



REALIDAD MIXTA EN MECATRÓNICA QUIRÚRGICA: INNOVACIONES Y RETOS EN LA EDUCACIÓN EN BIOINGENIERÍA Y PRÁCTICA CLÍNICA

MIXED REALITY IN SURGICAL MECHATRONICS: INNOVATIONS AND CHALLENGES IN BIOENGINEERING EDUCATION AND CLINICAL PRACTICE

Adrian Nacarino ¹, Anderson La-Rosa ¹, Bryan Sanchez ¹, Jose Cornejo ^{1,2,4},
Mariela Vargas ¹, Jorge Cornejo ^{1,3}, Ricardo Palomares ^{2,4}

RESUMEN

Introducción: La realidad mixta (RM), combinación de realidad aumentada (RA) y virtual (RV) ha emergido como una herramienta clave en la mecatrónica quirúrgica y ha mejorado la precisión y la visualización en procedimientos clínicos. **Métodos:** Este estudio presenta una revisión de literatura de los recientes avances en RM, en la base de datos Scopus y se ha tomado en cuenta el impacto en cirugía y la enseñanza médica. Se revisan tecnologías como Microsoft HoloLens y Magic Leap, así como simuladores de neurocirugía y ortopedia. **Resultados:** La RM mejora la precisión quirúrgica y reduce los tiempos operativos, que baja de 121.34 a 97.62 minutos en promedio. A pesar de su potencial, se enfrentan desafíos como la incomodidad del uso prolongado de dispositivos y la baja autonomía de las baterías. **Conclusiones:** La RM puede transformar la cirugía y la educación médica, sin embargo, su adopción masiva dependerá de la superación de barreras tecnológicas y financieras, especialmente en Latinoamérica, donde la infraestructura aún es limitada.

Palabras clave: Cirugía; Mecatrónica; Realidad virtual; Enseñanza médica; Bioingeniería. (Fuente: DeCS-BIREME)

ABSTRACT

Introduction: Mixed reality (MR), a combination of augmented reality (AR) and virtual reality (VR), has emerged as a key tool in surgical mechatronics, improving precision and visualization in clinical procedures. **Methods:** This study presents a literature review of recent MR advances from the Scopus database, taking into account its impact on surgery and medical education. Technologies such as Microsoft HoloLens and Magic Leap, as well as neurosurgery and orthopedic simulators, are reviewed. **Results:** MR enhances surgical precision and reduces operating times, with an average decrease from 121.34 to 97.62 minutes. Despite its potential, challenges include discomfort from prolonged device use and low battery autonomy. **Conclusions:** MR has the potential to transform surgery and medical education; however, its widespread adoption will depend on overcoming technological and financial barriers, especially in Latin America, where infrastructure is still limited.

Keywords: Surgery; Mechatronics; Virtual reality; Medical education; Bioengineering. (Source: MESH-NLM)

¹ Instituto de Investigaciones en Ciencias Biomédicas (INICIB), Universidad Ricardo Palma, Lima, Perú

² Escuela Profesional de Ingeniería Mecatrónica, Facultad de Ingeniería, Universidad Ricardo Palma, Lima, Perú

³ Mayo Clinic, USA

⁴ Grupo de Investigación en Robótica y Mecatrónica Avanzada (GI-ROMA), Universidad Ricardo Palma, Lima, Perú

Citar como: Nacarino A, La-Rosa A, Sanchez B, Cornejo J, Vargas M, Cornejo J, Palomares R. Realidad mixta en mecatrónica quirúrgica: Innovaciones y retos en la educación en bioingeniería y práctica clínica. Rev Fac Med Hum. 2024;24(4):215-223. doi 10.25176/RFMH.v24i4.6807

Journal home page: <http://revistas.urp.edu.pe/index.php/RFMH>

Artículo publicado por la Revista de la Facultad de Medicina Humana de la Universidad Ricardo Palma. Es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la Licencia Creative Commons: Creative Commons Attribution 4.0 International, CC BY 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), que permite el uso no comercial, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada. Para uso comercial, por favor póngase en contacto con revista.medicina@urp.edu.pe



INTRODUCCIÓN

La realidad mixta (RM) se sitúa entre la realidad aumentada (RA) y la realidad virtual (RV); al combinar elementos de ambas para ofrecer una experiencia interactiva más avanzada. La RV crea entornos completamente virtuales e inmersivos que pueden involucrar múltiples sentidos, mientras que la RA superpone datos virtuales sobre el entorno real, sin una interacción profunda⁽¹⁾. En contraste, la RM integra datos virtuales en el entorno real, de manera que estos interactúan en tiempo real, proporcionan una experiencia más inmersiva y funcional^(2,3), como se muestra en la Tabla 1. Dispositivos como HoloLens permiten la visualización de datos tridimensionales

durante procedimientos quirúrgicos sin interrumpir el flujo de trabajo, aunque enfrentan desafíos como la necesidad de software especializado y posibles efectos secundarios en los usuarios^(4,5). (Figura 1).

A nivel mundial, la mayor cantidad de estudios realizados se han hecho en Estados Unidos (1883), seguido por Inglaterra (677), Canadá (600), Alemania (509) e Italia (444), donde Perú se encuentra debajo de las 100 investigaciones⁽⁶⁾. A pesar de estos retos, la RM tiene el potencial de transformar la cirugía y la educación médica, mejorar la precisión y la toma de decisiones en tiempo real.



