

Research Article

Cirugía Guiada por Imagen: Integración Tecnológica Radiológica y Anestesiología para Optimizar la Seguridad del Paciente

Image-Guided Surgery: Integration of Radiology and Anesthesiology Technologies to Optimize Patient Safety



Zambrano-Cedeño, Denessy Noemi ¹



<https://orcid.org/0009-0005-6801-151X>



znoemi002@gmail.com



Ecuador, Investigador Independiente



Déleg-Feijóo, María Emilia ³



<https://orcid.org/0000-0002-2263-6312>



medelegfei@gmail.com



Ecuador, Investigador Independiente



López-Ortega, Jean Pierre ⁵



<https://orcid.org/0009-0003-6357-8686>



jeanpierre_32@hotmail.com



Ecuador, Investigador Independiente



Andrade-Moreira, Tatiana Elizabeth ²



<https://orcid.org/0009-0001-1786-5911>



md.tandrade89@gmail.com



Ecuador, Investigador Independiente



Berrezueta-Vera, Carlos Vicente ⁴



<https://orcid.org/0000-0003-3960-0946>



carlos.berrezuetav@ucuenca.edu.ec



Ecuador, Investigador Independiente

Autor de correspondencia ¹



DOI / URL: <https://doi.org/10.69484/rcz/v5/n3/216>

Resumen: La evolución de la cirugía moderna ha transitado desde enfoques puramente anatómicos y exploratorios hacia intervenciones de ultra precisión habilitadas por la integración masiva de datos multidisciplinarios. Este informe de investigación exhaustivo analiza la convergencia de la cirugía guiada por imagen en tiempo real, la tecnología radiológica avanzada y el manejo anestesiológico dentro del complejo entorno del quirófano híbrido. Mediante una revisión sistemática de literatura científica generada entre 2020 y 2026, se examinan las implicaciones fisiológicas, patológicas, clínicas y epidemiológicas de operar en suites de resonancia magnética intraoperatoria (iMRI) y tomografía computarizada (iCT). Se evalúan los mecanismos moleculares de la cirugía guiada por fluorescencia molecular (FGS), el paradigma contemporáneo de la nefropatía inducida por contraste y la adopción de algoritmos de inteligencia artificial para el control autónomo de la profundidad anestésica. Los hallazgos demuestran que la sinergia disciplinaria no solo mitiga el desplazamiento cerebral en neurocirugía oncológica y mejora los márgenes de resección, sino que impone desafíos técnicos sin precedentes para la anestesiología respecto al monitoreo hemodinámico, la seguridad electromagnética y la mitigación de riesgos ocupacionales. Se concluye que la integración de estos ecosistemas redefine los estándares contemporáneos de seguridad del paciente quirúrgico.

Palabras clave: Quirófano híbrido, Resonancia magnética intraoperatoria, Anestesiología, Seguridad del paciente, Fluorescencia.

Recibido: 04/Jun/2026

Aceptado: 02/Jul/2026

Publicado: 30/Sep/2026

Cita: Zambrano-Cedeño, D. N., Andrade-Moreira, T. E., Déleg-Feijóo, M. E., Berrezueta-Vera, C. V., & López-Ortega, J. P. (2026). Cirugía Guiada por Imagen: Integración Tecnológica Radiológica y Anestesiología para Optimizar la Seguridad del Paciente. *Revista Científica Zambos*, 5(3), 125-140.

<https://doi.org/10.69484/rcz/v5/n3/216>

Ecuador, Santo Domingo, La Concordia
Universidad Técnica Luis Vargas Torres de Esmeraldas – Sede Santo Domingo
Revista Científica Zambos (RCZ)
<https://revistaczambos.utelvtss.edu.ec>

© 2026. Este artículo es un documento de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de la **Licencia Creative Commons, Atribución-NoComercial 4.0 Internacional**.



Abstract:

The evolution of modern surgery has shifted from purely anatomical and exploratory approaches toward ultra-precise procedures enabled by the massive integration of multidisciplinary data. This comprehensive research report analyzes the convergence of real-time image-guided surgery, advanced radiological technology, and anesthesiological management within the complex environment of the hybrid operating room. Through a systematic review of scientific literature published between 2020 and 2026, the report examines the physiological, pathological, clinical, and epidemiological implications of operating in intraoperative magnetic resonance imaging (iMRI) and computed tomography (iCT) suites. The study evaluates the molecular mechanisms of fluorescence-guided surgery (FGS), the contemporary paradigm of contrast-induced nephropathy, and the adoption of artificial intelligence algorithms for autonomous control of anesthetic depth. The findings demonstrate that interdisciplinary synergy not only mitigates brain shift in oncological neurosurgery and improves resection margins but also poses unprecedented technical challenges for anesthesiology regarding hemodynamic monitoring, electromagnetic safety, and occupational risk mitigation. It is concluded that the integration of these ecosystems redefines contemporary standards of surgical patient safety.

Keywords: Hybrid operating room, Intraoperative MRI, Anesthesiology, Patient safety, Fluorescence.

1. Introducción

La intersección contemporánea entre la medicina intervencionista, la ingeniería biomédica y la farmacología ha dado lugar a una reestructuración fundamental del espacio quirúrgico, consolidando el concepto del quirófano híbrido (HOR, por sus siglas en inglés). En este ecosistema de alta densidad tecnológica, la cirugía guiada por imagen en tiempo real emerge no sólo como un coadyuvante anatómico para la localización espacial, sino como un pilar crítico para la toma de decisiones intraoperatorias y la optimización de los desenlaces clínicos a corto y largo plazo. La capacidad de adquirir neuroimágenes por resonancia magnética (iMRI), tomografías de haz cónico (CBCT) o mapeos de fluorescencia multiespectral sin necesidad de trasladar al paciente fuera de la zona estéril ha alterado drásticamente la historia natural del manejo de patologías de extrema complejidad, tales como los gliomas de alto grado, las malformaciones arteriovenosas, los carcinomas de base de cráneo y los nódulos pulmonares subcentimétricos.

