



# CIRUGÍA ESPAÑOLA

[www.elsevier.es/cirugia](http://www.elsevier.es/cirugia)



## Artículo especial

# Cirugía robótica como motor de la digitalización en cirugía

Miguel Toledano Trincado<sup>a</sup>, Juan Bellido-Luque<sup>b,\*</sup> y Mario Alvarez Gallego<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Hospital Universitario Río Hortega, Valladolid, España

<sup>b</sup> Hospital Universitario Virgen Macarena, Universidad de Sevilla, España

<sup>c</sup> Hospital Universitario La Paz, Madrid, España

## INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Historia del artículo:

Recibido el 2 de mayo de 2024

Aceptado el 4 de mayo de 2024

On-line el 15 de junio de 2024

Palabras clave:

Cirugía digital

Digitalización de la cirugía

Cirugía robótica

## RESUMEN

La cirugía clásica, llamada cirugía analógica, es aquella transmitida por nuestros mentores, cuyo conocimiento es delegado de generación en generación durante toda la historia de la cirugía. Sus principales limitaciones son una precisión quirúrgica limitada y la dependencia de la destreza del cirujano para la consecución de los objetivos quirúrgicos. La llamada cirugía digital incorpora toda la tecnología más avanzada, con el objetivo de mejorar los resultados de todas las fases del proceso quirúrgico. Las plataformas robóticas se consideran actualmente como unos de los principales impulsores de la transformación digital de la cirugía. Aporta considerables avances en la digitalización de la cirugía, visualización de mayor calidad, movimientos más controlados y estables con la eliminación del temblor, minimizando el riesgo de errores, integración de todos los datos dentro del proceso quirúrgico del paciente, uso de diferentes sistemas para una mejor planificación quirúrgica, aplicación de la realidad virtual y aumentada, *telementoring* o inteligencia artificial.

© 2024 AEC. Publicado por Elsevier España, S.L.U. Se reservan todos los derechos, incluidos los de minería de texto y datos, entrenamiento de IA y tecnologías similares.

## Robotic surgery as a driver of surgical digitalization

## ABSTRACT

Classical surgery, also called *analog surgery*, is transmitted to us by our mentors, whose knowledge has been delegated from generation to generation throughout the history of surgery. Its main limitations are limited surgical precision and dependence on the surgeon's skill to achieve surgical goals. So-called *digital surgery* incorporates the most advanced technology, with the aim of improving the results of all phases of the surgical process. Robotic platforms are currently considered to be one of the main drivers of the digital transformation of surgery. They bring considerable advances to the digitalization of surgery, including: higher quality visualization, more controlled and stable movements with elimination of tremor, minimized risk of errors, data integration throughout the patient's surgical

\* Autor para correspondencia.

Correo electrónico: [j\\_bellido\\_l@hotmail.com](mailto:j_bellido_l@hotmail.com) (J. Bellido-Luque).

<https://doi.org/10.1016/j.ciresp.2024.05.001>

0009-739X/© 2024 AEC. Publicado por Elsevier España, S.L.U. Se reservan todos los derechos, incluidos los de minería de texto y datos, entrenamiento de IA y tecnologías similares.

process, use of various systems for better surgical planning, application of virtual and augmented reality, *telementoring*, and artificial intelligence.

© 2024 AEC. Published by Elsevier España, S.L.U. All rights are reserved, including those for text and data mining, AI training, and similar technologies.

## Introducción

Estamos asistiendo a los albores de una de las mayores revoluciones en la historia de la cirugía. Gracias al desarrollo de la tecnología y a la implantación de la cirugía robótica, se ha iniciado la llamada «transformación digital de la cirugía».

La digitalización de la cirugía permitirá la navegación intraoperatoria asistida por pruebas de imagen, la asistencia a la toma de decisiones, e incluso la automatización de parte o de todo un procedimiento quirúrgico. Esta transformación digital no solo impactará la asistencia a nuestros enfermos, sino en la propia docencia de nuestro oficio y el futuro desarrollo de nuestra ciencia.

