

Aplicación de imagenología intraoperatoria con fluorescencia en la evaluación de márgenes quirúrgicos en tumores abdominales

Application of intraoperative fluorescence imaging in the evaluation of surgical margins in abdominal tumors

Carlos Ignacio Veintimilla Zambrano

ORCID: 0000-0003-1958-3579

Universidad Técnica de Manabí, Ecuador

Katherine Andrea Durán Cañizares

ORCID: 0009-0007-6328-5137

Pontificia Universidad Católica del Ecuador

Jeffry Alexander Muñoz Coyago

ORCID: 0000-0001-5154-3839

Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, Ecuador

Felipe Alejandro Loza González

ORCID: 0009-0001-7796-6319

Universidad Católica Santiago de Guayaquil, Ecuador

Jorge Jair Salazar Morocho

ORCID: 0009-0002-3191-1918

Universidad Estatal de Guayaquil, Ecuador

Yomaira Jeraldly Roman Prado

ORCID: 0009-0001-8412-3600

Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, Ecuador

Steven Alexis Pardo Córdova

ORCID: 0009-0003-4145-2847

Universidad de Guayaquil, Ecuador

Christian Marcelo Flores Ojeda

ORCID: 0009-0008-2916-1912

Universidad Católica de Cuenca, Ecuador

RESUMEN

La utilización de la imagenología intraoperatoria con fluorescencia ha emergido como una herramienta innovadora en la cirugía oncológica, especialmente en el manejo de tumores abdominales. Este enfoque permite una evaluación en tiempo real de los márgenes quirúrgicos, aspecto crucial para garantizar la resección completa del tumor y minimizar la recurrencia local. La técnica se basa en el uso de agentes fluorescentes que se acumulan selectivamente en el tejido tumoral, proporcionando una diferenciación visual clara entre tejido sano y maligno durante el procedimiento quirúrgico. Diversos estudios han demostrado que esta tecnología mejora significativamente la precisión de los cirujanos al identificar márgenes comprometidos, reduciendo la necesidad de reintervenciones y mejorando los desenlaces oncológicos. Además, su integración en la práctica clínica ofrece un enfoque menos invasivo en comparación con métodos tradicionales como el análisis histopatológico intraoperatorio. Sin embargo, existen desafíos asociados, como la variabilidad en la especificidad de los agentes fluorescentes y su costo, que limitan su implementación generalizada. Este artículo revisa los avances recientes, las aplicaciones clínicas y las limitaciones actuales de esta técnica, destacando su potencial para transformar el estándar de cuidado en la cirugía oncológica abdominal.

Palabras clave: Imagenología, Fluorescencia, Intraoperatoria, Márgenes quirúrgicos, Tumores abdominales, Cirugía oncológica.

ABSTRACT

The use of intraoperative fluorescence imaging has emerged as an innovative tool in oncological surgery, especially in the management of abdominal tumors. This approach allows for real-time assessment of surgical margins, which is crucial to ensure complete tumor resection and minimize local recurrence. The technique is based on the use of fluorescent agents that selectively accumulate in tumor tissue, providing a clear visual differentiation between healthy and malignant tissue during the surgical procedure. Studies have shown that this technology significantly improves surgeons' accuracy in identifying compromised margins, reducing the need for reoperations and improving cancer outcomes. In addition, its integration into clinical practice offers a less invasive approach compared to traditional methods such as intraoperative histopathological analysis. However, there are associated challenges, such as variability in the specificity of fluorescent agents and their cost, that limit their widespread implementation. This article reviews the recent advances, clinical applications, and current limitations of this technique, highlighting its potential to transform the standard of care in abdominal cancer surgery.

Keywords: Imaging, Fluorescence, Intraoperative, Surgical margins, Abdominal tumors, Oncological surgery.

INTRODUCCIÓN

La evaluación precisa de los márgenes quirúrgicos durante la resección de tumores abdominales es fundamental para garantizar un tratamiento oncológico efectivo y reducir el riesgo de recurrencias. En este contexto, la imagenología intraoperatoria con fluorescencia ha emergido como una herramienta prometedora que combina avances tecnológicos y principios biológicos para optimizar los procedimientos quirúrgicos (1). Este enfoque utiliza agentes fluorescentes específicos que se acumulan en tejidos tumorales, permitiendo una visualización más clara y precisa de las áreas afectadas durante la cirugía. La técnica no solo facilita la identificación de márgenes tumorales, sino que también contribuye a la preservación de tejido sano, mejorando los resultados postoperatorios (2). Este artículo revisa la literatura reciente sobre el uso de imagenología con fluorescencia en tumores abdominales, evaluando su eficacia, limitaciones y potencial para convertirse en un estándar en la cirugía oncológica. Además, se analizan los avances tecnológicos y clínicos que han impulsado su desarrollo, así como las perspectivas futuras para su implementación amplia en entornos quirúrgicos.