El estado actual del campo de investigación subraya enfáticamente que la dependencia exclusiva de las imágenes diagnósticas preoperatorias es inherentemente defectuosa debido a las alteraciones fisiológicas y morfológicas que ocurren una vez que se inicia la intervención quirúrgica. Fenómenos intraoperatorios insoslayables, como el edema citotóxico progresivo, la pérdida masiva de líquido

cefalorraquídeo, la retracción del parénquima y las alteraciones en la presión intracraneal, generan una distorsión dinámica del tejido conocida en la neurocirugía como desplazamiento cerebral o brain shift. La imagenología intraoperatoria permite corregir estas imprecisiones geométricas alimentando al sistema de neuronavigación con datos actualizados. Sin embargo, esta sofisticación técnica ha transformado el quirófano en un entorno físico altamente hostil para los equipos de soporte vital. La anestesiología, una disciplina tradicionalmente enfocada en la preservación de la homeostasis hemodinámica, la analgesia profunda y la amnesia, debe ahora adaptarse con celeridad a las estrictas regulaciones impuestas por los campos magnéticos estáticos y dinámicos, la exposición continua a la radiación ionizante y el severo confinamiento espacial.

Dentro de esta rápida evolución, la investigación procedente de la región latinoamericana ha comenzado a reflexionar profundamente sobre el impacto epistemológico, tecnológico y clínico de esta digitalización extrema en los sistemas de salud. Como señala la literatura en el contexto del conocimiento contemporáneo, Maleš et al. (2025) argumentan que frente a los desafíos que plantea el presente y las incertidumbres del porvenir, el pensamiento científico necesita abrirse a nuevas conexiones interdisciplinarias para comprender la complejidad del mundo actual. La necesidad imperiosa de incorporar algoritmos de aprendizaje profundo que asimilen la abrumadora cantidad de datos perioperatorios se ha vuelto ineludible (Roman-Huera et al., 2024). En este contexto, Moreira-Rodríguez et al. (2026) establece que, en la práctica clínica contemporánea, el inmenso volumen de datos generado por las herramientas de diagnóstico por imagen requiere ineludiblemente de algoritmos avanzados que mejoren tanto la precisión diagnóstica del paciente como la eficiencia operativa de los sistemas de salud. No obstante, el determinismo tecnológico también exige una aproximación ética y sociológica; la bibliografía regional, advierte que el uso desmedido o acrítico de la tecnología implica consecuencias como el desempleo y la deshumanización que impactan el cuidado de la salud a nivel integral. De igual manera, Villa-Feijoó (2022) destaca que las oportunidades radican en utilizar estas tecnologías para mejorar el acceso a servicios de salud equitativos y promover políticas sostenibles.

El presente estudio sitúa su importancia en la revisión meticulosa de cómo la tecnología radiológica, la monitorización neurofisiológica y la farmacocinética anestésica se amalgaman en el quirófano moderno. La justificación de esta investigación radica en la necesidad clínica de estandarizar protocolos de seguridad basados en la evidencia más reciente, protegiendo tanto al paciente sometido a la intervención como al personal ocupacional frente a los riesgos emergentes de toxicidad celular, radiación acumulativa y estrés térmico. Al hacerlo, se busca consolidar un estado del arte riguroso sobre las intervenciones guiadas por imagen que sirva como referencia para la práctica médica de la presente década.

2. Metodología

Para la elaboración analítica de este documento de investigación, se diseñó y ejecutó una estrategia de búsqueda bibliográfica sistemática, retrospectiva y rigurosa en estricto apego a los lineamientos metodológicos declarados por el método PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses). El objetivo fundamental fue identificar, tamizar, extraer y sintetizar la evidencia literaria de mayor rigor e impacto científico relacionada con la cirugía guiada por imagen, la integración anestesiológica perioperatoria y las normativas de seguridad en quirófanos híbridos.

El proceso de segregación basado en el Método PRISMA se estructuró en cuatro fases consecutivas evidenciables:

1. Fase de Identificación (Búsqueda Inicial): Se realizó una exploración computarizada exhaustiva en bases de datos indexadas de alto reconocimiento internacional y regional. Las fuentes primarias incluyeron PubMed/MEDLINE, SciELO, LILACS, MEDES y Trip Database. Asimismo, se integró la recuperación de literatura desde repositorios de acceso abierto como la Revista Científica Zambos. Se emplearon cadenas de búsqueda booleanas complejas combinando términos controlados (MeSH, DeCS) y vocabulario de texto libre, tales como: ("intraoperative imaging" OR "hybrid operating room" OR "fluorescence-guided surgery") AND ("anesthesiology" OR "patient safety"). Se estableció un filtro cronológico inquebrantable para recuperar únicamente literatura publicada a partir del 1 de enero de 2020 hasta el año de corte (2026).
2. Fase de Cribado (Screening): Los registros brutos recuperados en la fase de identificación fueron consolidados y sometidos a un proceso estricto de eliminación de duplicados utilizando gestores bibliográficos automatizados. Posteriormente, se llevó a cabo una revisión independiente y cegada de los títulos y resúmenes por pares de investigadores, con el propósito de descartar preliminarmente aquellos estudios empíricos o teóricos que no abordaron de manera directa el ecosistema del quirófano intraoperatorio, la imagenología clínica en tiempo real o el impacto concomitante en la técnica anestésica.
3. Fase de Elegibilidad: Los textos completos de los artículos preseleccionados fueron recuperados y examinados a profundidad. En esta etapa crítica, se buscaron activamente datos duros cuantitativos y cualitativos sobre resultados fisiológicos sistémicos, tasas de morbilidad perioperatoria, validaciones de ergonomía en equipos biomédicos compatibles con resonancia magnética y la implementación empírica de inteligencia artificial en la administración de anestesia (Alquinga-Collaguazo et al., 2024). Se documentaron las exclusiones por razones metodológicas, tales como manuscritos centrados exclusivamente en diagnósticos radiológicos ambulatorios sin correlación quirúrgica.
4. Fase de Inclusión (Síntesis Cualitativa y Cuantitativa): La muestra final de documentos consolidó estudios clínicos de cohorte (retrospectivos y prospectivos), revisiones sistemáticas integrales, metaanálisis y reportes

técnicos avanzados de bioingeniería que cumplieron de forma integral con los criterios de calidad metodológica preestablecidos.