Los cirujanos no nos podemos quedar al margen de esta revolución y tenemos la obligación de familiarizarnos con la inteligencia artificial, la gobernanza y la explotación de los datos, y estar preparados para participar en el futuro del desarrollo tecnológico de la cirugía.

Podemos definir la digitalización de la cirugía como aquel proceso que incluye la incorporación de tecnologías digitales, como la realidad virtual, aumentada o mixta, la simulación quirúrgica, la telecirugía y la inteligencia artificial, en el campo de la cirugía para mejorar la precisión, la eficiencia y los resultados de los procedimientos quirúrgicos.

La cirugía robótica merece mención aparte, ya que está siendo un motor importante en la digitalización de la cirugía en los últimos años.

Para entender las razones por las que la cirugía robótica es actualmente un pilar básico en la digitalización quirúrgica, tendremos primero que saber cuáles han sido los cambios que han llevado a la cirugía analógica tradicional a convertirse en la actual cirugía digital.

## Cirugía analógica

Este tipo de cirugía se basa en 2 conceptos fundamentales:

1. *Experiencia adquirida durante años de práctica quirúrgica.* El conocimiento quirúrgico clásico se basa en la transmisión de la información llevada a cabo por nuestros mentores y en la experiencia adquirida con la repetición de los procedimientos quirúrgicos, al principio tutelados como cirujanos en formación y posteriormente de forma independiente.
2. *Destreza del cirujano.* Los cirujanos dependemos en gran medida de nuestras habilidades manuales, existiendo por ello una gran diferencia entre un cirujano y otro basado en la destreza que cada uno posee para la realización de determinados procedimientos manuales.

Este tipo de cirugía presenta diferentes limitaciones:

1. *Visualización:* La visualización en la cirugía clásica analógica se realiza principalmente a través de lentes de aumento o cámaras quirúrgicas, que ofrecen una visión limitada y de baja calidad.
2. *Error humano:* Debido a su dependencia de la habilidad manual del cirujano, la cirugía analógica presenta un mayor riesgo de comisión de errores humanos, cuya probabilidad aumenta en procedimientos largos y complejos.
3. *Precisión:* La precisión en la cirugía analógica depende en gran medida de la destreza y la coordinación del cirujano. Las limitaciones naturales de las manos humanas asociado al cansancio del cirujano en procedimientos largos y complejos, lleva asociado una disminución de la precisión de los movimientos.
4. *Integración de datos:* Tanto la adquisición como la gestión e integración de los datos de los registros médicos e imágenes médicas no están incluidos en el proceso quirúrgico en la cirugía analógica, lo que limita en gran medida la toma de decisiones tanto pre como intra o postoperatorias.

## Cirugía digital y robotización quirúrgica

La cirugía digital utiliza tecnología más avanzada como robots quirúrgicos, que incorporan sistemas de visualización de alta definición, en 3D y otras herramientas de navegación quirúrgica intraoperatoria, ofreciendo considerables ventajas sobre la cirugía analógica.

La cirugía robótica se está convirtiendo en el motor de la expansión de la cirugía digital. Las razones por las que las plataformas robóticas son parte fundamental de la digitalización quirúrgica se detallan a continuación:

### Visualización mejorada

La cirugía digital ofrece una considerable mejora en la visualización quirúrgica, con el uso de imágenes 4K y 3D, ofreciendo al cirujano una mayor capacidad de detección de estructuras durante los procedimientos quirúrgicos, facilitando la realización de gestos quirúrgicos complejos con más seguridad y mejor control<sup>1</sup> (tabla 1).

Así mismo es posible ampliar y enfocar la imagen en tiempo real sin detrimento de la definición. Todas estas mejoras ayudan a los cirujanos a identificar y tratar situaciones quirúrgicas complejas con mayor precisión. Este es un aspecto crucial que ha transformado la manera en que los cirujanos perciben y realizan los procedimientos quirúrgicos.

