la capa inicial, parámetros orientados a reproducir con fidelidad la textura nodular característica de la cirrosis. Tras la impresión, las piezas se sometieron a lijado y coloración diferenciada por estructura, realizados también por los estudiantes, para facilitar su identificación visual durante las sesiones didácticas posteriores (Figura 1).

Cabe precisar que no se realizó una evaluación objetiva independiente de la fidelidad morfológica de los biomodelos 3D resultantes (por ejemplo, validación por un panel de expertos en anatomía patológica, métricas geométricas de superposición con la imagen fuente u otro procedimiento de verificación cuantitativa). El procedimiento descrito en este apartado corresponde, por tanto, al objetivo técnico de elaboración perseguido y no a un resultado de fidelidad morfológica validado empíricamente; esta distinción se mantiene de forma consistente en los resultados y las conclusiones del estudio.

2.4. Intervención didáctica

Una vez fabricados los biomodelos 3D, el grupo experimental desarrolló cuatro sesiones de 60 minutos bajo una estrategia de Aprendizaje Basado en Problemas, en las que los estudiantes trabajaron en grupos pequeños manipulando directamente las piezas de hígado sano y cirrótico que ellos mismos habían diseñado y elaborado, para resolver casos clínicos de enfermedad hepatobiliar. En el mismo período, el grupo control recibió los mismos contenidos mediante exposición magistral con apoyo de imágenes bidimensionales, sin acceso a los modelos impresos ni a una metodología de trabajo activo en pequeños grupos. Al finalizar, ambos grupos respondieron la Prueba de Conocimientos (postest) y el grupo experimental respondió, además, el cuestionario TAM referido al proceso de diseño descrito en la sección 2.3.

Es necesario explicitar aquí la principal limitación metodológica del estudio. Entre los dos grupos (control-experimental) cambian simultáneamente dos componentes: el recurso didáctico (biomodelos 3D frente a imágenes 2D) y la metodología docente (ABP con trabajo activo en pequeños grupos frente a clase magistral). Esto se denomina confusión de intervención (en inglés, *intervention confound*) al variar juntos en la aplicación educativa, es decir ninguna diferencia entre grupos puede atribuirse solo a la impresión 3D. Esta diferencia podría depender del biomodelo 3D, de la metodología activa, o de la interacción entre ambos. El presente estudio evaluó el efecto en conjunto de los dos componentes (biomodelos 3D - ABP) frente a la enseñanza tradicional, y no el efecto específico de ninguno de ellos por separado. Esta limitación se retoma en la discusión y se refleja de forma consistente en la interpretación de los resultados y en las conclusiones.

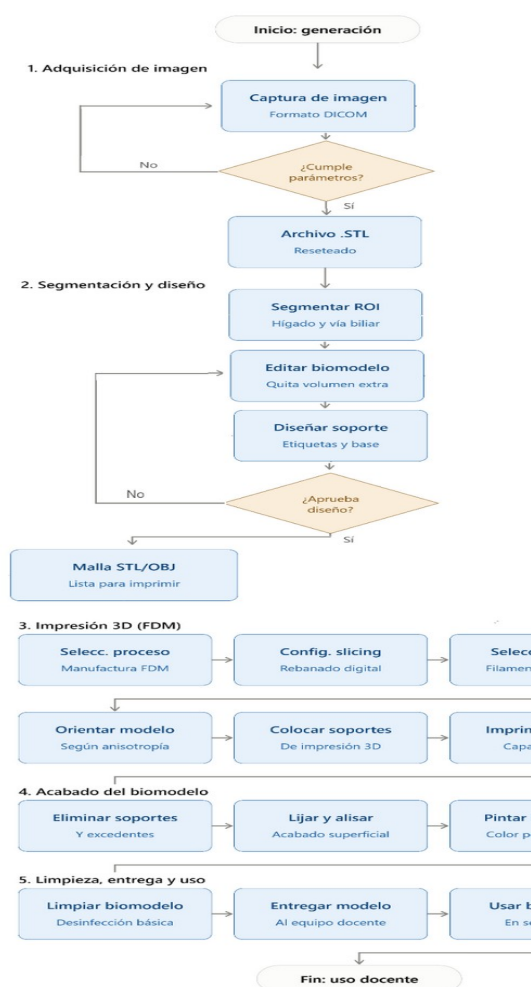


Figura 1. Flujo de trabajo seguido por los estudiantes, bajo guía docente, para el diseño digital y la elaboración de los biomodelos hepáticos mediante impresión 3D, desde la imagen DICOM hasta su uso en la sesión docente.

