# CIRUGÍA ROBÓTICA E INTELIGENCIA ARTIFICIAL: AVANCES EN LA DETECCIÓN INTRAOPERATORIA DE MÁRGENES TUMORALES EN CÁNCER COLORRECTAL

**AUTOR:** MANUEL ALBERTO SOLÍS AGUILAR, KAROLINA RODRIGUEZ ZAMARRIPA

**RESUMEN**

El cáncer colorrectal (CCR) representa una de las principales causas de mortalidad oncológica a nivel mundial, atribuida en gran medida a la persistencia de márgenes quirúrgicos positivos (R1) tras la resección tumoral. La cirugía robótica Da Vinci (CRDV) ha demostrado ventajas frente a técnicas tradicionales; sin embargo, la confirmación de márgenes negativos (R0) continúa dependiendo del análisis histopatológico postoperatorio. En este contexto, la integración de inteligencia artificial (IA) en el entorno quirúrgico tiene como objetivo optimizar la detección de márgenes tumorales de forma intraoperatoria y en tiempo real. Esta revisión analiza estudios recientes sobre modelos de IA aplicados a biopsias y ecografía intraoperatoria, incluyendo algoritmos como Residual Networks-34 (ResNet-34) y Mask Region-based Convolutional Neural Network (Mask R-CNN). Se abordan sus ventajas, limitaciones, implicaciones clínicas y perspectivas futuras en la formación quirúrgica y en el sistema de salud mexicano.



## INTRODUCCIÓN

Según la base de datos GLOBOCAN de la Organización Mundial de la Salud (1), el cáncer colorrectal (CCR) es el tercer tipo de cáncer más frecuentemente diagnosticado en hombres y el segundo en mujeres a nivel mundial. En México, la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (2) reporta que esta neoplasia constituye la primera causa de muerte por cáncer, con 16,082 casos nuevos y 8,283 defunciones registradas en 2022. Aunque el riesgo de desarrollar CCR comienza a aumentar de forma sostenida a partir de los 40 años (3), el Colegio Americano de Gastroenterología (4) estima que la edad promedio al momento del diagnóstico es de 70 años. Esta diferencia temporal indica que un porcentaje importante de pacientes recibe el diagnóstico en etapas avanzadas de la enfermedad, las cuales suelen requerir esquemas terapéuticos más agresivos.

En cuanto a la sintomatología, la Sociedad Americana Contra el Cáncer (5) señala que los signos más comunes incluyen cambios en los hábitos intestinales, como diarrea o estreñimiento, disminución en el calibre de las heces, tenesmo, hematoquecia, melena, dolor abdominal tipo cólico, debilidad, fatiga y pérdida de peso sin causa aparente.

Por otro lado, en relación con los factores de riesgo, la Asociación Española Contra el Cáncer (6) destaca el sobrepeso u obesidad, la diabetes mellitus tipo 2, el sedentarismo, el consumo de alcohol y tabaco, la edad avanzada, los antecedentes personales o familiares de pólipos o CCR, así como las enfermedades inflamatorias intestinales como elementos determinantes en la aparición de esta neoplasia.

La resección quirúrgica con márgenes negativos (R0) constituye un factor determinante en el pronóstico del CCR (7). El análisis histopatológico de los márgenes quirúrgicos permite identificar la presencia de células tumorales residuales, lo cual es fundamental para reducir el riesgo de recurrencia local. No obstante, esta evaluación presenta limitaciones asociadas tanto a las características del procedimiento como a factores humanos. La valoración macroscópica e intraoperatoria puede ser insuficiente en casos de tumores infiltrantes o con localización anatómica compleja, mientras que una carga excesiva de trabajo sobre los patólogos puede comprometer la precisión diagnóstica y retrasar decisiones terapéuticas.

El objetivo durante la intervención quirúrgica es lograr la resección completa del tumor, así como de las principales estructuras vasculares adyacentes y del grupo linfático correspondiente al segmento colónico afectado (8). La incorporación de tecnologías como la cirugía robótica y la inteligencia artificial (IA) ha sido propuesta como estrategia para mejorar la detección intraoperatoria de márgenes tumorales, con el propósito de optimizar la toma de decisiones quirúrgicas en tiempo real y mejorar los desenlaces oncológicos.

En este contexto, la cirugía robótica Da Vinci (CRDV) se ha consolidado como una alternativa de alta precisión frente a las técnicas quirúrgicas convencionales, al proporcionar visualización tridimensional, mayor destreza instrumental y acceso mejorado a regiones anatómicamente complejas, como la pelvis. Estas características favorecen una disección más precisa y un control más eficaz de los márgenes quirúrgicos, especialmente en tumores rectales. La incorporación de IA en este entorno quirúrgico ha sido propuesta como una herramienta complementaria para asistir en la detección intraoperatoria de márgenes tumorales, con el objetivo de optimizar la resección y mejorar los desenlaces oncológicos.