Por otro lado, la estabilidad de la imagen que proporcionan los robots quirúrgicos permiten eliminar movimientos indeseados de la mano del cirujano, garantizando una visualización más nítida y estable durante la cirugía.

Tabla 1 – Características de la imagen Full HD, 4K y 3D

Full HD	4K	3D
Resolución: 1.920 × 1.080 píxeles	Resolución: 3.840 × 2.160 píxeles	Precisa 2 cámaras con diferente ángulo. Fusión de 2 imágenes
Menor calidad de imagen	Experiencia realista	Sensación de profundidad del campo quirúrgico
Gama cromática menor	Gama de colores más amplia	Mayor precisión de movimientos
Menor coste	Mejor delimitación de la anatomía quirúrgica	Necesidad de gafas de visión 3D en cirugía laparoscópica
Compatibilidad con hardware habitual	Elevados costes	Colocación del cirujano en ángulo específico respecto a la pantalla

La iluminación en los sistemas robóticos se puede ajustar de manera flexible para proporcionar una iluminación óptima en el campo quirúrgico, lo que es fundamental para una cirugía precisa<sup>1</sup>.

Reducción de errores humanos

La cirugía digital reduce la dependencia de la habilidad manual del cirujano, lo que disminuye el riesgo de errores humanos. Los principales motivos por los que la cirugía digital consigue disminuir la probabilidad de errores a través de las plataformas robóticas, son:

Control y precisión de movimientos<sup>2</sup>: Los sistemas de cirugía robótica permiten a los cirujanos realizar movimientos extremadamente precisos y controlados. Dicha precisión quirúrgica se consigue de varias maneras:

- *Eliminación del temblor*: Los sistemas robóticos están diseñados para eliminar el temblor natural de las manos humanas. Incluso el cirujano más hábil puede tener microtemblores en las manos que afectan a la precisión en procedimientos delicados.
- *Movimientos controlados*: Los brazos robóticos son altamente controlables y pueden moverse con una precisión milimétrica. Esto es especialmente valioso en cirugías que involucran estructuras anatómicas delicadas o pequeñas, como nervios o vasos sanguíneos.
- *Estabilidad de movimientos repetitivos*: Los robots pueden repetir movimientos con una precisión constante, lo que es particularmente beneficioso en procedimientos que requieren la realización de tareas repetitivas o suturas precisas.

Reducción del cansancio: Un factor importante que afecta directamente a la posibilidad de errores humanos es el cansancio del cirujano durante procedimientos largos, hecho que se reduce de forma significativa con la cirugía robótica. El cirujano se encuentra confortablemente sentado en la consola durante el procedimiento. Este hecho mejora notablemente la probabilidad de errores durante los diferentes pasos quirúrgicos.

Integración de datos

Todos los datos médicos se encuentran digitalizados dentro de una misma plataforma, por lo que los registros electrónicos de salud e imágenes médicas, se integran directamente en el proceso quirúrgico en la cirugía digital, permitiendo el acceso por parte del cirujano a dicha información en cualquier momento del proceso, y en cualquier lugar<sup>3</sup>.

El primer paso hacia la digitalización en cirugía implica la adopción de registros médicos electrónicos (RME). Esto implica

la transición de la información de salud de los registros en papel a un formato electrónico, lo que facilita el acceso, la búsqueda y el intercambio de datos médicos relevantes para el paciente y el procedimiento quirúrgico.

