



EDITORIAL

Cirugía ortopédica digital: beneficios y desafíos de la realidad extendida y la computación espacial



Digital orthopaedic surgery: Benefits and challenges of extended reality and spatial computing

La integración de tecnologías de realidad extendida (XR) en cirugía ortopédica está marcando un hito significativo en el campo de la cirugía digital, dentro del paradigma de la medicina 5p. Estas tecnologías están revolucionando la manera en la que se planifican y ejecutan los procedimientos quirúrgicos, aportando importantes mejoras en la precisión de la planificación tanto pre- como intraoperatoria. En particular, los dispositivos de realidad mixta (MR) y holográfica están introduciendo innovaciones notables en la práctica quirúrgica al permitir una visualización 3D multimodal detallada y en tiempo real de las estructuras anatómicas, complementada con diferentes materiales de consulta y fuentes de información que de esta manera quedan integradas en la propia cirugía. Estas «capacidades aumentadas» posibilitan a los cirujanos el ejecutar la táctica operatoria con una traslación directa de la pantalla a la mesa quirúrgica, minimizando riesgos y mejorando indicadores clínicos^{1,2}.

Esta nueva «cirugía extendida» permite al especialista registrar las imágenes holográficas 3D de la anatomía del paciente directamente en el campo quirúrgico, con una superposición o *matching* suficientemente preciso y con diferentes niveles de detalle geométrico y morfológico, incluyendo tantas capas de información como se precise. Las gafas XR, con su capacidad para proyectar y manipular imágenes en 3D mediante comandos de voz, seguimiento de manos (*hand tracking*) o directamente por análisis de los movimientos oculares (*eye tracking*), están transformando la propia experiencia quirúrgica, reconfigurando la propia interacción humano-máquina (HMI). Su aplicación está siendo creciente en procedimientos quirúrgicos complejos, permitiendo su hibridación con otras tecnologías disruptivas como la impresión 3D³ o la cirugía con asistencia robótica.

La realidad mixta es una tecnología que combina elementos de la realidad aumentada (AR) y la realidad virtual

(VR), integrando información digital con el entorno físico del usuario y permitiendo la interacción en tiempo real con ambos mundos gracias a los sistemas de cartografía espacial. A diferencia de la AR, que simplemente superpone imágenes digitales, la MR permite una interacción más profunda y dinámica entre los objetos virtuales y físicos. En el ámbito de la cirugía ortopédica, esta tecnología, ejemplificada por dispositivos como las gafas HoloLens² de Microsoft, ofrece varias ventajas como dispositivo de iniciación, dado que su óptica cuenta con un visor transparente que permite una visualización constante del mundo real, restringiendo la experiencia inmersiva⁴.

Para un nivel avanzado, recientemente se ha incluido dentro de las tecnologías XR la modalidad de computación espacial, donde la interacción no se realiza mirando a una pantalla sino «a través de ella», visualizando un escritorio virtual que se integra plenamente con el espacio real. A diferencia de los sistemas holográficos, el mundo real se proyecta tras ser capturado gracias a una sensorización avanzada y el registro simultáneo de múltiples cámaras que permiten un procesamiento 3D del entorno sin latencia. El principal dispositivo dentro de este nuevo campo son las Apple Vision Pro[®] recientemente introducidas en el mercado. El *display* de estas gafas funde los elementos digitales con los del entorno que rodea al cirujano, permitiendo una experiencia mucho más rica e inmersiva, pero al tratarse de unas lentes opacas depende de una constante fuente de alimentación y una alta tasa de refresco para lograr actuar como la visión natural⁵.