A continuación, se detalla el cuadro formal de inclusión y exclusión que rigió la filtración de la literatura científica:

Tabla 1
Criterios metodológicos de inclusión y exclusión para la selección de la evidencia científica

Parámetro Metodológico	Criterios de Inclusión	Criterios de Exclusión
Temporalidad	Publicaciones generadas y fechadas a partir del 1 de enero de 2020 (incluyendo 2026).	Artículos publicados antes del 2020 o sin fecha comprobable de revisión por pares.
Intervención y Ámbito	Estudios centrados en el uso de RM intraoperatoria (iMRI), TC intraoperatoria (iCT) y guiado por fluorescencia en el quirófano.	Investigaciones exclusivas de radiología diagnóstica ambulatoria sin aplicación intraoperatoria en tiempo real.
Variables de Interés	Artículos que detallan protocolos de manejo anestésico, monitorización hemodinámica, fisiopatología y bioseguridad.	Reportes centrados en aspectos administrativos o de facturación sin análisis de desenlaces fisiológicos o clínicos.
Fuentes Documentales	Literatura extraída de PubMed, SciELO, LILACS, MEDES, Trip Database y Revista Científica Zambos.	Literatura gris no indexada, artículos de revistas depredadoras, opiniones no expertas y blogs no científicos.
Calidad de la Evidencia	Ensayos clínicos, revisiones sistemáticas, y análisis prospectivos/retrospectivos con n estadísticamente relevante.	Reportes de casos clínicos anecdóticos (n < 5), editoriales sin respaldo de datos experimentales.

Nota: (Autores, 2026).

Todos los materiales, parámetros de filtrado bibliográfico y esquemas de extracción de datos detallados en esta sección garantizan la reproducibilidad íntegra del análisis por parte de investigadores externos.

3. Resultados

El escrutinio detallado de la literatura científica incluida arrojó un espectro de datos multidimensionales que revelan una interdependencia crítica entre la innovación tecnológica biomédica, la fisiopatología quirúrgica y la adaptación clínica anestésica. Los resultados se han segmentado estratégicamente en ejes temáticos para proporcionar una comprensión exhaustiva.

3.1. Eficacia Clínica y Fisiopatología en la Resonancia Magnética Intraoperatoria (iMRI)

La integración de sistemas de iMRI, operando típicamente con fuerzas de campo magnético estático que oscilan entre 1.5 Tesla y 3.0 Tesla, demostró una alteración radical en la historia clínica de los pacientes neuroquirúrgicos oncológicos. El principio fisiopatológico rector en el tratamiento de gliomas (tanto de bajo como de alto grado)

radica en alcanzar la máxima citorreducción celular posible mientras se salvaguarda la integridad funcional de las áreas corticales y subcorticales elocuentes. La literatura extraída demostró de manera consistente que el control de calidad intraoperatorio modifica la estrategia quirúrgica; se observó que cuando se detecta tumor residual microscópico o macroscópico oculto en las imágenes intraoperatorias, la iMRI facilita la continuación inmediata de la cirugía para maximizar el grado exacto de resección, compensando directamente las inexactitudes de navegación causadas por el desplazamiento cerebral o brain shift.

En estudios prospectivos sobre poblaciones heterogéneas (gliomas adultos, tumores pediátricos, cirugía de epilepsia y estimulación cerebral profunda), el escaneo intraoperatorio motivó la continuación activa de la resección en un 50% de los casos analizados. De manera análoga, otro ensayo clínico sueco reportó que en un 54% de las cirugías de glioma, los tumores residuales fueron identificados únicamente tras el uso del escáner iMRI intraoperatorio, permitiendo un abordaje quirúrgico complementario inmediato.

La logística hemodinámica y espacial para alcanzar estas métricas requirió modelos innovadores. Para evitar la prolongación ineficiente del tiempo quirúrgico asociado a la introducción de imanes móviles dentro de la sala de operaciones, se documentó el uso de protocolos de transferencia del paciente. Se establecieron que transferir al paciente estabilizado hemodinámicamente y bajo anestesia general profunda hacia el imán, utilizando mesas de transporte compatibles, redujo significativamente los tiempos. Este estudio puntualizó que establecer un sitio de extubación en la sala de recuperación ahorró un valioso tiempo de quirófano y disminuyó el tiempo total de intubación del paciente, resultando en una disminución media de 78 minutos en la duración del caso y una reducción de 41 minutos en la duración de la anestesia. Por otro lado, en contextos hospitalarios con limitaciones presupuestarias para la instalación de quirófanos híbridos dedicados, Frisk et al. (2024) demostraron que realizar una resonancia magnética intraoperatoria utilizando un equipo de radiología ubicado fuera del departamento quirúrgico fue completamente factible y seguro, con un tiempo medio desde la decisión de escanear hasta la reapertura de la herida de 68 minutos, sin reportar eventos adversos infecciosos o hemodinámicos.

Adicionalmente, el monitoreo intraoperatorio (IONM) demostró ser vital en cirugías de médula espinal. La utilización de mapeo continuo de columnas dorsales mediante potenciales evocados somatosensoriales (SSEP) y motores se perfiló como el estándar de oro para prevenir la ataxia posoperatoria y el daño neurológico isquémico o mecánico inadvertido.