Figura 1. Propuesta de futura implementación colaborativa de una cirugía de cerebro, en la que se utilizan lentes de realidad virtual para visualizar la morfología del órgano. Contribución original.

Tabla 1. Comparación de tecnologías de realidad mixta (RM) en cirugía.

Característica	Realidad aumentada (RA)	Realidad mixta (RM)
Interacción	Vista directa o indirecta en tiempo real de un entorno físico del mundo real que se ha mejorado/aumentado añadiendo información generada por computadora ^(7,8) .	Integra los entornos físicos y digitales, lo que permite una interacción continua entre ambos. Ayuda a diseñar y evaluar cómo los usuarios interactúan con elementos físicos y digitales simultáneamente ⁽⁹⁾ .
Dispositivos	Teléfonos, tablets, gafas AR, visores como HoloLens ⁽¹⁰⁾ .	Pantalla montada en la cabeza, dispositivos de visualización portátiles, pantallas basadas en monitores y basadas en proyecciones ⁽¹¹⁾ .
Aplicaciones	Publicidad y comercial, entretenimiento y educación, medicina, y aplicaciones móviles para iPhones ⁽¹²⁾ .	Educación con aprendizaje integrado, diseño colaborativo con modelos virtuales en entornos reales ⁽¹¹⁾ , neurocirugía, cirugía maxilofacial, cirugía general ⁽¹³⁾ .

En este contexto, surge la cirugía asistida por computadora (CAS)^(14,15), que integra sistemas mecatrónicos con la RM para brindar a los cirujanos entrenamiento sin comprometer la vida de los pacientes⁽¹⁶⁾, como es el caso de la cirugía robótica⁽¹⁷⁾, la neurocirugía, la ortopedia, la laparoscopia, la intervención endoluminal con robots flexibles, el uso de cápsulas médicas y robots micro/nano no conectados, entre otros, con lo que se demuestra un

gran avance en la mejora de la precisión y la minimización de la invasividad⁽¹⁸⁾ (Figura 2). Mauro et al., en 2009, desarrollaron un microscopio neuroquirúrgico de RM para formación y fines intraoperatorios, con simulación realista (visual y háptica) de la palpación de gliomas de bajo grado, junto con la visualización estereoscópica en realidad aumentada de datos 3D relevantes para movimientos quirúrgicos seguros en intervenciones guiadas por imagen⁽¹⁹⁻²¹⁾.

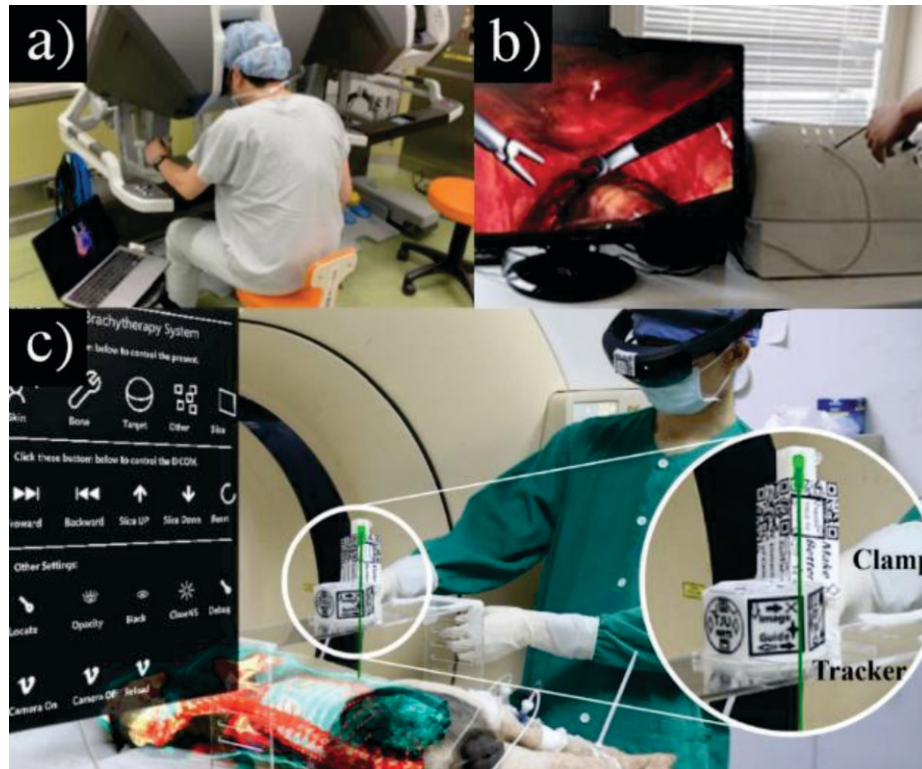


Figura 2. (a) Visualización de cirugía intraoperatoria de los modelos 3D de realidad virtual⁽²²⁾.
 (b) Simulador laparoscópico con representación de tejidos blandos de alta fidelidad⁽²³⁾.
 (c) Sistema de navegación de realidad mixta (MR)⁽²⁴⁾.

