

Simulador de realidad virtual para la enseñanza de la anatomía esquelética en ingeniería biomédica

Virtual reality simulator for teaching skeletal anatomy in biomedical engineering

-Fecha de recepción: 09-11-2025 -Fecha de aceptación: 18-11-2025 -Fecha de publicación: 12-01-2026

Francisco Vázquez-Guzmán¹
TecNM /I.T.Tehuacán, Puebla, México
francisco.vg@tehuacan.tecnm.mx
<https://orcid.org/0000-0002-3886-4774>

Liliana Elena Olguín-Gil²
TecNM/I.T.Tehuacán, Puebla, México
lilianaelena.og@tehuacan.tecnm.mx
<https://orcid.org/0000-0003-4649-1434>

Eduardo Vázquez-Zayas³
TecNM /I.T.Tehuacán, Puebla, México
eduardo.vz@tehuacan.tecnm.mx
<https://orcid.org/0000-0002-6534-5582>

Juan Carlos Hernández Trujillo⁴
TecNM /I.T.Tehuacán, Puebla, México
L20361075@tehuacan.tecnm.mx
<https://orcid.org/0009-0002-0139-6855>

Resumen

La enseñanza de la anatomía esquelética en Ingeniería Biomédica enfrenta limitaciones debido a la falta de acceso a herramientas interactivas. Este artículo tiene como objetivo presentar el desarrollo y la evaluación de un simulador de realidad virtual (RV) para mejorar la enseñanza de la organización esquelética humana, utilizando las herramientas de código abierto Unity y Blender, y el hardware Oculus Quest 2. La metodología utilizada para el desarrollo del simulador fue la metodología Scrum, donde mediante ciclos cortos de trabajo o sprints se incluyó el modelado anatómico en 3D y el desarrollo de la interfaz en Unity. La metodología utilizada para la evaluación de usabilidad, utilidad y aceptación del simulador fue una investigación de campo evaluativa con un enfoque cualitativo con un alcance descriptivo. Los resultados mostraron que el simulador fue percibido como inmersivo, intuitivo y útil como complemento en el aula, facilitando la retención del conocimiento. Se concluye que la RV representa una alternativa viable para

instituciones con recursos limitados, alineándose con los principios de la Industria 4.0 y la Educación 4.0, apostando a la innovación educativa en las ciencias de la salud.

Palabras clave

Realidad virtual, educación, anatomía esquelética.

Abstract

The teaching of skeletal anatomy in Biomedical Engineering faces limitations due to a lack of access to interactive tools. This article aims to present the development and evaluation of a virtual reality (VR) simulator to improve the teaching of human skeletal organization, using the open-source tools Unity and Blender, and the Oculus Quest 2 hardware. The methodology used for the simulator's development was Scrum, where short work cycles or sprints included 3D anatomical modeling and interface development in Unity. The methodology used to evaluate the simulator's usability, utility, and acceptance was evaluative field research with a qualitative approach and a descriptive scope. The results showed that the simulator was perceived as immersive, intuitive, and useful as a classroom complement, facilitating knowledge retention. It is concluded that VR represents a viable alternative for institutions with limited resources, aligning with the principles of Industry 4.0 and Education 4.0, and promoting educational innovation in the health sciences.

Keywords

Virtual reality, education, skeletal anatomy.

Introducción

Los recientes avances en la educación médica basada en RV han demostrado el potencial de las tecnologías inmersivas para abordar las limitaciones de los métodos tradicionales. Por ejemplo, Kadri et al. (2024) publicaron un estudio donde observaron que la RV mejora los resultados académicos, reduciendo la curva de aprendizaje en comparación con los métodos tradicionales. En otro estudio, Neyem et al. (2024) muestran que la incorporación de la RV incrementa la participación de los estudiantes y mejora la comprensión de los sistemas anatómicos, dando cobertura a un gran número de estudiantes. Según la publicación de UCAM (2024), las prácticas académicas con RV y Realidad Aumentada (RA) mejoraron un 70% en comparación con las clases ordinarias en relación al entendimiento de conceptos abstractos y al desarrollo de competencias para la resolución de problemas.

