

Cirurgía Guiada por Imágenes en Procedimientos Abdominales: Revisión Sistemática con Resumen

Cirurgia Guiada por Imagem em Procedimentos Abdominais: Revisão Sistemática com Overview

Image-guided Surgery in Abdominal Procedures: A Systematic Review with Overview

RESUMO

Introdução: O avanço das tecnologias ópticas e digitais transformou o cenário da cirurgia abdominal, permitindo o uso da cirurgia guiada por imagem (IGS) como ferramenta de alta precisão para orientação intraoperatória. A fluorescência com verde de indocianina (ICG), a ultrassonografia intraoperatória (IOUS), a colangiografia fluorescente (FC), a imagem multiespectral e as plataformas tridimensionais (3D/AR) têm se destacado por aprimorar a segurança, a perfusão e o controle anatômico durante procedimentos minimamente invasivos. **Métodos:** Realizou-se uma revisão sistematizada da literatura, segundo as recomendações do PRISMA 2020, com busca na base PubMed entre 2018 e 2025, utilizando os descritores “Image-Guided Surgery”, “Abdominal Surgery”, “Fluorescence Imaging”, “Indocyanine Green”, “Intraoperative Ultrasound” e “Augmented Reality”. Foram incluídos 16 estudos de texto completo (free full text), em inglês, envolvendo humanos e cirurgias abdominais minimamente invasivas. Excluíram-se editoriais, cartas e relatos de caso isolados. **Resultados:** A fluorescência com ICG foi a modalidade mais investigada, demonstrando redução de 60–70% nas fístulas anastomóticas e identificação anatômica biliar superior a 95%. A IOUS identificou até 20% de lesões hepáticas não detectadas previamente, enquanto a colangiografia fluorescente reduziu 30% das lesões iatrogênicas. Tecnologias emergentes, como fluorescência NIR-II, imagem hiperespectral e 3D/AR, mostraram ganhos médios de 15–20% em precisão anatômica e maior eficiência intraoperatória. **Conclusão:** A cirurgia guiada por imagem consolida-se como um eixo central da cirurgia abdominal moderna, promovendo maior segurança, previsibilidade e personalização dos procedimentos. A integração entre fluorescência, ultrassonografia, reconstrução 3D e inteligência artificial inaugura uma nova era de cirurgia inteligente, orientada por dados e com impacto direto na redução de complicações e na melhoria dos desfechos clínicos.

DESCRITORES: Cirurgia guiada por imagem; Fluorescência; Verde de indocianina; Ultrassonografia intraoperatória; Cirurgia minimamente invasiva; Realidade aumentada.

ABSTRACT

Introduction: The rapid evolution of optical and digital imaging technologies has transformed abdominal surgery, establishing Image-Guided Surgery (IGS) as a high-precision tool for real-time intraoperative orientation. Indocyanine Green (ICG) fluorescence, intraoperative ultrasound (IOUS), fluorescent cholangiography (FC), multispectral imaging, and 3D/augmented reality (AR) systems have enhanced intraoperative safety, tissue perfusion assessment, and anatomic visualization in minimally invasive procedures. **Methods:** A systematized literature review was conducted according to PRISMA 2020 guidelines. Searches were performed in PubMed (2018–2025) using the terms “Image-Guided Surgery,” “Abdominal Surgery,” “Fluorescence Imaging,” “Indocyanine Green,” “Intraoperative Ultrasound,” and “Augmented Reality.” A total of 16 full-text articles in English involving human subjects and abdominal minimally invasive surgery were included. Editorials, letters, and isolated case reports were excluded. **Results:** ICG fluorescence was the most studied modality, achieving a 60–70% reduction in anastomotic leaks and >95% bile duct identification rate. IOUS detected up to 20% of additional hepatic lesions, while fluorescent cholangiography reduced iatrogenic injuries by 30%. Emerging technologies such as NIR-II fluorescence, hyperspectral imaging, and 3D/AR navigation increased anatomical precision by 15–20%, optimizing operative outcomes. **Conclusion:** Image-guided surgery has become a cornerstone of modern abdominal surgery, enhancing precision, safety, and intraoperative decision-making. The convergence of fluorescence, ultrasound, 3D visualization, and artificial intelligence defines a new era of smart surgery, combining anatomical accuracy with predictive and data-driven intraoperative performance.

DESCRIPTORS: Image-guided surgery; Indocyanine green; Fluorescence; Intraoperative ultrasound; Minimally invasive surgery; Augmented reality.

RESUMEN

Introducción: Los avances en las tecnologías ópticas y digitales han transformado el panorama de la cirugía abdominal, permitiendo el uso de la cirugía guiada por imágenes (IGS) como herramienta de alta precisión para la orientación intraoperatoria. La fluorescencia con verde de indocianina (ICG), la ecografía intraoperatoria (IOUS), la colangiografía fluorescente (FC), la imagen multiespectral y las plataformas tridimensionales (3D/AR) se han destacado por mejorar la seguridad, la perfusión y el control anatómico durante los procedimientos mínimamente invasivos. **Métodos:** Se realizó una revisión sistemática de la literatura, según las recomendaciones de PRISMA 2020, con una búsqueda en la base de datos PubMed entre 2018 y 2025, utilizando los descriptores «Image-Guided Surgery», «Abdominal Surgery», «Fluorescence Imaging», «Indocyanine Green», «Intraoperative Ultrasound» y «Augmented Reality». Se incluyeron 16 estudios de texto completo (free full text), en inglés, que involucraban a seres humanos y cirugías abdominales mínimamente invasivas. Se excluyeron editoriales, cartas y casos clínicos aislados. **Resultados:** La fluorescencia con ICG fue la modalidad más investigada, demostrando una reducción

del 60-70 % en las fístulas anastomóticas y una identificación anatómica biliar superior al 95 %. La IOUS identificó hasta un 20 % de lesiones hepáticas no detectadas previamente, mientras que la colangiografía fluorescente redujo un 30 % las lesiones iatrogénicas. Las tecnologías emergentes, como la fluorescencia NIR-II, la imagen hiperespectral y la 3D/RA, mostraron ganancias medias del 15-20 % en precisión anatómica y mayor eficiencia intraoperatoria. **Conclusión:** La cirugía guiada por imágenes se consolida como un eje central de la cirugía abdominal moderna, promoviendo una mayor seguridad, previsibilidad y personalización de los procedimientos. La integración entre la fluorescencia, la ecografía, la reconstrucción 3D y la inteligencia artificial inaugura una nueva era de cirugía inteligente, orientada por datos y con un impacto directo en la reducción de complicaciones y la mejora de los resultados clínicos.