Otros estudios, también, han explorado el uso de la RM en entornos quirúrgicos y de simulación microquirúrgica. Galati et al., en 2020, propusieron un sistema basado en Microsoft HoloLens, un visor Digital Imaging and Communication in Medicine (DICOM) y una herramienta de visualización desarrollada en Unity, que mejora la velocidad y precisión de las cirugías al mostrar información en tiempo real directamente en el visor del cirujano, sin necesidad de dejar la mesa de operaciones. Sin embargo, este enfoque presenta desafíos como el aumento del estrés físico, la incomodidad por el peso del dispositivo y problemas de autonomía de la batería⁽²⁵⁾. Xiang et al., en 2023, por su parte, desarrollaron un marco de RM para la simulación de microcirugía que combina un microscopio quirúrgico con instrumentos de precisión reales, ofreciendo una experiencia inmersiva con interacción visual y táctil. Este sistema permite practicar habilidades de anastomosis y utiliza un seguimiento basado en visión para monitorizar instrumentos y vasos sanguíneos artificiales, además de facilitar la creación rápida de activos virtuales en diversas especialidades

microquirúrgicas⁽²⁶⁾. Jain et al., en 2023, exploraron el uso de la tecnología de realidad mixta (MR) en la enseñanza neuroquirúrgica, dado el declive en la disección de cadáveres y la necesidad de nuevas formas de aprendizaje. Tres neurocirujanos participaron como facilitadores, utilizando el dispositivo HoloLens 2 sin que los estudiantes tuvieran entrenamiento previo. Ocho residentes en neurocirugía evaluaron la experiencia, encontraron una curva de aprendizaje corta y calificaron el dispositivo como atractivo, fiable y fácil de usar. Aunque las opiniones sobre si la MR debería reemplazar los métodos tradicionales fueron mixtas, el estudio demuestra que esta tecnología es viable para la formación neuroquirúrgica⁽²⁷⁾. Estos estudios subrayan el potencial de la RM para mejorar, tanto la formación como los resultados quirúrgicos, aunque aún existen desafíos tecnológicos por superar.

Aplicación en innovación quirúrgica

La RM está ganando terreno en la enseñanza de la cirugía, con varias empresas y han apostado fuertemente por esta tecnología (Tabla 2).

Microsoft, con su proyecto HoloLens y Windows con Mixed Reality, han desarrollado un sistema de RM que combina hardware y software de alta precisión. Este sistema ha sido utilizado en aplicaciones médicas, industriales y educativas, lo que ha permitido a los cirujanos visualizar hologramas tridimensionales durante procedimientos quirúrgicos sin interrumpir el flujo de trabajo. Esta tecnología mejora la precisión y reduce errores; además, es pionera en estudios clínicos y simulaciones⁽²⁸⁾. Magic Leap, por su parte, ha desarrollado tecnología de campo de luz que proporciona una mejor sensación de fusión entre los

mundos físico y virtual y ha logrado un mayor realismo en la proyección de imágenes 3D, lo que permite colaboración médica en tiempo real; asimismo, ha mejorado la formación y diagnóstico en especialidades quirúrgicas^(29,30).

Finalmente, MetaVision está llevando la RM al usuario final a través de la comercialización de un dispositivo más económico, aunque orientada al mercado de consumo; esta empresa ha popularizado la RM y ha facilitado su adopción en la educación médica y simulación clínica⁽³¹⁾.

Tabla 2. Características principales de los principales dispositivos de RM.

Dispositivo	Características principales	Precio (USD)
HoloLens ⁽²⁸⁾	Lentes holográficas transparentes, duración de batería de 2-3 horas en uso activo, conectividad Wi-Fi 802.11ac y Bluetooth 4.1, cámaras de 2MP, 64GB de almacenamiento.	3,000
Magic Leap One ⁽²⁸⁾	FOV de 40°, resolución de 1280 x 960 por ojo, batería recargable, conectividad Bluetooth 4.2 y Wi-Fi, cámara a color RGB 1080p, 64GB de almacenamiento SSD.	2500
Meta 2 ⁽³²⁾	Campo de visión de 90°, resolución 2.5K, cable de 9 pies para datos y energía, conectividad por cable, cámara RGB de 720p, 128GB de almacenamiento.	1500

En México, la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) ha utilizado con éxito un sistema de lentes innovador para visualizar un holograma del paciente y realizar la primera cirugía con RM. La experiencia obtenida ha llevado a la colaboración con Microsoft en un proyecto para cirugía holográfica que involucra a especialistas de 13 países⁽³³⁾, además, Arroyo-Berezowsky et al., en 2019, realizaron un estudio con 10 residentes en donde el grupo de RV completó la tarea en 25.84 minutos, y el de control en 31.6 minutos, resaltando que el grupo de RV tendió a terminar antes⁽³⁴⁾. Por otro lado, García et al., en 2024, desarrollaron

VirtualCPR, una aplicación de realidad virtual para entrenar en técnicas de RCP⁽³⁵⁾. Finalmente, Medellín-Castillo et al., en 2016, presentaron un nuevo enfoque de cefalometría digital 3D con soporte háptico que mejora la precisión y reduce errores y variabilidad en comparación con los métodos 2D y 2½D, con lo que demostró ser más intuitivo y eficiente para los cirujanos dentales⁽³⁶⁾.

En Brasil, da Cruz et al., en 2016, estudiaron el calentamiento preoperatorio con simuladores de realidad virtual, obtuvieron una mejora significativa en



el rendimiento quirúrgico en estudiantes de medicina con experiencia básica en laparoscopia ⁽³⁷⁾. Adicionalmente, de Faria et al., en 2016, desarrollaron un recurso interactivo y estereoscópico para la enseñanza de neuroanatomía, lo que mejoró significativamente el aprendizaje de los estudiantes en comparación con los métodos de enseñanza tradicionales ⁽³⁸⁾. En España, investigadores de la Universidad de Málaga demostraron que la realidad virtual es una alternativa viable y más eficiente que los modelos impresos en 3D para la clasificación de fracturas proximales del húmero en la planificación prequirúrgica ⁽³⁹⁾.