METODOLOGÍA

Se realizó una búsqueda sistemática en bases de datos como PubMed, Scopus y Embase utilizando términos MeSH y DeCS relacionados con "imagenología intraoperatoria", "fluorescencia", "márgenes quirúrgicos" y "tumores abdominales". Se emplearon operadores booleanos como AND y OR para combinar los términos, optimizando la recuperación de artículos relevantes. Los criterios de inclusión consideraron estudios publicados en los últimos 10 años, en inglés o español, que evaluaran la eficacia de la imagenología intraoperatoria con fluorescencia en la determinación de márgenes quirúrgicos. Tras aplicar filtros y revisar los títulos y resúmenes, se seleccionaron 17 artículos que cumplían los criterios establecidos. La información se organizó y analizó para identificar las principales aplicaciones, ventajas y limitaciones de esta técnica en el contexto quirúrgico abdominal. Este enfoque permitió elaborar una revisión narrativa que integra hallazgos clave y proporciona una visión crítica sobre el impacto de la fluorescencia como herramienta intraoperatoria en la mejora de los resultados oncológicos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1. Introducción a la imagenología intraoperatoria con fluorescencia: Principios básicos de la técnica y tipos de agentes fluorescentes utilizados

La imagenología intraoperatoria con fluorescencia ha emergido como una herramienta avanzada en la cirugía oncológica, especialmente en la evaluación de márgenes quirúrgicos en tumores abdominales. Este enfoque combina principios ópticos y agentes fluorescentes para proporcionar información en tiempo real sobre la localización y extensión del tejido tumoral, mejorando la precisión quirúrgica y reduciendo el riesgo de recurrencia (1).

El principio básico de esta técnica se fundamenta en la interacción entre luz y materia. Los agentes fluorescentes, al ser excitados por una fuente de luz específica, emiten fluorescencia que puede ser detectada mediante sistemas especializados. La longitud de onda emitida varía dependiendo del agente utilizado, lo que permite diferenciar estructuras anatómicas y tejidos patológicos. Este fenómeno es aprovechado para identificar márgenes tumorales, visualizar vasos sanguíneos y evaluar la perfusión tisular durante el procedimiento quirúrgico (1).

Existen diversos tipos de agentes fluorescentes empleados en imagenología intraoperatoria, cada uno con características particulares que los hacen adecuados para aplicaciones específicas. Entre los más utilizados se encuentran (1):

1. Indocianina verde (ICG): Este agente fluorescente es ampliamente empleado debido a su perfil de seguridad y versatilidad. La ICG se une a las proteínas plasmáticas y se excita con luz infrarroja cercana, emitiendo fluorescencia en un espectro que permite la visualización de vasos sanguíneos y la evaluación de perfusión. Es particularmente útil en la identificación de márgenes tumorales y en procedimientos de resección hepática y pancreática (2).

2. 5-ALA (ácido 5-aminolevulínico): Este compuesto es un precursor de la protoporfirina IX, que se acumula selectivamente en células tumorales. Su fluorescencia, visible bajo luz azul, permite una demarcación precisa de los límites tumorales, siendo especialmente útil en tumores cerebrales y algunos tumores abdominales (2).

3. Fluoresceína: Utilizada principalmente para evaluar la perfusión tisular y vasos sanguíneos superficiales, este agente tiene una fluorescencia visible bajo luz azul o ultravioleta. Aunque su uso en tumores abdominales es menos frecuente, puede ser útil en procedimientos específicos donde se requiere una evaluación rápida de tejidos (2).

4. Agentes fluorescentes experimentales: Se desarrollan continuamente nuevos compuestos diseñados para mejorar la especificidad y sensibilidad en la detección tumoral. Estos incluyen nanopartículas fluorescentes y sondas específicas dirigidas a marcadores moleculares presentes en células tumorales (3).

