

Inteligencia artificial en neurocirugía: evidencia, aplicaciones clínicas y perspectivas futuras

Fabián Cremaschi,¹ Ariadna Chabán,^{1,2} María J. Núñez¹

1. Área de Neurología Clínica y Quirúrgica, Departamento de Neurociencias, Facultad de Ciencias Médicas, Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza, Argentina

2. Institute of Psychiatry, Psychology & Neuroscience Library, King's College London, Londres, Reino Unido

RESUMEN

Introducción: la inteligencia artificial (IA) ha surgido como una de las herramientas más disruptivas en la medicina contemporánea con un impacto creciente en la práctica neuroquirúrgica. Su capacidad para procesar grandes volúmenes de datos, identificar patrones complejos y asistir en la toma de decisiones quirúrgicas abre nuevas posibilidades en diagnóstico, planificación quirúrgica y educación médica. Sin embargo, su integración plantea desafíos significativos. En este contexto, resulta necesario realizar una revisión narrativa con metodología sistemática que sintetice las evidencias actuales, explore las aplicaciones clínicas más relevantes y analice sus perspectivas futuras.

Objetivos: analizar las principales evidencias, aplicaciones y perspectivas de la IA en neurocirugía.

Material y método: se efectuó una búsqueda en PubMed, Scopus y Web of Science, adaptando criterios PRISMA para revisiones narrativas. Se incluyeron estudios en inglés y español publicados entre 2020 y octubre 2025.

Resultado: de 412 registros seleccionados, se analizaron 118 artículos tras un cribado por relevancia y calidad metodológica. La IA muestra impacto significativo en diagnóstico, planificación prequirúrgica y aplicación en subespecialidades neuroquirúrgicas. Los grandes modelos de lenguaje ofrecen utilidad en educación y comunicación médico-paciente. Las limitaciones críticas incluyen la falta de validación externa generalizada, los sesgos algorítmicos, marcos regulatorios incipientes y desafíos particulares en Latinoamérica.

Conclusión: la IA constituye una herramienta transformadora en neurocirugía, pero su implementación responsable requiere validación rigurosa, marcos ético-legales robustos (especialmente adaptados al contexto regional) y supervisión humana constante. La formación profesional y la generación de evidencia local son imperativas para una integración equitativa y segura.

Palabras clave: Aprendizaje automático. Inteligencia artificial. Neurocirugía. Revisión narrativa

Artificial intelligence in neurosurgery: evidence, clinical applications and future perspectives

ABSTRACT

Background: artificial intelligence (AI) has emerged as one of the most disruptive tools in contemporary medicine, with a growing impact on neurosurgical practice. Its ability to process large volumes of data, identify complex patterns, and assist in surgical decision-making opens new possibilities in diagnosis, surgical planning, and medical education. However, its integration poses significant challenges. In this context, a narrative review with a systematic methodology is necessary to synthesize current evidence, explore the most relevant clinical applications, and analyze its prospects.

Objectives: to analyze the main evidence, applications, and perspectives of AI in neurosurgery.

Methods: a search was conducted in PubMed, Scopus, and Web of Science, adapting PRISMA criteria for narrative reviews. Studies in English and Spanish published between 2020 and October 2025 were included.

Results: of 412 selected records, 118 articles were analyzed after screening for relevance and methodological quality. AI shows significant impact on diagnosis, pre-surgical planning, and application in neurosurgical subspecialties. Large language models offer utility in education and physician-patient communication. Critical limitations include a lack of widespread external validation, algorithmic biases, nascent regulatory frameworks, and particular challenges in Latin America.

Conclusion: AI is a transformative tool in neurosurgery, but its responsible implementation requires rigorous validation, robust ethical and legal frameworks (especially adapted to the regional context), and constant human oversight. Professional training and the generation of local evidence are imperative for equitable and safe integration.

Keywords: Artificial intelligence. Machine learning. Narrative review. Neurosurgery

Fabián Cremaschi: fabiancremaschi@gmail.com

Recibido: 10/11/2025 Aceptado: 20/02/2026

DOI: 10.59156/revista.v40i01.792

Ariadna Chabán: ariadna.chaban@kcl.ac.uk

María J. Núñez: mariajulietanu@gmail.com

Los autores no declaran conflicto de interés

Los autores no declaran financiamiento.