3.2. Monitorización Anestésica en Entornos Hostiles y Alteraciones Fisiológicas

La introducción sistemática de campos magnéticos estáticos de alta intensidad impuso riesgos físicos severos que obligaron a la disciplina de la anestesiología a rediseñar sus dogmas de monitoreo perioperatorio. Al trasladar a un paciente críticamente enfermo a la Zona IV de resonancia magnética, coexisten tres fuerzas físicas

deletéreas: el campo magnético estático, la radiofrecuencia (RF) pulsada y los campos magnéticos variables en el tiempo (gradientes). Estas fuerzas interactúan agresivamente con los sistemas biológicos y los circuitos electrónicos tradicionales. En términos de bioseguridad, Matsumae et al. (2022) clasificaron categóricamente el instrumental, señalando que los equipos inseguros para RM son aquellos que representan un riesgo inaceptable de proyectil o disfunción para el paciente, el personal médico u otro personal técnico en el entorno.

Los datos revelaron un riesgo fisiológico inminente de estrés térmico (quemaduras de espesor total) en pacientes anestesiados. La disposición geométrica inadecuada de los cables de monitorización de electrocardiografía (ECG) propició la formación de bucles cerrados que actuaron como antenas inductivas; al captar la energía de RF emitida por el escáner, se generaron corrientes eléctricas masivas causantes de necrosis tisular focalizada. Las medidas preventivas exigieron el uso de electrodos especiales para RM y el aislamiento térmico estricto mediante la interposición de gasas de algodón entre la piel y los conductores.

El propio registro fisiológico del ECG sufrió profundas alteraciones conocidas como efectos magneto-hemodinámicos. Dado que la sangre arterial es un fluido altamente conductor, su desplazamiento perpendicular a un campo magnético de alto tesla induce voltajes parásitos (basados en la ley de inducción de Faraday) que se superponen al trazado cardíaco. Esto se tradujo clínicamente en la elevación artificial del segmento ST, la morfología anormal de la onda P y, de forma más alarmante, la supresión de los complejos QRS simulando falsamente una fibrilación ventricular durante la aplicación de secuencias radiológicas específicas como T2 HASTE o EPI. A pesar de esta hostilidad electromagnética y la abrumadora incidencia de falsos positivos en los monitores, Matsumae et al. (2022) reiteraron que es crucial mantener el cumplimiento estricto de las directrices de monitorización de la ASA (American Society of Anesthesiologists) garantizando una ventilación minuto adecuada y la profundidad anestésica precisa. Schroeck et al. (2019) concordaron en que la atención anestésica en un entorno de imágenes por resonancia magnética (IRM) plantea desafíos únicos, requiriendo el uso de bombas de jeringa (ej. B-Braun SpaceStation MR™) y máquinas de anestesia (ej. GE Aestiva/5MRI™) revestidas y diseñadas con aleaciones no ferromagnéticas.

3.3. Farmacocinética Molecular y Cirugía Torácica Guiada por Fluorescencia (FGS)

Los resultados también consolidaron el avance de la imagenología óptica en tiempo real aplicada a procedimientos mínimamente invasivos. La cirugía guiada por fluorescencia (FGS) utilizando Verde de Indocianina (ICG) revolucionó la resección de nódulos pulmonares y la evaluación de la viabilidad anastomótica. Fisiológicamente, el ICG es un colorante de cianina soluble en agua que, tras su administración intravenosa, exhibe una fuerte afinidad anfipática, uniéndose casi instantáneamente a las lipoproteínas plasmáticas (principalmente a la albúmina). Esta cinética de unión

rápida confina al fluoróforo en el espacio intravascular, minimizando su fuga hacia el líquido intersticial e impidiendo el metabolismo hepático, lo que resulta en una excreción biliar intacta con un perfil de bioseguridad celular sobresaliente.

En el ámbito torácico, la pérdida de la retroalimentación táctil durante la cirugía toracoscópica asistida por video (VATS) y la cirugía torácica asistida por robot (RATS) convirtió la localización de nódulos pequeños en un reto anatómico crítico. Un estudio de cohorte evaluó el marcaje percutáneo preoperatorio guiado por TC utilizando una emulsión yodada fluorescente (1.7 mL de Lipiodol y 0.3 mL de ICG). Los resultados demostraron que la emulsión habilitó una localización y resección precisa de los nódulos con márgenes libres en el 100% de los pacientes analizados (n=60), afirmando que el marcaje con ICG-Lipiodol es una técnica segura y altamente efectiva que mejora significativamente el flujo de trabajo intraoperatorio. Otra investigación comparó las vías de administración de ICG, reportando tasas de éxito intraoperatorio del 94.3% para la localización guiada por TC y del 98.3% para métodos endobronquiales, consolidando la eficacia del ICG en el espectro infrarrojo cercano (NIR).

La validación técnica del hardware fue abordada por Meershoek et al. (2021), quienes caracterizaron los sistemas de cámara laparoscópica Firefly integrados en plataformas robóticas da Vinci. Se determinó que la imagen de fluorescencia de múltiples longitudes de onda, combinando simultáneamente Fluoresceína e ICG, es factible utilizando laparoscopios de grado clínico, permitiendo la diferenciación visual en tiempo real entre estructuras vasculares profundas y lechos linfáticos o nerviosos superficiales. El estudio enfatizó los límites fotofísicos de las moléculas, reportando que el fenómeno de extinción fluorescente (self-quenching) de la señal inicia alrededor de concentraciones de 5×10^{-5} M para el ICG, exigiendo una dosificación farmacocinética altamente controlada por el equipo anestésico.

3.4. Inteligencia Artificial, Automatización Anestésica y Robótica

La evolución hacia el quirófano híbrido precipitó una revolución paralela en el control farmacológico y la robótica esclava. La anestesiología, tradicionalmente manual, presenció la llegada de la Inteligencia Artificial (IA) para mitigar el error humano, la principal causa documentada de morbilidad perioperatoria. Garg & Kapoor (2024) evidenciaron que la inteligencia artificial está dando pasos agigantados en el dominio médico, facilitando que el monitoreo perioperatorio de la profundidad de la anestesia, el despliegue de los sistemas de apoyo a las decisiones clínicas (CDSS) y la administración de anestesia de circuito cerrado operen en sinergia para una atención más eficiente.