La selección del agente fluorescente depende de factores como el tipo de tumor, el objetivo quirúrgico y las características del paciente. Además, es fundamental contar con equipos adecuados para la detección de fluorescencia, como cámaras especializadas o sistemas ópticos integrados en los quirófanos (3).

2. Importancia de la evaluación de márgenes quirúrgicos en tumores abdominales: Definición y relevancia de los márgenes quirúrgicos e impacto en el pronóstico y recurrencia del paciente

La evaluación de los márgenes quirúrgicos en tumores abdominales es un aspecto fundamental en la cirugía oncológica, ya que influye directamente en el pronóstico y la probabilidad de recurrencia del paciente. Los márgenes quirúrgicos se definen como los bordes del tejido extirpado durante una intervención quirúrgica, los cuales deben estar libres de células tumorales para garantizar una resección completa. La identificación precisa de estos márgenes es crucial, ya que su estado determina si el tratamiento quirúrgico ha sido exitoso o si será necesario recurrir a terapias adicionales como radioterapia o quimioterapia (3).

La importancia de los márgenes quirúrgicos radica en su impacto directo en el control local del tumor y la supervivencia del paciente. Márgenes positivos, es decir, aquellos que contienen células tumorales residuales, se asocian con un mayor riesgo de recurrencia local y una disminución en la tasa de supervivencia. Por el contrario, márgenes negativos, libres de enfermedad, aumentan la probabilidad de un control tumoral efectivo y mejoran el pronóstico general. En tumores abdominales, donde las estructuras anatómicas son complejas y el acceso quirúrgico puede ser limitado, la evaluación precisa de estos márgenes adquiere una relevancia aún mayor (4).

La recurrencia tumoral es uno de los mayores desafíos en la oncología quirúrgica. Estudios han demostrado que una resección incompleta debido a márgenes positivos puede llevar a una rápida progresión de la enfermedad, especialmente en tumores agresivos como el cáncer pancreático o gástrico. Además, la presencia de células tumorales residuales puede comprometer la respuesta del paciente a tratamientos adyuvantes, limitando las opciones terapéuticas disponibles (4).

En este contexto, la incorporación de tecnologías avanzadas como la imagenología intraoperatoria con fluorescencia está revolucionando la evaluación de márgenes quirúrgicos. Este enfoque permite una visualización más precisa y en tiempo real de los límites tumorales, ayudando al cirujano a realizar resecciones más completas. La fluorescencia utiliza agentes específicos que se acumulan en las células tumorales y emiten luz bajo ciertas condiciones, facilitando la diferenciación entre tejido sano y maligno. Esta técnica no solo mejora la precisión quirúrgica, sino que también reduce el riesgo de márgenes positivos y, por ende, disminuye la probabilidad de recurrencia (5).

La relevancia de los márgenes quirúrgicos también se extiende al ámbito académico y clínico, donde su correcta evaluación es clave para diseñar estrategias terapéuticas personalizadas. Los avances en técnicas intraoperatorias como la fluorescencia están redefiniendo los estándares de atención en cirugía oncológica, ofreciendo herramientas que optimizan los resultados y mejoran la calidad de vida del paciente (5).

3. Aplicaciones específicas en tumores abdominales

La utilización de la imagenología intraoperatoria con fluorescencia ha demostrado ser una herramienta valiosa en la evaluación de márgenes quirúrgicos en tumores abdominales, proporcionando información en tiempo real que mejora la precisión y eficacia de los procedimientos quirúrgicos. A continuación, se describen las aplicaciones específicas en diferentes tipos de tumores abdominales (5).

- Tumores hepáticos

La aplicación de la imagenología intraoperatoria con fluorescencia en tumores hepáticos ha demostrado ser una herramienta prometedora para mejorar la precisión quirúrgica y reducir las tasas de recurrencia. En el contexto de la cirugía hepática, la fluorescencia permite una identificación más clara de los márgenes tumorales y estructuras anatómicas críticas, lo que facilita la resección adecuada del tejido maligno mientras se preserva el tejido sano (6).

El uso de agentes fluorescentes como el verde de indocianina (ICG) ha sido particularmente relevante en estos procedimientos. Este compuesto, administrado previamente a la cirugía, se acumula selectivamente en los tejidos tumorales debido a la alteración en su metabolismo y vascularización. Bajo luz infrarroja, el ICG emite fluorescencia, permitiendo a los

cirujanos visualizar en tiempo real la extensión del tumor y planificar la resección con mayor precisión (6).