En Perú, el panorama es distinto. Aunque el país cuenta con aproximadamente 35 facultades o escuelas de medicina humana en 18 de las 24 provincias, solo alrededor del 14 % de ellas utilizan interfaces de realidad virtual ⁽⁴⁰⁾, aunque no todas emplean dispositivos digitales ni cuentan con suscripciones anuales para los cursos de Fisiología, Anatomía,

Histología, Cirugía y/o Patología ⁽⁴¹⁻⁴³⁾. Esta situación contrasta con otros países de la región y del mundo que están promoviendo el uso de la realidad aumentada y virtual para mejorar los procesos educativos ^(44,45). Si bien se están realizando esfuerzos por incorporar nuevas tecnologías acordes al desarrollo global, como el uso de robots cirujanos como el Da Vinci ⁽⁴⁶⁾, el contexto peruano actual requiere una renovación acelerada de los sistemas de enseñanza en medicina ^(47,48), que vaya más allá de los objetivos formativos convencionales e incluya reformas desde el proceso de admisión estudiantil hasta la calidad educativa organizada.

El uso de realidad mixta (RM) en la educación en Perú es más común en Física (15%), Ciencias de la Computación e Ingeniería (alrededor del 12%), mientras que disciplinas como Astronomía, Geología y Ciencias de la Tierra tienen una adopción mucho menor (menos del 2%). Esto sugiere que las áreas tecnológicas y científicas aprovechan más la RM, mientras que otras aún están rezagadas en su uso (Figura 3).

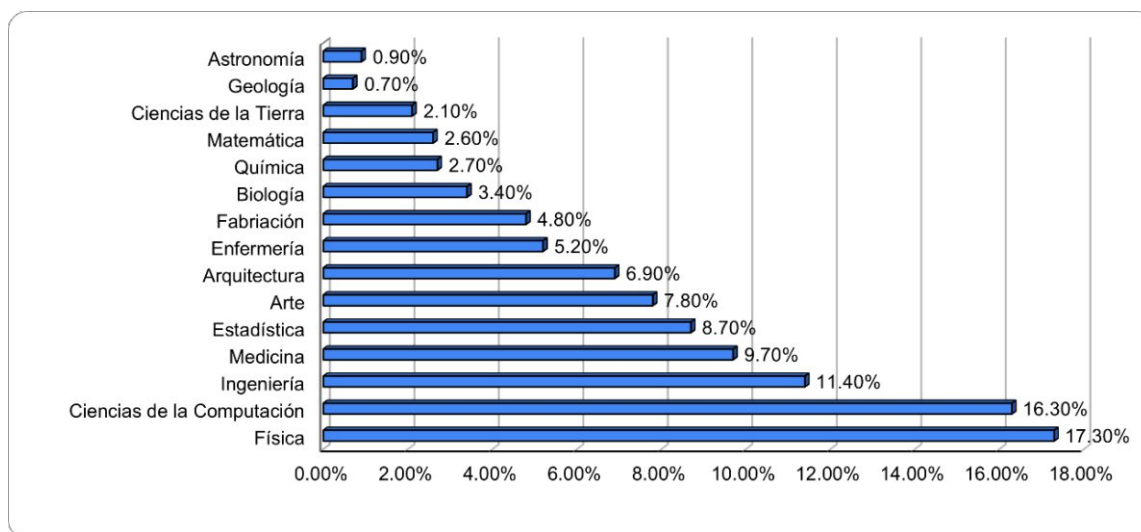


Figura 3. Estado actual del uso de RM en la educación en Perú ⁽⁴⁹⁾.

CONCLUSIÓN

Para implementar eficazmente estas tecnologías en Latinoamérica, es necesario considerar varios factores: inversión en infraestructura, capacitación del personal de salud y adaptación a las necesidades locales ⁽⁴⁹⁾. La RM tiene un enorme potencial para mejorar tanto la enseñanza médica como el tratamiento de pacientes ⁽⁵⁰⁾, en comparación con Europa y América del Norte,

donde se han observado aumentos significativos en la eficiencia quirúrgica, con una diferencia media ponderada de 12.31 en la capacidad de entrenamiento de habilidades ⁽⁵¹⁾ junto con mejoras en la calidad educativa al reducir el tiempo promedio de los procedimientos quirúrgicos a 97.62 ± 35.59 minutos; en comparación con los métodos tradicionales de enseñanza en cadáveres, que tienen un tiempo

promedio de 121.34 ± 12.17 minutos^(52,53). A pesar de los retos financieros y de infraestructura, las lecciones aprendidas de otras regiones pueden guiar una

integración exitosa de la realidad mixta en el ámbito médico latinoamericano y adaptarse a su propio contexto (54-55) (Figura 4).