2.5. Análisis estadístico

Los datos se procesaron con IBM SPSS Statistics v.25. Se calcularon estadísticos descriptivos (media, desviación estándar, mediana, cuartiles, mínimo y máximo) para la Prueba de Conocimientos y las subescalas del TAM. El supuesto de normalidad se verificó mediante la prueba de Shapiro-Wilk, recomendada para tamaños muestrales inferiores a 50 por grupo; su incumplimiento generalizado motivó el uso de estadística no paramétrica en todos los contrastes (23). La equivalencia inicial entre grupos y la comparación del rendimiento posttest y de la ganancia de aprendizaje (posttest menos pretest) se evaluaron mediante la prueba U de Mann-Whitney; el cambio pretest-posttest dentro de cada grupo, mediante la prueba de Wilcoxon; y la relación entre la aceptación tecnológica (TAM total, PEOU y PU) y el rendimiento académico posttest del grupo experimental, mediante el coeficiente de correlación de Spearman. Para complementar los valores de significación estadística con una medida de la magnitud del efecto, se calculó el coeficiente r biserial por rangos para los contrastes de Mann-Whitney y Wilcoxon, siguiendo la fórmula de la diferencia simple (22), y se estimaron intervalos de confianza del 95 % para r y para ρ mediante la transformación z de Fisher. Se interpretó un valor de

p superior a 0,05 como ausencia de evidencia de diferencia estadísticamente significativa entre los grupos, sin que ello implique por sí mismo la demostración de una equivalencia sustantiva entre ellos. En todos los contrastes se fijó un nivel de significancia $\alpha = 0,05$, bilateral.

2.6. Aspectos éticos

El estudio se ajustó a los principios de la Declaración de Helsinki de la Asociación Médica Mundial (24) y a las Pautas Éticas Internacionales del Consejo de Organizaciones Internacionales de las Ciencias Médicas (CIOMS) (25). El consentimiento informado de cada participante fue recabado por personal de apoyo a la investigación ajeno a la evaluación formal de la asignatura, y no por los docentes con responsabilidad directa de calificar a los estudiantes, con el fin de reducir el riesgo de coerción percibida. El consentimiento garantizaba la voluntariedad de la participación, el derecho a retirarse del estudio en cualquier momento sin perjuicio académico, y la confidencialidad de los datos mediante codificación alfanumérica. Tanto la Prueba de Conocimientos como el cuestionario TAM se administraron exclusivamente con fines de investigación: sus puntajes no formaron parte del registro de calificaciones oficiales de la asignatura, que se evaluó de forma independiente mediante los instrumentos regulares del curso. Por razones de equidad académica, el grupo control tuvo acceso a los biomodelos impresos una vez concluida la recolección de datos. La investigación contó con la aprobación del comité de ética institucional, según resolución N.º 47-CEISH-UNACH.

3. Resultados

En el pretest, ambos grupos partieron de un nivel de conocimiento hepatobiliar bajo y similar, sin diferencia estadísticamente significativa entre ellos según la prueba U de Mann-Whitney. Este resultado indica ausencia de evidencia de diferencia entre los grupos en el momento basal, pero no constituye, por sí mismo, una demostración de equivalencia sustantiva entre ambos (tabla 1). En el postest, el grupo experimental alcanzó una media de 9,75 puntos, con más de la mitad de los estudiantes en el puntaje máximo posible de la escala, mientras que el grupo control promedió 7,57 puntos, con una dispersión notablemente mayor (tabla 1, figura 2).

Tabla 1. Estadísticos descriptivos de la Prueba de Conocimientos (pretest-postest) y del cuestionario TAM (postest, grupo experimental).