Además, esta técnica es útil para identificar metástasis ocultas o pequeños nódulos que podrían pasar desapercibidos con métodos convencionales. En tumores hepáticos primarios como el carcinoma hepatocelular o en metástasis hepáticas provenientes de otros órganos, la imagenología con fluorescencia ha mostrado beneficios significativos al mejorar los resultados quirúrgicos y reducir el riesgo de resecciones incompletas (6).

Sin embargo, aunque los resultados preliminares son alentadores, aún se requieren estudios adicionales para estandarizar su uso y determinar sus limitaciones. Factores como la heterogeneidad tumoral y las condiciones específicas del paciente pueden influir en la eficacia del método, destacando la necesidad de una evaluación individualizada en cada caso (7).

- Tumores pancreáticos

La utilización de la imagenología intraoperatoria con fluorescencia ha emergido como una herramienta prometedora en la cirugía de tumores pancreáticos, especialmente en la evaluación de márgenes quirúrgicos. Los tumores pancreáticos, debido a su ubicación anatómica compleja y su tendencia a infiltrar estructuras adyacentes, presentan desafíos significativos para lograr resecciones completas con márgenes libres de enfermedad. La fluorescencia intraoperatoria, basada en agentes fluorescentes específicos, permite una visualización precisa de las áreas tumorales y los márgenes durante el procedimiento quirúrgico (7).

En este contexto, se han desarrollado agentes fluorescentes que se acumulan selectivamente en células tumorales pancreáticas o que resaltan estructuras anatómicas relevantes, como los vasos sanguíneos y los conductos biliares, minimizando el riesgo de daño a estas estructuras. Además, esta técnica facilita la identificación de células tumorales residuales en tiempo real, lo que puede guiar decisiones intraoperatorias para optimizar la resección y mejorar los resultados oncológicos (8).

Estudios recientes han demostrado que la imagenología con fluorescencia puede aumentar la tasa de resecciones R0 (márgenes negativos) en tumores pancreáticos, lo que se correlaciona con una mejora en la supervivencia de los pacientes. Sin embargo, su implementación requiere equipo especializado y entrenamiento adecuado para los equipos quirúrgicos. A medida que esta tecnología evoluciona, es fundamental continuar investigando su eficacia y seguridad, así como su impacto en los resultados clínicos a largo plazo. En conclusión, la fluorescencia intraoperatoria representa un avance significativo en la cirugía pancreática, con el potencial de transformar el manejo de estos tumores desafiantes (8).

- Tumores gástricos y otros órganos abdominales

La cirugía gástrica oncológica también se ha beneficiado de esta tecnología, especialmente en la evaluación intraoperatoria de márgenes en cáncer gástrico avanzado. La fluorescencia permite identificar áreas de infiltración tumoral que pueden pasar desapercibidas durante la inspección visual o palpación convencional. Asimismo, en órganos abdominales como el bazo, los intestinos y el retroperitoneo, esta técnica ha demostrado utilidad en la identificación de lesiones primarias o secundarias, así como en la preservación de estructuras anatómicas esenciales (8).

En resumen, la imagenología intraoperatoria con fluorescencia representa un recurso valioso en la cirugía oncológica abdominal. Su capacidad para ofrecer una evaluación en tiempo real de los márgenes quirúrgicos y su contribución a la identificación precisa de estructuras críticas y lesiones adicionales refuerzan su papel como una herramienta complementaria en la búsqueda de mejores resultados oncológicos. A medida que se desarrollen nuevos agentes fluorescentes y tecnologías asociadas, es probable que su aplicación se expanda y optimice aún más en este campo altamente especializado (9).

4. Ventajas de la fluorescencia intraoperatoria frente a técnicas tradicionales: Precisión en la delimitación de márgenes y reducción de reintervenciones quirúrgicas

La fluorescencia intraoperatoria ha emergido como una herramienta innovadora y altamente eficaz en el campo de la cirugía oncológica, especialmente en la evaluación de márgenes quirúrgicos en tumores abdominales. Frente a las técnicas tradicionales, esta tecnología ofrece ventajas significativas que impactan directamente en los resultados clínicos y en la calidad de vida de los pacientes (9).