El almacenamiento y la gestión de todos los datos médicos de salud aportan considerables ventajas<sup>3</sup>:

- *Acceso más rápido y eficiente*: Los RME permiten a los profesionales de la salud acceder a los registros médicos de los pacientes de manera rápida y eficiente.
- *Reducción de errores de documentación*: La digitalización de la información médica reduce significativamente los errores de documentación. A diferencia de los registros en papel, los datos digitales son más legibles y menos propensos a errores de transcripción.
- *Interoperabilidad*: Los sistemas RME permiten compartir datos entre diferentes sistemas y profesionales de la salud. Esto es crucial para la coordinación de la atención entre cirujanos, anestesiólogos, enfermeras y otros miembros del equipo quirúrgico.
- *Historial médico completo*: Los RME almacenan un historial médico completo de cada paciente, que incluye información sobre visitas anteriores, procedimientos realizados, medicamentos recetados y resultados de exámenes. Esto proporciona una vista integral de la salud del paciente, lo que es valioso para la toma de decisiones médicas informadas. La disponibilidad de datos médicos precisos y actualizados en tiempo real facilita la toma de decisiones clínicas durante la cirugía. Los cirujanos pueden acceder a información relevante sobre el paciente y adaptar su enfoque en función de esa información.
- *Seguridad de la información*: Los RME están diseñados con medidas de seguridad robustas para proteger la información de salud del paciente. Esto incluye la encriptación de datos, el control de acceso y la autenticación, lo que garantiza la confidencialidad de la información.
- *Integración con sistemas de planificación y navegación quirúrgica*: Los datos de los RME se pueden integrar con sistemas de planificación y navegación quirúrgica, lo que ayuda a los cirujanos a planificar y ejecutar procedimientos de manera más precisa.
- *Auditoría y seguimiento*: Los RME facilitan la auditoría y el seguimiento de la atención médica. Esto es importante para evaluar la calidad de los procedimientos quirúrgicos y garantizar que se sigan las mejores prácticas médicas.

Durante una intervención quirúrgica, se generan diversos tipos de datos y registros para garantizar un seguimiento preciso de la cirugía y la atención al paciente. Estos datos son

esenciales para documentar el procedimiento, evaluar la seguridad del paciente y optimizar los resultados. Datos del paciente, procedimiento quirúrgico (tipo de cirugía realizada, fecha y hora de inicio y finalización de la cirugía, nombre del cirujano principal, descripción detallada del procedimiento quirúrgico y otros), monitorización de signos vitales, registros de anestesia, datos quirúrgicos específicos (cantidad y tipo de tejido extirpado o reparado, dispositivos médicos o instrumentos específicos usados, registro de eventos inusuales o complicaciones durante la cirugía), son registrados y clasificados con el objetivo de garantizar una atención quirúrgica segura y de alta calidad<sup>4</sup>.

### Planificación quirúrgica

La digitalización en cirugía incluye además la utilización de sistemas de planificación quirúrgica. Los sistemas de planificación quirúrgica son herramientas digitales que permiten a los cirujanos planificar con precisión los procedimientos quirúrgicos antes o durante la cirugía. Estos sistemas utilizan imágenes médicas digitales, modelos 3D y herramientas de *software* especializadas, para ayudar en la planificación, navegación y ejecución de las cirugías.

Los sistemas de planificación quirúrgica permiten la identificación de estructuras anatómicas críticas mediante el análisis de imágenes médicas y la posterior evaluación de la mejor estrategia quirúrgica. Estos sistemas permiten a los cirujanos realizar simulaciones de procedimientos quirúrgicos antes de la cirugía real. Esto incluye la simulación de movimientos y vías de acceso para la mejor planificación de los pasos a realizar en la posterior cirugía. Esto es especialmente valioso en cirugías mínimamente invasivas donde se debe navegar con precisión.

Además, con la planificación quirúrgica, se pueden seleccionar los instrumentos y los dispositivos específicos que se utilizarán durante la cirugía, lo que permite una preparación meticulosa y garantiza que se tengan a mano los recursos adecuados.