A la vista de las ventajas significativas que pudieran demostrarse, persiste una brecha en la disponibilidad de plataformas de aprendizaje de este tipo que satisfagan las necesidades de los estudiantes. Las aplicaciones existentes de RV suelen ser costosas, de accesibilidad limitada o no alineadas a los requisitos curriculares específicos. Según Appello (2025), los costos de desarrollo de aplicaciones de RV en general rondan entre los \$20,000 a los \$40,000 dólares, según su grado de complejidad.

La escasa disponibilidad de herramientas adecuadas para poder entender la estructura ósea humana constituye también una de las dificultades en la educación superior, dado que los recursos tradicionales, como los libros de texto o los modelos tridimensionales, son insuficientes sobre todo cuando hay que identificar detalles propios de la estructura de un hueso determinado.

Aunado a esto, el uso de modelos estáticos y de imágenes bidimensionales no favorece la manera de relacionar su contenido de forma interactiva por parte de los estudiantes. La anatomía es una asignatura que suele requerir una exploración visual y táctil de los objetos anatómicos, por lo que la ausencia de herramientas de tipo interactivo puede hacer difícil el proceso de enseñanza-aprendizaje y contribuir a la escasa retención de la información.

El objetivo del proyecto fue diseñar, desarrollar y evaluar un simulador de RV de código abierto y bajo costo para la enseñanza de la anatomía del sistema esquelético humano, con el fin de proporcionar una herramienta que mejore la comprensión espacial en estudiantes de Ingeniería Biomédica mediante la experiencia de inmersión, específicamente en la asignatura Anatomía y Fisiología I.

La propuesta utiliza el software de código abierto Blender para el modelado anatómico en 3D, Unity para el desarrollo del entorno interactivo y el hardware de RV asequible Oculus Meta Quest 2, para ofrecer una solución escalable y de bajo costo que permita a los estudiantes visualizar, manipular e identificar estructuras óseas en un entorno 3D interactivo e inmersivo, superando las limitaciones de los recursos educativos tradicionales.

El simulador permite la interacción directa con los huesos del cuerpo humano, pudiendo tomarlos, rotarlos y analizarlos en profundidad en un entorno tridimensional. También se contempló la opción de escalar el tamaño de los modelos óseos para permitir la observación de estos en diferentes proporciones y nivel de detalle, de modo que pueda adaptarse a las necesidades individuales de cada usuario o clase.

Este proyecto se enmarca en los paradigmas de la Industria 4.0 y la Educación 4.0, los cuales promueven la integración de tecnologías digitales avanzadas, como la RV, la simulación y el Internet de las Cosas, en concordancia con entornos de aprendizaje personalizados, interactivos y centrados en el estudiante (Sánchez-Guzmán, 2019). La utilización de la RV en la enseñanza de la anatomía representa un claro ejemplo de estos paradigmas, ya que se promueve la inmersión, la interactividad y el aprendizaje experimental para formar profesionales expertos en entornos tecnológicamente complejos y multidisciplinarios (Hernández-de-Menéndez et al., 2020). Este simulador actúa como un puente entre la formación académica y las competencias digitales demandadas por la industria biomédica actual.

Aun con la existencia de alternativas como 3D Organon VR Anatomy, Anatomage Table y Complete Anatomy, las cuales ofrecen modelos detallados avanzados y muy vistosos, la barrera económica (Appello, 2025) y la falta de alineación curricular (Bazos et al., 2020) limitan su adopción. Por lo tanto, este trabajo presenta una propuesta económicamente viable enfocada para la Ingeniería Biomédica y para carreras afines a la medicina general, la cual pretender ser una herramienta apropiada para la práctica de la enseñanza en el aula.

Para validar la aplicabilidad del simulador, se complementó el desarrollo con una evaluación cualitativa de tipo no exploratorio. Mediante grupos focales con estudiantes, se evaluó la percepción sobre tres dimensiones clave: usabilidad, utilidad pedagógica percibida y aceptación de la herramienta. El análisis de los datos, basado en los principios de la teoría fundamentada, permitió comprender la experiencia de los usuarios y validar el simulador como un recurso educativo accesible y efectivo.