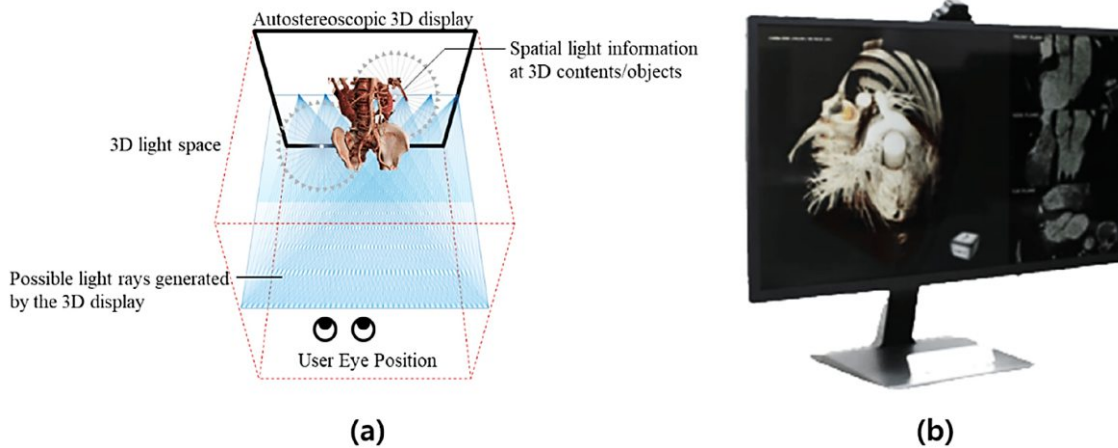


Figura 4. (a) Concepto de visualización 3D de campo de luz basado en seguimiento ocular, que muestra la generación y modelado de rayos de luz direccionales. (b) Prototipo de visualización 3D para aplicaciones médicas: navegador de tomografía computarizada cardíaca 3D. Obtenida bajo la licencia de CC BY 4.0⁽⁵⁶⁾.

Contribuciones de autoría: A.N., A.L-R. y B.S. participaron en la conceptualización, investigación, metodología, análisis e interpretación de datos, recursos y redacción del borrador original; M.V. y J.C. participaron en la supervisión clínica y aplicativa de los resultados; J.C., M.V., J.C., R.P. participaron en la supervisión y asesoría técnica, análisis e interpretación de datos; redacción del artículo; revisión crítica del artículo.

Financiamiento: Autofinanciado.

Conflictos de intereses: Los autores declaran no tener conflicto de interés.

Recibido: 01 de Setiembre, 2024.

Aprobado: 08 de Octubre, 2024.

Correspondencia: Adrian Nacarino.
Dirección: Av. Alfredo Benavides 5440, Santiago de Surco 15039, Lima-Perú.
Teléfono: +51 937331397
Correo electrónico: 202112450@urp.edu.pe