Instrumento	Grupo	Momento	M $\pm$ DE	Mdn (Q1-Q3)	Mín-Máx
Prueba de Conocimientos	Experimental (n=40)	Pretest	1,96 $\pm$ 1,33	1,54 (0,77-2,50)	0,00-5,38
Prueba de Conocimientos	Experimental (n=40)	Postest	9,75 $\pm$ 0,53	10,00 (10,00-10,00)	7,69-10,00
Prueba de Conocimientos	Control (n=32)	Pretest	2,00 $\pm$ 1,42	1,54 (0,77-3,08)	0,00-5,38
Prueba de Conocimientos	Control (n=32)	Postest	7,57 $\pm$ 1,22	8,08 (6,92-8,46)	3,85-9,23
TAM - PEOU	Experimental (n=40)	Postest	46,88 $\pm$ 14,73	54,00 (47,75-56,00)	8,00-56,00
TAM - PU	Experimental (n=40)	Postest	46,38 $\pm$ 15,53	55,00 (48,00-56,00)	8,00-56,00
TAM total	Experimental (n=40)	Postest	93,25 $\pm$ 29,91	107,00 (94,50-112,00)	16,00-112,00

Nota: M: media; DE: desviación estándar; Mdn: mediana; Q1-Q3: cuartiles 1 y 3; PEOU: facilidad de uso percibida; PU: utilidad percibida.

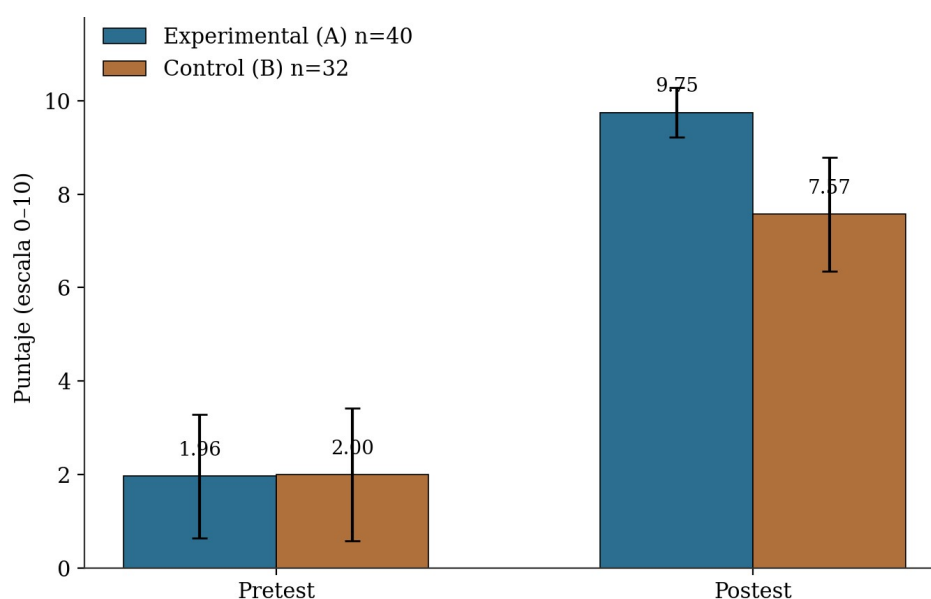


Figura 2. Comparación de los puntajes de la Prueba de Conocimientos en pretest y posttest, por grupo. Las barras de error representan la desviación estándar.

Ambos grupos mejoraron de forma estadísticamente significativa respecto a su propio pretest (Wilcoxon, $W=0,0$; $p<0,001$ en ambos grupos; r biserial por rangos de pares emparejados=1,00 en ambos casos, lo que indica que la totalidad de los estudiantes de cada grupo incrementó su puntaje), lo que indica que las dos estrategias didácticas se asociaron con aprendizaje. La comparación directa del posttest entre grupos favoreció de forma significativa al grupo experimental, al igual que la ganancia de aprendizaje entre posttest y pretest, coincidencia que, en conjunto, apoya la consistencia del hallazgo desde dos ángulos distintos (tabla 2). Dado que la intervención aplicada al grupo experimental combinó de forma indisoluble con el uso de biomodelos 3D y la estrategia ABP (véase sección 2.4), estas diferencias deben interpretarse como el efecto conjunto de ambos componentes frente a la enseñanza tradicional, y no como evidencia aislada del aporte específico de la impresión 3D.

Tabla 2. Resumen de los contrastes estadísticos, con tamaño del efecto e intervalo de confianza del 95 %.

