

## Validación de un modelo neuroanatómico en realidad virtual. Nuevas formas de enseñanza

Carlos Hesed Virto-Farfán<sup>1,a</sup>; Alexander Montesinos Cárdenas<sup>2,a,b</sup>; Franklin Miranda Solís<sup>3,a,c</sup>; Lugo Miranda Barriga<sup>3,d</sup>; Carlos Virto<sup>2,a,e</sup>; Cristabel Nilda Rivas Achahui<sup>2,a,f</sup>; Herminia Naveda Cahuana<sup>3,d,g</sup>; Micaela Rosaluz Manchego Jayo<sup>2,h</sup>; Yuri Vargas Jurado<sup>3,h</sup>; Juan Diego Condori Saavedra<sup>3,h</sup>; Luis Alejandro Montesinos Guerra<sup>2,h</sup>

1 Universidad Andina del Cusco, Instituto Científico. Cusco, Perú.

2 Universidad Andina del Cusco, Centro de Investigación en Neurociencias (CENEURO). Cusco, Perú.

3 Universidad Andina del Cusco, Laboratorios de Ciencias Básicas y del Anfiteatro Anatómico. Cusco, Perú.

<sup>a</sup> Médico cirujano; <sup>b</sup> magíster en Docencia Universitaria e Investigación Pedagógica, especialista en cardiología; <sup>c</sup> maestro en Docencia Universitaria; <sup>d</sup> biólogo; <sup>e</sup> magíster en Neurociencias, especialista en psiquiatría; <sup>f</sup> maestra en Salud Ocupacional y Medio Ambiente; <sup>g</sup> doctora en Ciencias de la Salud, maestra en Educación con mención en Educación Superior; <sup>h</sup> estudiante de Medicina Humana.

### RESUMEN

**Objetivo:** Validar un programa de realidad virtual (RV) diseñado para el aprendizaje de neuroanatomía. Para ello, se evaluó su impacto en cuanto a realismo, utilidad, practicidad, disfrute y recomendación. **Materiales y métodos:** Se utilizó un diseño descriptivo e instrumental para validar el programa a través de la evaluación de expertos en neurociencias. Cuarenta y dos profesionales en neurología, neurocirugía y psiquiatría participaron en la validación. Calificaron el sistema según realismo, utilidad, practicidad, disfrute y recomendación mediante un cuestionario estructurado de 13 ítems con escala Likert de cinco puntos. El modelo de RV, desarrollado mediante fotogrametría avanzada, permitió la manipulación interactiva de estructuras cerebrales tridimensionales. Los usuarios utilizaron cascos de RV y controladores manuales, lo que facilitó la exploración detallada de las relaciones anatómicas y funcionales del cerebro. **Resultados:** Los participantes manifestaron un alto nivel de satisfacción general con el sistema y destacaron el realismo de las imágenes (media = 4,76; DE = 0,43) y su utilidad para comprender relaciones tridimensionales complejas (media = 4,78; DE = 0,41). Sin embargo, la facilidad de uso recibió una puntuación menor (media = 4,36; DE = 0,61), lo que sugiere oportunidades de mejora en la interfaz de usuario. El disfrute de la experiencia también obtuvo calificaciones positivas (media = 4,58; DE = 0,51). Asimismo, la mayoría de los profesionales recomendó integrar el sistema en la formación médica (media = 4,64; DE = 0,48) y subrayó su potencial como herramienta complementaria a los métodos tradicionales. **Conclusiones:** El programa de RV validado demostró un impacto significativo como herramienta de aprendizaje en neuroanatomía y proporcionó una experiencia inmersiva que facilita la comprensión de las relaciones espaciales complejas del cerebro. Aunque se identificaron áreas de mejora, especialmente en la facilidad de uso del sistema, los resultados sugieren que esta tecnología puede transformar la formación médica avanzada y proporcionar un enfoque más atractivo, práctico y efectivo. Refinamientos adicionales en el diseño podrían ampliar su accesibilidad y aceptación; por lo tanto, consolidarían su papel en la educación médica moderna.

#### Correspondencia:

Carlos Hesed Virto Farfán  
hesedvirto@gmail.com

Recibido: 29/11/2024

Evaluado: 2/2/2025

Aprobado: 3/2/2025

**Palabras clave:** Neuroanatomía; Realidad Virtual; Educación Médica; Tecnología Educacional; Mapeo Encefálico (Fuente: DeCS BIREME).



Esta obra tiene licencia de Creative Commons. Artículo en acceso abierto. Atribución 4.0 Internacional. (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Copyright © 2025, Revista Horizonte Médico (Lima). Publicado por la Universidad de San Martín de Porres, Perú.