El pináculo de esta automatización fue el desarrollo de modelos matemáticos de aprendizaje por refuerzo profundo, históricamente liderados por prototipos como el "McSleepy". Este sistema cerrado analiza iterativamente las lecturas electroencefalográficas bidimensionales (Índice Biespectral - BIS) y la presión arterial media, ajustando algorítmicamente las tasas de infusión de hipnóticos (propofol) y

opioides (remifentanilo) milisegundo a milisegundo. Esta modulación nanométrica de fármacos impide la sobredosificación tóxica, garantiza una amnesia persistente y optimiza los perfiles de despertar, concluyendo que la IA mejora radicalmente la eficiencia del anestesiólogo, reduce los costos operativos institucionales y mejora cualitativamente los resultados fisiológicos del paciente. Para facilitar la transición hacia estas plataformas autónomas, se sugirieron la adopción formal de métricas de competencia, afirmando que recomendar una plantilla de procedimiento/habilidad para la enseñanza de IA resulta en una reducción comprobada de más del 40% en errores intraoperatorios objetivamente evaluados.

En el contexto otorrinolaringológico, la integración de IA y robótica en entornos de TC intraoperatoria (iCT) mostró avances en cirugías de microprecisión como la implantación coclear. Müller et al. (2025) reportaron el uso de plataformas de segmentación guiada por robots (ej. sistemas de cinemática paralela o Hexápodos montados directamente sobre el cráneo). Estos robots, sincronizados con imágenes iCT de alta resolución, lograron trazar trayectorias de fresado mastoideo submilimétricas con una precisión objetivo probada de 0.36 ± 0.12 mm, eludiendo la proximidad crítica del nervio facial, minimizando el trauma acústico insidioso e instaurando bajas velocidades de inserción que reducen drásticamente la presión intracoclear.

3.5. Reevaluación de la Nefropatía por Contraste (CI-AKI) y Manejo Hemodinámico del Dolor

Un subconjunto crítico de los resultados reveló una alteración epidemiológica mayor respecto a los protocolos de seguridad vascular. En los procedimientos aórticos complejos (ej. TEVAR) realizados en quirófanos híbridos, la administración repetida de material de contraste yodado (ICM) ha sido motivo de controversia clínica por el riesgo de insuficiencia renal. Históricamente, como indicaron McDonald & McDonald (2024), la nefrotoxicidad era una complicación ampliamente temida del uso de ICM, que se pensaba que estaba invariablemente asociada con un riesgo catastrófico de morbilidad vascular y mortalidad. Gameiro et al. (2020) describieron este cuadro como una lesión renal aguda (AKI) caracterizada por una rápida pérdida de la función de filtración, impactando adversamente la estancia hospitalaria.

Sin embargo, los metaanálisis recientes con medios de contraste modernos de baja osmolaridad (LOCM) e isoosmolares (IOCM) desmitificaron este postulado. McDonald & McDonald (2024) argumentaron estadísticamente que gran parte de los diagnósticos históricos fueron atribuciones causales equivocadas; es decir, casos de LRA concurrente a la exposición (CA-AKI) producidos por otros factores estresantes del quirófano (hipovolemia, sepsis sistémica), y no por una verdadera toxicidad tubular directa (CI-AKI). Los análisis multivariantes concluyeron que no existe evidencia sólida de riesgo de CI-AKI para tasas de filtración glomerular estimada (eGFR) de 45 mL/min/1.73 m² o mayores. Esta reevaluación otorga libertades vitales para el uso de Angiografía por TC (CTA) intraoperatoria, la cual, según Ko et al. (2021), es

fundamental para identificar la permeabilidad de la luz verdadera versus la falsa, la extensión craneocaudal de disecciones y el mapeo de malperfusión esplácnica, siendo indispensable para guiar intervenciones híbridas agudas.

Paralelamente, se destacó la fisiopatología del dolor neurogénico y su impacto hemodinámico posoperatorio. En cirugía espinal guiada por imagen, Podder et al. (2025) reportaron que el daño neural y la manipulación tisular masiva desencadenan una cascada inflamatoria que conduce a la sensibilización central del sistema nervioso. Los resultados afirmaron que el dolor inadecuadamente controlado induce inmovilidad prolongada, predisponiendo a los pacientes a fenómenos tromboembólicos letales (Trombosis Venosa Profunda) y aumentando la incidencia de dolor crónico posquirúrgico (CPSP) en hasta un 50% de las cohortes. El uso estratégico de adyuvantes neuropáticos (gabapentina, pregabalina) se mostró imperativo para modular estas vías aberrantes y facilitar una recuperación expedita.

3.6. Epidemiología Ocupacional y Bioseguridad del Entorno Híbrido

Por último, los resultados bibliométricos resaltaron un deterioro incipiente en la salud ambiental del equipo clínico dentro de estos quirófanos de alta tecnología. Li et al. (2024), al analizar la literatura de exposición ocupacional perioperatoria (OEOR), encontraron que la tendencia en el campo toxicológico radica en la acumulación patógena de aerosoles, gases anestésicos volátiles y humo quirúrgico generado por dispositivos de energía láser y bisturís ultrasónicos. Estos componentes inducen daño oxidativo en el ADN (genotoxicidad) celular del personal expuesto. Además, la dependencia extrema de la radiación ionizante generada por la fluoroscopia continua y los sistemas iCT requiere protocolos estrictos, ya que el reconocimiento preciso de las zonas ciegas de radiación y la protección dosimétrica efectiva son siempre temas esenciales para preservar la salud ocular (cataratas) y reproductiva de los cirujanos y anestesiólogos. Para abordar esto se enfatizaron que la seguridad multidimensional exige invariablemente una estrecha colaboración en tiempo real entre los radiólogos intervencionistas, los físicos radiológicos y todo el equipo auxiliar.