DESCRIPTORES: Cirugía guiada por imágenes; Fluorescencia; Verde de indocianina; Ecografía intraoperatoria; Cirugía mínimamente invasiva; Realidad aumentada.

Bruna Isabel Luzzani

Universidade do Contestado.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7713-0773>

Nathalia Bravo Fontolan Pedro

Universidade para o Desenvolvimento do Estado do Pantanal (UNIDERP)
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4087-1498>

Marina Meneses De Carvalho Coelho

UNIFACID IDOMED
ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-2444-1655>

Cristiann Fernando da Silva Araújo

Universidade de Cuiabá - UNIC
ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-4127-4057>

Marianna Maksoud Rodrigues

Universidade para o Desenvolvimento do Estado do Pantanal (UNIDERP)
ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-0990-6465>

Nathan Gabriel Patussi Linares Pereira

ULTRAMED LONDRINA
ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-9993-604X>

Recebido em: 07/11/2025
Aprovado em: 18/11/2025

INTRODUCCIÓN

Los avances en las tecnologías de imagen han transformado el panorama de la cirugía abdominal, proporcionando precisión, seguridad e integración tecnológica. La cirugía guiada por imágenes (Image-Guided Surgery, IGS) representa la convergencia entre la ingeniería biomédica, la visualización óptica (imagenología) y la cirugía mínimamente invasiva, lo que permite al cirujano operar con orientación anatómica y funcional en tiempo real. La incorporación de herramientas como la fluorescencia con indocianina verde (ICG), la ecografía intraoperatoria (IOUS), las plataformas 3D y de realidad aumentada (RA) y, más recientemente, la fluorescencia en el espectro infrarrojo cercano (NIR-II) y la imagen hiperespectral, han ampliado sustancialmente las posibilidades diagnósticas y terapéuticas en el campo abdominal (1-4).

Inicialmente aplicada en contextos neuroquirúrgicos y cardiovasculares, la IGS se ha ido adaptando progresivamente a las cirugías hepatopancreatobiliares, colorrectales y esofágicas, consolidándose como una de las innovaciones más prometedoras de la cirugía moderna. En 2023, la

Asociación Europea de Cirugía Endoscópica (EAES) publicó un consenso internacional en el que se definían recomendaciones prácticas para el uso de la fluorescencia intraoperatoria con ICG, destacando su seguridad, aplicabilidad y beneficios en la reducción de complicaciones (2).

El verde de indocianina (ICG) es actualmente el principal marcador óptico utilizado en la IGS. Cuando se excita con luz en el espectro del infrarrojo cercano, el ICG emite una fluorescencia detectable por cámaras especializadas, lo que permite la visualización dinámica de la perfusión tisular, la anatomía vascular y las estructuras biliares. Esta tecnología tiene un impacto clínico demostrado en la reducción de fístulas anastomóticas en cirugías colorrectales y en una mejor definición de los márgenes quirúrgicos en resecciones hepáticas (5-9). Dicho esto, los estudios demuestran que la angiografía fluorescente modifica la conducta intraoperatoria en hasta un 10 % de los casos, reduciendo las reoperaciones y los eventos adversos graves (10,11).

En la cirugía hepatopancreatobiliar, el uso de la fluorescencia con navegación tridimensional y reconstrucción digital ha mejorado el control de los márgenes tumorales y la seguridad de las reseccio-

nes anatómicas. Técnicas como la tinción positiva y negativa con ICG, descritas por Felli et al. (2021), y el uso de fluorescencia NIR-II propuesto por Zhang et al. (2024), representan avances significativos en la delimitación de segmentos hepáticos y en el aumento de la supervivencia libre de recidiva en pacientes con carcinoma hepatocelular (13,14).

La colangiografía fluorescente, aplicada desde 2010, sigue siendo uno de los usos más consolidados de la IGS, ya que permite la identificación segura del colédoco y las estructuras biliares durante la colecistectomía laparoscópica. Se observa una alta sensibilidad y especificidad, asociadas a un bajo coste y a la eliminación de la necesidad de contraste yodado cuando se utiliza esta técnica (7). Los estudios sobre ureterografía fluorescente con ICG refuerzan la utilidad de la técnica en la prevención de lesiones iatrogénicas durante las resecciones colorrectales (16).

En los últimos años, el campo se ha ampliado con la aparición de la imagen multiespectral e hiperespectral, que es capaz de integrar diferentes longitudes de onda para un análisis tisular más detallado (15). Estas tecnologías prometen revolucionar el proceso de decisión quirúrgica

al ofrecer información automatizada sobre la perfusión, la oxigenación y la viabilidad tisular en tiempo real.

Así, la cirugía guiada por imágenes se consolida como un eje estructurante de la cirugía abdominal moderna, promoviendo no solo mejores resultados clínicos y oncológicos, sino también una mayor estandarización técnica y reproducibilidad de los resultados. El futuro de la IGS se perfila en la integración entre la fluorescencia avanzada, el modelado 3D, la inteligencia artificial y la robótica, consolidando un modelo de cirugía más preciso, predictivo y personalizado (1-16).

MATERIALES Y MÉTODOS

El presente estudio consiste en una revisión sistemática de la literatura, elaborada con el objetivo de reunir, comparar y sintetizar las evidencias científicas más recientes sobre el uso de la cirugía guiada por imágenes en procedimientos abdominales, con énfasis en las aplicaciones hepatopancreatobiliares, colorrectales, biliares y esofágicas. El diseño metodológico siguió las recomendaciones de PRISMA 2020 (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), con adaptaciones para revisiones cualitativas de carácter integrador y narrativo-descriptivo.

Estrategia de búsqueda

La búsqueda bibliográfica se realizó exclusivamente en la base de datos PubMed (Biblioteca Nacional de Medicina de EE. UU.), elegida por su amplia cobertura y disponibilidad de artículos de acceso libre y revisión por pares (texto completo gratuito).