Materiales y Métodos

Este estudio se realizó mediante un enfoque metodológico de desarrollo tecnológico combinado con una evaluación cualitativa. Su alcance fue doble, en primer lugar, desarrollar un prototipo funcional de un simulador de RV, y segundo, describir las percepciones iniciales de los usuarios sobre su usabilidad y utilidad educativa en un contexto real.

Para el desarrollo de la aplicación se utilizó la metodología Scrum implementando etapas cortas de trabajo o sprints, en donde el proyecto se dividió en las siguientes fases:

La primera etapa del desarrollo consistió en la creación de los modelos tridimensionales que representarían tanto el ambiente virtual del simulador como algunas de las estructuras óseas humanas. Esta actividad fue crucial para sentar las bases visuales y anatómicas del simulador y se dividió en dos etapas, el escaneo físico de elementos reales y el modelado digital y optimización de los archivos 3D.

Finalizado el escaneo, los archivos 3D fueron exportados en el software Blender, una herramienta de diseño 3D de código abierto ampliamente reconocida por su flexibilidad, potencia y compatibilidad con otros entornos de desarrollo, donde se llevó a cabo la limpieza, reparación y optimización del modelo. Las acciones realizadas en esta etapa incluyeron la eliminación de ruido digital y mallas innecesarias, la corrección de huecos o imperfecciones geométricas, la reducción del número de polígonos para garantizar un rendimiento fluido en el Oculus Quest 2 y la asignación de texturas básicas para mantener la apariencia visual sin recargar el procesamiento gráfico, tal como se muestra en la figura 1.

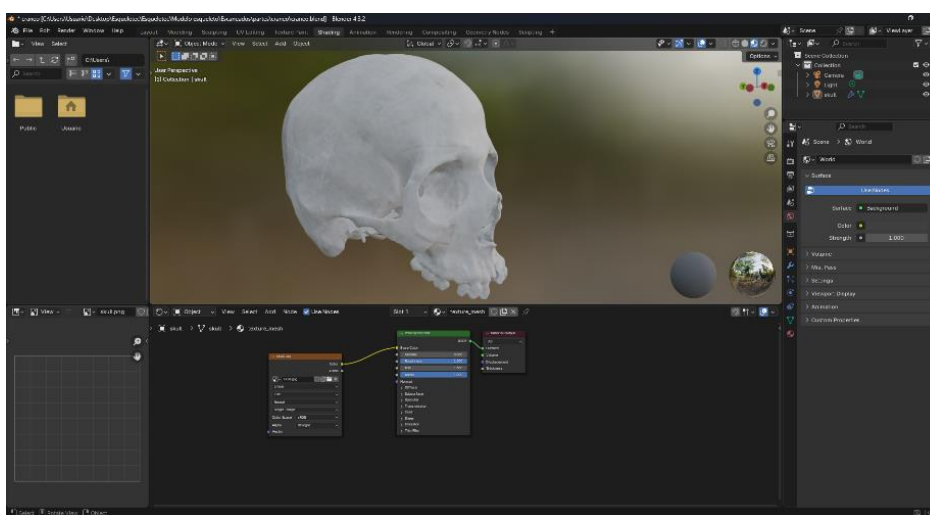


Fig. 1. Optimización de modelos 3D.

La siguiente etapa del proyecto consistió en el desarrollo del simulador dentro del entorno de Unity, en donde se transformaron los modelos 3D en elementos interactivos dentro de una escena virtual inmersiva compatible con el visor Oculus Meta Quest 2, con el objetivo de crear un entorno amigable, funcional e intuitivo para el usuario en el cual fuera posible manipular los huesos previamente escaneados y refinados. Cabe señalar que, desde el punto de vista técnico, el sistema fue desarrollado utilizando el sistema de interfaz Canvas de Unity, combinado con programación en C# orientada a objetos.

Para habilitar la compatibilidad con el visor Oculus Meta Quest 2, se integró el kit de desarrollo de software o SDK oficial de Meta, el cual permitió configurar los controladores, la vista en primera persona y la interacción táctil de los objetos en el espacio 3D, garantizando que las acciones en el entorno respondieran de forma precisa a los movimientos físicos del visor y sus controladores. Antes de integrar cualquier modelo anatómico, fue necesario definir un espacio en el que el usuario se ubicara correctamente dentro del mundo tridimensional y, sobre todo, evitar problemas como caídas al vacío, errores de colisión o falta de referencias espaciales.