## Validation of a virtual reality model for neuroanatomy learning: new approaches to teaching

### ABSTRACT

**Objective:** To validate a virtual reality (VR) model designed for neuroanatomy learning by evaluating its impact in terms of realism, usefulness, practicality, enjoyment, and recommendation. **Materials and methods:** A descriptive, instrument-validation study was conducted to assess the model through expert judgment in the field of neuroscience. Forty-two professionals in neurology, neurosurgery, and psychiatry participated in the study. The system was rated for realism, usefulness, practicality, enjoyment, and recommendation using a structured 13-item questionnaire based on a five-point Likert scale. The VR model, developed through advanced photogrammetry, enabled

interactive manipulation of three-dimensional (3D) brain structures. Participants employed VR headsets and hand controllers to explore, in detail, the anatomical and functional relationships within the brain. **Results:** Participants reported high overall satisfaction with the system, emphasizing both the realism of the images (mean = 4.76, SD = 0.43) and the system's usefulness in understanding complex 3D relationships (mean = 4.78, SD = 0.41). However, practicality received a slightly lower score (mean = 4.36, SD = 0.61), suggesting opportunities for improvement in the user interface. Enjoyment of the experience also received positive ratings (mean = 4.58, SD = 0.51). In addition, most professionals recommended integrating the system into medical education (mean = 4.64, SD = 0.48), highlighting its potential as a complementary tool to traditional teaching methods. **Conclusions:** The validated VR model proved to be a valuable tool for neuroanatomy learning, providing an immersive experience that facilitates the understanding of the complex spatial relationships within the brain. Although areas for improvement were identified, particularly regarding system practicality, the findings suggest that this technology has the potential to transform advanced medical education by offering a more engaging, practical, and effective approach. Further refinements in design could enhance its accessibility and acceptance, thereby solidifying its role in contemporary medical education.

**Keywords:** Neuroanatomy; Virtual Reality; Education, Medical; Educational Technology; Brain Mapping (Source: MeSH NLM).

## INTRODUCCIÓN

La neuroanatomía es una de las disciplinas más complejas dentro de la educación médica, dado que requiere la comprensión de relaciones tridimensionales (3D) intrincadas en el sistema nervioso central y periférico, así como aspectos macro y microscópicos de las estructuras neurales <sup>(1,2)</sup>. Los métodos de enseñanza tradicionales, basados en textos y diagramas bidimensionales, enfrentan limitaciones para transmitir estas características, lo que dificulta la formación integral de los estudiantes. En este contexto, la realidad virtual (RV) ha emergido como una herramienta educativa innovadora que ofrece experiencias inmersivas y dinámicas, lo que ha permitido a los estudiantes explorar modelos anatómicos tridimensionales en un entorno interactivo <sup>(3,4)</sup>.

Los avances recientes en tecnologías de modelado 3D, como la fotogrametría y las tomografías computarizadas (TC), han permitido la creación de representaciones detalladas de estructuras neuroanatómicas, lo que ha potenciado la comprensión espacial y la retención de conocimientos <sup>(5,6)</sup>. Además, se ha demostrado que los entornos virtuales fomentan la participación activa de los estudiantes, mejoran su motivación y se adaptan a diversos estilos de aprendizaje mediante la manipulación interactiva de objetos 3D <sup>(7)</sup>. La pandemia de la COVID-19 impulsó la integración de la RV en los programas educativos, lo cual ofreció una alternativa eficaz frente a las limitaciones del aprendizaje remoto <sup>(8)</sup>.

La incorporación de la RV en la enseñanza de la neuroanatomía ha mostrado beneficios significativos, incluyendo un mayor compromiso estudiantil y resultados de aprendizaje superiores en comparación con los métodos tradicionales <sup>(9)</sup>. Sin embargo, su adopción enfrenta desafíos como los altos costos de *hardware* y *software*, la falta de estándares para el diseño y evaluación de programas, así como la necesidad de validar su eficacia pedagógica <sup>(10)</sup>. Además, la carga cognitiva asociada con el uso inicial de tecnologías inmersivas puede afectar el rendimiento y la retención de habilidades, lo que subraya la importancia de diseñar programas que minimicen estas limitaciones <sup>(11)</sup>.

En este contexto, la validación de programas de RV es crucial para garantizar su efectividad como herramienta educativa y su viabilidad en la enseñanza de neuroanatomía.

El objetivo de este estudio fue validar un programa de realidad virtual diseñado para el aprendizaje de neuroanatomía. Para ello, se evaluó su impacto en cuanto a realismo, utilidad, practicidad, disfrute y recomendación.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### *Diseño y población de estudio*

Se realizó una evaluación, por parte de expertos, utilizando el modelo de planilla para la validez de contenido de instrumentos propuesto por Mergen *et al.* <sup>(5)</sup>. En la evaluación participaron 42 profesionales seleccionados por su perfil docente y especialidad en neurociencias (médicos neurólogos, neurocirujanos y psiquiatras) provenientes de los hospitales nacionales Adolfo Guevara Velasco, Hospital Regional del Cusco y Hospital Antonio Lorena del Cusco.

### *Variables y mediciones*

Con respecto al instrumento de evaluación, se diseñó un cuestionario estructurado compuesto por 13 ítems distribuidos en cinco categorías:

- Realismo: evaluación de la representación anatómica y percepción de profundidad.
- Utilidad: valoración del impacto del modelo en la comprensión de relaciones tridimensionales.
- Practicidad: evaluación de la facilidad de uso de la interfaz y comandos.
- Disfrute: grado de satisfacción y motivación generado por la experiencia.
- Recomendación: opinión sobre la integración del sistema en la formación médica.