Contraste	Prueba	Estadístico	p	r / rho (IC95 %)
Equivalencia inicial (pretest Exp. vs. Control)	U de Mann-Whitney	U=629,5	0,908	r=0,02 [-0,22, 0,25]
Cambio pretest-posttest, grupo experimental	Wilcoxon	W=0,0	<0,001	r=1,00
Cambio pretest-posttest, grupo control	Wilcoxon	W=0,0	<0,001	r=1,00
Posttest entre grupos (Exp. vs. Control)	U de Mann-Whitney	U=1241,5	<0,001	r=0,94 [0,91, 0,96]
Ganancia de aprendizaje entre grupos	U de Mann-Whitney	U=1033,5	<0,001	r=0,61 [0,45, 0,74]
TAM total vs. rendimiento (posttest)	Rho de Spearman	rho=0,135	0,408	rho=0,14 [-0,18, 0,43]
PEOU vs. rendimiento (posttest)	Rho de Spearman	rho=0,108	0,507	rho=0,11 [-0,21, 0,41]

PU vs. rendimiento (postest)	Rho de Spearman	rho=0,161	0,322	rho=0,16 [-0,16, 0,45]
-------------------------------------	-----------------	-----------	-------	------------------------

Nota: Exp.: grupo experimental; U: estadístico de Mann-Whitney; W: estadístico de Wilcoxon; rho: coeficiente de correlación de Spearman; r: coeficiente r biserial por rangos (contrastes de Mann-Whitney y Wilcoxon); IC95 %: intervalo de confianza del 95 % calculado mediante la transformación z de Fisher.

En cuanto a la aceptación tecnológica hacia el proceso de diseño y elaboración de los biomodelos 3D, las medianas de facilidad de uso percibida (PEOU=54,00, rango 8-56) y de utilidad percibida (PU=55,00, rango 8-56) se situaron próximas al valor máximo de la escala, lo que sugiere una valoración globalmente favorable por parte del grupo experimental (tabla 1). No obstante, la desviación estándar fue elevada en ambas subescalas (14,73 y 15,53, respectivamente), con un valor mínimo de 8, lo que evidencia que, junto a una mayoría con percepción muy positiva, existió un grupo reducido de estudiantes con una valoración claramente negativa.

Al analizar la relación entre la aceptación tecnológica y el rendimiento académico postest mediante el coeficiente rho de Spearman, no se identificaron asociaciones estadísticamente significativas (tabla 2). Esta ausencia de correlación podría explicarse, al menos parcialmente, por un efecto techo en el postest del grupo experimental: al concentrarse la mayoría de los puntajes en el valor máximo de la escala, la variabilidad disponible para que cualquier coeficiente de correlación detectara una asociación real quedó sustancialmente reducida, con independencia de la subescala contrastada. Esta explicación es plausible pero no puede confirmarse con los datos disponibles; de forma complementaria, el hallazgo también puede interpretarse como una limitación de la capacidad discriminativa del instrumento en el extremo superior de la escala, aspecto que se retoma en la discusión.

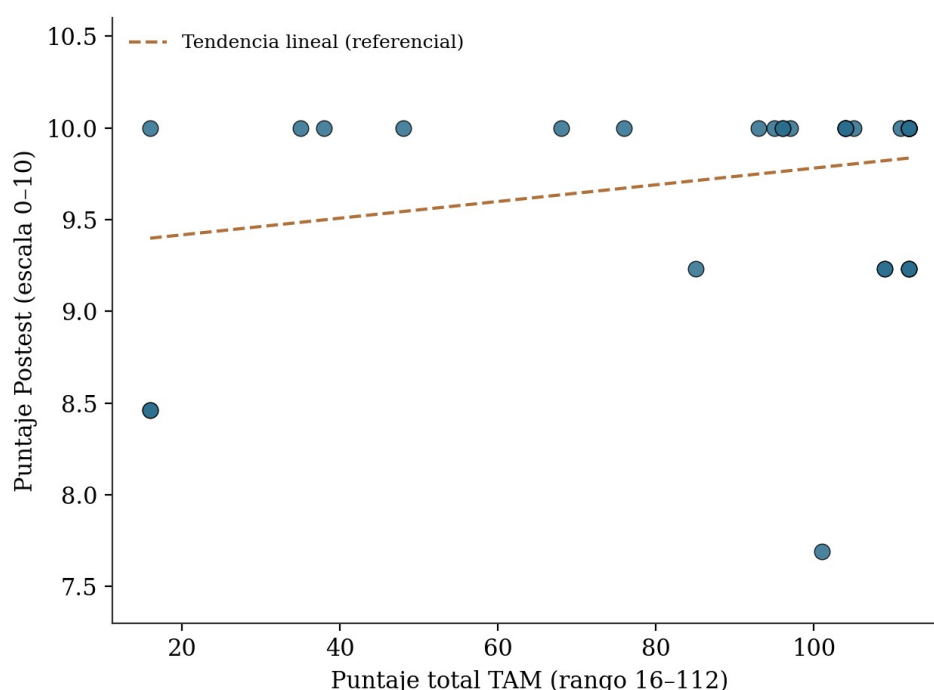


Figura 3. Relación entre aceptación tecnológica (TAM) y rendimiento académico en el grupo experimental (n=40).