Este es un artículo de acceso abierto bajo la licencia CC BY-NC

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>

INTRODUCCIÓN

La inteligencia artificial (IA), particularmente a través del aprendizaje automático (*machine learning*, ML) y el aprendizaje profundo (*deep learning*, DL), se ha consolidado como una tecnología disruptiva en la medicina de precisión. En neurocirugía, disciplina que maneja volúmenes complejos proveniente de datos de neuroimágenes y variables clínicas, la IA promete optimizar el diagnóstico, la planificación quirúrgica y la predicción de resultados.⁽¹⁻⁴⁾ Modelos recientes, incluidos los grandes modelos de lenguaje (*Large Language Models*, LLMs), amplían su potencial al ámbito educativo, de documentación y de comunicación.⁽⁵⁾

Sin embargo, la transición desde el desarrollo algorítmico hacia la implementación clínica rutinaria enfrenta desafíos significativos, entre ellos la validación externa limitada, la preocupación por los sesgos algorítmicos, la responsabilidad legal, la protección de datos y la necesidad de marcos regulatorios adaptativos.⁽⁶⁾

En neurocirugía, la evidencia disponible sugiere beneficios en la segmentación tumoral, la planificación prequirúrgica y la predicción de resultados funcionales. Asimismo, los LLMs han emergido como herramientas de apoyo en educación médica, documentación clínica y comunicación con pacientes y familiares, principalmente como complemento del juicio profesional.⁽⁷⁾ No obstante, su incorporación plantea desafíos relevantes relacionados con la validación clínica, la seguridad del paciente, la protección de datos y las implicancias éticas y legales.

Este trabajo constituye una revisión narrativa con metodología sistemática de búsqueda bibliográfica. No se trata de una revisión sistemática formal con metaanálisis, sino de una síntesis crítica estructurada de la bibliografía recabada. Se evalúa el impacto clínico real, se analizan las limitaciones técnicas y metodológicas de los estudios existentes y se discuten los imperativos éticos y regulatorios, con especial atención al contexto latinoamericano.

OBJETIVOS

Analizar las principales evidencias, aplicaciones y perspectivas de la IA en neurocirugía.

MATERIALES Y MÉTODOS

Diseño del estudio

Se realizó una revisión narrativa de la literatura mediante una búsqueda sistemática adaptando las recomendaciones de la declaración PRISMA 2020 (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*), para estructurar la búsqueda y selección en esta revisión narrativa. El objetivo fue identificar y analizar el impacto clínico, técnico y ético de la inteligencia artificial (IA) en la neurocirugía global.

Estrategia de búsqueda y fuentes de información

Se consultaron las bases de datos PubMed (MEDLINE), Scopus (Elsevier) y Web of Science Core Collection para maximizar la exhaustividad y la validez externa de la revisión. PubMed se utilizó por su cobertura focalizada en biomedicina y por el vocabulario controlado MeSH, que mejora la recuperación de literatura clínica. Scopus se incluyó por su mayor cobertura multidisciplinaria y su indexación amplia de actas de congresos, capítulos y revistas técnicas relevantes para inteligencia artificial. Web

of Science se empleó por su selección curada de revistas y su capacidad para análisis de citas históricas y métricas de impacto.

El período de búsqueda comprendió desde el 1 de enero de 2020 hasta el 31 de octubre de 2025. Se diseñó una estrategia híbrida combinando términos controlados (MeSH) y lenguaje libre mediante operadores booleanos (AND, OR, NOT) para combinar términos, optimizada según la sintaxis de cada repositorio:

PubMed: (((("neurosurgery"[MeSH Terms] OR "neurosurgical procedures"[MeSH Terms] OR "neurosurg*" [tiab] OR "brain surgery"[tiab])) AND (("artificial intelligence"[MeSH Terms] OR "machine learning"[MeSH Terms] OR "deep learning"[MeSH Terms] OR "artificial intelligence"[tiab] OR "machine learning"[tiab] OR "deep learning"[tiab] OR "neural networks"[tiab] OR "large language models"[tiab] OR "radiomics"[tiab])))).

Scopus/Web of Science: TITLE-ABS-KEY((neurosurger* OR "brain surgery" OR "neurosurgical procedure*") AND ("artificial intelligence" OR "machine learning" OR "deep learning" OR "neural network*" OR "large language model*" OR "radiomics" OR "computer vision"))).

Complementariamente, se realizó una búsqueda secundaria dirigida a los dominios ético y regulatorio utilizando los términos: ("ethics" OR "regulation" OR "bias" OR "accountability") AND ("artificial intelligence") AND ("neurosurgery"). Fueron criterios de inclusión: revisiones sistemáticas, metaanálisis, ensayos clínicos (fases I-IV), estudios observacionales prospectivos y retrospectivos y estudios de validación diagnóstica, artículos de consenso y revisiones técnicas sobre aspectos éticos y marcos regulatorios. Población humana y aplicaciones directas en el contexto neuroquirúrgico clínico. Idiomas: inglés y español.

Fueron criterios de exclusión: estudios estrictamente preclínicos (modelos animales o modelos *in silico* sin validación posterior con datos clínicos); reportes de protocolos de investigación sin resultados publicados; modelos de IA de aplicación genérica no transferibles a la práctica neuroquirúrgica; editoriales de opinión sin sustento metodológico; y selección de estudios y extracción de datos.

Dos autores revisaron de forma independiente títulos y resúmenes; los conflictos se resolvieron por consenso con un tercer autor. El proceso de selección se detalla en el diagrama de flujo PRISMA (Figura 1).