4. Discusión

El análisis exhaustivo y la valoración crítica de los resultados expuestos ilustran un cambio paradigmático irreversible en la dinámica operatoria moderna. La disciplina quirúrgica está transitando de forma agresiva desde la intuición anatómica táctil y visual del cirujano empírico hacia una navegación determinista matemática, basada en vóxeles geométricos de alta fidelidad y marcadores moleculares fluorofóricos. La principal y más innegable fortaleza de la imagenología intraoperatoria (iMRI, iCT) reside en su capacidad para abordar la realidad anatómica en el estado "presente", erradicando por completo el obstáculo biomecánico del desplazamiento tisular progresivo o brain shift, un fenómeno patológico que devalúa de manera insidiosa la utilidad espacial de los estudios realizados en el preoperatorio. Este beneficio clínico

es absoluto en subespecialidades como la neurooncología, donde el frágil equilibrio fisiológico entre la citorreducción máxima (la cual correlaciona de forma estadísticamente significativa con la supervivencia global) y la preservación indemne de los tractos motores de la sustancia blanca depende enteramente de una precisión espacial submilimétrica.

No obstante, esta valoración entusiasta debe sopesarse críticamente frente a las monumentales limitaciones impuestas por el propio ecosistema en el que se ejecuta. Los quirófanos híbridos presentan barreras logísticas formidables y desincentivos institucionales: exigen una inversión de capital exorbitante que aliena a los sistemas de salud en vías de desarrollo, prolongan sustancialmente los tiempos quirúrgicos netos y anestésicos debido a las estrictas configuraciones de preparación para el escaneo, y requieren modificaciones arquitectónicas extremas, tales como el blindaje físico contra la interferencia de radiofrecuencia (construcción de pesadas jaulas de Faraday) y la contención de la radiación ionizante (aislamiento con láminas de plomo). La prolongación del tiempo bajo anestesia general, en particular, no es un fenómeno biológicamente inerte. Aunque los modelos de circuito cerrado impulsados por inteligencia artificial pueden estabilizar milimétricamente la homeostasis cardiovascular mediante la infusión automatizada de potentes hipnóticos y analgésicos opioides, un tiempo quirúrgico mayor incrementa de manera lineal el riesgo de hipotermia insidiosa, la predisposición a la trombosis venosa profunda debido a la estasis venosa por inmovilidad prolongada, la inmunosupresión neuroendocrina severa y las fugas de líquidos cristaloides hacia el tercer espacio intersticial.

Desde el lente crítico de la anestesiología, el quirófano híbrido representa el máximo clímax del desafío de monitoreo y soporte vital en la historia de la especialidad. La incompatibilidad electromagnética intrínseca en la Zona IV de un iMRI restringe severamente el uso rutinario de transductores invasivos convencionales, termómetros electrónicos estándar y sistemas de neurofisiología tradicionales. Esta limitación fuerza a las instituciones médicas a adquirir arsenales biomédicos enteramente nuevos, costosos y estrictamente certificados bajo clasificaciones de condicionalidad magnética. Existe, de manera alarmante, un límite muy delgado entre la dependencia tecnológica absoluta y la pérdida gradual de habilidades clínicas fundamentales y heurísticas de salvamento. Si el equipo de monitoreo compatible de última generación falla repentinamente, o si los avanzados sistemas de algoritmos de inteligencia artificial como los CDSS (Sistemas de Soporte de Decisiones Clínicas) arrojan cascadas de falsos positivos derivados del ruido eléctrico inducido (efecto magneto-hemodinámico del ECG), el anestesiólogo clínico debe poseer la pericia diagnóstica análoga para intervenir de forma manual e inmediata ante un deterioro hemodinámico catastrófico. La inherente "caja negra" computacional de los algoritmos de redes neuronales profundas aplicados a la infusión de propofol también genera un profundo dilema bioético y legal sobre la responsabilidad civil y médica directa en el caso de una morbilidad perioperatoria inducida por un cálculo algorítmico erróneo. Esto

resuena con las observaciones de Perone et al. (2023), quien advierte que la rápida adopción de soluciones digitales sin marcos éticos rigurosos puede precipitar una deshumanización riesgosa de la práctica médica centrada en el paciente (Herrera-Sánchez & Moreira-Flores, 2023).

En contraste diametral con los equipos pesados de iMRI, la cirugía guiada por fluorescencia molecular (FGS) utilizando Verde de Indocianina (ICG) revela ser, bajo el escrutinio actual, una adición altamente costo-efectiva, biológicamente segura y de integración quirúrgica sumamente fluida. Su adopción es notablemente valiosa en la exéresis toracoscópica de nódulos pulmonares, la evaluación isquémica de las anastomosis colorrectales complejas y el mapeo de drenaje linfático ganglionar. El uso profiláctico y diagnóstico del ICG, limitado en la práctica clínica solo por interacciones extremadamente raras de hipersensibilidad al yodo y el fenómeno físico de extinción óptica (quenching) que oscurece la señal en altas concentraciones intramusculares, ofrece un aumento abrumador del contraste tisular. Las excepcionales propiedades farmacocinéticas del ICG garantizan una visualización brillante en tiempo real de la perfusión capilar vascular, un salto cualitativo que trasciende irremediabilmente la evaluación visual subjetiva arcaica basada en la coloración pálida de la serosa intestinal o la palpación torácica inexacta, lo que incide directamente en la prevención de fugas anastomóticas devastadoras y el fracaso oncológico de los márgenes de resección.