## CIRUGÍA ROBÓTICA FRENTE A LAS TÉCNICAS QUIRÚRGICAS DEL PRESENTE

Diversos estudios comparativos han demostrado que la CRDV ofrece ventajas clínicas significativas frente a la cirugía laparoscópica (CL) y la cirugía abierta (CA) en el tratamiento del CCR (9, 10, 11). En términos de control oncológico, la CRDV alcanzó una tasa de supervivencia a tres años del 96%, superior al 93% observado con CL y al 87% con CA. La tasa de complicaciones postoperatorias también fue menor con CRDV (9%) en relación con CL (13.5%) y CA (20.4%), reforzando su perfil de seguridad. Si bien el tiempo quirúrgico fue mayor en la CRDV en comparación con la CL (29.08 min) y la CA (38.81 min) ($p < 0.001$), este incremento se compensó por una reducción significativa en la pérdida sanguínea intraoperatoria: 42.11 ml menos en promedio que con CL y 102.5 ml menos que con CA ($p < 0.001$). Esta menor hemorragia puede traducirse en una reducción en la necesidad de transfusiones y en una mejor estabilidad hemodinámica postoperatoria. Además, la duración de la hospitalización fue significativamente menor en los pacientes

sometidos a CRDV, con un promedio de 4.5 días vs 9.8 días en CA, lo que sugiere una recuperación más rápida y un menor consumo de recursos hospitalarios. Estos beneficios cobran relevancia si se considera que la población intervenida tenía una edad promedio de 63.5 años, lo que respalda el uso de la CRDV como una opción quirúrgica segura y clínicamente eficaz, con ventajas clínicas tangibles en pacientes de edad avanzada.

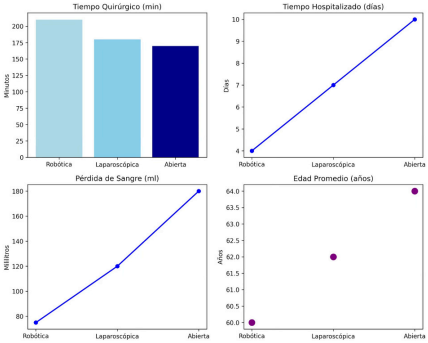


**Figura 1.** Comparación de variables.

## MODELOS DE ENTRENAMIENTO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL PARA EL ANÁLISIS HISTOPATOLÓGICO

Como complemento a las técnicas quirúrgicas avanzadas, una vez realizada la resección tumoral mediante CRDV, se ha incorporado IA en el análisis histopatológico mediante redes neuronales profundas. Actualmente, los sistemas automatizados basados en aprendizaje profundo (deep learning, DL) se han utilizado en el procesamiento de imágenes médicas, tales como tomografías computarizadas, resonancias magnéticas e imágenes por resonancia magnética con contraste dinámico, con resultados favorables en la detección temprana de diversos tipos de cáncer, incluidos los de mama, pulmón y cerebro.

Entre los modelos evaluados, *Residual Networks-34* (ResNet-34), entrenado con imágenes teñidas con hematoxilina y eosina, alcanzó una precisión del 93.4 %, con una sensibilidad del 99.7 % y una especificidad del 97.7 % (12). Estos resultados son comparables con los obtenidos por patólogos humanos, lo que respalda su uso como herramienta auxiliar en entornos con alta carga de trabajo o necesidad de diagnóstico ágil y reproducible. Otros modelos, como la combinación de U-Net con Random Forest y el modelo *Big Transfer-Medium* (BiT-M), lograron tasas de precisión del 87 % y 80.6 %, respectivamente (13, 14).

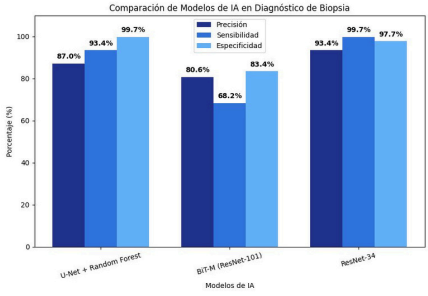


**Figura 2.** Comparación de modelos IA en diagnóstico de biopsia.

## LA CIRUGÍA GUIADA POR INTELIGENCIA ARTIFICIAL EN TIEMPO REAL YA ES EL PRESENTE

Como parte de las estrategias orientadas a la optimización de la cirugía oncológica, se ha evaluado la integración de IA en plataformas quirúrgicas robóticas, con énfasis en la identificación intraoperatoria de tejido tumoral residual. En los últimos años, la ecografía intraoperatoria con contraste (contrast-enhanced intraoperative ultrasound,

CE-IOUS), combinada con el modelo Mask Region-based Convolutional Neural Network (Mask R-CNN), ha alcanzado una precisión del 96.5 %, con una sensibilidad del 98.1 % y una especificidad del 97.6 %, superando modelos como SpecNet y Random Forest (15). Mask R-CNN se caracteriza por su capacidad para realizar segmentación a nivel de píxel, lo que permite una delimitación morfológica precisa de las estructuras identificadas (16).