REFERENCIAS

1. McKnight RR, Pean CA, Buck JS, Hwang JS, Hsu JR, Pierre SN. Virtual Reality and Augmented Reality—Translating Surgical Training into Surgical Technique. *Curr Rev Musculoskelet Med*. 2020;13(6):663–74. doi:10.1007/s12178-020-09667-3
2. Tepper OM, Rudy HL, Lefkowitz A, Weimer KA, Marks SM, Stern CS, et al. Mixed Reality with HoloLens: Where Virtual Reality Meets Augmented Reality in the Operating Room. *Plast Reconstr Surg*. 2017;140(5):1066. doi:10.1097/PRS.0000000000003802
3. Yoon JW, Chen RE, Kim EJ, Akinduro OO, Kerezoudis P, Han PK, et al. Augmented reality for the surgeon: Systematic review. *Int J Med Robot*. 2018;14(4):e1914. doi:10.1002/rcs.1914
4. Vervoorn MT, Wulfse M, Doormaal TPCV, Ruurda JP, Kaaij NPV der, Heer LMD. Mixed Reality in Modern Surgical and Interventional Practice: Narrative Review of the Literature. *JMIR Serious Games*. 2023;11(1):e41297. doi:10.2196/41297
5. Cornejo J, Cornejo-Aguilar JA, Vargas M, Helguero CG, Milanezi de Andrade R, Torres-Montoya S, et al. Anatomical Engineering and 3D Printing for Surgery and Medical Devices: International Review and Future Exponential Innovations. *BioMed Res Int*. 2022;2022(1):6797745. doi:10.1155/2022/6797745
6. Zhang J, Yu N, Wang B, Lv X. Trends in the Use of Augmented Reality, Virtual Reality, and Mixed Reality in Surgical Research: a Global Bibliometric and Visualized Analysis. *Indian J Surg*. 2022;84(1):52–69. doi:10.1007/s12262-021-03243-w
7. Carmigniani J, Furht B. Augmented Reality: An Overview. En: Furht B, editor. *Handbook of Augmented Reality* [Internet]. New York, NY: Springer; 2011 [citado el 29 de agosto de 2024]. p. 3–46. doi:10.1007/978-1-4614-0064-6_1
8. Allcca D, Nacarino A, Sanchez B, Castro R, La-Rosa A, Cornejo J, et al. Mechatronics Bio-Design of Hip Prosthesis using Mechanic of Materials Analysis and Finite Element Method: A Proof of Concept. En: 2024 5th International Conference on Recent Trends in Computer Science and Technology (ICRTCSST) [Internet]. 2024 [citado el 31 de agosto de 2024]. p. 438–43. doi:10.1109/ICRTCSST61793.2024.10578526
9. Coutrix C, Nigay L. Mixed reality: a model of mixed interaction. En: Proceedings of the working conference on Advanced visual interfaces [Internet]. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery; 2006 [citado el 29 de agosto de 2024]. p. 43–50. (AVI '06). doi:10.1145/1133265.1133274
10. Liao T. Future directions for mobile augmented reality research: Understanding relationships between augmented reality users, nonusers, content, devices, and industry. *Mob Media Commun*. 2019;7(1):131–49. doi:10.1177/2050157918792438
11. Rokhsaritalemi S, Sadeghi-Niaraki A, Choi S-M. A Review on Mixed Reality: Current Trends, Challenges and Prospects. *Appl Sci*. 2020;10(2):636. doi:10.3390/app10020636
12. Carmigniani J, Furht B, Anisetti M, Ceravolo P, Damiani E, Ivkovic M. Augmented reality technologies, systems and applications. *Multimed Tools Appl*. 2011;51(1):341–77. doi:10.1007/s11042-010-0660-6
13. Moser T, Hohlagschwandtner M, Kormann-Hainzl G, Pözlbauer S, Wolfartsberger J. Mixed Reality Applications in Industry: Challenges and Research Areas. En: Winkler D, Biffl S, Bergsmann J, editores. *Software Quality: The Complexity and Challenges of Software Engineering and Software Quality in the Cloud*. Cham: Springer International Publishing; 2019. p. 95–105. doi:10.1007/978-3-030-05767-1_7
14. Adams L, Krybus W, Meyer-Ebrecht D, Rueger R, Gilsbach JM, Moesges R, et al. Computer-assisted surgery. *IEEE Comput Graph Appl*. 1990;10(3):43–51. doi:10.1109/38.55152
15. Cornejo J, Cornejo J, Vargas M, Carvajal M, Perales P, Rodriguez G, et al. SY-MIS Project: Biomedical Design of Endo-Robotic and Laparoscopic Training System for Surgery on the Earth and Space. *Emerg Sci J*. 2024;8(2):372–93. doi:10.28991/ESJ-2024-08-02-01
16. Cornejo J, Cornejo-Aguilar JA, Gonzalez C, Sebastian R. Mechanical and Kinematic Design of Surgical Mini Robotic Manipulator used into SP-LAP Multi-DOF Platform for Training and Simulation. En: 2021 IEEE XXVIII International Conference on Electronics, Electrical Engineering and Computing (INTERCON) [Internet]. 2021 [citado el 31 de agosto de 2024]. p. 1–4. doi:10.1109/INTERCON52678.2021.9532965
17. Cornejo J, Barrera S, Ruiz CAH, Gutierrez F, Casasnovas MO, Kot L, et al. Industrial, Collaborative and Mobile Robotics in Latin America: Review of Mechatronic Technologies for Advanced Automation. *Emerg Sci J*. 2023;7(4):1430–58. doi:10.28991/ESJ-2023-07-04-025
18. Dagnino G, Kundrat D. Robot-assistive minimally invasive surgery: trends and future directions. *Int J Intell Robot Appl* [Internet]. 2024 [citado el 7 de octubre de 2024]; doi:10.1007/s41315-024-00341-2
19. Cornejo J, Cornejo-Aguilar JA, Sebastian R, Perales P, Gonzalez C, Vargas M, et al. Mechanical Design of a Novel Surgical Laparoscopic Simulator for Telemedicine Assistance and Physician Training during Aerospace Applications. En: 2021 IEEE 3rd Eurasia Conference on Biomedical Engineering, Healthcare and Sustainability (ECBIOS) [Internet]. 2021 [citado el 31 de agosto de 2024]. p. 53–6. doi:10.1109/ECBIOS51820.2021.9510753