La estrategia combinó descriptores controlados de Medical Subject Headings (MeSH) y términos libres, estructurados de la siguiente manera:

(«Cirugía guiada por imágenes») Y («Cirugía abdominal» O «Cirugía hepatobiliar» O «Cirugía colorrectal» O «Cirugía pancreática» O «Cirugía esofágica») AND («Fluorescence Imaging» OR «Indocyanine Green» OR «Intraoperative Ultrasound»

OR «Augmented Reality» OR «Hyperspectral Imaging» OR «NIR-II» OR «Ureterography»).

Se aplicaron los siguientes filtros de búsqueda:

Acceso libre al texto completo (free full text);

Publicaciones entre 2019 y 2025;

Idioma: inglés;

Estudios con poblaciones humanas;

Enfoque en procedimientos abdominales mínimamente invasivos.

Se excluyeron editoriales, cartas al editor, informes de casos aislados, revisiones no sistemáticas, estudios puramente experimentales y trabajos sin relación directa con el uso intraoperatorio de tecnologías de imagen.

Selección de los estudios

La selección se realizó en dos etapas independientes:

Etapas 1 - Selección de títulos y resúmenes: de los 237 registros iniciales identificados, se eliminaron los duplicados y los artículos sin relación directa con el tema.

Etapas 2: lectura completa: tras la lectura completa de los textos restantes, 16 estudios cumplían íntegramente los criterios de elegibilidad y se incluyeron en la revisión.

Los criterios de inclusión fueron los siguientes:

Ensayos clínicos aleatorios, revisiones sistemáticas y metaanálisis, revisiones narrativas, consensos internacionales y estudios prospectivos u observacionales;

Trabajos que abordaran técnicas de cirugía guiada por imágenes aplicadas al abdomen;

Investigaciones que utilizaran verde de indocianina (ICG), fluorescencia en el espectro infrarrojo (NIR-I y NIR-II), ecografía intraoperatoria (IOUS), colangiografía fluorescente (FC), imagen multispectral o hiperespectral y navegación tridimensional con realidad aumentada (3D/AR);

Estudios que analizaran resultados clínicos, anatómicos o funcionales asociados al uso intraoperatorio de la imagen.

Extracción y organización de los datos

La recopilación de datos se realizó de forma estandarizada, mediante una hoja

de cálculo electrónica que contenía las siguientes variables:

Autor y año de publicación;

Tipo de estudio;

Procedimiento abdominal abordado;

Modalidad de imagen utilizada;

Principales resultados y conclusiones de los autores.

Las modalidades de imagen identificadas se agruparon en seis categorías:

Fluorescencia con verde de indocianina (ICG);

Fluorescencia en el espectro infrarrojo cercano (NIR-I y NIR-II);

Ecografía intraoperatoria (IOUS);

Colangiografía fluorescente (FC);

Imagen multispectral e hiperespectral;

Navegación tridimensional y realidad aumentada (3D/RA).

El análisis de los datos se llevó a cabo de forma narrativa e integradora, con el fin de identificar patrones de eficacia, limitaciones, avances tecnológicos y perspectivas futuras de la cirugía guiada por imágenes en las principales subáreas de la cirugía abdominal.

Síntesis de los estudios incluidos

De los 237 estudios identificados inicialmente, 16 se incluyeron en el análisis final, de acuerdo con los criterios de elegibilidad. Entre ellos, se observó un predominio de metaanálisis y revisiones sistemáticas (n = 5), seguidos de ensayos clínicos aleatorizados (n = 2), revisiones simples de carácter narrativo (n = 3), estudios prospectivos y observacionales (n = 5) y consensos internacionales (n = 1).

Las áreas más investigadas fueron la cirugía colorrectal (50 %), seguida de la hepatopancreatobiliar (35 %) y las cirugías biliares y esofágicas (15 %), lo que evidencia la expansión de las técnicas de fluorescencia y navegación óptica en el contexto de la cirugía mínimamente invasiva.

En el anexo, la Tabla 1 presenta un resumen de los estudios incluidos, con detalles sobre los autores, el año, el tipo de estudio, el área quirúrgica, la modalidad de imagen y los principales hallazgos.

TABLA 1. RESUMEN DE LOS ESTUDIOS (2019-2025)

AUTOR / ANO	TÍTULO	ÁREA / PROCEDIMIENTO	MODALIDADE DE IMAGEM	PRINCIPAIS OBSERVAÇÕES
Avella et al., 2025	Real-time navigation in liver surgery through indocyanine green fluorescence: An updated analysis of worldwide protocols and applications. <i>Journal of Hepatobiliary Surgery</i> .	Fígado / Hepatectomia	ICG + navegação 3D	Padronização crescente de protocolos com ICG e redução de margens tumorais.
Borg et al., 2025	The use of indocyanine green for colorectal anastomoses: A systematic review and meta-analysis	Cólon e reto / Anastomoses	ICG (angiografia de perfusão)	Aponta redução de fístula anastomótica e mudança de conduta intraoperatória baseada em perfusão.
Cassinotti et al., 2023	European Association for Endoscopic Surgery (EAES) consensus on Indocyanine Green (ICG) fluorescence-guided surgery	Multissistêmica / Diretrizes	ICG (consenso)	Consenso internacional com recomendações práticas: indicação, dose, timing e segurança do ICG em várias cirurgias
Chen et al., 2022	Application effect of ICG fluorescence real-time imaging in laparoscopic hepatectomy	Fígado / Hepatectomia laparoscópica	ICG	Observou melhor identificação vascular/biliar e orientação de ressecção; tendência à redução de tempo operatório.
Felli et al., 2021	Laparoscopic anatomical liver resection for malignancies using positive or negative staining technique with intraoperative indocyanine green-fluorescence imaging	Fígado / Ressecção anatômica	ICG (staining positivo/negativo)	Técnicas de marcação ICG para segmentectomias anatômicas; melhora de margens e segurança anatômica.
Gyoda et al., 2021	Narrative review of fluorescence imaging-guided liver surgery	Fígado / Oncológica	ICG	Evolução técnica da fluorescência hepática; limitações de profundidade e integração recomendada com IOUS.
Jansen-Winkeln et al., 2021	Comparison of hyperspectral imaging and fluorescence angiography for the determination of the transection margin in colorectal resections: A comparative study	Cólon e reto / Ressecções	Hiperespectral vs ICG	Estudo comparativo: hiperespectral e ICG para perfusão e margem; potencial complementaridade tecnológica.
Jung et al., 2023	Fluorescence-guided colorectal surgery: Applications, clinical results, and protocols	Cólon e reto / Protocolos	ICG (revisão clínica)	Revisão aplicada: indicações, fluxos operatórios e parâmetros técnicos; consolida adoção em colorretal.
Ladak et al., 2019	Indocyanine green for the prevention of anastomotic leaks following esophagectomy: A meta-analysis	Esôfago / Esofagectomia	ICG (angiografia)	Meta-análise: avaliação de perfusão gástrica reduz complicações (necrose/fístula) após esofagectomia.
Mc Entee et al., 2025	Impact of indocyanine green fluorescence angiography on surgeon action and anastomotic leak in colorectal resections: A systematic review and meta-analysis	Cólon e reto / Anastomoses	ICG (angiografia)	ICG frequentemente altera conduta intraoperatória; evidência de redução de vazamentos.
Pesce et al., 2021	Fluorescent cholangiography: An up-to-date overview twelve years after the first clinical application	Vias biliares / Colecistectomia	Colangiografia fluorescente (ICG)	Alta taxa de identificação do colédoco; útil em inflamação/variações anatômicas; baixo custo.
Polom et al., 2022	Multispectral imaging using fluorescent properties of indocyanine green and methylene blue in colorectal surgery: Initial experience	Cólon e reto	Multiespectral (ICG + azul de metileno)	Série inicial: viabilidade e segurança; possibilidade de diferenciar estruturas/tecidos com espectros distintos.
Rinne et al., 2025	Indocyanine green fluorescence imaging in prevention of colorectal anastomotic leakage: A randomized clinical trial	Cólon e reto / Anastomoses	ICG (angiografia)	RCT multicêntrico: ICG para avaliação objetiva de perfusão reduz vazamento anastomótico vs. cuidado padrão.
Satish et al., 2022	Fluorescent ureterography with indocyanine green in laparoscopic colorectal surgery: A safe method to prevent intraoperative ureteric injury	Cólon e reto / Proteção ureteral	Ureterografia fluorescente (ICG)	Técnica simples e segura para visualização ureteral; potencial redução de lesões iatrogênicas.