La utilización de estas herramientas durante el acto quirúrgico ha mostrado utilidad en la mejora de la delimitación de márgenes de resección en tiempo real. Su integración en sistemas quirúrgicos avanzados constituye una línea de investigación en desarrollo dentro del ámbito de la cirugía oncológica asistida por IA.

## DISCUSIÓN

La integración de IA en la CRDV representa una herramienta prometedora para optimizar la identificación intraoperatoria de márgenes R0, lo cual puede contribuir a una menor tasa de recurrencias y a una mayor sobrevida libre de enfermedad. Modelos como ResNet-34 han demostrado una alta precisión en el análisis digital de tejidos histológicos, alcanzando métricas comparables al rendimiento de patólogos humanos, y facilitando el diagnóstico asistido. Asimismo, la combinación de CE-IOUS y algoritmos como Mask R-CNN ha marcado un precedente importante en el análisis histopatológico en tiempo real.

No obstante, la implementación práctica de estas tecnologías en quirófanos enfrenta múltiples desafíos. Uno de los principales es la variabilidad en la calidad de las imágenes histológicas y ecográficas, lo que puede afectar la fiabilidad de los modelos. Además, el entrenamiento de algoritmos de IA depende en gran medida de la cantidad y diversidad de imágenes disponibles, lo que introduce posibles sesgos si no se representan adecuadamente todas las variables clínicas y biológicas de la población.

En lo que respecta a la bioética, representa un desafío garantizar el acceso equitativo a este tipo de tecnología, especialmente en países en desarrollo como México. Otro reto importante es no anteponer los resultados generados por los sistemas automatizados al juicio clínico del personal médico, construyendo un modelo únicamente asistencial en el que la IA actúe como apoyo diagnóstico y no como sustituto de la responsabilidad clínica.

Asimismo, el futuro acceso a bases de datos nacionales (*Big Data*) con imágenes histológicas, clínicas y quirúrgicas de pacientes mexicanos permitirá mejorar el entrenamiento de los algoritmos y adaptarlos al contexto local. Por otro lado, la competencia tecnológica y la evolución del mercado podrían contribuir a una progresiva reducción de costos, facilitando su adopción en instituciones tanto públicas como privadas. En paralelo, la formación de recursos humanos será un pilar esencial: la capacitación masiva, la actualización de programas académicos y la colaboración entre universidades, centros de investigación y hospitales de alta especialidad serán fundamentales para

formar una nueva generación de cirujanos expertos en cirugía robótica con IA. Esto optimizaría los resultados oncológicos en el país y posicionaría a México como referente regional en cirugía de precisión.

**CONCLUSIONES**

La IA integrada a la CRDV representa un avance significativo en la evaluación intraoperatoria de márgenes tumorales en el CCR. Modelos como ResNet-34 y Mask R-CNN han demostrado una alta precisión diagnóstica, comparable al desempeño de especialistas humanos, facilitando una resección más precisa y segura. Si bien estos avances ofrecen beneficios clínicos tangibles, su adopción a gran escala exige superar desafíos relevantes, como la validación clínica local, la disponibilidad de infraestructura tecnológica y la formación especializada del personal médico. La colaboración entre instituciones académicas, hospitales y centros de investigación será clave para garantizar una implementación efectiva, equitativa y sostenible.

México tiene el potencial de consolidarse como referente regional en cirugía oncológica de precisión mediante el uso de IA. La inversión estratégica en tecnología, capacitación e investigación aplicada puede permitir una transición hacia una medicina más eficiente, accesible y centrada en el paciente.