Evaluación de la calidad y nivel de evidencia

La calidad metodológica de los estudios de validación diagnóstica fue evaluada mediante la herramienta

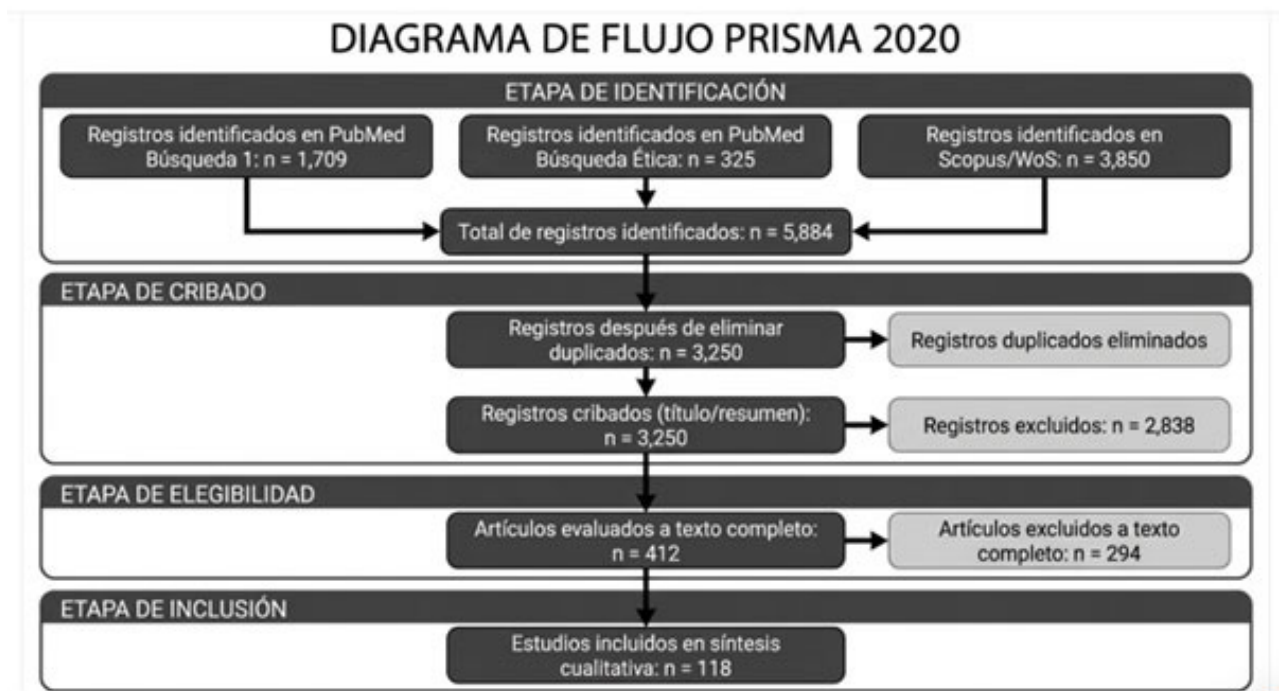


Figura 1. Diagrama de flujo.

QUADAS-2. El nivel de evidencia científica se categorizó según la escala del Oxford Centre for Evidence-Based Medicine (OCEBM) 2011. Para la síntesis narrativa, se priorizaron aquellos estudios con mayor relevancia clínica y solidez estadística, extrayendo datos sobre: subespecialidad neuroquirúrgica, arquitectura del modelo de IA, tamaño de la muestra/dataset y métricas de desempeño (AUC, precisión, sensibilidad/especificidad). A pesar de la estrategia combinada, persisten limitaciones por latencia de indexación, variaciones en políticas editoriales y posible sesgo por acceso institucional a bases de pago; por ello se reportan los conteos brutos y los conteos de duplicados y se discute el posible impacto en los resultados.

RESULTADOS

Selección de estudios y flujo bibliométrico

La búsqueda sistemática inicial arrojó un total de 5884 registros (PubMed: 1709; Scopus y Web of Science: 3850; búsqueda secundaria en PubMed sobre ética/regulación: 325). El volumen en Scopus y Web of Science fue significativamente mayor que PubMed ($n = 3850$ vs. $n = 2034$), debido a la naturaleza interdisciplinaria de la IA que abarca publicaciones en áreas de ingeniería y computación no indexadas en bases de datos puramente biomédicas. Tras la eliminación de duplicados, se tamizaron 3250 títulos y resúmenes. De estos, se seleccionaron 412 artículos para evaluación de texto completo por cumplir con los criterios de pertinencia clínica.

Finalmente, se incluyeron 118 artículos para la síntesis

narrativa, los cuales cumplieron con los estándares de calidad metodológica establecidos. El crecimiento total de la secuencia desde el 2020 hasta el 2025 es del 125 %, con una tasa de crecimiento anual compuesta (CAGR) del 17.61 %.