Así mismo se pueden crear crear modelos 3D detallados de la anatomía del paciente, mostrando estructuras anatómicas, órganos, vasos sanguíneos, o tumores a partir de imágenes médicas de tomografías computarizadas (TC) o resonancia magnética (RM). Con estos modelos 3D y *software* determinado, se consigue simular la cirugía a realizar planificando la secuencia de pasos quirúrgicos en un entorno virtual antes de la cirugía real<sup>5</sup>.

Al permitir una planificación detallada y la visualización de posibles complicaciones antes de la cirugía, estos sistemas pueden ayudar a reducir los riesgos durante el procedimiento real<sup>5</sup>.

La planificación quirúrgica digitalizada facilita además la comunicación entre los miembros del equipo quirúrgico, ya que todos ellos tienen acceso al planteamiento quirúrgico y los pasos durante la cirugía, permitiendo una mejora en la interconexión entre cada miembro del equipo.

Después de la cirugía, los sistemas de planificación pueden utilizarse para evaluar la precisión y los resultados del procedimiento. Esto es útil para la mejora continua y el seguimiento de la calidad.

### Realidad virtual, aumentada y mixta

De acuerdo con la Real Academia Española de la Lengua, la realidad virtual (RV) se define como: «Representación de escenas o imágenes de objetos producida por un sistema informático, que da la sensación de su existencia real».

Es por tanto un entorno de escenas u objetos de apariencia real, que crea en el usuario la sensación de estar inmerso en él. Es una realidad digital, simulada, de tal manera que las aplicaciones de realidad virtual sumergen al usuario en un entorno artificial, generado por ordenador, que simula la realidad mediante el empleo de dispositivos interactivos, que envían y reciben información, mediante el empleo de sensores y actuadores. Estos dispositivos interactivos, habitualmente son los denominados gafas o cascos de realidad virtual (*Head Mounted Display* [HMD]), si bien pueden existir otros como auriculares, guantes o trajes especiales, que permiten la percepción de diferentes estímulos sensoriales visuales, auditivos o táctiles<sup>6</sup>.

La RV puede ser de 2 tipos: inmersiva y no inmersiva. La no inmersiva emplea también un ordenador, pero sin existir la necesidad de dispositivos interactivos adicionales. De mucho menor coste que la variante inmersiva, este enfoque es similar a una navegación en entornos 3D usando un ordenador, manipulando el entorno únicamente con teclado y ratón o periféricos no inmersivos. La RV no inmersiva, permite por tanto la interacción con un mundo virtual, pero sin sentirse dentro del mismo.

La RV puede implementarse según diferentes métodos<sup>7</sup>:

- Empleo de simuladores.
- Uso de avatares (personajes en el ámbito digital).
- Proyección de imágenes reales (diseño de gráficos por ordenador).
- Modelado 3D por ordenador.
- Inmersión en entornos virtuales (interfaces cerebro/máquina).

La RV no modifica la realidad, sino que crea una realidad completamente nueva. A través de la programación informática, se generan mundos y entornos virtuales (simulaciones) que suponen una representación alternativa de la realidad, y con la que se puede interactuar<sup>8</sup>.

La realidad aumentada (RA) se basa en una representación de la realidad, visualizada a través de un dispositivo, con información digital añadida por éste. Se combinan así elementos físicos tangibles con elementos virtuales, creándose así una realidad aumentada en tiempo real. Complementa por tanto la percepción del mundo real con capas de información digital (imágenes fijas, sonidos, vídeos, datos, modelos 3D, etc.), que se superponen a la realidad (a la percepción del mundo físico) en tiempo real<sup>9</sup>.

En cirugía robótica la RA se ha utilizado para mejorar la precisión y la eficiencia de los procedimientos, pudiendo superponer imágenes de RM o TC sobre la imagen a tiempo real de la cirugía permitiendo una mejor visualización y orientación de las estructuras anatómicas. Asimismo, mediante el uso de la RA, se pueden resaltar puntos de

referencia anatómicos o marcadores quirúrgicos en el campo visual del cirujano para facilitar la identificación de estructuras específicas y garantizar una cirugía precisa<sup>9</sup>.