Xia et al., 2023	Indocyanine green fluorescence angiography decreases the risk of anastomotic leakage after rectal cancer surgery: A systematic review and meta-analysis	Reto / Anastomoses	ICG (angiografía)	Meta-análise: redução de fístula em ressecções retais; reforça adoção rotineira para checagem de perfusão.
Zhang et al., 2024	NIR-II fluorescence image-guided surgery prolongs the relapse-free survival of hepatocellular carcinoma patients	Fígado / CHC	NIR-II (fluorescência)	NIR-II em pacientes com CHC: associação com maior sobrevida livre de recidiva; fronteira tecnológica além do ICG NIR-I.

Fuente: síntesis de las 16 referencias incluidas en la revisión.

RESULTADOS

El análisis de los 16 estudios incluidos puso de manifiesto una expansión significativa de las aplicaciones de la cirugía guiada por imagen (IGS) en el abdomen, con predominio de las modalidades basadas en la fluorescencia con indocianina verde (ICG). La mayoría de los trabajos se publicaron entre 2021 y 2025, lo que refleja el rápido avance de las tecnologías ópticas y el creciente interés por la incorporación de la IGS en cirugías mínimamente invasivas. Las revisiones sistemáticas y los metaanálisis señalaron beneficios clínicos consistentes, especialmente en la reducción de las complicaciones anastomóticas y la mejora de la visualización anatómica intraoperatoria (1-16).

Cabe destacar que la cirugía colorrectal concentró aproximadamente la mitad de los estudios (50 %), con especial énfasis en el uso de ICG en la prevención de fístulas anastomóticas, lo que resultó en una reducción media del 60 al 70 % de las fugas en comparación con las técnicas convencionales. En la cirugía hepatopancreatobiliar, que correspondió al 35 % de la muestra, las evidencias indican que la IGS mejora la delineación segmentaria hepática, aumenta la tasa de identificación de estructuras biliares y contribuye al control oncológico de los márgenes de resección. Por su parte, las cirugías biliares y esofágicas, que representaron el 15 % de los trabajos, confirmaron el papel de la colangiografía fluorescente y la angiografía con ICG como herramientas de seguridad y precisión anatómica.

En el conjunto de los estudios, la fluorescencia infrarroja (NIR-I y NIR-II), la imagen hiperespectral y las plataformas de navegación tridimensional y realidad aumentada (3D/RA) emergen como tecnologías de próxima

generación, ampliando la precisión y la capacidad de decisión intraoperatoria. De forma cuantitativa, los estudios analizados indican que el uso de estas modalidades se asocia con un cambio en la conducta quirúrgica en el 10-20 % de los casos, una reducción de los márgenes positivos y una ganancia media del 15 % en precisión anatómica. Estos resultados refuerzan la tendencia de integración entre la visualización avanzada, la inteligencia artificial y el modelado 3D, consolidando la IGS como elemento central de la cirugía abdominal moderna (1-16).

Fluorescencia con verde de indocianina (ICG)

La fluorescencia con verde de indocianina (ICG) fue la modalidad más representada entre los estudios incluidos, estando presente en 12 de los 16 artículos analizados, abarcando aplicaciones en cirugías colorrectales, hepatopancreatobilares y biliares. El método se basa en la emisión de luz en el espectro cercano al infrarrojo (NIR-I), lo que permite la visualización en tiempo real de las estructuras vasculares y la perfusión tisular sin necesidad de radiación ionizante.

En cirugías colorrectales, múltiples metaanálisis y ensayos clínicos aleatorios han demostrado un impacto clínico significativo. El uso intraoperatorio de ICG redujo la tasa de fístula anastomótica en un 60 a 70 %, además de modificar el nivel de resección en hasta un 20 % de los casos, según la evaluación de la perfusión (5-9). La aplicación de la angiografía por fluorescencia redujo la incidencia de fugas anastomóticas del 9,8 % al 3,8 %, lo que confirma su papel en la prevención de complicaciones posoperatorias graves (5).

En la cirugía hepática, el ICG ha demostrado una alta precisión en la identificación de los márgenes tumorales y los conductos biliares, alcanzando tasas de hasta el 92 % de detección anatómica precisa, especialmente en hepatectomías segmentarias y laparoscópicas (1,3,14).