Perfil demográfico y geográfico de la autoría

No se pudo determinar con certeza el género de los primeros y últimos autores de cada trabajo evaluado, por lo que no se pudo llegar a conclusiones significativas al respecto. En cuanto a la distribución idiomática de la muestra final, se observó una hegemonía absoluta del idioma inglés ya que el 100 % de los 118 artículos fueron escritos en esa lengua. Cabe mencionar que de los 1709 artículos de PubMed, solo uno era en español pero relacionado a Urología.

Calidad de la evidencia

La evaluación mediante los niveles de evidencia del Oxford Centre for Evidence-Based Medicine (OCEBM) clasifica a la mayoría de los estudios en calidad baja de nivel de evidencia científica (Tabla 1). Solo 9 de los 118 trabajos analizados corresponden a ensayos clínicos prospectivos (7.6 %), lo que subraya la necesidad de transitar hacia estudios de mayor calidad.

Hallazgos en ética y regulación

La búsqueda secundaria ($n = 325$) determinó que no hay documentos clave de consenso ni guías (*guidelines*, *practice guidelines*) al respecto si no consideraciones y alerta de eventuales riesgos. Si bien existen marcos éticos

TABLA 1. DISTRIBUCIÓN DE LA EVIDENCIA CIENTÍFICA EN IA SEGÚN SUBESPECIALIDAD NEUROQUIRÚRGICA (2020-2025)

Subespecialidad	Áreas de aplicación principal	Nivel de evidencia (OCEBM)	Métricas de desempeño predominantes	n (%)
Neurooncología	Radiómica, segmentación de gliomas, predicción de mutación IDH y metilación MGMT	II - III	AUC 0.85-0.94 Coeficiente Dice >0.88	46 (39 %)
Patología vascular	Detección de aneurismas, predicción de ruptura y riesgo de vasoespasmó en HSA	II	Sensibilidad 90-97 % Especificidad >85 %	22 (19 %)
Columna	Planificación de alineación sagital y predicción de resultados funcionales (PROMs)	III	Precisión (Accuracy) >80 %	18 (15 %)
Neurocirugía funcional	Localización de zonas epileptógenas y programación de parámetros en DBS	III - IV	Reducción de error posicional <1.5 mm	14 (12 %)
Neurointensivismo / Trauma	Predicción de hipertensión endocraneana y pronóstico en TEC grave	II - III	Sensibilidad 88 %; AUC 0.82- 0.89	12 (10 %)
Ética y regulación	Sesgos algorítmicos, responsabilidad legal y marcos normativos	V	Consenso de expertos (Delphi)	6 (5 %)
TOTAL				118 (100 %)

OCEBM: Oxford Centre for Evidence-Based Medicine. AUC: Area Under the Curve. IDH: Isocitrate Dehydrogenase. MGMT: O6-methylguanine-DNA methyltransferase. DBS: Deep Brain Stimulation. TEC: traumatismo encefalocraneano. HSA: hemorragia subaracnoidea.

generales y guías incipientes, no hay aún guías de práctica clínica específicas y ampliamente adoptadas para la implementación de IA en neurocirugía.

DISCUSIÓN

La inteligencia artificial está redefiniendo los paradigmas en neurocirugía, con ganancias tangibles en precisión diagnóstica, eficiencia en la planificación y potencial para personalizar la atención. En particular, los algoritmos de ML han mostrado utilidad en la estimación de trayectorias quirúrgicas seguras, la segmentación tumoral automática y la identificación de factores pronósticos relevantes.

LLMs en práctica y educación neuroquirúrgica

La evidencia revisada muestra que los LLMs se han incorporado como herramientas complementarias en la práctica neuroquirúrgica, con utilidad en educación médica continua, redacción de documentación y respuesta inicial a preguntas frecuentes de pacientes, siempre bajo supervisión profesional. Estudios comparativos en escenarios

simulados han reportado diferencias de desempeño entre plataformas, destacando la necesidad de evaluar su uso en entornos clínicos reales y con salvaguardas de seguridad y privacidad. Çöllüoğlu y Dikici compararon ChatGPT-4o y Gemini, encontrando un mejor desempeño global del primero en precisión y relevancia en casos complejos simulados.⁽⁸⁾ Patil y col. propusieron un marco de adopción segura, diferenciando entre uso educativo y manejo de datos clínicos sensibles.⁽⁵⁾

Aprendizaje automático en planificación prequirúrgica

En planificación prequirúrgica, los algoritmos de aprendizaje automático se emplean para estimar trayectorias quirúrgicas seguras, segmentar automáticamente estructuras críticas y tumores, e identificar variables pronósticas. Se han reportado modelos basados en biomarcadores de RMf (resonancia magnética funcional) con correlaciones significativas respecto a la respuesta clínica, aunque con limitaciones de tamaño muestral y unilateralidad que restringen su generalización.⁽¹⁾ Revisiones de alcance confirman el potencial de estas herramientas, pero señalan

la ausencia de validación prospectiva multicéntrica como una barrera para su adopción clínica inmediata.⁽⁹⁾