**REFERENCIAS**


1. The International Agency for Research on Cancer (IARC). Global Cancer Observatory [Internet]. gco.iarc.fr. 2022. [Consultado 27 Jun 2025]. Disponible en: https://gco.iarc.fr/en
2. Secretaría de Salud. 131. Necesario, modificar estilos de vida para evitar desarrollo de cáncer colorrectal: INCan [Internet]. gob.mx. 2024. [Consultado 25 Jun 2025]. Disponible en: https://www.gob.mx/salud/prensa/131-necesario-modificar-estilos-de-vida-para-evitar-desarrollo-de-cancer-colorrectal-incan?idiom=es
3. Haggar F, Boushey R. Colorectal Cancer Epidemiology: Incidence, Mortality, Survival, and Risk Factors. Clinics in Colon and Rectal Surgery [Internet]. Nov 2009 [Consultado 25 Jun 2025]; 22(4):192. Disponible en: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/21037809/
4. American College of Gastroenterology. DETECCION DEL CANCER COLORRECTAL [Internet]. American College of Gastroenterology. 2025 [Consultado 25 Jun 2025]. Disponible en https://gi.org/patients/recursos-en-espanol/deteccion-del-cancer-colorectal/
5. American Cancer Society. Signos y síntomas del cáncer colorrectal [Internet]. www.cancer.org. 2025 [Consultado 26 Jun 2025]. Disponible en https://www.cancer.org/es/cancer/tipos/cancer-de-colon-o-recto/deteccion-diagnostico-clasificacion-por-etapas/senales-y-sintomas.html
6. Asociación Española contra el Cancer. Causas y factores de riesgo del cáncer de colon [Internet]. www.contraelcancer.es. 2025 [Consultado 22 Jun 2025]. Disponible en https://www.contraelcancer.es/es/todo-sobre-cancer/tipos-cancer/cancer-colon/causas-cancer-colon
7. Morales-Cruz M, Armillas-Canseco F, Carpinteyro-Espín P, Domínguez-Rosado I, Mercado MA. Valor pronóstico del margen quirúrgico positivo tras la resección de un colangiocarcinoma. Experiencia en un centro de alto volumen en cirugía hepatopancreatobiliar. Revista de Gastroenterología de México [Internet]. Ene 2020 [Consultado 21 Jun 2025]; 85(1):18–24. Disponible en: https://www.revistagastroenterologiamexico.org/es-valor-pronostico-del-margen-quirurgico-articulo-S0375090619300588
8. Menon G, Cagir B. Colon Cancer [Internet]. StatPearls Publishing; 2025 [Consultado 20 Jun 2025]. Disponible en https://www-ncbi-nlm-nih-gov.translate.goog/books/NBK470380/?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=tc
9. Rahimli M, Perrakis A, Schellerer V, Gumbs A, Lorenz E, Franz M, et al. Robotic and laparoscopic liver surgery for colorectal liver metastases: an experience from a German Academic Center. World Journal of Surgical Oncology. Dic 2020; 18(1).

10. Yang SX, Sun ZQ, Zhou QB, Xu JZ, Chang Y, Xia KK, et al. Security and Radical Assessment in Open, Laparoscopic, Robotic Colorectal Cancer Surgery: A Comparative Study. Technology in Cancer Research & Treatment. Ene 2018; 17:153303381879416.
11. Yuval JB, Thompson HM, Verheij FS, Fiasconaro M, Patil S, Widmar M, et al. Comparison of Robotic, Laparoscopic, and Open Resections of Nonmetastatic Colon Cancer. Diseases of the Colon & Rectum. Oct 2023; 66(10):1347-1358.
12. Neto PC, Montezuma D, Oliveira SP, Oliveira D, Fraga J, Monteiro A, et al. An interpretable machine learning system for colorectal cancer diagnosis from pathology slides. Precision Oncology. Mar 2024; 8(1).
13. Bokhorst JM, Nagtegaal ID, Fraggetta F, Vatrano S, Mesker W, Vieth M, et al. Automated risk classification of colon biopsies based on semantic segmentation of histopathology images [Internet]. arXiv.org. 2021 [Consultado 30 Jun 2025]. Disponible en http://arxiv.org/abs/2109.07892
14. Tani Y, Ishihara R, Inoue T, Okubo Y, Kawakami Y, Katsunori Matsueda, et al. A single-center prospective study evaluating the usefulness of artificial intelligence for the diagnosis of esophageal squamous cell carcinoma in a real-time setting. BMC Gastroenterology. May 2023; 23(1).
15. Takayama M, Ito K, Karako K, Mihara Y, Sasaki S, Ichida A, et al. An artificial intelligence-based recognition model of colorectal liver metastases in intraoperative ultrasonography with improved accuracy through algorithm integration. Journal of Hepato-Biliary-Pancreatic Sciences. 2024 Nov 15;32(1):58–68.
16. Petru P. What is Mask R-CNN? The Ultimate Guide. [Internet]. Roboflow Blog. 2023 [Consultado 30 Jun 2015]. Disponible en https://blog-roboflow-com.translate.goog/mask-rcnn/?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=tc
17. Google Colaboratory [Internet]. colab.research.google.com. [Consultado 30 Jun 2025]. Disponible en https://colab.research.google.com
18. Harris CR, Millman KJ, van der Walt SJ, Gommers R, Virtanen P, Cournapeau D, et al. Array Programming with NumPy. Nature [Internet]. 2020 Sep 16;585(7825):357–62. Disponible en https://www.nature.com/articles/s41586-020-2649-2
19. Virtanen P, Gommers R, Oliphant TE, Haberland M, Reddy T, Cournapeau D, et al. SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python. Nature Methods. 2020 Feb 3;17(3):261–72.