La RA puede mostrar datos vitales del paciente durante la cirugía, como la frecuencia cardíaca, la presión arterial o los niveles de oxígeno en la sangre, en la vista del cirujano durante la cirugía. Esto permite una monitorización continua sin apartar la vista del campo quirúrgico.

En resumen, la RA durante los procedimientos laparoscópicos o robóticos mejora la precisión, la seguridad y la eficiencia de estas intervenciones, reduciendo el riesgo de errores y complicaciones (tabla 2).

La realidad mixta (RM) también denominada realidad mezclada o realidad híbrida, es una combinación entre RV y RA, que permite crear nuevos espacios en los que interactúan tanto objetos y/o personas reales como virtuales. Mediante la RM, se traslada el mundo real al mundo virtual, generando un modelo 3D de la realidad y, sobre este, superponiendo información virtual, ligando las 2 realidades. En RM, la inserción de elementos reales en un entorno virtual se consigue registrando en tiempo real el objeto o persona física real, a través de un interfaz computarizado<sup>9</sup>.

Simulación quirúrgica

La digitalización de la cirugía conlleva el uso de plataformas de simulación quirúrgica, pudiendo simular el proceso a realizar antes de la cirugía. Incluso algunas plataformas usan como base las imágenes de TAC o RNM con el objetivo de poder simular los pasos de la cirugía en la anatomía del propio paciente.

Telecirugía y telementorización

La cirugía robótica, como parte de la cirugía digital, permite la llamada telecirugía, mediante la cual un cirujano localizado en un punto concreto, puede realizar una intervención quirúrgica a distancia usando plataformas robóticas que llevan incluido dicho sistema<sup>10</sup>.

La telecirugía permite que los pacientes tengan acceso a cirujanos altamente especializados sin estar físicamente presentes en su área geográfica. Esto es especialmente valioso en casos de procedimientos complejos o poco comunes, donde se requiere la experiencia de un especialista<sup>10</sup>.

La telecirugía se ha utilizado en situaciones de urgencia, como desastres naturales o áreas remotas donde la atención médica avanzada es escasa<sup>11</sup>. Los robots quirúrgicos y la tecnología de comunicación permiten que los cirujanos

realicen procedimientos críticos a distancia, en situaciones especiales de urgencia.

La telementorización o guía a distancia consiste en el establecimiento de una relación en la cual un experto (mentor) aporta una guía a un cirujano menos experto (mentee) desde una localización remota, permitiendo la colaboración en tiempo real entre cirujanos en diferentes ubicaciones<sup>12</sup>.

El «telementoring» se utiliza, por tanto, en el proceso de capacitación de cirujanos y residentes, pudiendo supervisar y guiar a cirujanos en formación en tiempo real, lo que mejora la calidad de la educación médica.

Es importante destacar que la telecirugía también presenta diversos inconvenientes que deben ser corregidos, como la latencia en la comunicación, la seguridad de los datos y las consideraciones éticas y legales.

Inteligencia artificial y aprendizaje automático en cirugía

La incorporación de la inteligencia artificial (IA) y el aprendizaje automático (machine learning [ML]) en cirugía, ha transformado la forma en que se planifican y ejecutan los procedimientos quirúrgicos. Estas tecnologías permiten la recopilación y el análisis de datos en tiempo real, la toma de decisiones más precisas y la mejora de la seguridad del paciente<sup>13,14</sup>.

La IA y el aprendizaje automático permiten el análisis de datos en tiempo real durante la cirugía. Los algoritmos de IA pueden detectar cambios anómalos en los datos durante la cirugía, lo que puede indicar posibles complicaciones. Por ejemplo, pueden alertar sobre un sangrado inesperado o una disminución en la saturación de oxígeno.

En cirugía robótica, los algoritmos de IA pueden optimizar los movimientos del robot para garantizar una precisión máxima y minimizar el tiempo de recuperación del paciente.