Por subespecialidad, la IA ha mostrado impacto clínico relevante (Tabla 2). En neurocirugía funcional, modelos de aprendizaje profundo alcanzan precisiones cercanas al 92 % en la identificación de enfermedad de Parkinson⁽¹⁰⁻¹²⁾ y especificidades superiores al 90 % en la lateralización de focos epilépticos y otras aplicaciones que mejoran el rendimiento en la cirugía de esta patología.⁽¹³⁻¹⁶⁾ En neurocirugía oncológica, plataformas intraoperatorias basadas en aprendizaje profundo han logrado coeficientes de Dice cercanos a 0.9 en segmentación tumoral en tiempo real, mejorando la extensión de la resección.⁽¹⁷⁻²⁰⁾ En neurocirugía vascular, algoritmos para detección de hemorragia intracraneal han reportado sensibilidades cercanas al 92 % y modelos para detección de aneurismas cerebrales han alcanzado áreas bajo la curva (AUC) de hasta 0.97.^(2,21,22) Estos desempeños prometedores, sin embargo, provienen principalmente de estudios retrospectivos y requieren validación prospectiva antes de su adopción rutinaria.

Las aplicaciones de inteligencia artificial en neurocirugía para el tratamiento de patología espinal incluyen algoritmos de ML y DL para diagnóstico, planificación quirúrgica, navegación intraoperatoria y predicción de complicaciones. Los modelos actuales permiten segmentación automatizada de imágenes, optimización de la colocación de tornillos pediculares, predicción de resultados funcionales y personalización de tratamientos en deformidad espinal y patología degenerativa. Además, la integración de inteligencia artificial con tecnologías como realidad aumentada y navegación robótica ha demostrado mejorar la precisión quirúrgica y reducir complicaciones, aunque persisten desafíos en la validación clínica y la generalización de los modelos.⁽²³⁻²⁶⁾ Por otro lado, la impresión 3D ha sido utilizada para diseñar guías de tornillos pediculares y modelos de columna que ayudan a planificar cirugías de escoliosis, estenosis y fracturas vertebrales. Además, la creación de implantes intersomáticos personalizados ha demostrado ventajas en la restauración de la alineación espinal y la mejora de la integración ósea.⁽²⁷⁾

Comunicación médico-paciente

En comunicación médico-paciente, estudios cualitativos indican que plataformas basadas en IA, incluidos *chatbots* con grandes modelos de lenguaje, pueden mejorar la comprensión de procedimientos, reducir la ansiedad preoperatoria y apoyar la educación sanitaria. La aceptación es mayor cuando estas herramientas se emplean como complemento a la explicación del neurocirujano y personalizan la información, manteniendo la supervisión

profesional como condición indispensable.⁽²⁸⁾

Más allá de la comunicación, las herramientas de IA también se exploran como apoyo al diagnóstico en patologías específicas. Por ejemplo, De Bartolo Villar y col. reportaron el desarrollo de 2 aplicaciones basadas en inteligencia artificial para el diagnóstico de neuralgia del trigémino y espasmo hemifacial, evaluadas en 150 participantes con alta aceptación clínica y satisfacción de pacientes. Este trabajo constituye una evidencia pionera en Latinoamérica sobre la utilidad de modelos de lenguaje en patologías neurológicas específicas, destacando su potencial para optimizar diagnósticos tempranos y derivaciones adecuadas.⁽²⁹⁾ Estos hallazgos sugieren que la IA puede complementar la comunicación clínica, reducir la ansiedad preoperatoria y favorecer decisiones más informadas, actuando como herramienta de orientación y contención inicial sin reemplazar la interacción humana. El avance de estas aplicaciones clínicas plantea, de manera inevitable, desafíos éticos y legales que acompañan la integración de la IA en la práctica neuroquirúrgica.

Aspectos éticos, legales y técnicos

Los aspectos éticos, legales y técnicos emergen como condicionantes de la implementación segura. La literatura documenta que los modelos entrenados en poblaciones no diversas pueden replicar o amplificar disparidades en salud, lo que es especialmente crítico en contextos latinoamericanos con poblaciones subrepresentadas en conjuntos de datos globales.^(30,31) La cadena de responsabilidad ante errores que involucren sistemas de IA sigue siendo ambigua, y requieren marcos legales claros y adaptativos. En el plano regulatorio, la FDA ha publicado un plan de acción para IA/ML en software como dispositivo médico y la Unión Europea avanza con el Artificial Intelligence Act,^(32,33) pero en América Latina aún no hay regulación estandarizada.

Desde una perspectiva conceptual, los modelos de lenguaje de gran escala han emergido como herramientas complementarias en educación, documentación clínica y comunicación con pacientes y familiares. La evidencia disponible sugiere una mejor aceptación cuando estas tecnologías se emplean como apoyo al profesional médico bajo supervisión humana, mientras que su uso autónomo plantea riesgos éticos y legales.