En conjunto, los resultados son compatibles con la hipótesis de investigación en lo referente al rendimiento académico la cual plantea que la combinación de biomodelos anatómicos diseñados y fabricados por los propios estudiantes mediante modelado digital e impresión 3D, aplicada a través de la estrategia didáctica ABP, se asoció con una mejora significativamente mayor del aprendizaje de la anatomía patológica hepatobiliar frente a la enseñanza tradicional. Dado que el diseño del estudio no permite separar estadísticamente el aporte del recurso tridimensional con la metodología ABP (sección 2.4), esta conclusión se limita al efecto conjunto de ambos componentes (3D-ABP). Respecto a la aceptación tecnológica, la hipótesis se sostiene solo parcialmente: si bien la valoración fue globalmente favorable, no se encontró evidencia estadística suficiente de una asociación lineal con el rendimiento alcanzado.

4. Discusión

Los resultados muestran que la intervención aplicada al grupo experimental con los biomodelos anatómicos diseñados y fabricados por los estudiantes mediante impresión 3D, trabajados bajo la estrategia ABP, se asoció con una ganancia de aprendizaje significativamente mayor que la enseñanza expositiva tradicional en el bloque hepatobiliar de Anatomía Patológica, sin diferencias iniciales entre los grupos. Este hallazgo es coherente, en sentido amplio, con la revisión sistemática con metaanálisis de ensayos controlados aleatorizados de Xie et al., que concluye que los modelos impresos en 3D facilitan la visualización espacial y se asocian a un mayor rendimiento académico frente a métodos exclusivamente bidimensionales (5). En el terreno hepático específicamente, la mejora observada es compatible con lo reportado por Bao et al., quienes documentaron avances significativos en la comprensión de procedimientos quirúrgicos hepáticos entre estudiantes que emplearon modelos impresos a tamaño real frente a métodos convencionales (6). Conviene señalar, sin embargo, que ni el estudio de Xie et al. ni el de Bao et al. combinaron el recurso tridimensional con una metodología de Aprendizaje Basado en Problemas aplicado en esta investigación, por lo que la comparación con el presente estudio es orientativa y no puede tomarse como confirmación de que el componente de impresión 3D, por sí solo, explique la magnitud del efecto observado.

Dentro del contexto latinoamericano, los hallazgos son coherentes con lo reportado por Valdez et al. sobre la asociación positiva entre la visualización tridimensional y el rendimiento académico en estudiantes de medicina de la región (26), y se alinean con revisiones recientes publicadas en revistas iberoamericanas de educación médica que documentan efectos educativos favorables de la impresión 3D y de las herramientas tecnológicas aplicadas a la enseñanza de la morfología (15,16), así como con la adopción creciente de recursos digitales descrita desde carreras de medicina regionales (17). La presente investigación aporta, en particular, un antecedente ecuatoriano hasta ahora no documentado en este ámbito específico: si bien la UNACH había reportado experiencias previas favorables con tecnologías visuales afines, con una valoración global positiva entre estudiantes que emplearon realidad aumentada para el aprendizaje anatómico (27), no se identificaron publicaciones que evaluaran específicamente el efecto de biomodelos patológicos impresos en 3D, diseñados por los propios estudiantes y aplicados mediante ABP, sobre el rendimiento académico en asignaturas de anatomía patológica de la carrera de Medicina. Esta observación describe un vacío relativo a ese contexto particular dentro de la literatura revisada, y no debe leerse como una afirmación absoluta de inexistencia de estudios similares en otros entornos no cubiertos por esta revisión.