En el ámbito de la cirugía ortopédica, la tecnología XR, y muy especialmente la computación espacial, ofrece múltiples opciones técnicas muy significativas, como son la interacción espacial en tiempo real, la supervisión remota o *proctoring*, la visualización y monitorización inmersiva de

datos médicos, o el propio registro posicional. Los nuevos flujos de trabajo en la cirugía ortopédica digital obligan a tener un enfoque holístico donde la etapa pre- e intraoperatoria convergen, rompiendo la frontera entre la planificación y la ejecución, y entre el mundo virtual y el mundo real. La primera ventaja de la tecnología XR la encontramos en el entrenamiento paciente-específico, donde estos entornos 3D permiten un input viso-espacial único. En esta etapa, se hace imprescindible el trabajo cooperativo e interdisciplinar con especialistas de imagen médica e ingeniería biomédica, para integrar elementos de programación, diseño 3D CAD y la propia táctica quirúrgica, que constituirán la «escena quirúrgica digital» disponible en las gafas. En el momento de la ejecución operatoria, este proyecto 3D se transfiere en tiempo real permitiendo su superposición directa sobre el campo quirúrgico, incluyendo el gemelo digital del paciente, con sus diferentes elementos morfológicos y anatómicos, y sus estudios de imagen radiológica; marcadores posicionales, instrumental quirúrgico o los propios implantes. Las gafas posibilitan una visualización directa (*pass-through*), evitando que los cirujanos tengan que poner su atención en las pantallas periféricas (sistemas *heads-up*). Este registro directo sobre el paciente, y retroalimentado en tiempo real, permite opciones de corrección y verificación nunca antes alcanzadas, facilitando un guiado preciso durante la intervención, asegurando que el cirujano mantenga una conciencia situacional completa sin necesidad de desviar la mirada y evitando así distracciones innecesarias. A través del control de la propia escena holográfica, el operador puede configurar todos los elementos de la misma, limitando su número, orden o composición. De esta manera, en todo momento existe control del nivel de inmersión y amplitud de la información proyectada.

Sin embargo, como toda innovación disruptiva, la adopción de este tipo de tecnología también presenta desafíos, tanto en sus aspectos regulatorios como organizacionales. La formación especializada del personal quirúrgico y la integración de estos dispositivos en los flujos de trabajo existentes son aspectos cruciales a considerar. Además, la infraestructura tecnológica debe mantenerse y actualizarse continuamente para soportar estas innovaciones. El coste de estos dispositivos puede ser una barrera significativa para su implementación a gran escala, exacerbando las inequidades en el acceso a la atención quirúrgica avanzada. Es fundamental destacar que estas tecnologías deben ser utilizadas como asistencia supervisada por el cirujano, ya que aún existen riesgos asociados con su uso que requieren una supervisión constante y un control experto. Un riesgo importante es la posible abstracción y distracción durante la cirugía si no se controla el volumen de información proyectada en las gafas o si la experiencia se vuelve demasiado inmersiva. Además, para que esta tecnología sea realmente efectiva, debería ser utilizada por todo el equipo quirúrgico, permitiendo la participación plena en tiempo real.

En el campo regulatorio, debemos considerar que los elementos digitales construidos en las gafas para un paciente determinado a partir de sus estudios de imagen constituyen un producto sanitario a medida (PSM), que cuenta con su propia legislación y aspectos normativos. Tanto la prescripción de esta prestación, como su diseño e implementación clínica, debe realizarse en centros cualificados que cuenten con equipos multidisciplinares, un sistema de

gestión de calidad acreditado y proveedores de tecnología certificados⁶. La verificación de estos productos y la validación de las herramientas empleadas es responsabilidad del especialista, que debe contar con la experiencia profesional tras completar la oportuna curva de aprendizaje, y con el respaldo institucional necesario como para hacer frente al reto tecnológico como garante de la seguridad del paciente⁷. Un ejemplo notable de la implementación exitosa de estas tecnologías lo tenemos en hospitales universitarios acreditados para la fabricación académica o *point-of-care* de PSM, donde la tecnología XR se ha integrado como una parte más del proceso quirúrgico asistencial, y de manera muy destacable en nuevos quirófanos híbridos 3D⁸.