Para el diseño del espacio ambiental se utilizó un recurso gratuito disponible en la Unity Asset Store o tienda en línea para creadores de Unity, el paquete Interior House Assets | URP. Este elemento proporcionó una serie de habitaciones prediseñadas con mobiliario y divisiones físicas, originalmente orientado a representar espacios residenciales. Sin embargo, su estructura modular y bajo peso gráfico lo convirtieron en una base ideal para crear una escena más convincente.

Para las funcionalidades como el movimiento de la cabeza, las manos y la adaptación correcta del espacio creado se incorporaron al sistema elementos proporcionados por el SDK oficial de Meta, los cuales permiten establecer una representación real del ambiente virtual al usuario en un entorno 3D. Además de la cámara principal, se añadieron los modelos de manos virtuales, que serían posteriormente utilizados para establecer interacciones con los objetos del entorno. La cámara fue ubicada en el centro del escenario virtual y alineada con el plano del suelo, mientras que los controladores fueron posicionados a ambos lados para simular la ubicación natural de las manos. La lógica básica de interacción con objetos tridimensionales se implementó usando de manera inicial cubos simples como objetos de prueba, así como la inclusión de pequeñas iteraciones para manejar su estabilidad, refinando las funciones para asegurar una base estable antes de trabajar con modelos más complejos. Se consideró la configuración de colisiones, agarre, rotación y escalado de las manos virtuales con el componente OVRGrabbable del SDK de Meta.

El funcionamiento de cada componente en condiciones reales se verificó durante la ejecución de la escena desde Unity, se realizaron pruebas directas en el Oculus Meta Quest 2 anotando cualquier comportamiento inusual, como retrasos, colisiones fallidas, pérdida de objetos o la responsividad del sistema durante el agarre.

Para facilitar la exploración segmentada del modelo anatómico, se desarrolló un menú interactivo permanente dentro del entorno de RV. La interfaz, que simula una pantalla táctil flotante fue implementada utilizando el sistema Canvas de Unity y programada en C#. La lógica central se encapsula en la clase `SkeletonPartController`, que gestiona arreglos del objeto `GameObject` para las partes esqueléticas y sus correspondientes posiciones.

La funcionalidad permitió al usuario seleccionar regiones específicas, como cabeza, tórax y extremidades. Al seleccionar una sección, el sistema oculta todas las partes, muestra sólo la seleccionada y la reposiciona en el centro de la escena.

El control visual y de colisiones se manejó mediante los componentes `Renderer` y `Collider` de cada objeto. Una variable booleana (`isFullSkeletonVisible`) actuó como bandera de estado para garantizar transiciones estables. Esta arquitectura modular asegura escalabilidad y fácil mantenimiento, permitiendo la integración de nuevas secciones directamente desde el editor de Unity.

Posteriormente se integraron los modelos escaneados y modelados en Blender, probando y verificando su funcionalidad. Dado que dichos modelos presentaron retraso en la respuesta, parpadeo y congelamiento por el exceso de polígonos presentes en las mallas, se buscaron alternativas que permitieran mantener la fidelidad anatómica sin comprometer la estabilidad del Oculus Quest 2, puesto que sus recursos son limitados.

Durante el desarrollo del simulador de RV se abordó la manipulación del modelo esquelético desde un enfoque técnico que combina la estructura jerárquica de Unity con principios de programación orientada a objetos (POO) y programación estructurada. La estrategia implementada consistió en crear una jerarquía donde el objeto raíz `Esqueleto` contiene como hijos las principales regiones anatómicas como `Cabeza`, `Caja`, `Columna`, `Extremidades`, y demás regiones. A su vez, cada región contiene los modelos individuales de los huesos correspondientes, agrupando visual y funcionalmente las partes del cuerpo, ver Figura 2.