La ausencia de correlación estadísticamente significativa entre la aceptación tecnológica y el rendimiento académico admite al menos dos explicaciones no excluyentes entre sí, ninguna de las cuales puede confirmarse de manera definitiva con los datos disponibles. La primera es de naturaleza estadística y de medición: el marcado efecto techo observado en el posttest del grupo experimental redujo la variabilidad disponible para que cualquier coeficiente de correlación detectara una asociación real, y constituye, en sí mismo, una limitación de la capacidad discriminativa del instrumento de evaluación en el extremo superior de la escala, más que necesariamente una

limitación de la asociación en la población general. La segunda es de naturaleza teórica y encuentra respaldo en el propio marco del TAM: la utilidad percibida y la facilidad de uso percibida determinan la intención conductual de utilizar una tecnología, no necesariamente el desempeño que se obtiene al utilizarla (10). En esta línea, Kalinkara y Özdemir, al evaluar mediante UTAUT2 la aceptación de un entorno de anatomía en metaverso, encontraron que las expectativas de desempeño y de esfuerzo predecían la intención de uso con relativa independencia de la calidad técnica del recurso, lo que sugiere que la aceptación tecnológica y el resultado de aprendizaje pueden comportarse como fenómenos parcialmente disociados (11). Bajo esta lectura, resulta plausible que los estudiantes del grupo experimental hayan aprendido más por el valor pedagógico de diseñar, fabricar y manipular una réplica física de un caso clínico real dentro de una metodología activa de Aprendizaje Basado en Problemas, con relativa independencia de cuánto valoraran específicamente la tecnología de impresión 3D empleada para producir dicho recurso; esta interpretación, sin embargo, es post hoc y requeriría un diseño específico para contrastarse.

Entre las limitaciones del estudio, la más relevante para la interpretación causal de los resultados es de naturaleza metodológica y no estadística: la intervención aplicada al grupo experimental combinó de forma indisoluble dos componentes el recurso de biomodelos 3D diseñados y fabricados por los estudiantes y la metodología de Aprendizaje Basado en Problemas en pequeños grupos, frente a una intervención control que combinó, igualmente, dos componentes distintos las imágenes bidimensionales y la clase magistral generalmente expositiva. Esta confusión de intervención impide, por diseño, determinar si la diferencia observada se debe al recurso tridimensional, a la metodología ABP, al trabajo activo en pequeños grupos, o a la interacción entre estos elementos, y debe considerarse la limitación central al interpretar los resultados de este estudio, por delante de las limitaciones adicionales que se describen a continuación. El diseño cuasi-experimental, con grupos intactos no asignados aleatoriamente, favorece la validez ecológica pero no permite descartar por completo variables de confusión asociadas a los paralelos de origen. La muestra correspondió a una sola cohorte de una única institución y a un solo caso patológico (cirrosis hepática), lo que limita la generalización de los hallazgos a otras lesiones hepatobiliares o a otros contextos formativos. No se realizó, además, una evaluación objetiva independiente de la fidelidad morfológica de los biomodelos impresos, por lo que las afirmaciones de este estudio sobre su utilidad docente no implican una validación morfométrica de dicha fidelidad. Futuras investigaciones podrían aislar experimentalmente el efecto del recurso 3D del correspondiente a la metodología ABP (por ejemplo, mediante un diseño factorial con cuatro brazos), incorporar instrumentos con mayor rango de discriminación en el extremo superior de la escala de conocimientos, ampliar el estudio a otras estructuras patológicas y distintas instituciones, y explorar el papel mediador más que directamente correlacional de la aceptación tecnológica sobre el rendimiento académico.

5. Conclusiones

- Bajo la guía del docente, los estudiantes diseñaron y fabricaron biomodelos de hígado sano y cirrótico a partir de un mismo estudio de imágenes DICOM reales, mediante segmentación en 3D Slicer, posprocesamiento en Meshmixer e impresión FDM en PLA; este procedimiento se orientó a reproducir la textura nodular característica de la cirrosis con fines docentes, sin que se haya efectuado una validación morfométrica independiente de la fidelidad anatómica alcanzada.
- La estrategia didáctica de Aprendizaje Basado en Problemas aplicada con los biomodelos 3D diseñados por los propios estudiantes se implementó en un período de tiempo comparable al del grupo control, sin incidencias relevantes, lo que respalda su factibilidad operativa en un curso regular de Anatomía Patológica.
- La aceptación tecnológica del grupo experimental hacia el proceso de diseño y elaboración de los biomodelos impresos en 3D fue, en general, elevada, tanto en facilidad de uso percibida como en utilidad percibida, aunque con un grupo minoritario de valoraciones claramente negativas.