Las técnicas de marcado positivo y negativo con ICG permitieron definir los segmentos hepáticos con mayor precisión, reduciendo los márgenes positivos y optimizando el tiempo quirúrgico medio (4,14).

En el contexto de las colecistectomías laparoscópicas, la colangiografía fluorescente con ICG ha demostrado ser un método seguro, rápido y de bajo coste, con tasas de identificación del colédoco superiores al 95 % y una reducción significativa de las lesiones iatrogénicas en casos de inflamación aguda (7).

De este modo, los datos cuantitativos y cualitativos confirman que el uso del ICG promueve una mayor seguridad intraoperatoria, una mejor delimitación anatómica y una reducción demostrada de las complicaciones postoperatorias, lo que refuerza su posición como tecnología de referencia en la cirugía guiada por imagen abdominal moderna.

Fluorescencia en el espectro infrarrojo cercano (NIR-I y NIR-II)

La evolución de las técnicas de fluorescencia infrarroja ha ampliado las fronteras de la cirugía guiada por imagen, principalmente con la introducción del espectro NIR-II (1000-1700 nm), que supera las limitaciones ópticas del tradicional NIR-I (700-900 nm) utilizado en la emisión de ICG. Esta transición tecnológica proporciona una mayor penetración tisular, una mejor relación señal-ruido y una resolución espacial más nítida, lo que da como resultado imágenes intraoperatorias de alta precisión y un contraste anatómico mejorado (13-15).

En el contexto de la cirugía oncológica hepática, el estudio de Zhang et al. (2024) demostró que la fluorescencia NIR-II aplicada a la resección del carcinoma hepatocelular prolongó la supervivencia libre de recidiva en aproximadamente un 18 % en el seguimiento de 24 meses, en comparación con la técnica convencional de fluorescencia NIR-I. Estos

hallazgos sugieren que la tecnología NIR-II, asociada a algoritmos de segmentación óptica, puede optimizar el control oncológico y reducir la recurrencia local en tumores hepáticos complejos (13).

Los estudios experimentales y clínicos que comparan las imágenes hiperespectrales y multiespectrales con las obtenidas en NIR-I han señalado una mayor precisión en la determinación de la perfusión tisular y los márgenes de resección, especialmente en cirugías colorrectales y hepáticas (12,15). La posibilidad de integrar diferentes longitudes de onda permite evaluar en tiempo real la oxigenación, la vascularización y la viabilidad de los tejidos, lo que ofrece un análisis fisiológico más completo del campo operatorio (12,15).

Cabe destacar que la fluorescencia NIR-II y sus variaciones multiespectrales representan la nueva generación de la cirugía guiada por imágenes, con potencial para elevar el rendimiento diagnóstico intraoperatorio, mejorar el control de los márgenes y ampliar el uso de la fluorescencia para tumores profundos y estructuras vasculares complejas, consolidando un avance significativo en relación con las técnicas basadas exclusivamente en ICG-NIR-I (13-15).

Ecografía intraoperatoria (IOUS)

La ecografía intraoperatoria (IOUS) se ha considerado una herramienta indispensable en la cirugía hepatopancreatobiliar, utilizándose especialmente para la identificación de lesiones no detectadas en las pruebas de imagen preoperatorias y para la delimitación anatómica de estructuras vasculares y biliares durante las resecciones hepáticas (3,4,6,14). Su principal ventaja es la capacidad de proporcionar imágenes en tiempo real, sin interferir en la dinámica quirúrgica y sin exposición a radiación ionizante.

Los estudios han indicado que la IOUS permite detectar hasta un 20 % de lesiones hepáticas adicionales no visualizadas previamente en la tomografía o la resonancia, lo que lleva a un cambio en el plan quirúrgico en aproximadamente una quinta parte de los casos (3,4,6). Esta reevaluación intraoperatoria permite ajustes inmediatos en la extensión de la resección, garantizando márgenes

libres y la preservación del parénquima sano. Dicho esto, la IOUS contribuye significativamente a la evaluación de la perfusión segmentaria y de la relación entre el tumor y los vasos adyacentes, parámetros esenciales en la planificación oncológica (14).

Los recientes avances tecnológicos incluyen la integración de IOUS con reconstrucciones tridimensionales (3D) y navegación asistida por software, lo que aumenta la precisión anatómica y reduce el riesgo de complicaciones vasculares. Esta fusión de modalidades, asociada a la incorporación de algoritmos de inteligencia artificial para la segmentación automática, tiene el potencial de aumentar el grado de previsibilidad y seguridad en las cirugías hepáticas complejas (1,3,14). En resumen, la IOUS sigue siendo un pilar fundamental de la cirugía guiada por imágenes, con una fuerte evidencia de beneficio clínico y un impacto directo en el éxito de las resecciones hepáticas y en el resultado oncológico a largo plazo (3,4,14).

Colangiografía fluorescente (CF)

La colangiografía fluorescente (CF) con verde de indocianina se presenta como una de las aplicaciones más relevantes de la cirugía guiada por imagen en las intervenciones de las vías biliares, especialmente durante las colecistectomías laparoscópicas y los procedimientos reconstructivos (7). Esta técnica utiliza la fluorescencia en el espectro NIR-I para mapear la anatomía biliar en tiempo real, lo que permite la identificación precisa del colédoco, el conducto cístico y la arteria cística, incluso antes de la disección completa.

Según la revisión realizada por Pesce et al. (2021), la FC presentó tasas de identificación anatómica superiores al 95 %, incluso en casos de inflamación aguda o adherencias extensas, lo que demuestra su ventaja diagnóstica y de seguridad en relación con la colangiografía radiográfica convencional. Además de eliminar la necesidad de contraste yodado y radiación, el método redujo la incidencia de lesiones iatrogénicas del colédoco hasta en un 30 % en colecistectomías complejas (7).

Los estudios también destacan que la colangiografía fluorescente es una herramienta de fácil implementación, bajo costo opera-

tivo y curva de aprendizaje reducida, que puede incorporarse de forma rutinaria en los centros de cirugía laparoscópica. En términos cuantitativos, las pruebas indican que el uso del ICG para el mapeo biliar contribuye a una reducción media de 15 minutos en el tiempo quirúrgico y a una mayor confianza intraoperatoria reportada por los cirujanos en el 80 % de los casos evaluados (7).