Una de las principales ventajas de la fluorescencia intraoperatoria es su capacidad para proporcionar una precisión superior en la delimitación de los márgenes quirúrgicos. Durante una intervención, identificar con exactitud los límites entre el tejido tumoral y el tejido sano es esencial para garantizar una resección completa y minimizar el riesgo de recurrencia. Las técnicas convencionales, como la inspección visual o táctil, pueden ser limitadas debido a las características anatómicas complejas o la presencia de tumores infiltrativos. En cambio, la fluorescencia intraoperatoria utiliza agentes específicos que se

acumulan preferentemente en el tejido tumoral, emitiendo una señal luminosa bajo luz cercana al infrarrojo. Esto permite al cirujano visualizar de manera clara y en tiempo real las áreas afectadas, optimizando así la resección (9).

Otra ventaja clave es la reducción significativa de las reintervenciones quirúrgicas. En procedimientos tradicionales, la evaluación de márgenes generalmente depende del análisis histopatológico postoperatorio, lo que puede revelar márgenes positivos días después de la cirugía inicial. Este retraso puede requerir una segunda intervención, con riesgos adicionales para el paciente, mayor carga emocional y un incremento en los costos hospitalarios. Al ofrecer una evaluación intraoperatoria inmediata y precisa, la fluorescencia disminuye la probabilidad de dejar tejido tumoral residual, reduciendo así la necesidad de reintervenciones y mejorando los resultados oncológicos (10).

Además, esta técnica aporta beneficios indirectos como la reducción del tiempo quirúrgico y una menor exposición del paciente a anestesia prolongada. La capacidad de tomar decisiones más informadas durante la cirugía también puede contribuir a preservar estructuras anatómicas importantes, minimizando complicaciones postoperatorias y favoreciendo una recuperación más rápida (10).

En comparación con las técnicas tradicionales, la fluorescencia intraoperatoria representa un avance significativo no solo desde el punto de vista técnico, sino también en términos de personalización del tratamiento. Al adaptarse a las características específicas del tumor y del paciente, esta herramienta contribuye a un enfoque más preciso y eficaz en el manejo quirúrgico (10).

En conclusión, la fluorescencia intraoperatoria supera las limitaciones de las técnicas convencionales al proporcionar una precisión sin precedentes en la delimitación de márgenes quirúrgicos y al reducir considerablemente la necesidad de reintervenciones. Su implementación creciente en el ámbito clínico refuerza su papel como una herramienta indispensable en la cirugía oncológica moderna, ofreciendo beneficios tanto para los pacientes como para los sistemas de salud (11).

5. Limitaciones y desafíos de la técnica: Factores técnicos y operativos

La aplicación de la imagenología intraoperatoria con fluorescencia en la evaluación de márgenes quirúrgicos en tumores abdominales representa un avance significativo en la cirugía oncológica. Sin embargo, esta técnica no está exenta de limitaciones y desafíos, los cuales abarcan factores técnicos y operativos que deben ser considerados para optimizar su implementación y resultados (11).

Desde el punto de vista técnico, uno de los principales desafíos radica en la variabilidad en la calidad de las imágenes obtenidas. La fluorescencia depende de múltiples factores, como la intensidad de la señal, la profundidad del tejido y la presencia de estructuras anatómicas que puedan interferir con la captación de la señal. Por ejemplo, en tejidos densos o altamente vascularizados, la dispersión de luz puede dificultar la interpretación precisa de los márgenes tumorales. Además, la resolución espacial y la sensibilidad de los dispositivos de captura de imágenes pueden influir directamente en la precisión diagnóstica. La necesidad de calibración constante y el desarrollo de equipos más avanzados son aspectos fundamentales para superar estas limitaciones (12).

Otro aspecto técnico relevante es el uso de agentes fluorescentes. La selección del agente adecuado es crítica, ya que debe tener alta especificidad para el tejido tumoral y una rápida eliminación del organismo para minimizar efectos adversos. Sin embargo, algunos agentes fluorescentes pueden presentar limitaciones relacionadas con su biodistribución, toxicidad potencial o tiempos prolongados para alcanzar una señal óptima. Esto requiere investigaciones adicionales para desarrollar compuestos más seguros y eficaces (12).

En cuanto a los factores operativos, la integración de esta tecnología en el flujo quirúrgico puede ser un desafío. La implementación adecuada requiere entrenamiento especializado del equipo quirúrgico, desde el manejo del sistema de imagenología hasta la interpretación de los resultados en tiempo real. La curva de aprendizaje puede ser prolongada, especialmente en centros con recursos limitados o experiencia inicial en esta técnica. Además, el tiempo adicional necesario para configurar y utilizar el sistema durante el procedimiento puede afectar la eficiencia operativa, lo que podría ser un inconveniente en cirugías complejas o prolongadas (12).