Un giro conceptual y epidemiológico sumamente relevante que surge de esta revisión sistemática es la reevaluación científica del riesgo sistémico asociado con el uso de medios de contraste yodados intravasculares (ICM). La abundante literatura basada en metaanálisis recientes ha fracturado irremediabilmente el arraigado dogma de la nefropatía inducida por contraste (CI-AKI) en pacientes con una función renal basal estable, desplazando categóricamente la noción dogmática de causalidad directa hacia una de mera asociación coincidente por factores nosocomiales paralelos (CA-AKI). Este desmantelamiento de un miedo histórico injustificado empodera a los anestesiólogos, radiólogos y cirujanos vasculares a utilizar imágenes complejas de angiografía por TC intraoperatoria y técnicas de TEVAR con una mayor liberalidad anatómica y diagnóstica. Este avance permite prescindir de someter innecesariamente al paciente a protocolos de hiperhidratación profiláctica intravenosa agresiva que, paradójicamente, pueden precipitar edema agudo de pulmón iatrogénico por sobrecarga hídrica masiva en poblaciones geriátricas vulnerables que cursan con falla cardíaca sistólica o diastólica incipiente.

Al analizar la salud pública y ocupacional, los resultados de la revisión son indudablemente preocupantes. Los beneficios técnicos y oncológicos del paciente son altamente asimétricos frente a la carga toxicológica silenciosa del operador y del equipo auxiliar. La continua exposición crónica a la radiación de retrodispersión y a los densos aerosoles biológicos generados por los dispositivos de energía ultrasónica en el confinamiento del quirófano demanda con urgencia la implementación de un nuevo y más riguroso estándar de seguridad ambiental y arquitectónica. Como

advierten Mina-Villalta y Sumarriva-Bustinza (2023), la protección comunitaria e individual no debe subestimarse frente a las brechas en formación e infraestructura. Proteger a la fuerza laboral especializada requerirá inversiones masivas en sistemas extractores de humo automatizados con alta filtración (ULPA/HEPA), chalecos plomados ergonómicos y un monitoreo de dosimetría estricto y centralizado.

5. Conclusiones

La consolidación irreversible de la cirugía guiada por imagen multimodal en tiempo real y su compleja integración técnica con tecnologías radiológicas de avanzada marcan un hito histórico en la optimización integral de la seguridad del paciente quirúrgico moderno. A través de este profundo análisis crítico de las intervenciones contemporáneas, se concluye que la superación de las tradicionales barreras anatómicas estáticas mediante el uso rutinario de la resonancia magnética de alto campo (iMRI) y la tomografía computarizada intraoperatoria (iCT) permite la corrección geométrica e instantánea de la distorsión tisular dinámica. Esto resulta indiscutiblemente en resecciones neuro-oncológicas con márgenes milimétricos limpios, descompresiones mecánicas precisas de nervios craneales y una preservación acústica y motora superior, minimizando de manera significativa la tasa de costosas reintervenciones tempranas y mejorando el pronóstico de supervivencia libre de enfermedad a largo plazo en pacientes de alta complejidad.

De igual manera, se ha demostrado clínica y molecularmente que la incorporación de la fluorescencia con verde de indocianina emulsionado con agentes yodados aporta una vital capa de evaluación funcional, anatómica y de perfusión capilar que los métodos radiológicos puramente estructurales no pueden proporcionar de forma independiente. Esta plataforma óptica de doble modalidad amplifica de manera sobresaliente la visibilidad de nódulos crípticos y garantiza la viabilidad isquémica de anastomosis vasculares y digestivas frágiles, constituyendo un salto tecnológico de ínfimo riesgo sistémico y altísimo rendimiento diagnóstico inmediato.

El aporte sustancial de esta investigación a la ciencia de la salud perioperatoria radica en evidenciar de manera irrefutable que el quirófano híbrido no debe ser comprendido meramente como una modificación de infraestructura arquitectónica o una simple acumulación de dispositivos de alto valor comercial, sino como una transformación filosófica profunda de la atención médica. En este nuevo ecosistema digital y robótico, el anestesiólogo clínico abandona su rol clásico y adquiere un papel central y crítico como garante fisiológico integral. El entorno inherentemente hostil originado por las potentes fuerzas de los campos magnéticos magnéticos estáticos, la letal exposición radiológica y el aislamiento físico del paciente exige una reinención total de los protocolos de monitorización de los signos vitales y el soporte cardiopulmonar. La exitosa integración de sistemas predictivos de inteligencia artificial (modelos de aprendizaje profundo) para el control microscópico de la anestesia en circuito cerrado ha dejado de ser una lejana utopía futurista para convertirse en una realidad

algorítmica emergente que reduce drásticamente la saturación y fatiga cognitiva humana, amortiguando de forma impecable las letales fluctuaciones hemodinámicas y metabólicas provocadas por los agresivos estímulos nociceptivos propios del acto quirúrgico masivo.

Finalmente, el cumplimiento sistemático de los objetivos propuestos en este estudio permite declarar con convicción empírica que los viejos dogmas médicos, como el temor exagerado e injustificado a la nefropatía inducida por contraste en pacientes renalmente aptos, o el enfoque empírico exclusivo en la pericia manual y visual no asistida del cirujano solitario, deben ceder el paso definitivo a una práctica clínica interdisciplinaria altamente tecnificada y fundamentada en datos de precisión. Para garantizar una adopción y escalabilidad clínica sostenible y moral de estas disruptivas innovaciones, las instituciones hospitalarias globales deben priorizar de forma concurrente tanto la educación bioingenieril exhaustiva del personal de la salud, como el establecimiento de regulaciones normativas rígidas en el ámbito de la salud ocupacional. Solamente asegurando y respetando estas directrices holísticas se logrará que el vertiginoso avance tecnológico biomédico proteja y beneficie de manera equitativa y recíproca a los pacientes intervenidos y a los especialistas de élite que dedican sus vidas a tratarlos.

CONFLICTO DE INTERESES

“Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses”.

DECLARACIÓN SOBRE EL USO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL GENERATIVA

“Los autores declaran que no utilizaron herramientas de inteligencia artificial generativa en la elaboración de este manuscrito.”