La realidad extendida tiene el potencial de revolucionar la cirugía ortopédica, principalmente en áreas que requieren de una planificación avanzada y personalizada, a destacar la reconstructiva compleja, los procedimientos en raquis, o cirugías multiabordaje como la oncológica o la del paciente politraumatizado. La capacidad de planificar y ejecutar cirugías con una precisión sin precedentes brinda nuevas posibilidades, no solo para la innovación en la práctica quirúrgica, sino también en la formación de los médicos residentes o la educación de los pacientes. Más allá de considerar esta tecnología por su moda o tendencia, supone una magnífica oportunidad para la creación de nuevos perfiles competenciales e implantación de programas formativos reglados por parte de las instituciones sanitarias y las sociedades científicas, cuya certificación capacite al profesional para el uso cualificado y seguro dentro de este nuevo paradigma asistencial.

Bibliografía

1. Jud L, Fotouhi J, Andronic O, Aichmair A, Osgood G, Navab N, et al. Applicability of augmented reality in orthopedic surgery – A systematic review. *BMC Musculoskelet Disord.* 2020;21:103, <http://dx.doi.org/10.1186/s12891-020-3110-2>.
2. Malhotra S, Halabi O, Dakua SP, Padhan J, Paul S, Palliyali W. Augmented Reality in Surgical Navigation: A Review of Evaluation and Validation Metrics. *Applied Sciences.* 2023;13:1629, <http://dx.doi.org/10.3390/app13031629>.
3. Mediavilla-Santos L, García-Sevilla M, Calvo-Haro JA, Ruiz Alba MT, Pérez-Mañanes R, Pascau González J, et al. Validation of patient-specific 3 D impression models for pelvic oncological orthopedic surgery. *Rev Esp Cir Ortop Traumatol.* 2022;66:403–9, <http://dx.doi.org/10.1016/j.recot.2021.07.001>.
4. Pose-Díez-de-la-Lastra A, Moreta-Martínez R, García-Sevilla M, García-Mato D, Calvo-Haro JA, Mediavilla-Santos L, et al. HoloLens 1 vs. HoloLens 2: Improvements in the New Model for Orthopedic Oncological Interventions. *Sensors.* 2022;22:4915, <http://dx.doi.org/10.3390/s22134915>.
5. Waisberg E, Ong J, Masalkhi M, Zaman N, Sarker P, Lee AG, et al. Apple Vision Pro: the future of surgery with advances in virtual and augmented reality. *Ir J Med Sci.* 2024;193:345–6, <http://dx.doi.org/10.1007/s11845-023-03457-9>.
6. Calvo-Haro JA, Pascau J, Mediavilla-Santos L, Sanz-Ruiz P, Sánchez-Pérez C, Vaquero-Martín J, et al. Conceptual evolution of 3 D printing in orthopedic surgery and traumatology: from “do it yourself” to “point of care manufacturing”. *BMC Musculoskelet Disord.* 2021;22:360, <http://dx.doi.org/10.1186/s12891-021-04224-6>.
7. Andrés-Cano P, Calvo-Haro JA, Fillat-Gomá F, Andrés-Cano I, Pérez-Mañanes R. Role of the orthopaedic surgeon in 3 D printing: current applications and legal issues for a personalized medi-

- cine. Rev Esp Cir Ortop Traumatol (Engl Ed). 2021;65:138–51, <http://dx.doi.org/10.1016/j.recot.2020.06.014>.
8. RTVE Noticias. Hospital Universitario Gregorio Marañón [2 Junio 2024]. Integración de tecnología XR en quirófano híbrido 3D. [Video]. YouTube. <https://youtu.be/4aThmvrOMNI?si=1QbTjtBF0wHSIE0Z>.

R. Pérez-Mañanes^{a,b,c,d,*} y J.A. Calvo-Haro^{a,b,c}
^a Servicio de Cirugía Ortopédica y Traumatología, Hospital General Universitario Gregorio Marañón, Madrid, España

^b CSUR de Sarcomas y Otros Tumores Músculo Esqueléticos del Adulto, Red europea EURACAN, Madrid, España
^c Universidad Complutense de Madrid, Madrid, España
^d Unidad de Planificación Avanzada y Manufactura 3D (UPAM3D), Madrid, España

* Autor para correspondencia.
Correo electrónico: ruben.perez@salud.madrid.org
(R. Pérez-Mañanes).