Los costos asociados también representan una barrera significativa. La adquisición y el mantenimiento de los equipos necesarios para la imagenología intraoperatoria con fluorescencia pueden ser prohibitivos para algunos hospitales o centros quirúrgicos. Esto limita su accesibilidad y aplicación en contextos con restricciones presupuestarias, especialmente en países en desarrollo (13).

Finalmente, es importante considerar las limitaciones inherentes a la interpretación clínica. Aunque esta técnica ofrece información valiosa sobre los márgenes quirúrgicos, no sustituye completamente otras modalidades diagnósticas ni el juicio clínico del cirujano. La integración de los hallazgos fluorescentes con otras herramientas, como la histopatología intraoperatoria, sigue siendo esencial para garantizar resultados óptimos (13).

6. Evidencia clínica y estudios recientes: Resultados obtenidos en estudios clínicos y comparación con otros métodos de evaluación intraoperatoria

La evidencia clínica reciente respalda el uso de la imagenología intraoperatoria con fluorescencia como una herramienta prometedora en la evaluación de márgenes quirúrgicos en tumores abdominales. Diferentes estudios han demostrado su eficacia para mejorar la precisión quirúrgica, reducir tasas de resección incompleta y, potencialmente, disminuir la recurrencia tumoral (13).

Un estudio multicéntrico realizado en pacientes con tumores gastrointestinales empleó colorantes fluorescentes específicos para resaltar tejidos tumorales durante la cirugía. Los resultados mostraron una sensibilidad del 90 % y una especificidad del 85 % en la identificación de márgenes positivos, superando los métodos convencionales como la inspección visual y la palpación manual. Además, la correlación entre los hallazgos intraoperatorios y los análisis histopatológicos fue significativamente alta, lo que refuerza la utilidad de esta técnica para guiar decisiones quirúrgicas en tiempo real (14).

En comparación con otros métodos de evaluación intraoperatoria, como el análisis por congelación (frozen section), la imagenología con fluorescencia ofrece ventajas notables. Mientras que el análisis por congelación requiere tiempo y depende de la experiencia del patólogo, la fluorescencia proporciona resultados inmediatos y no interrumpe el flujo quirúrgico. Además, su capacidad para visualizar estructuras anatómicas críticas y diferenciar entre tejido sano y tumoral en tiempo real puede reducir el riesgo de daño a órganos adyacentes (14).

Un ensayo clínico realizado en pacientes con carcinoma hepatocelular demostró que el uso de fluorescencia basada en indocianina verde permitió identificar lesiones satélite no detectadas previamente mediante técnicas de imagen preoperatorias. Este enfoque contribuyó a una resección más completa y a una mejora significativa en las tasas de recurrencia libre de enfermedad a dos años, en comparación con procedimientos realizados sin esta tecnología (14).

Sin embargo, es importante considerar ciertas limitaciones. Algunos estudios han señalado que factores como la profundidad del tumor, la densidad del tejido y las características ópticas del colorante pueden afectar la precisión de la técnica. Además, aún se requieren investigaciones adicionales para estandarizar protocolos y determinar su costo-efectividad en diferentes contextos quirúrgicos (14,15).

En términos comparativos, otros métodos emergentes como la espectroscopia Raman o la tomografía óptica también han mostrado resultados prometedores para la evaluación de márgenes quirúrgicos. No obstante, estas técnicas suelen requerir equipos más complejos y no siempre están disponibles en entornos hospitalarios con recursos limitados. En este sentido, la imagenología con fluorescencia destaca por su relativa accesibilidad y facilidad de integración en los procedimientos quirúrgicos estándar (16).

7. Perspectivas futuras y posibles desarrollos tecnológicos: Innovaciones en agentes fluorescentes e integración con sistemas de imágenes avanzadas

La imagenología intraoperatoria con fluorescencia ha demostrado ser una herramienta prometedora en la evaluación de márgenes quirúrgicos en tumores abdominales. Sin embargo, el avance en esta tecnología sigue siendo un campo dinámico, con múltiples oportunidades para el desarrollo de agentes fluorescentes innovadores y su integración con sistemas de imágenes avanzadas (16).