Cada ítem fue valorado en una escala de Likert de cinco puntos (1 = totalmente en desacuerdo; 5 = totalmente de acuerdo).

En relación con el desarrollo del modelo de neuroanatomía en RV, se utilizó fotogrametría avanzada para generar un modelo

tridimensional detallado del cerebro humano que integra su configuración interna y externa. Este modelo se diseñó para manipularse en un entorno de RV mediante controladores manuales con funciones específicas. Los usuarios pudieron rotar, trasladar y escalar los modelos utilizando comandos intuitivos integrados en los controladores:

- Manipulación: El posicionamiento y la rotación de los modelos anatómicos se lograron ajustando la orientación y dirección del controlador mientras se presionaban los botones analógicos.
- Escalado: Las funciones de acercamiento y alejamiento se realizaron mediante movimientos simultáneos de los controladores hacia fuera o hacia dentro, respectivamente, mientras se mantenía presionado el botón analógico.
- Perspectiva: El uso de cascos de RV permitió la evaluación tridimensional fluida y precisa de las estructuras anatómicas desde diferentes perspectivas neuroquirúrgicas.

Los participantes interactuaron con el *software* en sesiones individuales de 20 a 30 minutos. Posteriormente, completaron el cuestionario de validación. Se supervisaron la manipulación del modelo y la navegación en RV para garantizar la correcta implementación de las funciones del sistema.

#### **Análisis estadístico**

Los datos obtenidos se analizaron mediante medidas de tendencia central (medias) y dispersión (desviaciones estándar). Se calcularon estadísticas descriptivas para cada ítem. Adicionalmente, se evaluó la distribución porcentual de las respuestas para un análisis cualitativo complementario.

#### **Consideraciones éticas**

El estudio contó con la aprobación del Comité de Ética de la Universidad Andina del Cusco, de conformidad con la Resolución N.º 183-CU-2023-UAC, de fecha 8 de mayo de 2023.

## **RESULTADOS**

#### **Análisis descriptivo de las respuestas**

El sistema de RV fue evaluado por 42 médicos y residentes especializados en neurocirugía, neurología y psiquiatría de tres hospitales de referencia en Cusco. Los resultados de la validación interna se presentan de manera detallada en la Tabla 1, que incluye los valores de media y desviación estándar para cada ítem evaluado.

#### 1. Realismo:

- El ítem “El modelo digital 3D muestra las estructuras anatómicas de forma realista” obtuvo una media de 4,762 (DE = 0,431), lo que refleja una percepción altamente positiva sobre la fidelidad visual y anatómica de los modelos desarrollados.

- La capacidad de distinguir diferentes niveles de profundidad en los modelos anatómicos fue el ítem mejor valorado, con una media de 4,786 (DE = 0,415).
- La posibilidad de experimentar diferentes perspectivas anatómicas recibió una puntuación ligeramente inferior (M = 4,643; DE = 0,485), aunque permaneció en un nivel destacado dentro del rango superior.

#### 2. Utilidad:

- Los participantes asignaron una calificación alta a la utilidad del sistema para comprender las relaciones tridimensionales entre las estructuras anatómicas (M = 4,786; DE = 0,415), lo que indica que el sistema de RV fue percibido como un recurso didáctico innovador.
- En comparación con clases de anatomía bidimensional (2D), la RV obtuvo una calificación de 4,619 (DE = 0,492). Se destaca su capacidad para ofrecer una experiencia de aprendizaje más atractiva y eficaz.

#### 3. Practicidad:

- Los participantes evaluaron la facilidad de uso de la interfaz y los comandos de navegación con una media de 4,357 (DE = 0,618). Esta fue la categoría con mayor dispersión en las respuestas, lo que sugiere áreas potenciales de mejora.
- La experiencia de movimiento fluido alrededor de las muestras anatómicas obtuvo un puntaje medio de 4,214 (DE = 0,565). Esto reafirma la funcionalidad del sistema, aunque con margen para una optimización.

#### 4. Disfrute:

- El disfrute de la experiencia de la RV recibió una valoración alta (M = 4,667; DE = 0,612), lo que indica la capacidad del sistema para generar una experiencia inmersiva positiva.
- El ítem “Esta experiencia despertó mi interés por el estudio de la neuroanatomía quirúrgica” también fue bien evaluado, con una media de 4,619 (DE = 0,492). Esto destaca el impacto motivacional del sistema.

#### 5. Recomendación:

- La recomendación de integrar el sistema en la formación de estudiantes y residentes de Medicina fue ampliamente respaldada (M = 4,643; DE = 0,485).
- De manera similar, el impacto potencial del sistema en la formación global de neuroanatomía se calificó con una media de 4,619 (DE = 0,492), lo que confirma la percepción de su utilidad como herramienta educativa.