La IA puede ayudar a reducir los errores humanos al proporcionar alertas y recordatorios en tiempo real, mejorando la seguridad del paciente durante la cirugía y pudiendo minimizar el riesgo de complicaciones intra y postoperatorias.

La IA puede personalizar el tratamiento quirúrgico para cada paciente en función de su historial médico, su estado actual y sus características individuales. Esto permite una atención más precisa y adaptada a las necesidades del paciente<sup>13,14</sup>.

El ML es una disciplina dentro de la IA que, a través de algoritmos, dota a la plataforma robótica la capacidad de identificar patrones en datos masivos y elaborar predicciones.

Tabla 2 – Diferencias entre realidad virtual y realidad aumentada

	Realidad virtual	Realidad aumentada
Interacción cirujano/mundo real	Baja	Alta
Inmersión del cirujano en la experiencia digital	Alta	Media
	Inmersión total de cirujano en una realidad paralela	Depende de la intensidad de incorporación de aspectos digitales al mundo real
Coste	Alto	Depende del nivel de digitalización del mundo real
Facilidad de uso	Complejo	Sencillo
	Se crea una realidad totalmente nueva más compleja de manejar	



Desempeña un papel fundamental en la cirugía robótica, permitiendo mejoras significativas en la precisión, la eficiencia y la seguridad de los procedimientos quirúrgicos<sup>15</sup>.

Aplicación del ML en cirugía robótica<sup>16</sup>:

- Identificación de patrones específicos en imágenes médicas que indiquen la presencia de lesiones o tumores, facilitando su diagnóstico precoz y tratamiento temprano.
- Desarrollo de algoritmos que para detectar con mayor precisión lesiones intraabdominales, segmentar estructuras anatómicas para la localización de tumores en órganos sólidos teniendo como base las imágenes de TC o RM, siendo de gran utilidad para la planificación quirúrgica y la navegación intraoperatoria.
- Análisis de todos los datos médicos del paciente, como imágenes y registros de salud, para la mejor planificación quirúrgica, personalizada para cada paciente.
- Análisis de movimientos de los instrumentos robóticos y la respuesta del tejido en tiempo real. Esto permite al cirujano poder ajustar sus movimientos y minimizar el riesgo de lesiones.
- Eliminación de temblores involuntarios durante los movimientos quirúrgicos mediante algoritmos, mejorando la precisión quirúrgica.
- Los sistemas ML pueden monitorizar las señales biométricas del cirujano, como la frecuencia cardíaca y el movimiento ocular, para detectar signos de fatiga y estrés. Esto puede ayudar a prevenir errores debidos al agotamiento.
- Desarrollo de sistemas de retroalimentación táctil basados en ML que permiten a los cirujanos sentir la resistencia y la textura de los tejidos a través de los instrumentos robóticos.
- Evaluación de datos postoperatorios, ayudando a identificar áreas de mejora pre e intraoperatorias.

Por todo lo anteriormente expuesto, el ML desempeña un papel integral en la cirugía robótica al mejorar la precisión, la eficiencia y la seguridad de los procedimientos quirúrgicos. La combinación de la inteligencia artificial y la robótica permite a los cirujanos realizar intervenciones más precisas y personalizadas, lo que beneficia tanto a los pacientes como a los profesionales de la salud.

Como resumen, la cirugía robótica se presenta como el principal impulsor de la digitalización quirúrgica con una gran capacidad de evolución, pero actualmente estamos al inicio del camino hacia la consecución de la integración total de los datos de todo el proceso quirúrgico, tanto preoperatorio como intra- y postoperatorio.

En cirugía abierta o laparoscópica la experiencia quirúrgica y la habilidad del cirujano son los pilares fundamentales para la consecución de los objetivos marcados. Sin embargo, con la transformación digital robótica, el cirujano pasará a ser un científico que estará apoyado por toda la tecnología que la plataforma digital robótica aporta, integrando toda la información de cada fase del procedimiento quirúrgico, para así conseguir minimizar riesgos y complicaciones durante dicho proceso, sin precisar de una gran experiencia quirúrgica o elevada destreza manual.