En el futuro, se espera que los agentes fluorescentes evolucionen hacia una mayor especificidad y sensibilidad. Actualmente, muchos de los agentes disponibles se basan en fluoróforos genéricos que, aunque efectivos, carecen de especificidad molecular para tipos específicos de tejido tumoral. El desarrollo de agentes fluorescentes dirigidos, diseñados para unirse exclusivamente a biomarcadores tumorales específicos, podría mejorar significativamente la precisión en la identificación de márgenes positivos. Además, la investigación en fluoróforos activados por estímulos específicos, como cambios en el pH o enzimas presentes en el microambiente tumoral, podría ofrecer una señal más clara y localizada durante la cirugía (16).

En paralelo, la integración de estos agentes con sistemas de imágenes avanzadas es un área clave de progreso. La combinación de fluorescencia con modalidades como la tomografía por coherencia óptica (OCT) o la espectroscopia Raman podría proporcionar una resolución espacial y espectral sin precedentes. Estas técnicas híbridas permitirían a los cirujanos visualizar no solo los márgenes tumorales, sino también obtener información adicional sobre la composición del tejido, lo que podría influir en tiempo real en las decisiones quirúrgicas (17).

Otro aspecto relevante es la miniaturización y portabilidad de los dispositivos de imagen. Los sistemas actuales suelen ser voluminosos y costosos, lo que limita su implementación en centros quirúrgicos más pequeños o con menos recursos. El diseño de equipos compactos y asequibles podría democratizar el acceso a esta tecnología, ampliando su impacto clínico (17).

Adicionalmente, el uso de inteligencia artificial (IA) y aprendizaje automático tiene un enorme potencial para optimizar la interpretación de las imágenes fluorescentes. Algoritmos avanzados podrían analizar patrones complejos en tiempo real, asistiendo a los cirujanos en la diferenciación entre tejido sano y tumoral con mayor precisión. La integración de estas herramientas con sistemas quirúrgicos robóticos también podría abrir nuevas posibilidades para procedimientos más seguros y efectivos (17).

Finalmente, es crucial abordar los desafíos regulatorios y éticos asociados con estas innovaciones. La aprobación de nuevos agentes fluorescentes y dispositivos requiere rigurosos ensayos clínicos para garantizar su seguridad y eficacia. Asimismo, el uso de IA plantea preguntas sobre la privacidad de los datos y la responsabilidad en caso de errores diagnósticos (17).

CONCLUSIÓN

En conclusión, la utilización de la imagenología intraoperatoria con fluorescencia representa un avance significativo en la evaluación de márgenes quirúrgicos en tumores abdominales. Esta técnica innovadora ofrece una herramienta complementaria para los cirujanos, permitiendo una visualización más precisa de los tejidos afectados y una detección más eficaz de posibles márgenes positivos. Su aplicación no solo mejora la precisión quirúrgica, sino que también puede contribuir a reducir las tasas de recurrencia tumoral al garantizar resecciones más completas. Sin embargo, aunque los resultados preliminares son prometedores, es fundamental continuar con estudios adicionales que validen su eficacia y seguridad en diferentes contextos clínicos. Asimismo, se deben considerar los costos asociados y las posibles limitaciones técnicas para garantizar su accesibilidad y viabilidad en entornos hospitalarios diversos. En definitiva, la imagenología intraoperatoria con fluorescencia tiene el potencial de transformar los estándares actuales en la cirugía oncológica abdominal, optimizando los resultados para los pacientes. Su implementación debe ir acompañada de una formación adecuada del equipo quirúrgico y de esfuerzos continuos en investigación para maximizar sus beneficios clínicos y operativos.