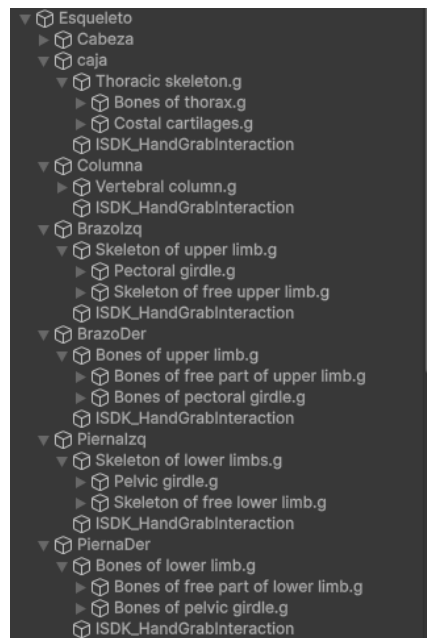


Fig. 2. Jerarquía esquelética en unity.

La lógica del simulador se implementó principalmente en las clases *SkeletonPartController* y *AutoExploder*. En el primero se encapsulan los métodos que permiten mostrar u ocultar partes del cuerpo humano y en el segundo se implementa la animación que separa las partes del cuerpo.

Finalizada la integración de los modelos anatómicos definitivos y completadas las pruebas funcionales de interacción dentro del entorno de RV, se procedió a evaluar la usabilidad, utilidad percibida y aceptación del simulador en un contexto educativo real. Para ello se propuso un estudio de enfoque cualitativo con diseño fenomenológico (Moustakas, 1994), en el cual se propuso comprender las experiencias y percepciones directas de los usuarios finales (Tong et al., 2007).

El estudio se llevó a cabo con una muestra intencionada de estudiantes de Ingeniería Biomédica reclutados en cinco grupos diferentes pertenecientes al Instituto Tecnológico de Tehuacán. Se buscó establecer un equilibrio en la composición de los grupos respecto al género y el nivel de avance académico. Todos los participantes firmaron un consentimiento informado previo a su participación.

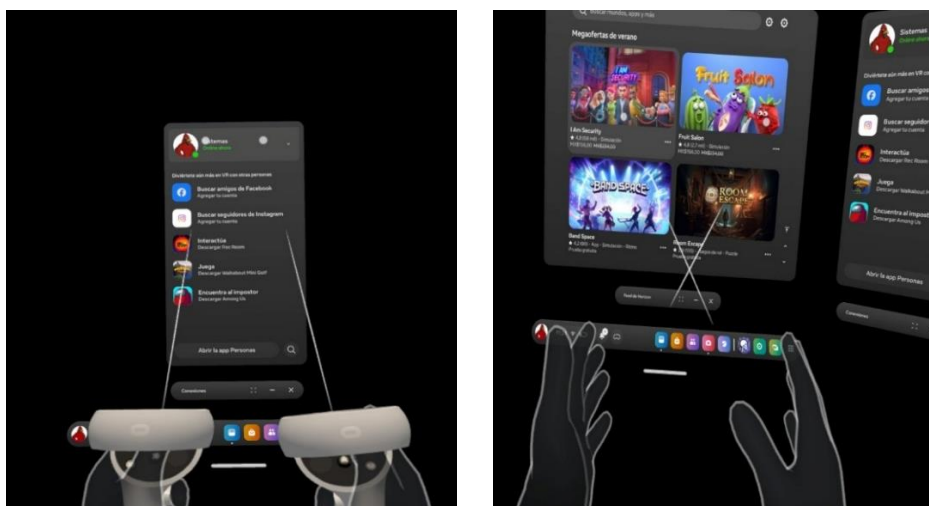
La recolección de datos se realizó mediante la técnica de grupos focales, considerada ideal para explorar percepciones colectivas y generar discusión en profundidad (Kitzinger, 1995). Cada grupo focal se conformó en grupos compuesto por 6 a 8 participantes, guiado por un moderador utilizando un protocolo semiestructurado. Las sesiones, con una duración aproximada de 15 a 20 minutos, se realizaron después de que cada participante interactuó con el simulador durante al

menos 10 minutos. En todas las sesiones se recabó información para su posterior análisis, el cual se realizó mediante los principios de la teoría fundamentada de Strauss y Corbin (2012) a través de la codificación temática con el apoyo del software NVivo. Este proceso se desarrolló mediante el proceso de codificación abierta, la agrupación de códigos en categorías y la integración de dichas categorías para definir temas centrales. Con el propósito de minimizar el sesgo y garantizar la identificación de los temas, se propuso implementar una triangulación mediante la participación de dos colaboradores para revisar los resultados y la devolución de hallazgos para comprobar la interpretación de las experiencias.