20. Cornejo J, Perales-Villarreal JP, Sebastian R, Cornejo-Aguilar JA. Conceptual Design of Space Biosurgeon for Robotic Surgery and Aerospace Medicine. En: 2020 IEEE ANDESCON [Internet]. 2020 [citado el 31 de agosto de 2024]. p. 1–6. doi:10.1109/ANDESCON50619.2020.9272122
21. De Mauro A, Raczkowsky J, Halatsch ME, Wörn H. Mixed Reality Neurosurgical Microscope for Training and Intra-operative Purposes. En: Shumaker R, editor. *Virtual and Mixed Reality* [Internet]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2009 [citado el 20 de agosto de 2024]. p. 542–9. (Lecture Notes in Computer Science; vol. 5622). doi:10.1007/978-3-642-02771-0_60
22. Ujjie H, Chiba R, Yamaguchi A, Nomura S, Shiyi H, Fujiwara-Kuroda A, et al. Developing a Virtual Reality Simulation System for Preoperative Planning of Robotic-Assisted Thoracic Surgery. *J Clin Med*. 2024;13(2):611. doi:10.3390/jcm13020611
23. Deng Z, Xiang N, Pan J. State of the Art in Immersive Interactive Technologies for Surgery Simulation: A Review and Prospective. *Bioengineering*. 2023;10(12):1346. doi:10.3390/bioengineering10121346
24. Lin Z, Lei C, Yang L. Modern Image-Guided Surgery: A Narrative Review of Medical Image Processing and Visualization. *Sensors*. 2023;23(24):9872. doi:10.3390/s23249872
25. Galati R, Simone M, Barile G, De Luca R, Cartanese C, Grassi G. Experimental Setup Employed in the Operating Room Based on Virtual and Mixed Reality: Analysis of Pros and Cons in Open Abdomen Surgery. *J Healthc Eng*. 2020;2020(1):8851964. doi:10.1155/2020/8851964
26. Xiang N, Liang H-N, Yu L, Yang X, Zhang JJ. A mixed reality framework for microsurgery simulation with visual-tactile perception. *Vis Comput*. 2023;39(8):3661–73. doi:10.1007/s00371-023-02964-1
27. Jain S, Timofeev I, Kirillos RW, Helmy A. Use of Mixed Reality in Neurosurgery Training: A Single Centre Experience. *World Neurosurg*. 2023;176:e68–76. doi:10.1016/j.wneu.2023.04.107
28. Palumbo A. Microsoft HoloLens 2 in Medical and Healthcare Context: State of the Art and Future Prospects. *Sensors*. 2022;22(20). doi:10.3390/s22207709
29. Cornejo J, Cornejo-Aguilar JA, Palomares R. Biomedik Surgeon: Surgical Robotic System for Training and Simulation by Medical Students in Peru. En: 2019 International Conference on Control of Dynamical and Aerospace Systems (XPOTRON) [Internet]. 2019 [citado el 31 de agosto de 2024]. p. 1–4. doi:10.1109/XPOTRON.2019.8705717
30. Zari G, Condino S, Cutolo F, Ferrari V. Magic Leap 1 versus Microsoft HoloLens 2 for the Visualization of 3D Content Obtained from Radiological Images. *Sensors*. 2023;23(6):3040. doi:10.3390/s23063040
31. Westermeier F, Brübach L, Wienrich C, Latoschik ME. Assessing Depth Perception in VR and Video See-Through AR: A Comparison on Distance Judgment, Performance, and Preference. *IEEE Trans Vis Comput Graph*. 2024;30(5):2140–50. doi:10.1109/TVCG.2024.3372061
32. Anaya-Sánchez R, Rejón-Guardia F, Molinillo S. Impact of virtual reality experiences on destination image and visit intentions: the moderating effects of immersion, destination familiarity and sickness. *Int J Contemp Hosp Manag* [Internet]. 2024 [citado el 31 de agosto de 2024]; ahead-of-print (ahead-of-print). doi:10.1108/IJCHM-09-2023-1488
33. Zaragoza Pérez R, Cuevas Escudero AL. Realidad aumentada en la enseñanza. *RDU UNAM* [Internet]. 2020 [citado el 31 de agosto de 2024]; doi:10.22201/cuaieed.16076079e.2020.21.6.9
34. Arroyo-Berezowsky C, Jorba-Elguero P, Altamirano-Cruz MA, Quinzanos-Fresnedo J. Usefulness of immersive virtual reality simulation during femoral nail application in an orthopedic fracture skills course. *J Musculoskelet Surg Res*. 2019;3:326. doi:10.4103/jmsr.jmsr_78_19
35. De Jesus Encarnacion Ramirez M, Chmutin G, Nurmukhametov R, Soto GR, Kannan S, Piavchenko G, et al. Integrating Augmented Reality in Spine Surgery: Redefining Precision with New Technologies. *Brain Sci*. 2024;14(7):645. doi:10.3390/brainsci14070645
36. Medellín-Castillo HI, Govea-Valladares EH, Pérez-Guerrero CN, Gil-Valladares J, Lim T, Ritchie JM. The evaluation of a novel haptic-enabled virtual reality approach for computer-aided cephalometry. *Comput Methods Programs Biomed*. 2016;130:46–53. doi:10.1016/j.cmpb.2016.03.014
37. da Cruz JAS, dos Reis ST, Cunha Frati RM, Duarte RJ, Nguyen H, Srougi M, et al. Does Warm-Up Training in a Virtual Reality Simulator Improve Surgical Performance? A Prospective Randomized Analysis. *J Surg Educ*. 2016;73(6):974–8. doi:10.1016/j.jsurg.2016.04.020
38. de Faria JWV, Teixeira MJ, de Moura Sousa Júnior L, Otoch JP, Figueiredo EG. Virtual and stereoscopic anatomy: when virtual reality meets medical education. *J Neurosurg*. 2016;125(5):1105–11. doi:10.3171/2015.8.JNS141563
39. Almirón Santa-Bárbara R, García Rivera F, Lamb M, Víquez Da-Silva R, Gutiérrez Bedmar M. New technologies for the classification of proximal humeral fractures: Comparison between Virtual Reality and 3D printed models—a randomised controlled trial. *Virtual Real*. 2023;27(3):1623–34. doi:10.1007/s10055-023-00757-4
40. Morales-Mere J, Chessa JJ, Palomares R, Cornejo J. Mixed Reality System for Education and Innovation in Prehospital Interventions at Peruvian Fire Department. En: 2020 IEEE XXVII International Conference on Electronics, Electrical Engineering and Computing (INTERCON) [Internet]. 2020 [citado el 1 de septiembre de 2024]. p. 1–4. doi:10.1109/INTERCON50315.2020.9220259