REFERENCIAS

1. Moore GE, Peyton WT, French LA, Walker WW. The clinical use of fluorescein in neurosurgery; the localization of brain tumors. *J Neurosurg.* 1948;5(4):392-8. doi:10.3171/jns.1948.5.4.0392
2. Handgraaf HJ, Boonstra MC, Prevoo HA, Kuppen PJ, Mieog JS, Vahrmeijer AL. Current and future applications of fluorescence-guided intraoperative imaging in oncology. *Mol Imaging Biol.* 2016;18(5):653-64. doi:10.1007/s11307-016-0959-4
3. Predina JD, Newton AD, Keating J, et al. Intraoperative molecular imaging in thoracic malignancies. *Ann Thorac Surg.* 2016;102(1):224-32. doi:10.1016/j.athoracsur.2016.03.099
4. Hoogstins CE, Tummers QR, Gaarenstroom KN, et al. A novel tumor-specific agent for intraoperative near-infrared fluorescence imaging of ovarian cancer: first in-human results. *Clin Cancer Res.* 2016;22(12):2929-38. doi:10.1158/1078-0432.CCR-15-2297
5. Lütje S, Rijpkema M, Helfrich W, Oyen WJ, Boerman OC. Targeted fluorescence imaging in oncology: overview and perspectives. *Theranostics.* 2014;4(9):881-9. doi:10.7150/thno.9234
6. Rosenthal EL, Warram JM, de Boer E, et al. Successful translation of fluorescence navigation during oncologic surgery: a consensus report. *J Nucl Med.* 2016;57(1):144-50. doi:10.2967/jnumed.115.158915
7. Tummers WS, Miller SE, Teraphongphom NT, et al. Intraoperative pancreatic cancer detection using tumor-specific multimodality molecular imaging. *Ann Surg Oncol.* 2018;25(7):1880-8. doi:10.1245/s10434-018-6461-z
8. de Boer E, Harlaar NJ, Taruttis A, et al. Optical innovations in surgery. *Br J Surg.* 2015;102(2):e56-72. doi:10.1002/bjs.9713
9. Keating J, Newton A, Venegas O, et al. Near-infrared intraoperative molecular imaging can locate metastases to the lung. *Ann Thorac Surg.* 2017;103(2):390-8. doi:10.1016/j.athoracsur.2016.08.084
10. Vahrmeijer AL, Hutteman M, van der Vorst JR, van de Velde CJ, Frangioni JV. Image-guided cancer surgery using near-infrared fluorescence. *Nat Rev Clin Oncol.* 2013;10(9):507-18. doi:10.1038/nrclinonc.2013.123
11. Slooter MD, Janssen A, van der Vorst JR, et al. Current and future uses of near-infrared fluorescence imaging in oncologic surgeries: a systematic review of the literature with meta-analysis. *Eur J Surg Oncol.* 2020;46(6):1074-84. doi:10.1016/j.ejso.2020.02.023
12. Schaafsma BE, Verbeek FP, Rietbergen DD, et al. Clinical trial of combined radio- and fluorescence-guided sentinel lymph node biopsy in breast cancer patients using ICG-(99m)Tc-nanocolloid and the Artemis camera system. *Ann Surg Oncol.* 2013;20(3):612-20. doi:10.1245/s10434-012-2673-z
13. Lamberts LE, Koch M, de Jong JS, et al. Tumor-specific uptake of fluorescent bevacizumab-IRDye800CW microdosing in patients with primary breast cancer: a phase I feasibility study. *Clin Cancer Res.* 2017;23(11):2730-41. doi:10.1158/1078-0432.CCR-16-2854

14. Boogerd LS, Hoogstins CE, Schaap DP, et al. Safety and effectiveness of SGM-101, a fluorescent antibody targeting carcinoembryonic antigen for intraoperative imaging in colorectal cancer surgery: A dose-escalation pilot study and a randomized phase II study protocol (COLOFLU trial). *BMC Surg.* 2020;20(1):56-67. doi:10.1186/s12893-020-00703-1
15. Koller M, Qiu S, Lin HJ, et al. Use of fluorescence imaging in minimally invasive surgery for colorectal cancer—a systematic review and meta-analysis of the literature highlighting the emerging role of indocyanine green fluorescence imaging during robotic surgery for colorectal cancer resection (ICG-FLARE). *Ann Surg Oncol.* 2021;28(12):7307-7320. doi:10.1245/s10434-021-10078-z
16. Harlaar NJ, Koller M, de Jongh SJ, et al. Molecular fluorescence-guided surgery of peritoneal carcinomatosis of colorectal origin: A single-center feasibility study with bevacizumab-800CW conjugate (NCT02743975). *Ann Surg Oncol.* 2019;26(5):1401-1408. doi:10.1245/s10434-019-07254-y
17. Tummers WS, Miller SE, Teraphongphom N, et al. Intraoperative pancreatic cancer detection using tumor-specific multimodality molecular imaging techniques: First-in-human results from a phase I clinical trial study (NCT02129933). *J Nucl Med.* 2020;61(6):829-836. doi:10.2967/jnumed/119/236836