- No se encontró una relación estadísticamente significativa entre la aceptación tecnológica y el rendimiento académico; este resultado podría explicarse, al menos parcialmente, por un efecto techo en el posttest del grupo experimental, sin que ello permita descartar con certeza una ausencia real de asociación en condiciones de mayor variabilidad.
- El rendimiento académico del grupo experimental que trabajó con biomodelos 3D mediante ABP fue significativamente superior al del grupo con enseñanza tradicional, tanto en el puntaje final como en la ganancia de aprendizaje, lo que apoya la hipótesis de investigación en su componente de rendimiento, referida siempre al efecto conjunto de ambos componentes de la intervención y no solo a la impresión 3D de manera aislada.
- Dado que el diseño del estudio no permite separar estadísticamente el aporte del recurso de biomodelos 3D con la metodología ABP, esta limitación debe considerarse al trasladar los hallazgos a decisiones curriculares, y señala la necesidad de diseños factoriales futuros que permitan aislar ambos componentes.
- El estudio aporta un antecedente empírico sobre la combinación de biomodelos impresos en 3D diseñados y elaborados por los estudiantes y su aplicación con la estrategia ABP para la enseñanza de la anatomía patológica hepatobiliar. Los hallazgos contribuyen al conocimiento sobre estrategias innovadoras de aprendizaje en el ámbito institucional; no obstante, sus resultados deben interpretarse dentro de este contexto específico, sin extrapolarse como evidencia de pionerismo a nivel de la educación médica ecuatoriana.

Financiación: Los autores declaran no haber recibido financiación específica de organismos públicos, comerciales o sin fines de lucro para la realización de este estudio.

Declaración de conflicto de interés: Los autores declaran no tener ningún conflicto de interés.

Contribuciones de los autores: B.G.H.C.: conceptualización y metodología de la investigación. M.V.M.R y A.G.M.A han participado en la curación de datos, análisis estadístico, redacción del borrador original. A.T.O y W.P.V.A: realizaron la conceptualización, supervisión, diseño y elaboración de los biomodelos, redacción-revisión y edición. Todos los autores han leído y aceptado la versión enviada del manuscrito.

6. Referencias

1. Suárez-Escudero JC, Posada-Jurado MC, Bedoya-Muñoz LJ. Enseñar y aprender anatomía: modelos pedagógicos, historia, presente y tendencias. *Acta Med Colomb.* 2020, 45(4), 1-8. <https://doi.org/10.36104/amc.2020.1898>
2. Huynh N, Burgess A, Wing L, Mellis C. Anatomy by whole body dissection as an elective: student outcomes. *J Surg Educ.* 2021, 78(2), 492-501. <https://doi.org/10.1016/j.jsurg.2020.07.041>
3. Fahrni S, Sabatasso S. 3D modelling in anatomy teaching: state of the art and pilot investigations for its application. *Transl Res Anat.* 2025, 41, 100444. <https://doi.org/10.1016/j.tria.2025.100444>
4. McMenamin PG, Hussey D, Chin D, Alam W, Quayle MR, Coupland SE, et al. The reproduction of human pathology specimens using three-dimensional (3D) printing technology for teaching purposes. *Med Teach.* 2021, 43(2), 189-197. <https://doi.org/10.1080/0142159X.2020.1837357>
5. Xie G, Wang T, Fu H, Liu D, Deng L, Zheng X, et al. The role of three-dimensional printing models in medical education: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *BMC Med Educ.* 2025, 25, 1-14. <https://doi.org/10.1186/s12909-025-07187-7>
6. Bao G, Yang P, Yi J, Peng S, Liang J, Li Y, et al. Full-sized realistic 3D printed models of liver and tumors anatomy: a useful tool for the clinical medicine education of beginning trainees. *BMC Med Educ.* 2023, 23, 574. <https://doi.org/10.1186/s12909-023-04535-3>
7. Rubat Baleuri F, Pattou M, Jaffredo M, Lacroix G, Courtine C, Sarrazin J, et al. From visualization to education: the role of 3D-printed and virtual kidney models in training for renal cancer surgery, a systematic review. *J Robot Surg.* 2025, 20, 52. <https://doi.org/10.1007/s11701-025-02961-7>
8. Al Majarafi A, Al Busaidi M, Fawzy Kandil M, Al Hadeethi A, Al Mutani M, Al Farii H. The utilization of 3D pelvis model to improve the ability to understand complex anatomy among orthopaedic surgical trainees. *BMC Med Educ.* 2025, 25, 519. <https://doi.org/10.1186/s12909-025-07105-x>