Tabla 1. Media y desviación estándar para cada ítem de la validación interna

	Pregunta	Media	Desviac. estándar
Realismo	El modelo digital 3D muestra las estructuras anatómicas de forma realista.	4,762	0,431
	Pude distinguir diferentes niveles de profundidad en los modelos anatómicos.	4,786	0,415
	Pude experimentar diferentes perspectivas anatómicas.	4,643	0,485
Utilidad	Los modelos 3D me ayudaron a comprender las relaciones tridimensionales de las estructuras anatómicas.	4,786	0,415
	En comparación con una clase de anatomía tradicional (2D), la RV ofrece una experiencia de aprendizaje más atractiva.	4,619	0,492
Practicidad	La interfaz de usuario y los comandos de navegación eran fáciles de usar.	4,357	0,618
	Pude moverme alrededor de las muestras anatómicas sin problemas.	4,214	0,565
Disfrute	Me gustó la experiencia de RV.	4,667	0,612
	Esta experiencia despertó mi interés por el estudio de la neuroanatomía quirúrgica.	4,619	0,492
	No experimenté dolores de cabeza, fatiga visual ni mareos durante el ejercicio de RV.	4,429	0,59
Recomendación	Este sistema debería formar parte de la formación de estudiantes y residentes de Medicina.	4,643	0,485
	Los cursos con muestras virtuales pueden ser beneficiosos para la formación médica.	4,643	0,485
	Este sistema podría tener un gran impacto en la formación global en neuroanatomía.	4,619	0,492

### Distribución de respuestas

La distribución porcentual de las evaluaciones cualitativas se presenta en la Figura 1, donde se evidencia que el 62 % de los participantes seleccionaron la puntuación más alta (5) en la mayoría de los ítems evaluados. Las respuestas restantes

se concentraron principalmente en la categoría “de acuerdo” (puntaje 4), mientras que menos del 10 % optaron por valores intermedios (puntajes 3 o 2). No se registraron respuestas en la categoría de desacuerdo total (puntaje 1).

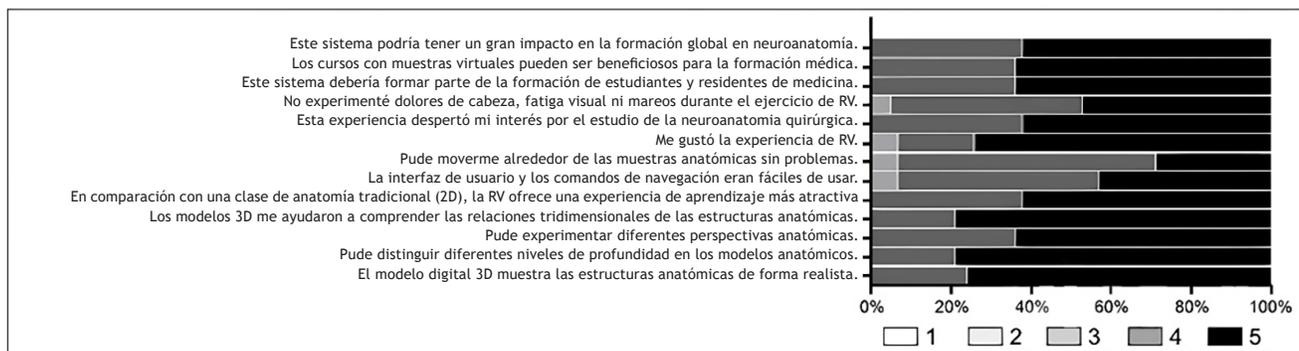


Figura 1. Evaluaciones cualitativas del software de RV por 42 médicos asistentes y residentes de neurocirugía, neurología y psiquiatría

RV: realidad virtual; 2D: bidimensional; 3D: tridimensional.

### **Imágenes y representaciones anatómicas**

En cuanto al desarrollo del modelo tridimensional, la representación gráfica de los cerebros utilizados en el proceso de fotogrametría se muestra en la Figura 2, que ilustra las estructuras anatómicas empleadas para generar los modelos

digitales. Este material permitió una representación precisa de las configuraciones interna y externa del cerebro, lo que facilitó la evaluación visual desde múltiples perspectivas. El modelo tridimensional en realidad virtual puede verse en el siguiente enlace [https://youtu.be/dct9AUrzF\\_U](https://youtu.be/dct9AUrzF_U).



**Figura 2.** Materiales de neuroanatomía usados para la fotogrametría y desarrollo del software

El análisis de los valores de media y desviación estándar para cada ítem confirma una tendencia consistente hacia la aceptación y satisfacción con el sistema de RV. Todas las desviaciones estándar fueron inferiores a 0,7, lo que indica una alta homogeneidad en las respuestas. Los ítems relacionados con el realismo y la utilidad fueron los que obtuvieron una valoración más alta, con puntajes medios cercanos a 4,8,

mientras que los indicadores de practicidad, aunque bien evaluados, presentaron respuestas más heterogéneas.

### **DISCUSIÓN**

El presente estudio evaluó la eficacia, usabilidad y aceptación de un sistema de RV diseñado para la enseñanza de neuroanatomía.

Los resultados obtenidos destacan el potencial de este sistema para complementar y mejorar los métodos tradicionales de enseñanza, especialmente en áreas que requieren comprensión tridimensional de estructuras complejas como el cerebro humano.