41. Wilson AB, Miller CH, Klein BA, Taylor MA, Goodwin M, Boyle EK, et al. A meta-analysis of anatomy laboratory pedagogies. *Clin Anat*. 2018;31(1):122–33. doi:10.1002/ca.22934
42. Cornejo-Aguilar JA, Cornejo J, Vargas M, Sebastian R. The revolution of robotic surgery in latin america and the future implementation in the healthcare system of Peru: La revolución de la cirugía robótica en latino américa y la futura implementación en el sistema de salud del Perú. *Rev Fac Med Humana*. 2019;19(1):5. doi:10.25176/RFMH.v19.n1.1800
43. Cornejo J, Cornejo Aguilar JA, Peralas Villarreal JP. INTERNATIONAL INNOVATIONS IN MEDICAL ROBOTICS TO IMPROVE THE PATIENT MANAGEMENT IN PERU: INNOVACIONES INTERNACIONALES EN ROBÓTICA MÉDICA PARA MEJORAR EL MANEJO DEL PACIENTE EN PERÚ. *Rev Fac Med Humana*. 2019;19(4):1. doi:10.25176/RFMH.v19i4.2349
44. Mendoza GAA, Lewis F, Plante P, Brassard C. Estado del arte sobre el uso de la realidad virtual, la realidad aumentada y el video 360° en educación superior. *EduTec Rev Electrónica Tecnol Educ*. 2023;(84):35–51. doi:10.21556/edutec.2023.84.2769
45. Cornejo J, Vargas M, Cornejo-Aguilar JA. Robotics and Biomedical Innovative Applications in Public Health during the COVID-19 Pandemic: Aplicaciones Innovadoras De La Robótica Y Biomédica En La Salud Pública Durante La Pandemia Del COVID-19. *Rev Fac Med Humana* [Internet]. 2020 [citado el 2 de septiembre de 2024];20(4). doi:10.25176/RFMH.v20i4.3042
46. Clínica Internacional adquiere el primer robot quirúrgico en el Perú | empresas | breca | cirugías | medicina | cirujanos | Intuitive Surgical | ECONOMIA | GESTIÓN [Internet]. [citado el 7 de octubre de 2024]. Disponible en: https://gestion.pe/economia/empresas/clinica-internacional-adquiere-el-primer-robot-quirurgico-en-el-peru-empresas-breca-cirugias-medicina-cirujanos-intuitive-surgical-noticia/#google_vignette
47. Vargas M, Cornejo J, De La Cruz-Vargas JA. Health without Borders: INICIB-URP leading Medical Education through Bioengineering and Mechatronic Technologies: Salud sin Fronteras: INICIB-URP liderando la Educación Médica a través de Bioingeniería y Tecnologías Mecatrónicas. *Rev Fac Med Humana*. 2024;24(3):07–11. doi:10.25176/RFMH.v24i3.6701
48. Vargas M, Cornejo J, Correa-López LE. Ingeniería biomédica: la revolución tecnológica para el futuro del sistema de salud peruano. *Rev Fac Med Humana* [Internet]. 2017 [citado el 2 de septiembre de 2024];16(2). doi:10.25176/RFMH.v16.n3.659
49. Caballero-Garriazo JA, Rojas-Huacanca JR, Sánchez-Castro A, Lázaro-Aguirre AF. Systematic review on the application of Virtual Reality in University Education. *Rev Electrónica Educ*. 2023;27(3):1–18. doi:10.15359/ree.27-3.17271
50. Morimoto T, Kobayashi T, Hirata H, Otani K, Sugimoto M, Tsukamoto M, et al. XR (Extended Reality: Virtual Reality, Augmented Reality, Mixed Reality) Technology in Spine Medicine: Status Quo and Quo Vadis. *J Clin Med*. 2022;11(2):470. doi:10.3390/jcm11020470
51. Zhang R, Jin X, Liu M, Tong HY. The Effectiveness of Augmented Reality/Mixed Reality in Medical Education: A Meta- Analysis [Internet]. 2024 [citado el 30 de agosto de 2024]. doi:10.21203/rs.3.rs-4549366/v1
52. Wu Q, Wang Y, Lu L, Chen Y, Long H, Wang J. Virtual Simulation in Undergraduate Medical Education: A Scoping Review of Recent Practice. *Front Med* [Internet]. 2022 [citado el 30 de agosto de 2024];9. doi:10.3389/fmed.2022.855403
53. Sadek O, Baldwin F, Gray R, Khayyat N, Fotis T. Impact of Virtual and Augmented Reality on Quality of Medical Education During the COVID-19 Pandemic: A Systematic Review. *J Grad Med Educ*. 2023;15(3):328–38. doi:10.4300/JGME-D-22-00594.1
54. Martel Cervantes C, Sandoval C, Palomares R, Borja Arroyo J, Murillo Manrique M, Cornejo J. BIOMEDICAL ANTHROPOMETRIC EVALUATION AND CONCEPTUAL MECHANICAL DESIGN OF A ROBOTIC SYSTEM FOR LOWER LIMBS PASSIVE-REHABILITATION ON POST-STROKE PATIENTS. *Revista de la Facultad de Medicina Humana*. 2024 Apr 1;24(2). doi:10.25176/rfmh.v24i2.6550
55. Sandoval C, Martel C, Palomares R, Arroyo JB, Manrique MFM, Cornejo J. Conceptual mechatronic design of ankle-foot exoskeleton system for assisted rehabilitation of pediatric patients with spastic cerebral palsy. In: 2023 IEEE MIT Undergraduate Research Technology Conference (URTC). IEEE; 2023. doi:10.1109/URTC60662.2023.10534922
56. Kang D, Choi JH, Hwang H. Autostereoscopic 3D display system for 3D medical images. *Applied Sciences*. 2022 Apr 24;12(9):4288. doi:10.3390/app1209428