En definitiva, el robot será el centro de control que en el que se integrará todo el *big data* del paciente, tanto datos como imágenes, y cuya información podrá analizarse de forma automática para poder ayudar al cirujano a la toma de decisiones en cada etapa del proceso quirúrgico.

## Financiación

Los autores declaran no haber recibido financiación para la realización de este trabajo.

## Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Zhang L, Hong H, Zang L, Dong F, Lu A, Feng B, et al. Application Value of 4K High-Definition System in Laparoscopic Gastrectomy: Preliminary Results and Initial Experience. *J Laparoendosc Adv Surg Tech A*. 2022;32:137-41.
2. Cleary K, Watson V, Lindisch D, Taylor RH, Fichtinger G, Xu S, et al. Precision placement of instruments for minimally invasive procedures using a «needle driver» robot. *Int J Med Robot*. 2005;1:40-7.
3. Anderson JE, Chang DC. Using electronic health records for surgical quality improvement in the era of big data. *JAMA Surg*. 2015;150:24-9.
4. Robinson JR, Huth H, Jackson GP. Review of information technology for surgical patient care. *J Surg Res*. 2016;203:121-39.
5. Yao XW, Ai K, Li Y. Presurgical Planning of 3D Printing for a Large Abdominal Pheochromocytoma and Paraganglioma. *Urology*. 2022;165:356-8.
6. Lang H, Huber T. Virtual and Augmented Reality in Liver Surgery. *Ann Surg*. 2020;271:e8.
7. Alaker M, Wynn GR, Arulampalam T. Virtual reality training in laparoscopic surgery: A systematic review & meta-analysis. *Int J Surg*. 2016;29:85-94.
8. Ochs V, Saad B, Taha-Mehlitz S, Staubli S, Neumann K, Fischer L, et al. An analysis of virtual reality in abdominal surgery-A scoping review. *Int J Med Robot*. 2024;20:e2623.
9. Lungu AJ, Swinkels W, Claesen L, Tu P, Egger J, Chen X. A review on the applications of virtual reality, augmented reality and mixed reality in surgical simulation: An extension to different kinds of surgery. *Expert Rev Med Devices*. 2021;18:47-62.
10. Marescaux J, Leroy J, Rubino F, Smith M, Vix M, Simone M, et al. Transcontinental robot-assisted remote telesurgery: Feasibility and potential applications. *Ann Surg*. 2002;235:487-92.
11. Barba P, Stramiello J, Funk EK, Richter F, Yip MC, Orosco RK. Remote telesurgery in humans: A systematic review. *Surg Endosc*. 2022;36:2771-7.
12. Bilgic E, Turkdogan S, Watanabe Y, Madani A, Landry T, Lavigne D, et al. Effectiveness of Telementoring in Surgery Compared With On-site Mentoring: A Systematic Review. *Surg Innov*. 2017;24:379-85.
13. Zhang C, Hallbeck MS, Salehinejad H, Thiels C. The integration of artificial intelligence in robotic surgery: A narrative review. *Surgery*. 2024. S0039-6060(24)00068-0.

- 
14. Knudsen JE, Ghaffar U, Ma R, Hung AJ. Clinical applications of artificial intelligence in robotic surgery. *J Robot Surg.* 2024;18:102.
  15. Loftus TJ, Tighe PJ, Filiberto AC, Efron PA, Brakenridge SC, Mohr AM, et al. Artificial Intelligence and Surgical Decision-making. *JAMA Surg.* 2020;155:148-58.
  16. Henn J, Bunes A, Schmid M, Kalff JC, Matthaei H. Machine learning to guide clinical decision-making in abdominal surgery-a systematic literature review. *Langenbecks Arch Surg.* 2022;407:51-61.