Resultados y/o Discusión

Después de colocarse adecuadamente el visor Oculus Quest 2.0 ajustando las correas superiores y laterales, se debe presionar el botón de encendido ubicado en el lado derecho del dispositivo para posteriormente acceder a la interfaz inicial flotante del usuario y al menú principal eligiendo el ícono del simulador.

El usuario puede interactuar con el visor Oculus Quest 2 de dos maneras, utilizando los controles físicos (figura 3a), uno para cada mano, con botones, gatillos y sensores incluidos o mediante el seguimiento de las manos o manos virtuales (figura 3b), en donde se detecta el movimiento de las manos reales a través de las cámaras del visor, ofreciendo una experiencia más natural e intuitiva, basándose en gestos reales de las manos, sin necesidad de dispositivos adicionales.



a) Controles físicos

b) Controles virtuales

Fig. 3. Manejo de los controles.

Después de finalizada la carga del simulador, se accede al entorno virtual el cual muestra un espacio semejante a un lobby de espera, similar al de un consultorio médico, como se observa en la figura 4.



Fig. 4. *Entorno virtual.*

Para desplazarse dentro del entorno virtual se debe aplicar el gesto de teletransportación, el cual consiste en formar con la mano una figura similar a una pistola invertida utilizando únicamente el dedo índice y el pulgar, apuntando hacia el suelo. Al ejecutar este gesto correctamente, aparece una línea arqueada que indica el destino para posteriormente unir las puntas de los dedos índice y pulgar para confirmar el desplazamiento al punto señalado, tal como se muestra en la figura 5, para acercarse al modelo esquelético situado en el cuarto contiguo.



Fig. 5. *Instrucción de movimiento dentro del entorno.*

El usuario tiene acceso visual directo a un menú interactivo el cual se presenta como una pantalla flotante. Este menú presenta las opciones de las secciones anatómicas para su exploración, como

cabeza, caja torácica. columna vertebral, entre otras. A la izquierda del menú se observa el esqueleto humano completo dispuesto en primer plano, listo para su manipulación. Aplicando los gestos previamente diseñados, el usuario puede tomar cada sección del cuerpo como si se tratara de un objeto físico real mediante el uso de sus manos virtuales.

Adicionalmente, el simulador permite escalar el tamaño del esqueleto o de sus componentes individuales, utilizando las manos para ampliar o reducir sus dimensiones, ofreciendo así una experiencia personalizada, tal como se muestra en la figura 6.



Fig. 6. Escalamiento de una parte del modelo óseo.

El usuario podrá interactuar directamente con el menú táctil flotante seleccionando cualquiera de los botones que representan las distintas secciones del esqueleto, tales como cabeza, columna o caja torácica. Al tocar un botón, el simulador aísla la sección seleccionada, ocultando temporalmente las demás partes para centrar la atención en el área elegida.

Junto al objeto seleccionado, aparece un segundo menú lateral que presenta su información general y un botón “Desglosar”. Al activar este botón, la sección se despliega, separando cada hueso individual para que sean claramente visibles y puedan ser manipulados individualmente por el usuario. Durante esta acción, el tamaño de cada hueso queda fijo al valor asignado previamente, restringiendo la capacidad de escalado mientras se mantienen las opciones de agarre y rotación, garantizando así una experiencia de exploración detallada, como se muestra en la figura 7.



Fig. 7. Manipulación del modelo óseo.