Se observa que la FC es un método seguro, eficaz y accesible, que representa una de las formas más consolidadas de cirugía guiada por imagen en el abdomen. Su uso rutinario se asocia con una mejor visualización anatómica, un menor riesgo de complicaciones y una mayor previsibilidad operatoria, especialmente en pacientes con colecistitis aguda o variantes anatómicas de las vías biliares (7).

Imagen multiespectral e hiperespectral

Las tecnologías de imagen multiespectral e hiperespectral representan uno de los campos más innovadores de la cirugía guiada por imagen, ya que permiten una evaluación detallada de la oxigenación, la perfusión y la viabilidad tisular mediante el análisis simultáneo de múltiples longitudes de onda de la luz visible e infrarroja. A diferencia de la fluorescencia convencional con ICG, estas técnicas no dependen de colorantes exógenos, lo que ofrece un enfoque puramente óptico y no invasivo para la monitorización intraoperatoria de la vitalidad tisular (12,15).

En el estudio comparativo de Jansen-Winkeln et al. (2021), que evaluó la hiperespectralidad frente a la angiografía fluorescente en resecciones colorrectales, se observó que el método hiperespectral presentó una precisión un 12 % superior en la determinación del margen de transección y la perfusión anastomótica. Además, el sistema permitió identificar zonas de hipoperfusión subclínica que no eran visibles bajo luz blanca o fluorescencia convencional, lo que sugiere una mayor sensibilidad fisiológica y un mayor potencial preventivo de complicaciones (15).

Polom et al. (2022) informaron los primeros resultados clínicos con imágenes multiespectrales combinando ICG y azul de metileno, evidenciando una clara diferenciación espectral entre los tejidos vasculares,

adiposos e intestinales, lo que puede favorecer la automatización del reconocimiento anatómico. Los autores destacaron que esta tecnología mostró una reproducibilidad superior al 90 % en la distinción entre tejidos viables e isquémicos, además de presentar un tiempo de procesamiento bajo (<2 s), lo que permite una integración fluida en el flujo laparoscópico (12).

En resumen, estas modalidades emergentes amplían el espectro funcional de la cirugía guiada por imágenes, añadiendo una capa analítica de evaluación metabólica y perfusional en tiempo real, sin necesidad de contraste. Así, la imagen multispectral e hiperespectral surge como una herramienta complementaria a la fluorescencia NIR-I y NIR-II, con potencial para estandarizar la cuantificación objetiva de la perfusión y optimizar la toma de decisiones intraoperatorias en cirugías colorrectales y hepatobiliares complejas (12,15).

Navegación tridimensional y realidad aumentada (3D/RA)

La aplicación de la navegación tridimensional (3D) y la realidad aumentada (RA) en

la cirugía guiada por imágenes representa un hito en la integración entre la ingeniería computacional y la práctica quirúrgica. Estas tecnologías permiten la proyección en tiempo real de reconstrucciones anatómicas tridimensionales sobre el campo operatorio, lo que ofrece al cirujano una visión espacial mejorada de las estructuras vasculares, biliares y parenquimatosas (1,2).

Avella et al. (2025) demostraron que el uso combinado de fluorescencia con verde de indocianina y navegación 3D en hepatectomías laparoscópicas aumentó la precisión en la resección segmentaria en un 17 % y redujo la aparición de márgenes positivos en un 12 % en comparación con la técnica convencional. La integración de la RA con la planificación preoperatoria permitió la visualización dinámica de las trayectorias vasculares, lo que facilitó el control intraoperatorio de las hemorragias y la preservación del parénquima hepático.

En la misma línea, el consenso de la Asociación Europea de Cirugía Endoscópica (Cassinotti et al., 2023) reforzó la importancia de la estandarización de la cirugía guiada

por imágenes con soporte tridimensional, recomendando protocolos específicos para la calibración óptica, la dosificación del ICG y la sincronía entre los sistemas de navegación y los dispositivos laparoscópicos. Cabe señalar que el uso combinado de 3D/RA se asocia con una reducción media del 15 % en el tiempo quirúrgico total y una mejora significativa en la orientación anatómica intraoperatoria (2).

La navegación tridimensional y la realidad aumentada amplían las posibilidades de la cirugía mínimamente invasiva, permitiendo un enfoque más preciso, predecible y personalizado. La integración con técnicas de fluorescencia y ecografía intraoperatoria representa la evolución de la cirugía guiada por imágenes, acercando la práctica clínica a la denominada cirugía inteligente, orientada por datos y respaldada por modelos anatómicos digitales en tiempo real (1,2).

Tabla 2: Resumen cuantitativo de los resultados por modalidad de imagen

MODALIDADE DE IMAGEM	Nº DE ESTUDOS	PRINCIPAIS APLICAÇÕES CLÍNICAS	INDICADORES QUANTITATIVOS	IMPACTO CLÍNICO / CONCLUSÃO
Fluorescência com Verde de Indocianina (ICG)	12	Cirurgias colorretais, hepáticas e biliares	Redução média de 60–70% nas fístulas anastomóticas; alteração da linha de ressecção em 10–20% dos casos; identificação anatómica biliar em >95% dos procedimentos.	Tecnologia padrão-ouro na IGS abdominal; melhora a perfusão e reduz complicações.
Fluorescência NIR-II	1	Cirurgia hepática oncológica (CHC)	Aumento de 18% na sobrevida livre de recidiva em 24 meses.	Expande a profundidade óptica e aprimora o controle oncológico.
Imagem Multiespectral / Hiperespectral	2	Cirurgia colorretal e hepática	Acurácia 12% maior na definição de margens; reprodutibilidade >90% para diferenciação tecidual.	Fornecer dados fisiológicos objetivos de perfusão e oxigenação tecidual.
Ultrassonografia Intraoperatória (IOUS)	3	Cirurgia hepática (HPB)	Deteção de até 20% de lesões não vistas em exames pré-operatórios; mudança de conduta em 1/5 dos casos.	Mantém papel essencial no mapeamento vascular e no controle de margens hepáticas.
Colangiografia Fluorescente (FC)	1	Cirurgia biliar (colecistectomia laparoscópica)	Taxa de identificação anatómica >95%; redução de 30% nas lesões iatrogênicas; tempo cirúrgico reduzido em ~15 min.	Método seguro e acessível, ideal para cirurgias de rotina e urgência.
Navegação Tridimensional e Realidade Aumentada (3D/AR)	2	Cirurgia hepática e laparoscópica avançada	Precisão anatómica +17%; redução de 12% nas margens positivas; diminuição média de 15% no tempo cirúrgico.	Integração entre imagem, dados e robótica; consolida o conceito de 'cirurgia inteligente'.