**Realismo y representación anatómica:** Los resultados demuestran que los participantes valoraron significativamente el realismo de los modelos 3D, lo que es consistente con la importancia de una representación visual precisa en el aprendizaje anatómico. Los altos puntajes en los ítems relacionados con la percepción de profundidad ( $M = 4,786$ ;  $DE = 0,415$ ) y la capacidad de experimentar diferentes perspectivas anatómicas ( $M = 4,643$ ;  $DE = 0,485$ ) destacan la capacidad del sistema para simular configuraciones anatómicas de manera altamente detallada. Esto sugiere que el uso de fotogrametría avanzada y técnicas de modelado digital logró satisfacer las expectativas de los usuarios en cuanto a calidad visual y fidelidad anatómica.

**Utilidad educativa:** El sistema mostró ser útil no solo como herramienta de visualización, sino también como un medio para facilitar la comprensión de relaciones espaciales entre estructuras anatómicas ( $M = 4,786$ ;  $DE = 0,415$ ). Además, el contraste favorable respecto a las clases tradicionales en 2D ( $M = 4,619$ ;  $DE = 0,492$ ) respalda su capacidad para mejorar la experiencia de aprendizaje. Estos hallazgos coinciden con investigaciones previas que han señalado que la inmersión en entornos virtuales puede mejorar la retención de conocimientos y la comprensión conceptual en disciplinas médicas.

**Practicidad y navegación:** Aunque la interfaz fue evaluada positivamente ( $M = 4,357$ ;  $DE = 0,618$ ), este fue el ítem con mayor variabilidad en las respuestas, lo que sugiere la necesidad de optimizar ciertos aspectos del diseño y la interacción del sistema. Si bien los usuarios lograron moverse libremente en el entorno virtual ( $M = 4,214$ ;  $DE = 0,565$ ), esta área presentó las puntuaciones más bajas, lo que indica oportunidades para mejorar la experiencia del usuario. Incorporar interfaces más intuitivas y comandos simplificados podría aumentar la accesibilidad del sistema para usuarios menos familiarizados con la tecnología de RV.

**Disfrute y motivación:** Los altos puntajes relacionados con la satisfacción y el disfrute ( $M = 4,667$ ;  $DE = 0,612$ ) reflejan que el sistema no solo es funcional, sino también atractivo para los usuarios. Este hallazgo es crucial, ya que el disfrute en experiencias educativas puede mejorar la motivación intrínseca, lo que a su vez puede influir en el compromiso y la retención de conocimientos. Además, el hecho de que la experiencia despertara interés por el estudio de la neuroanatomía quirúrgica ( $M = 4,619$ ;  $DE = 0,492$ ) sugiere que la RV tiene el potencial de inspirar a los estudiantes hacia especializaciones específicas.

**Recomendación e impacto educativo:** La alta recomendación del sistema como parte de la formación médica ( $M = 4,643$ ;  $DE = 0,485$ ) y su potencial para impactar la educación global en neuroanatomía ( $M = 4,619$ ;  $DE = 0,492$ ) indican un consenso

generalizado sobre la utilidad del sistema en contextos educativos. Estas percepciones refuerzan la idea de que la RV puede ser un complemento efectivo a los métodos tradicionales, especialmente en áreas donde la interacción con modelos anatómicos reales es limitada.

La integración de la RV en la educación neuroquirúrgica y las neurociencias representa un enfoque prometedor para optimizar el aprendizaje y la simulación de procedimientos. Como se ha señalado, la RV se ha establecido como un recurso complementario eficaz para la enseñanza, especialmente en la comprensión de la compleja arquitectura ósea del cráneo. Estudios han demostrado que los modelos de RV pueden competir con métodos tradicionales como la disección cadavérica y los atlas anatómicos para la enseñanza de la anatomía base del cráneo. Esto los posiciona como una herramienta valiosa para el aprendizaje de la neuroanatomía y el desarrollo de habilidades quirúrgicas <sup>(12)</sup>.

Los usuarios de sistemas de RV han identificado desafíos relacionados con la complejidad de la interfaz y la sobrecarga de información, sin embargo, la percepción general ha sido positiva. Se destaca el potencial de la RV para fomentar un aprendizaje personalizado mediante la exploración no lineal de estructuras anatómicas. Este enfoque favorece la participación activa y la retención de información compleja <sup>(12,13)</sup>. Además, los avances tecnológicos recientes han ampliado el alcance de la RV en las neurociencias, desde la formación de residentes hasta la gestión del dolor agudo y la retroalimentación intraoperatoria. La incorporación de retroalimentación háptica en los entornos inmersivos refuerza su utilidad como una herramienta segura y versátil para la educación y el cuidado de los pacientes <sup>(14)</sup>.

La RV tiene el potencial de transformar la formación neuroquirúrgica y refleja la necesidad de enfoques pedagógicos innovadores en la educación médica. Sin embargo, para maximizar su impacto, es esencial abordar las limitaciones detectadas en los sistemas actuales. La mejora continua de las interfaces de usuario y la presentación de contenidos es fundamental para optimizar la usabilidad y la satisfacción de los aprendices. Las futuras herramientas educativas de RV deben incorporar retroalimentación de los usuarios para perfeccionar la experiencia educativa y alinearse con las mejores prácticas en entornos de aprendizaje inmersivos <sup>(15)</sup>.