Al seleccionar una sección ósea desde el menú, el simulador despliega toda la región, mostrando detalladamente los huesos del cráneo, los dientes y los cartílagos, si se eligió la sección cabeza, por ejemplo. Esta sección completa se presenta frente al usuario, quien puede interactuar directamente con ella. Utilizando las manos virtuales, el usuario tiene la capacidad de tomar y mover la cabeza en el espacio tridimensional, lo que le permite explorar todos los ángulos de la estructura ósea, ver figura 8.



Fig. 8. Selección de la sección esquelética.

Una vez seleccionada la sección, el usuario visualizará un menú en el lado derecho de la pantalla, que proporciona una descripción general de la sección actual. Tal como se describió antes, el botón “Desglosar” separará en sus partes individuales, permitiendo que cada hueso sea visualizado y

manipulado por separado para ofrecer una visión más detallada y precisa de cada estructura ósea, tal como se muestra en la Figura 9.



Fig. 9. Separación de la sección esquelética.

Al volver a seleccionar el botón “Desglosar” utilizando el puntero, la sección previamente separada volverá a su posición original. De esta manera, todos los huesos se agruparán nuevamente, permitiendo que la sección sea tomada en su totalidad y escalada de nuevo a su tamaño original.

El simulador se pudo probar con estudiantes del nivel superior de la carrera de Ingeniería Biomédica del Instituto Tecnológico de Tehuacán, en la que sus opiniones reflejaron que el simulador logró su meta de inmersividad y que el usuario se siente más en contacto con el esqueleto, a su vez que es más atraído no solo a aprender sobre la organización esquelética, sino también a la ingeniería, ver figura 10.



Fig. 10. Pruebas con estudiantes.

Algunas de las opiniones directas de los participantes destacan que la experiencia fue muy agradable y entretenida en la que claramente tiene mucho potencial de convertirse en una herramienta para las clases. También que se siente muy real la acción de tomar los huesos y hacerlos grandes y pequeños. El 80% de las opiniones versan acerca de que la experiencia es muy intuitiva y fácil de entender.

Después de recabar la información cualitativa, en la nube de palabras se observan 3 temas centrales que caracteriza la experiencia de los usuarios. Respecto a la usabilidad se revela que la curva de aprendizaje inicial es rápida al interactuar por primera vez con la RV, tal como lo menciona Kadri et al. (2024) respecto a que la intuición en la interacción en RV debe ser efectivo. Aun cuando se presentó fascinación o curiosidad, tras un periodo de adaptación presentaron dominio y fluidez. Opiniones como “Al inicio un poco complicado, pero después es fácil” o “Puedes explorar a más detalle, creo que sería excelente para memorizar las partes del esqueleto”. La triangulación entre los dos colaboradores confirmó este patrón. Respecto a la utilidad percibida, los participantes no percibieron al simulador de RV como un remplazo, sino como un complemento a los libros y las clases teóricas, asociándose con las prácticas y la consolidación de conocimiento. Una persona opinó: “ahora que he usado el simulador recuerdo mejor la anatomía ósea gracias al ambiente inmersivo”. Este resultado coincide con la teoría cognitiva del aprendizaje multimedia de Mayer (2009), que menciona que los estudiantes aprenden mejor cuando pueden manipular modelos mentales de sistemas complejos. Respecto a la aceptación del simulador, el análisis reveló una valoración positiva basada en la experiencia del aprendizaje y el factor tecnológico. Los estudiantes destacaron que el simulador permitió una comprensión táctil y espacial que consideraron inalcanzable con métodos tradicionales. Un estudiante ejemplificó esta percepción al opinar: “Aprender el esqueleto humano con RV me parece más didáctico que aprender en libros o imágenes, cambiar el tamaño de todas las partes del esqueleto es más agradable aprender mediante esta tecnología”. Opiniones contrastadas con Neyem et al (2024) así como Skulmowski y Rey (2018), corroboran estas opiniones en donde ambas fuentes mencionan la importancia de aprender mediante las sensaciones y experiencias de los espacios 3D inmersivos.