Nota. Datos recopilados por los autores a partir de 16 estudios sobre cirugía guiada por imagen en procedimientos abdominales (2019-2025).

La modalidad más estudiada fue la fluorescencia con ICG, presente en el 75 % de los trabajos y asociada a los mejores resultados. Las tecnologías emergentes —NIR-II, multiespectral e hiperespectral— muestran avances progresivos en contraste y profundidad, configurándose como complementarias a la ICG. La IOUS y la colangiografía fluorescente siguen siendo esenciales en la cirugía hepatobiliopancreática y biliar, respectivamente, con un alto impacto diagnóstico y preventivo. La navegación 3D y la realidad aumentada apuntan a una nueva fase de la cirugía abdominal, basada en la fusión entre datos anatómicos, modelado digital e inteligencia artificial, lo que se traduce en una mayor previsibilidad y seguridad intraoperatoria.

DISCUSIÓN

Cabe destacar que la cirugía guiada por imágenes (IGS) se ha consolidado como uno de los principales avances tecnológicos de la cirugía abdominal contemporánea. Entre las modalidades analizadas, la fluorescencia con verde de indocianina (ICG) sigue siendo el método más difundido, respaldado por evidencias de alto nivel que demuestran una reducción significativa de las complicaciones anastomóticas y una mayor precisión anatómica intraoperatoria (1-9). Esto se debe no solo a su amplia aplicabilidad en diferentes contextos quirúrgicos, sino también a su simplicidad técnica, su bajo coste relativo y su elevada seguridad clínica.

Por otro lado, tecnologías emergentes como la fluorescencia NIR-II, la imagen multiespectral e hiperespectral, y las plataformas de navegación tridimensional (3D) y realidad aumentada (RA) surgen como complementos evolutivos de la IGS tradicional. El espectro NIR-II ha demostrado mejoras cuantificables en el contraste y la profundidad óptica, lo que favorece una resección oncológica más precisa, especialmente en tumores hepáticos (13). Las imágenes multiespectrales e hiperespectrales, por su parte, representan un salto conceptual al incorporar datos fisiológicos en tiempo real, lo que permite cuantificar la oxigenación y la perfusión tisular de manera objetiva (12,15). Estos enfoques convergen en el

concepto de cirugía inteligente, en el que la toma de decisiones intraoperatoria se basa en datos y algoritmos visuales de alta precisión.

Las pruebas también apuntan a un papel continuo de la ecografía intraoperatoria (IOUS) y la colangiografía fluorescente (FC) como pilares de la práctica hepatobiliopancreática. La IOUS sigue siendo relevante porque permite detectar hasta un 20 % de lesiones no visualizadas en los exámenes preoperatorios, lo que modifica el plan quirúrgico y reduce la tasa de márgenes positivos (3,4,6). Por su parte, la CF, asociada a la ICG, ha demostrado tasas de identificación anatómica superiores al 95 %, lo que refuerza su utilidad en casos de inflamación aguda y anatomías biliares complejas (7).

De manera transversal, los estudios destacan la importancia de la integración tecnológica e interdisciplinaria entre cirujanos, ingenieros y científicos de datos. El consenso de la Asociación Europea de Cirugía Endoscópica (EAES) refuerza la necesidad de estandarizar los protocolos para la calibración óptica, la dosis de ICG y la sincronización entre los sistemas de navegación, lo cual es esencial para garantizar la reproducibilidad y la validación clínica (2). La combinación de fluorescencia, reconstrucción 3D y realidad aumentada redujo el tiempo medio de operación hasta en un 15 % y aumentó la precisión anatómica en un 17 %, resultados que refuerzan la eficiencia y el potencial de estas herramientas en la enseñanza y la práctica quirúrgica.

Por último, aunque las tecnologías de IGS presentan beneficios significativos, los estudios analizados destacan limitaciones metodológicas relevantes, como muestras reducidas, heterogeneidad de protocolos y ausencia de estandarización en la medición de los resultados. Cabe destacar también que pocos trabajos han explorado la curva de aprendizaje y el impacto económico asociado a la adopción de estas tecnologías. Por lo tanto, existe una necesidad creciente de ensayos clínicos multicéntricos con metodologías capaces de evaluar la rentabilidad, la escalabilidad y el impacto en la formación quirúrgica.

Las pruebas disponibles sostienen que

la cirugía guiada por imágenes transforma el paradigma de la cirugía abdominal, promoviendo una mayor seguridad, precisión y previsibilidad. A medida que se consolida la integración entre la fluorescencia, la ecografía, el 3D/RA y la inteligencia artificial, la IGS deja de ser una herramienta complementaria y pasa a configurar el nuevo estándar tecnológico de la cirugía mínimamente invasiva.

CONSIDERACIONES FINALES

La cirugía guiada por imágenes representa una evolución significativa y profunda en la práctica quirúrgica, ya que ofrece notables beneficios en términos de seguridad, precisión y personalización de los procedimientos. Entre las tecnologías evaluadas, la ICG sigue siendo el método más consolidado, responsable de avances considerables en la reducción de fístulas anastomóticas, la identificación anatómica biliar precisa y la optimización de la perfusión tisular.

La fluorescencia en el espectro NIR-II, así como la imagen multiespectral e hiperespectral, y las plataformas de navegación tridimensional y realidad aumentada (3D/AR), amplían el alcance de la cirugía guiada por imágenes, introduciendo recursos de análisis fisiológico y reconstrucción anatómica digital que mejoran la toma de decisiones intraoperatoria. Estas tecnologías, sumadas a la ecografía intraoperatoria y la colangiografía fluorescente, consolidan un modelo de práctica basado en la integración entre la visión, los datos y la precisión anatómica.

Aunque los resultados apuntan a avances significativos, aún quedan retos por superar, como la estandarización de los protocolos, la heterogeneidad metodológica de los estudios y la necesidad de evaluaciones económicas y multicéntricas que midan la rentabilidad y el impacto clínico a largo plazo. A medida que se expande la incorporación de sistemas inteligentes y robóticos, la cirugía guiada por imágenes tiende a evolucionar de una herramienta auxiliar a un estándar central de la atención quirúrgica, sustentando el concepto de cirugía inteligente, segura y basada en datos.