A pesar de los avances, persisten barreras para la implementación generalizada de la IA en neurocirugía, como desafíos en ciberseguridad, protección de datos, sesgos algorítmicos y ausencia de marcos regulatorios uniformes. En conjunto, la evidencia respalda la integración de la IA como herramienta de apoyo a la práctica neuroquirúrgica, sin reemplazar el juicio clínico del especialista. No obstante, el salto desde el rendimiento prometedor en conjuntos de datos controlados hacia

la utilidad clínica real y generalizable continúa siendo el principal obstáculo. Las limitaciones metodológicas identificadas (sesgo de selección, falta de diversidad en los datos, ausencia de validación externa y evaluación prospectiva del impacto clínico) son consistentes con revisiones sistemáticas recientes y subrayan la necesidad de estudios multicéntricos con estándares de reporte robustos.⁽³⁴⁻³⁶⁾

La producción científica local, aunque aún limitada, incluye aportes relevantes publicados en revistas locales, como el estudio sobre IA en neuralgia del trigémino y espasmo, que ejemplifica la viabilidad de aplicaciones clínicas contextualizadas y la necesidad de fortalecer la investigación aplicada en la región.^(29,37)

La formación del neurocirujano debe evolucionar para incluir alfabetización digital, comprensión crítica de los principios de la IA y habilidades para interpretar sus resultados en el contexto clínico. La confianza del paciente, fundamento de la relación médico-paciente, puede verse comprometida si no se abordan de manera transparente los riesgos de sesgo, error y despersonalización;⁽³⁸⁾ por ello, los aspectos éticos y regulatorios no son consideraciones accesorias, sino condiciones necesarias para una implementación segura. La IA debe conceptualizarse como un instrumento de aumento de la inteligencia clínica, nunca como un reemplazo del juicio experto.^(39,40) Todo esto nos lleva, finalmente, a considerar importantes aspectos ético del uso de la IA en Neurocirugía, los problemas reportados y estrategias de mitigación propuestas.

La integración de la IA en neurocirugía plantea desafíos éticos fundamentales que requieren atención sistemática para garantizar una implementación responsable y beneficiosa para los pacientes. Los principales problemas éticos identificados en la literatura incluyen el sesgo algorítmico, la privacidad y gobernanza de datos, la interpretabilidad de los modelos, la responsabilidad profesional, el consentimiento informado y la equidad en el acceso.^(11,18,20,41)

Sesgo algorítmico y equidad

El sesgo algorítmico representa una de las preocupaciones éticas más críticas en la aplicación de IA en neurocirugía. Los algoritmos entrenados con datos no representativos pueden perpetuar o amplificar disparidades étnicas, culturales y geográficas, resultando en diagnósticos erróneos, predicciones de riesgo inexactas y tratamientos inadecuados que afectan desproporcionadamente a poblaciones subrepresentadas.^(12,18,20) Este sesgo puede originarse en múltiples etapas del desarrollo algorítmico, incluidas la recolección de datos, el diseño del modelo y la implementación clínica.^(12,20) La falta de diversidad en los conjuntos de datos de entrenamiento, particularmente

la subrepresentación de mujeres, grupos étnicos minoritarios y poblaciones de bajos recursos, contribuye significativamente a este problema.^(12,13)

Privacidad, seguridad y gobernanza de datos

La protección de la información clínica sensible y la seguridad de los datos constituyen preocupaciones éticas centrales. El uso de grandes volúmenes de datos de pacientes para entrenar algoritmos de IA plantea riesgos relacionados con la confidencialidad, el uso no autorizado y las violaciones de privacidad.^(11,14,18) La gobernanza inadecuada de datos puede comprometer la confianza del paciente y exponer información médica a actores no autorizados, especialmente cuando los datos se comparten entre instituciones o con desarrolladores comerciales de IA.^(11,14)

Interpretabilidad y transparencia

La naturaleza de “caja negra” de muchos modelos de aprendizaje profundo limita la capacidad de los neurocirujanos para comprender cómo se generan las recomendaciones clínicas, lo que dificulta la toma de decisiones informadas y la identificación de errores algorítmicos.^(15,18,20) Esta falta de interpretabilidad puede erosionar la confianza clínica y comprometer la autonomía profesional, especialmente cuando los algoritmos producen resultados contraintuitivos o inesperados.^(15,20)

Responsabilidad y supervisión clínica

La literatura enfatiza que la responsabilidad última por las decisiones clínicas debe permanecer en el neurocirujano, independientemente del nivel de automatización.^(11,15,16,20) Sin embargo, la dependencia excesiva de sistemas automatizados puede conducir al “sesgo de automatización”, donde los profesionales aceptan pasivamente las recomendaciones de IA sin evaluación crítica, lo que aumenta el riesgo de errores clínicos.^(12,15) Además, el uso prolongado de IA puede resultar en la pérdida de habilidades clínicas fundamentales (*de-skilling*), reducción de la vigilancia profesional y disminución de la competencia diagnóstica independiente.⁽¹⁵⁾