La enseñanza de la neuroanatomía, una disciplina esencial en la educación médica enfrenta desafíos significativos debido a la complejidad estructural y funcional del cerebro. Los métodos tradicionales de aprendizaje, basados en imágenes bidimensionales y modelos estáticos, presentan limitaciones para transmitir las relaciones espaciales intrincadas de las estructuras cerebrales <sup>(16)</sup>. En respuesta a estas dificultades, la RV ha surgido como una herramienta innovadora que ofrece experiencias inmersivas e interactivas, lo que permite una comprensión más profunda de la neuroanatomía y mejora la retención del conocimiento <sup>(17)</sup>.

Aunque inicialmente creada para el entretenimiento, la RV ha avanzado hacia la educación médica y ha sobresalido en el estudio de la neuroanatomía, gracias a su capacidad para superar los métodos tradicionales <sup>(18)</sup>. Plataformas como SONIA (immerSive custOmizable Neuro learning plAtform) han transformado la manera en que los estudiantes y profesionales de la salud interactúan con las estructuras cerebrales. Dichas plataformas ofrecen modelos tridimensionales que facilitan el aprendizaje personalizado y la exploración detallada de redes anatómicas y funcionales <sup>(19)</sup>. Estudios recientes han demostrado que la RV no solo mejora los resultados del aprendizaje, sino que también aumenta la satisfacción y la motivación de los estudiantes <sup>(20)</sup>.

A pesar de sus beneficios, la implementación de RV en la educación presenta desafíos, como el alto costo de los equipos, la necesidad de integración curricular adecuada y la superación de barreras tecnológicas, incluyendo problemas como el cibermareo <sup>(21)</sup>. Sin embargo, el avance continuo en las tecnologías de RV y su validación a través de estudios sistemáticos son fundamentales para establecer su eficacia como herramienta educativa estándar en neuroanatomía <sup>(22)</sup>.

La integración de tecnologías como la RV y la realidad aumentada (RA) ha transformado la enseñanza de la neuroanatomía y ha ofrecido soluciones innovadoras frente a las limitaciones de los métodos tradicionales. Modelos tridimensionales generados mediante fotogrametría permiten una experiencia inmersiva que mejora la comprensión espacial, como se demostró en estudiantes que interactuaron con cerebros humanos virtuales: obtuvieron mejores resultados en pruebas teóricas y prácticas en comparación con métodos tradicionales <sup>(23)</sup>. De igual forma, la implementación de la RV y la RA en la capacitación neuroquirúrgica ha permitido a los residentes explorar la anatomía de las fibras de sustancia blanca desde diferentes perspectivas, lo que ha fomentado una mejor preparación para procedimientos complejos <sup>(24)</sup>. Estas tecnologías también mostraron un impacto significativo en estudiantes cuyos programas fueron interrumpidos por eventos como terremotos. Mejoraron las tasas de respuestas correctas en evaluaciones tras su interacción con modelos virtuales <sup>(25)</sup>. En el ámbito educativo pregrado, la incorporación de una práctica de disección virtual mostró resultados positivos en la participación y el interés de los estudiantes, lo que subrayó la viabilidad de estas tecnologías en entornos académicos con recursos limitados <sup>(26)</sup>.

En el ámbito de la neurocirugía, las aplicaciones mixtas de RV y RA han demostrado ser particularmente útiles en la planificación de procedimientos como la resección de tumores cerebrales y el tratamiento de aneurismas. La precisión y la seguridad quirúrgica mejoraron gracias a la superposición de información clave en tiempo real <sup>(27)</sup>. Este avance se complementa con la creación de laboratorios neuroquirúrgicos virtuales que simulan entornos operativos completos, lo que brinda acceso global a recursos educativos que anteriormente eran limitados, como modelos de disección cadavérica digital <sup>(28)</sup>. Además, el desarrollo de modelos tridimensionales de disección

de fibras de sustancia blanca, disponibles gratuitamente en plataformas digitales, ha incrementado la accesibilidad al aprendizaje anatómico de alta calidad <sup>(29)</sup>. Sin embargo, la adopción de la RV sigue siendo desigual. Por ejemplo, en Australia y Nueva Zelanda, solo un 36 % de las universidades utiliza RV en sus programas de neuroanatomía. Esto refleja desafíos relacionados con la variabilidad en el currículo y la implementación tecnológica <sup>(30)</sup>. No obstante, la aceptación de estas herramientas, tanto por estudiantes de pregrado como de posgrado, subraya la necesidad de continuar optimizando su usabilidad y de que sean adaptadas a las necesidades educativas <sup>(31)</sup>. En suma, estos estudios resaltan el potencial transformador de la RV y la RA en la educación médica, al poner de relieve su capacidad para superar barreras tradicionales y fomentar una formación más dinámica y efectiva.

En conclusión, el sistema de RV evaluado demostró ser una herramienta altamente efectiva, motivadora y aceptada para la enseñanza de neuroanatomía. Su capacidad para representar estructuras anatómicas de manera realista, facilitar la comprensión tridimensional y motivar a los usuarios refuerza su potencial como complemento a los métodos tradicionales de enseñanza. Con mejoras específicas en la interfaz y una evaluación más amplia, este sistema podría consolidarse como un recurso estándar en la formación médica avanzada.

**Agradecimientos:** A Michael Net Oros, por su dedicación y experticia, fundamentales en el desarrollo del *software* que hizo posible este estudio.