9. Chetan D, Valverde I, Shi-Joon Y. 3D printed models in cardiology training. *JACC Adv.* **2024**, 3(4), 100893. <https://doi.org/10.1016/j.jacadv.2024.100893>
10. Davis FD. Perceived usefulness, perceived ease of use, and user acceptance of information technology. *MIS Q.* **1989**, 13(3), 319-340. <https://doi.org/10.2307/249008>
11. Kalinkara Y, Özdemir O. Anatomy in the metaverse: exploring student technology acceptance through the UTAUT2 model. *Anat Sci Educ.* **2024**, 17(6), 656-670. <https://doi.org/10.1002/ase.2353>
12. Barrows HS. A taxonomy of problem-based learning methods. *Med Educ.* **1986**, 20(6), 481-486. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2923.1986.tb01386.x>
13. Bailón Mieses JA, Jarre Barcia TR, Zamora Pazmiño LI. The relevance of Problem-Based Learning in the development of critical thinking. *Rev Esp Educ Med.* **2025**, 6(5), 681791. <https://revistas.um.es/edumed/article/view/681791>
14. Torres Paez FF, Londoño JA. Contributions of Problem-Based Learning to the achievement of meaningful learning in the teaching of medicine. *Rev Esp Educ Med.* **2024**, 5(4), 619851. <https://doi.org/10.6018/edumed.619851>
15. Zelada Espejo MI, Segura Beltrán F, Margas Cavieres F, Rojas Pino M. Impacto de la impresión 3D en el aprendizaje de estudiantes de medicina: una revisión sistemática. *Rev Esp Educ Med.* **2024**, 5(4), 626811. <https://doi.org/10.6018/edumed.626811>
16. Ampuero Valenzuela IP, Riquelme-Vilches V, Vargas-Zurita E, Araya-Figueroa S, Cozzi-Ahumada R, Riquelme-Bahamondes C, Herrera-Alcaino Á. Influencia de las herramientas tecnológicas en la enseñanza de la morfología en la educación médica: una revisión sistemática. *Rev Esp Educ Med.* **2024**, 5(4), 631071. <https://doi.org/10.6018/edumed.631071>
17. Hecht-López P, Maturana-Arancibia JC, Parra-Villegas E. Nuevos recursos digitales y de impresión 3D para la enseñanza de la anatomía. *Rev Argent Anat Online.* **2023**, 14(1), 1-9.
18. Aiken LR. Content validity and reliability of single items or questionnaires. *Educ Psychol Meas.* **1980**, 40(4), 955-959. <https://doi.org/10.1177/001316448004000419>
19. Kuder GF, Richardson MW. The theory of the estimation of test reliability. *Psychometrika.* **1937**, 2(3), 151-160. <https://doi.org/10.1007/BF02288391>
20. Davis FD, Bagozzi RP, Warshaw PR. User acceptance of computer technology: a comparison of two theoretical models. *Manage Sci.* **1989**, 35(8), 982-1003. <https://doi.org/10.1287/mnsc.35.8.982>
21. Cronbach LJ. Coefficient alpha and the internal structure of tests. *Psychometrika.* **1951**, 16(3), 297-334. <https://doi.org/10.1007/BF02310555>
22. Kerby DS. The simple difference formula: an approach to teaching nonparametric correlation. *Compr Psychol.* **2014**, 3, 11.IT.3.1. <https://doi.org/10.2466/11.IT.3.1>
23. Siegel S. Nonparametric statistics for the behavioral sciences. *McGraw-Hill.* 1956.
24. Declaración de Helsinki. *Gaceta Medica de Mexico* **2001**, 137(4), 391. Available from: <https://www.medigraphic.com/pdfs/gaceta/gm-2001/gm014n.pdf>
25. Council for International Organizations of Medical Sciences (CIOMS). International ethical guidelines for health-related research involving humans. *CIOMS.* **2016**. <https://cioms.ch/wp-content/uploads/2017/01/WEB-CIOMS-EthicalGuidelines.pdf>
26. Valdez GV, González CS, López JLG. Atlas anatómico 3D como recurso didáctico en la enseñanza de la anatomía humana. *Rev Cuba Educ Med Super.* **2025**, 39(1), 1-12. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i2.17304
27. Hidalgo-Cajo B, Hidalgo-Cajo D, Montenegro-Chanalata M, Hidalgo-Cajo I. Augmented reality as a support resource in the teaching-learning process. *Rev Electron Interuniv Form Profr.* **2021**, 24(3), 43-55. <https://doi.org/10.6018/reifop.465451>