Conclusiones

El desarrollo y evaluación preliminar del simulador de RV para la enseñanza de la anatomía esquelética demuestra que el uso de tecnologías inmersivas de código abierto y bajo costo

constituye una alternativa viable y prometedora para enriquecer la formación en Ingeniería Biomédica. Las conclusiones se organizan en torno a los objetivos planteados del estudio:

En el ámbito técnico, se expuso la viabilidad de integrar herramientas de código abierto como Blender y /Unity, con hardware asequible como el Oculus Quest 2 de Meta, para crear una experiencia inmersiva. La arquitectura modular del sistema permitió una interacción intuitiva con modelos anatómicos optimizados.

En el ámbito pedagógico, la evaluación cualitativa reveló que los estudiantes perciben al simulador como un complemento que facilita la comprensión y la retención del conocimiento, en la cual se complementa la teoría abstracta con la manipulación práctica.

En cuanto a la usabilidad, los resultados confirmaron una curva de aprendizaje inicial rápida que permitió la interacción fluida desde los primeros minutos. La utilidad percibida se centró en su papel como complemento pedagógico que facilita la comprensión espacial y la retención del conocimiento anatómico. Finalmente, se registró una aceptación apropiada por parte de los estudiantes, quienes valoraron la experiencia inmersiva como motivadora y adecuada para su formación en ingeniería biomédica.

Referencias

- Appello. (2025). *The true cost of building a VR app: budget planning guide*.
<https://appello.com.au/articles/the-true-cost-of-building-a-vr-app-budget-planning-guide>
- Bazos, E., Attardi, S., Baytor, J. y Wilson, T. (2020). Clinical Anatomy and Unexpected Careers: Is There Curriculum for That? *Anatomical Sciences Education*, 14(4).
<https://doi.org/10.1002/ase.2005>
- Kadri, M., Boubakri, F.-E., Kaghat, F.-Z., Azough, A. y Zidani, K. (2024). Immersive virtual anatomy laboratory for enhancing medical education based on virtual reality and serious games, design, implementation, and evaluation. *Entertainment Computing*, 49(100624).
<https://doi.org/10.1016/j.entcom.2023.100624>
- Kitzinger, J. (1995). Qualitative Research: Introducing focus groups. *BMJ*, 311(7000), 299-302.
<https://doi.org/10.1136/bmj.311.7000.299>
- Mayer, R. E. (2009). *Multimedia Learning*. Cambridge University Press.
<https://doi.org/10.1017/CBO9780511811678>
- Moustakas, C. (1994). *Phenomenological research methods*. SAGE Publications, Inc.
<https://doi.org/10.4135/9781412995658>

- Neyem, M., Cadile, S., Burgos-Martínez, E., Farfán Cabello, O. y Inzunza, M. (2024). Enhancing medical anatomy education with the integration of virtual reality into traditional lab settings. *Clinical Anatomy*. <https://doi.org/10.1002/ca.24213>
- Sánchez-Guzmán, D. (2019). Industria y educación 4.0 en México: un estudio exploratorio. *Innovación Educativa*, 19(81), 39-63. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1665-26732019000300039
- Skulmowski, A. y Rey, G. (2018). Embodied learning: introducing a taxonomy based on bodily engagement and task integration. *Cognitive Research: Principles and Implications*, 3(6). <https://doi.org/10.1186/s41235-018-0092-9>
- Strauss, A. y Corbin, J. (2012). *Basics of Qualitative Research (3rd ed.): Techniques and Procedures for Developing Grounded Theory*. SAGE Publications, Inc.
- Tong, A., Sainsbury, P. y Craig, J. (2007). Consolidated criteria for reporting qualitative research (COREQ): a 32-item checklist for interviews and focus groups. *International Journal for Quality in Health Care*, 19(6), 349–357. <https://doi.org/10.1093/intqhc/mzm042>
- UCAM. (2024). *El 70% de los alumnos aprende más con el uso de tecnologías de realidad virtual y aumentada*. <https://www.ucam.edu/noticias/70-alumnos-aprende-mas-uso-tecnologias-realidad-virtual-aumentada>

Copyright (2026) © Francisco Vázquez Guzmán, Liliana Elena Olguín Gil, Eduardo Vázquez Zayas, Juan Carlos Hernández Trujillo



Este texto está protegido bajo una licencia internacional Creative Commons 4.0. Usted es libre para Compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato— y Adaptar el documento — remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla las condiciones de atribución. Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.