Consentimiento informado y confianza

Obtener un consentimiento informado válido cuando se utilizan herramientas de IA en la atención neuroquirúrgica presenta desafíos únicos. Los pacientes deben comprender cómo la IA influye en su diagnóstico y tratamiento, los riesgos asociados y las limitaciones de los algoritmos. Mantener la confianza de pacientes y clínicos es esencial para la adopción exitosa de IA, lo que requiere transparencia sobre el papel de la tecnología en la toma de decisiones clínicas.^(11,16)

Conflictos financieros y acceso equitativo

Los conflictos de interés financieros relacionados con el desarrollo e implementación de IA, así como las disparidades en el acceso a tecnologías avanzadas entre diferentes regiones y grupos socioeconómicos, plantean preocupaciones éticas adicionales.^(11,14) La concentración de recursos de IA en instituciones de alto nivel puede ampliar las brechas existentes en la calidad de la atención neuroquirúrgica.⁽¹²⁾

Problemas reportados por el uso de IA

Todo lo descrito anteriormente son problemas reales que los neurocirujanos debemos tener en cuenta. Los efectos adversos documentados incluyen errores diagnósticos debido a algoritmos defectuosos o inadecuadamente entrenados, falsos positivos y negativos en la detección de patologías, recomendaciones quirúrgicas inapropiadas y fallas en la predicción de complicación.^(15,18,21) En patología oncológica, se han reportado errores en la segmentación y clasificación tumoral que pueden llevar a decisiones terapéuticas incorrectas.⁽¹⁸⁾ En enfermedad de Parkinson y epilepsia, los modelos pueden fallar en la discriminación de subtipos o en la localización precisa de zonas epileptógenas, especialmente en poblaciones con fenotipos atípicos.⁽¹⁵⁾ En patología vascular y espinal, los principales problemas incluyen detección errónea de aneurismas, hemorragias o lesiones estructurales, así como segmentación incorrecta en imágenes.^(15,18)

Estrategias de mitigación

Para abordar estos desafíos éticos, la literatura propone múltiples estrategias de mitigación. La validación externa rigurosa en poblaciones diversas y multicéntricas es fundamental para reducir el sesgo algorítmico y mejorar la generalización de los modelos.^(12,18,20) El uso de conjuntos de datos representativos que incluyan variables demográficas relevantes, junto con técnicas de reponderación, aumento de datos y aprendizaje federado, puede mitigar sesgos estadísticos y sociales.^(12,20,22)

La transparencia y explicabilidad de los algoritmos deben priorizarse mediante el desarrollo de modelos interpretables y la documentación clara de las fuentes de datos, metodologías de entrenamiento y limitaciones conocidas.^(11,12,18) Resulta esencial la implementación de marcos de gobernanza robustos que incluyan supervisión ética, protección de privacidad, cumplimiento regulatorio y monitoreo continuo del desempeño algorítmico.^(11,14,22)

La educación y capacitación de neurocirujanos en ciencia de datos, ética de IA y pensamiento crítico sobre sistemas automatizados puede reducir el sesgo de automatización y preservar las habilidades clínicas fundamentales.^(14,15,22) El establecimiento de políticas institucionales que enfatizen el

uso responsable, la integridad académica, la transparencia y la gestión de conflictos financieros es crucial para la implementación ética de IA.^(11,14)

Finalmente, la participación interdisciplinaria que incluya neurocirujanos, bioeticistas, científicos de datos, pacientes y comunidades afectadas en el diseño, evaluación e implementación de algoritmos puede garantizar que los sistemas de IA reflejen valores éticos y prioridades clínicas apropiadas.^(12,20,22) Para guiar la adopción responsable de estas tecnologías, es necesario el desarrollo de marcos regulatorios específicos para IA en neurocirugía, con énfasis en la seguridad del paciente, la eficacia clínica y la equidad.^(11,14,42)

En conclusión, aunque la IA ofrece beneficios significativos en neurocirugía, su implementación debe estar guiada por principios éticos sólidos, validación rigurosa y supervisión continua para maximizar los beneficios y minimizar los riesgos para los pacientes.^(11,16,18,20)

Perspectivas futuras de la IA en neurocirugía

Las perspectivas futuras de la IA en neurocirugía se centran en la consolidación de sistemas de apoyo a la decisión clínica, la automatización avanzada de diagnóstico y planificación quirúrgica, y la integración de modelos multimodales para personalizar el tratamiento neuroquirúrgico. Se espera que la IA mejore la precisión diagnóstica y pronóstica en neurooncología, patología vascular, funcional y espinal, con algoritmos que superan el 85 % de exactitud en la mayoría de las aplicaciones actuales y que continúan perfeccionándose para reducir la variabilidad y el sesgo.^(10,43)