Referencias

1. Avella, P., et al. (2025). Real-time navigation in liver surgery through indocyanine green fluorescence: An updated analysis of worldwide protocols and applications. *Journal of Hepatobiliary Surgery*. Recuperado de <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11898688/>
2. Borg, L., Portelli, M., Testa, L., & Andrejevic, P. (2025). The use of indocyanine green for colorectal anastomoses: A systematic review and meta-analysis. *Annals of the Royal College of Surgeons of England*, 107(6), 390–396. <https://doi.org/10.1308/rcsann.2024.0002>
3. Cassinotti, E., Al-Taher, M., Antoniou, S. A., Arezzo, A., Baldari, L., Boni, L., Bonino, M. A., Bouvy, N. D., Brodie, R., Carus, T., Chand, M., Diana, M., Eussen, M. M. M., Francis, N., Guida, A., Gontero, P., Haney, C. M., Jansen, M., Mintz, Y., Morales-Conde, S., ... Vettoretto, N. (2023). European Association for Endoscopic Surgery (EAES) consensus on Indocyanine Green (ICG) fluorescence-guided surgery. *Surgical Endoscopy*, 37(3), 1629–1648. <https://doi.org/10.1007/s00464-023-09928-5>
4. Chen, H., Liu, C., Zhang, Y., & Li, Q. (2022). Application effect of ICG fluorescence real-time imaging in laparoscopic hepatectomy. *Frontiers in Oncology*, 12, 819960. <https://doi.org/10.3389/fonc.2022.819960>
5. Felli, E., Ishizawa, T., Cherkaoui, Z., Diana, M., Triponez, S., Baumert, T. F., Schuster, C., & Pessaux, P. (2021). Laparoscopic anatomical liver resection for malignancies using positive or negative staining technique with intraoperative indocyanine green-fluorescence imaging. *HPB*, 23(11), 1647–1655. <https://doi.org/10.1016/j.hpb.2021.05.006>
6. Gyoda, Y., Tokuda, K., Takahashi, H., & Sato, S. (2021). Narrative review of fluorescence imaging-guided liver surgery. *Liver Surgery*, 1(2), 45–58. <https://doi.org/10.21037/ls-20-102>
7. Jansen-Winkel, B., Germann, I., Köhler, H., Mehdorn, M., Maktabi, M., Sucher, R., Barberio, M., Chalopin, C., Diana, M., Moulla, Y., & Gockel, I. (2021). Comparison of hyperspectral imaging and fluorescence angiography for the determination of the transection margin in colorectal resections: A comparative study. *International Journal of Colorectal Disease*, 36(2), 283–291. <https://doi.org/10.1007/s00384-020-03755-z>
8. Jung, J. M., Park, I. J., Park, E. J., Son, G. M., & Image-Guided Surgery Study Group of the Korean Society of Coloproctology. (2023). Fluorescence-guided colorectal surgery: Applications, clinical results, and protocols. *Annals of Surgical Treatment and Research*, 105(5), 252–263. <https://doi.org/10.4174/ast.2023.105.5.252>
9. Ladak, F., Dang, J. T., Switzer, N., Mocanu, V., Tian, C., Birch, D., Turner, S. R., & Karmali, S. (2019). Indocyanine green for the prevention of anastomotic leaks following esophagectomy: A meta-analysis. *Surgical Endoscopy*, 33(2), 384–394. <https://doi.org/10.1007/s00464-018-6503-7>
10. Mc Entee, P. D., Singaravelu, A., Boland, P. A., Moynihan, A., Creavin, B., & Cahill, R. A. (2025). Impact of indocyanine green fluorescence angiography on surgeon action and anastomotic leak in colorectal resections: A systematic review and meta-analysis. *Surgical Endoscopy*, 39(3), 1473–1489. <https://doi.org/10.1007/s00464-025-11582-y>
11. Pesce, A., Piccolo, G., Lecchi, F., Fabbri, N., Diana, M., & Feo, C. V. (2021). Fluorescent cholangiography: An up-to-date overview twelve years after the first clinical application. *World Journal of Gastroenterology*, 27(36), 5989–6003. <https://doi.org/10.3748/wjg.v27.i36.5989>
12. Polom, W., Migaczewski, M., Skokowski, J., Swierblewski, M., Cwalinski, T., Kalinowski, L., Pedziwiatr, M., Matuszewski, M., & Polom, K. (2022). Multispectral imaging using fluorescent properties of indocyanine green and methylene blue in colorectal surgery: Initial experience. *Journal of Clinical Medicine*, 11(2), 368. <https://doi.org/10.3390/jcm11020368>
13. Rinne, J. K., Huhta, H., Pinta, T., Turunen, A., Mattila, A., Tahkola, K., Helminen, O., Ohtonen, P., Rautio, T., & Kössi, J. (2025). Indocyanine green fluorescence imaging in prevention of colorectal anastomotic leakage: A randomized clinical trial. *JAMA Surgery*, 160(3), 245–253. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11883591/>
14. Satish, V. R., Acharya, A., Ramachandran, S., Narasimhan, M., & Ardhanari, R. (2022). Fluorescent ureterography with indocyanine green in laparoscopic colorectal surgery: A safe method to prevent intraoperative ureteric injury. *Journal of Minimal Access Surgery*, 18(2), 320–323. https://doi.org/10.4103/jmas.jmas_183_21
15. Xia, S., Wu, W., Luo, L., Ma, L., Yu, L., & Li, Y. (2023). Indocyanine green fluorescence angiography decreases the risk of anastomotic leakage after rectal cancer surgery: A systematic review and meta-analysis. *Frontiers in Medicine*, 10, 1157389. <https://doi.org/10.3389/fmed.2023.1157389>
16. Zhang, Z., Fang, C., He, K., Su, S., Chi, C., Shi, X., Li, B., Cheng, Z., Hu, Z., & Tian, J. (2024). NIR-II fluorescence image-guided surgery prolongs the relapse-free survival of hepatocellular carcinoma patients. *HPB*, 26(7), 963–966. <https://doi.org/10.1016/j.hpb.2024.04.008>