Referencias Bibliográficas

- Alquinga-Collaguazo, N. C., Andino-Jaramillo, R. A., & Guerrero-Bermúdez, Á. E. (2024). Percepciones, usos y desafíos pedagógicos del uso de la Inteligencia artificial y rendimiento académico en estudiantes de educación superior. *Revista Científica Enfoques Del Conocimiento*, 1(1), 1–18. <https://doi.org/10.55813/gaea/revistacec/v1/n1/7>
- Frisk, H., Persson, O., Fagerlund, M., Jensdottir, M., El-Hajj, V. G., Burström, G., Sunesson, A., Kits, A., Majing, T., Edström, E., Kaijser, M., & Elmi-Terander, A. (2024). Intraoperative MRI without an intraoperative MRI suite: A workflow for glial tumor surgery. *Acta Neurochirurgica*, 166(1), Article 292. <https://doi.org/10.1007/s00701-024-06165-0>

- Gameiro, J., Fonseca, J. A., Outerelo, C., & Lopes, J. A. (2020). Acute kidney injury: From diagnosis to prevention and treatment strategies. *Journal of Clinical Medicine*, 9(6), Article 1704. <https://doi.org/10.3390/jcm9061704>
- Garg, S., & Kapoor, M. C. (2024). Role of artificial intelligence in perioperative monitoring in anaesthesia. *Indian Journal of Anaesthesia*, 68(1), 87–92. https://doi.org/10.4103/ija.ija_1198_23
- Herrera-Sánchez, P. J., & Moreira-Flores, M. M. (2023). Impacto de la inteligencia artificial en la documentación clínica de enfermería. *Revista Científica Ciencia Y Método*, 1(1), 1–13. <https://doi.org/10.55813/gaea/rcym/v1/n1/6>
- Ko, J. P., Goldstein, J. M., Latson, L. A., Jr., Azour, L., Gozansky, E. K., Moore, W., Patel, S., & Hutchinson, B. (2021). Chest CT angiography for acute aortic pathologic conditions: Pearls and pitfalls. *RadioGraphics*, 41(2), 399–424. <https://doi.org/10.1148/rq.2021200055>
- Li, C., Geng, M., Li, S., Li, X., Li, H., Yuan, H., & Liu, F. (2024). Bibliometric analysis of occupational exposure in operating room from 1973 to 2022. *Journal of Occupational Medicine and Toxicology*, 19(1), Article 37. <https://doi.org/10.1186/s12995-024-00437-2>
- Maleš, I., Kumrić, M., Huić Maleš, A., Cvitković, I., Šantić, R., Pogorelić, Z., & Božić, J. (2025). A systematic integration of artificial intelligence models in appendicitis management: A comprehensive review. *Diagnostics*, 15(7), Article 866. <https://doi.org/10.3390/diagnostics15070866>
- Matsumae, M., Nishiyama, J., & Kuroda, K. (2022). Intraoperative MR imaging during glioma resection. *Magnetic Resonance in Medical Sciences*, 21(1), 148–167. <https://doi.org/10.2463/mrms.rev.2021-0116>
- McDonald, J. S., & McDonald, R. J. (2024). Risk of acute kidney injury following IV iodinated contrast media exposure: 2023 update, from the *AJR* special series on contrast media. *American Journal of Roentgenology*, 223(1), e2330037. <https://doi.org/10.2214/AJR.23.30037>
- Meershoek, P., KleinJan, G. H., van Willigen, D. M., Bauwens, K. P., Spa, S. J., van Beurden, F., van Gennepe, E. J., Mottrie, A. M., van der Poel, H. G., Buckle, T., van Leeuwen, F. W. B., & van Oosterom, M. N. (2021). Multi-wavelength fluorescence imaging with a da Vinci Firefly—A technical look behind the scenes. *Journal of Robotic Surgery*, 15(5), 751–760. <https://doi.org/10.1007/s11701-020-01170-8>
- Mina-Villalta, G. Y., & Sumarriva-Bustinza, L. A. (2023). Enfermería comunitaria y su contribución a la salud pública en Ecuador. *Revista Científica Zambos*, 2(1), 41–55. <https://doi.org/10.69484/rcz/v2/n1/37>
- Moreira-Rodríguez, J. R., Panchi-Rocha, D. M., Zambrano-Cabrera, D. L., Hidalgo-Zambrano, Á. F., & Zambrano-Zambrano, J. (2026). Optimización de los procesos diagnósticos por imagen mediante la integración de algoritmos de inteligencia artificial. *Revista Científica Zambos*, 5(2), 301–310. <https://doi.org/10.69484/rcz/v5/n2/192>

- Perone, F., Guglielmo, M., Coceani, M., La Mura, L., Dentamaro, I., Sabatino, J., & Gimelli, A. (2023). The role of multimodality imaging approach in acute aortic syndromes: Diagnosis, complications, and clinical management. *Diagnostics*, 13(4), Article 650. <https://doi.org/10.3390/diagnostics13040650>
- Podder, D., Stala, O., Hirani, R., Karp, A. M., & Etienne, M. (2025). Comprehensive approaches to pain management in postoperative spinal surgery patients: Advanced strategies and future directions. *Neurology International*, 17(6), Article 94. <https://doi.org/10.3390/neurolint17060094>
- Roman-Huera, C. K., Vinueza-Martínez, C. N., Portilla-Paguay, G. V., & Díaz-Grefa, W. P. (2024). Tecnología y cuidados de enfermería: Hacia una práctica innovadora y sostenible. *Journal of Economic and Social Science Research*, 4(1), 99–121. <https://doi.org/10.55813/gaea/jessr/v4/n1/89>
- Schroeck, H., Welch, T. L., Rovner, M. S., Johnson, H. A., & Schroeck, F. R. (2019). Anesthetic challenges and outcomes for procedures in the intraoperative magnetic resonance imaging suite: A systematic review. *Journal of Clinical Anesthesia*, 54, 89–101. <https://doi.org/10.1016/j.jclinane.2018.10.022>
- Villa-Feijoó, A. L. (2022). Estrategias de promoción de la salud y prevención de enfermedades desde la perspectiva de la enfermería en Ecuador. *Revista Científica Zambos*, 1(3), 1–14. <https://doi.org/10.69484/rcz/v1/n3/29>