**Contribución de autoría:** HVF, AMC, FMS, LMB, CV, CNRA, HNC, MRMJ, YVJ, JDCS y LAMG recopilaron la información, analizaron, revisaron y optimizaron el manuscrito. Todos los autores aprobaron la versión final del artículo.

**Fuentes de financiamiento:** La Universidad Andina del Cusco financió este artículo mediante la Resolución N. ° 183-CU-2023-UAC, con fecha 8 de mayo de 2023.

**Conflicto de intereses:** Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Obrero-Gaitán E, Nieto-Escamez FA, Zagalaz-Anula N, Cortés-Pérez I. An innovative approach for online neuroanatomy and neuror rehabilitation teaching based on 3D virtual anatomical models using leap motion controller during COVID-19 pandemic. *Front Psychol* [Internet]. 2021;12:590196. Disponible en: <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2021.590196>
2. Kapp K. 3 instructional design strategies for virtual reality learning [Internet]. *eLearning Industry*; 2021. Disponible en: <https://elearningindustry.com/instructional-design-strategies-virtual-reality-learning>
3. Gallardo K, Rivera N. Evaluating virtual reality as a learning resource: an insight into user experience, usability and learning experience [Internet]. En: *eLML 2020 - The Twelfth International Conference on Mobile, Hybrid, and On-line Learning*; 2020; Valencia, Spain. Disponible en: [https://personales.upv.es/thinkmind/dl/conferences/elml/elml\\_2020/elml\\_2020\\_3\\_80\\_50056.pdf](https://personales.upv.es/thinkmind/dl/conferences/elml/elml_2020/elml_2020_3_80_50056.pdf)

4. Edify. Neuroanatomy [Internet]. United Kingdom: Edify and University of East Anglia; 2025. Disponible en: <https://www.edify.ac/use-cases/neuroanatomy>
5. Mergen M, Graf N, Meyerheim M. Reviewing the current state of virtual reality integration in medical education - a scoping review. *BMC Med Educ* [Internet]. 2024;24(1):788. Disponible en: <https://doi.org/10.1186/s12909-024-05777-5>
6. Udeozor C, Chan P, Russo Abegão F, Glassey J. Game-based assessment framework for virtual reality, augmented reality and digital game-based learning. *Int J Educ Technol High Educ* [Internet]. 2023;20:36. Disponible en: <https://doi.org/10.1186/s41239-023-00405-6>
7. John C. UI professor brings neuroanatomy to life with VR technology [Internet]. United States of America: The Daily Illini; 2024. Disponible en: [https://dailyillini.com/life\\_and\\_culture-stories/2024/11/26/ui-neuroanatomy-vr-technology/](https://dailyillini.com/life_and_culture-stories/2024/11/26/ui-neuroanatomy-vr-technology/)
8. Gutiérrez F, Pierce J, Vergara VM, Coulter R, Saland L, Caudell TP, et al. The effect of degree of immersion upon learning performance in virtual reality simulations for medical education. *Stud Health Technol Inform* [Internet]. 2007;125:155-60. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/17377256>
9. Mergen M, Meyerheim M, Graf N. Towards integrating virtual reality into medical curricula: a single center student survey. *Educ Sci* [Internet]. 2023;13(5):477. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/educsci13050477>
10. Bracq M-S, Michinov E, Jannin P. Virtual reality simulation in nontechnical skills training for healthcare professionals: a systematic review. *Simul Healthc* [Internet]. 2019;14(3):188-94. Disponible en: <https://doi.org/10.1097/SIH.0000000000000347>
11. Walter S, Speidel R, Hann A, Leitner J, Jerg-Bretzke L, Kropp P, et al. Skepticism towards advancing VR technology - student acceptance of VR as a teaching and assessment tool in medicine. *GMS J Med Educ* [Internet]. 2021;38(6):Doc100. Disponible en: <https://doi.org/10.3205/zma001496>
12. Peters MDJ, Marnie C, Tricco AC, Pollock D, Munn Z, Alexander L, et al. Updated methodological guidance for the conduct of scoping reviews. *JBI Evid Synth* [Internet]. 2020;18(10):2119-26. Disponible en: <https://doi.org/10.1124/JBIES-20-00167>
13. Stern C, Lizarondo L, Carrier J, Godfrey C, Rieger K, Salmond S, et al. Methodological guidance for the conduct of mixed methods systematic reviews. *JBI Evid Synth* [Internet]. 2020;18(10):2108-18. Disponible en: <https://doi.org/10.1124/JBISRI-D-19-00169>
14. Guedes HG, Câmara Costa Ferreira ZM, Ribeiro de Sousa Leão L, Souza Montero EF, Otoch JP, Artifon ELA. Virtual reality simulator versus box-trainer to teach minimally invasive procedures: a meta-analysis. *Int J Surg* [Internet]. 2019;61:60-8. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ijssu.2018.12.001>
15. Bartlett JD, Lawrence JE, Stewart ME, Nakano N, Khanduja V. Does virtual reality simulation have a role in training trauma and orthopaedic surgeons? *Bone Joint J* [Internet]. 2018;100-B(5):559-65. Disponible en: <https://doi.org/10.1302/0301-620X.100B5.BJJ-2017-1439>
16. Lohre R, Warner JJP, Athwal GS, Goel DP. The evolution of virtual reality in shoulder and elbow surgery. *JSES Int* [Internet]. 2020;4(2):215-23. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jseint.2020.02.005>
17. Bakshi SK, Lin SR, Ting DSW, Chiang MF, Chodosh J. The era of artificial intelligence and virtual reality: transforming surgical education in ophthalmology. *Br J Ophthalmol* [Internet]. 2021;105(10):1325-8. Disponible en: <https://doi.org/10.1136/bjophthalmol-2020-316845>
18. Harpham-Lockyer L, Laskaratos FM, Berlingieri P, Epstein O. Role of virtual reality simulation in endoscopy training. *World J Gastrointest Endosc* [Internet]. 2015;7(18):1287-94. Disponible en: <https://doi.org/10.4253/wjge.v7.i18.1287>
19. Lohre R, Warner JJP, Morrey BR, Athwal GS, Morrey ME, Mazzocca AD, et al. Mitigating surgical skill decay in orthopaedics using virtual simulation learning. *J Am Acad Orthop Surg Glob Res Rev* [Internet]. 2021;5(10):e21.00193. Disponible en: <https://doi.org/10.5435/JAOSGlobal-D-21-00193>
20. Yi WS, Rouhi AD, Duffy CC, Ghanem YK, Williams NN, Dumon KR. A systematic review of immersive virtual reality for nontechnical skills training in surgery. *J Surg Educ* [Internet]. 2024;81(1):25-36. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jsurg.2023.11.012>
21. Campbell K, Taylor V, Douglas S. Effectiveness of online cancer education for nurses and allied health professionals; a systematic review using Kirkpatrick evaluation framework. *J Cancer Educ* [Internet]. 2019;34(2):339-56. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s13187-017-1308-2>
22. Jallad ST, Işık B. The effectiveness of virtual reality simulation as learning strategy in the acquisition of medical skills in nursing education: a systematic review. *Ir J Med Sci* [Internet]. 2022;191(3):1407-26. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11845-021-02695-z>
23. Aridan N, Bernstein-Eliav M, Gamzo D, Schmeidler M, Tik N, Tavor I. Neuroanatomy in virtual reality: development and pedagogical evaluation of photogrammetry-based 3D brain models. *Anat Sci Educ* [Internet]. 2024;17(2):239-48. Disponible en: <https://doi.org/10.1002/ase.2359>
24. Aydin SO, Barut O, Yılmaz MO, Sahin B, Akyoldas G, Akgun MY, et al. Use of 3-dimensional modeling and augmented/virtual reality applications in microsurgical neuroanatomy training. *Oper Neurosurg (Hagerstown)* [Internet]. 2023;24(3):318-23. Disponible en: <https://doi.org/10.1227/ons.0000000000000524>
25. Gurses ME, Gökalp E, Gecici NN, Gungor A, Berker M, Ivan ME, et al. Creating a neuroanatomy education model with augmented reality and virtual reality simulations of white matter tracts. *J Neurosurg* [Internet]. 2024;141(3):865-74. Disponible en: <https://doi.org/10.3171/2024.2.JNS2486>
26. Broomell APR, Allison M, Ellern GJD. Feasibility and utility of a virtual reality laboratory exercise in an undergraduate neuroscience course. *J Undergrad Neurosci Educ* [Internet]. 2022;20(3):A346-A352. Disponible en: <https://doi.org/10.59390/ZYCY4696>
27. Najera E, Patrick H, Natour A, Lockard G, Samy RN, Jean WC. Virtual and augmented reality in neurosurgery. *Adv Exp Med Biol* [Internet]. 2024;1462:375-82. Disponible en: [https://doi.org/10.1007/978-3-031-64892-2\\_22](https://doi.org/10.1007/978-3-031-64892-2_22)
28. Erol G, Güngör A, Sevgi UT, Gülsuna B, Doğruel Y, Emmez H, et al. Creation of a microsurgical neuroanatomy laboratory and virtual operating room: a preliminary study. *Neurosurg Focus* [Internet]. 2024;56(1):E6. Disponible en: <https://doi.org/10.3171/2023.10.FOCUS23638>
29. Gurses ME, Gungor A, Gökalp E, Hanalioglu S, Karatas Okumus SY, Tatar I, et al. Three-dimensional modeling and augmented and virtual reality simulations of the white matter anatomy of the cerebrum. *Oper Neurosurg (Hagerstown)* [Internet]. 2022;23(5):355-66. Disponible en: <https://doi.org/10.1227/ons.0000000000000361>
30. Newman HJ, Meyer AJ, Carr SE. Neuroanatomy teaching in Australian and New Zealand medical schools. *World Neurosurg* [Internet]. 2021;149:e217-e24. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2021.02.048>
31. Sumunar DSEW, Stathakarou N, Davoody N. User acceptance of neuroanatomy virtual reality course: contrasting views between undergraduate and postgraduate students. *Health Informatics J* [Internet]. 2024;30(2):14604582241260601. Disponible en: <https://doi.org/10.1177/14604582241260601>