El desarrollo de plataformas de aprendizaje federado y consorcios de datos multicéntricos permitirá abordar los problemas de generalización y sesgo algorítmico, facilitando la validación externa y la equidad en el acceso a tecnologías avanzadas.^(1,44) La IA también se proyecta como herramienta clave en la educación neuroquirúrgica, simulación quirúrgica y retroalimentación intraoperatoria en tiempo real, optimizando la formación y la seguridad del paciente.⁽⁵⁾ La literatura anticipa una mayor integración de IA en la navegación quirúrgica, la robótica y la predicción de complicaciones, así como el desarrollo de modelos explicables y transparentes que permitan la supervisión clínica efectiva y la confianza profesional.^(41,45) Sin embargo, la adopción clínica generalizada dependerá de la resolución de desafíos éticos, regulatorios y de privacidad, así como de la estandarización de metodologías y la robustez técnica de los sistemas.^(35,45,46)

Limitaciones del estudio

Este trabajo presenta limitaciones propias de su diseño narrativo. La búsqueda se restringió a inglés y español,

pudiendo omitir literatura relevante en otros idiomas, lo que pudo excluir estudios relevantes de otras bases de datos o contextos regionales. Por otro lado, la revisión se basó principalmente en literatura indexada en los motores de búsqueda más relevantes, pero no en todas las bases de datos disponibles. Finalmente, la heterogeneidad metodológica y el predominio de estudios con tamaños muestrales reducidos, o sin validación externa, limitan la generalización de los resultados. Estas limitaciones subrayan la necesidad de futuras investigaciones multicéntricas que evalúen de manera sistemática el impacto clínico, ético y económico de la IA en neurocirugía.

CONCLUSIONES

La IA se ha consolidado como una herramienta poderosa y transformadora en neurocirugía, con aplicaciones validadas en segmentación de lesiones, planificación quirúrgica, diagnóstico asistido y apoyo a la comunicación médico-paciente. Su integración clínica responsable exige superar las limitaciones actuales mediante estudios multicéntricos, prospectivos y con validación externa robusta, siguiendo estándares internacionales de reporte que garanticen transparencia y reproducibilidad. El desarrollo e implementación deben estar guiados por marcos éticos y regulatorios sólidos que prioricen la equidad, la transparencia, la responsabilidad y la seguridad del paciente.

En Latinoamérica, resulta urgente avanzar hacia normativas adaptadas y consensos regionales que promuevan la colaboración y la generación de evidencia local, evitando la ampliación de brechas tecnológicas. La creación de consorcios de datos, la armonización regulatoria y los programas de capacitación regional son estrategias clave para una integración equitativa. La formación del neurocirujano debe incluir alfabetización digital y comprensión crítica de los principios de la IA, utilizándola como complemento que amplíe sus habilidades clínicas sin sustituir el juicio humano.

Desde una perspectiva clínica y ética, la IA debe entenderse como un complemento del juicio profesional y no como un sustituto del neurocirujano. Su implementación

requiere validación científica rigurosa, supervisión humana constante y un marco ético-legal sólido que garantice la seguridad del paciente. En este contexto, la formación interdisciplinaria, el desarrollo de políticas regulatorias claras y la evaluación continua de su impacto clínico y económico serán determinantes para una incorporación responsable y sostenible de la IA en la neurocirugía.

Si bien aún no existe evidencia de que la IA pueda reemplazar al neurocirujano, aquel profesional que la integre en su práctica obtendrá una ventaja que potencie su capacidad diagnóstica y terapéutica frente a quienes la omitan, consolidando una verdadera "inteligencia aumentada" como complemento de su pericia clínica.

Agradecimientos

Los autores agradecen a Santiago Fragapane por su aporte en la concepción de la idea original del artículo, así como a colegas y revisores por sus observaciones durante la redacción y revisión del manuscrito.

Declaración de uso de inteligencia artificial

Las herramientas de inteligencia artificial (ChatGPT-5.2, Copilot GPT 5 y Gemini 3 Pro) se utilizaron exclusivamente para la corrección gramatical, la verificación del formato de referencias y la sugerencia de sinónimos para mejorar la fluidez del texto en español. Para la preparación de esta versión final del trabajo, las herramientas de IA no fueron utilizadas en la generación de contenido, interpretación o conclusiones. La concepción del trabajo, el análisis crítico, la síntesis de la información, la interpretación de los hallazgos y la redacción intelectual son exclusivamente de los autores, quienes asumen plena responsabilidad por el contenido del manuscrito.

Contribuciones de autoría

Conceptualización, Análisis formal, Metodología, Administración del proyecto, Supervisión, Visualización y Redacción - borrador original: Fabián Cremaschi. Curación de datos, Investigación, Recursos, Validación y Redacción - revisión y edición: Fabián Cremaschi, Ariadna Chabán, María J. Núñez. Adquisición de fondos y Software: no fueron requeridos para el presente trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

1. Baker CR, Pease M, Sexton DP, Abumoussa A, Chambless LB. Artificial intelligence innovations in neurosurgical oncology: a narrative review. *J Neurooncol*. 2024;169(3):489-96. Doi: 10.1007/s11060-024-04757-5
2. Staartjes VE, Zanier O, da Mutten R, Serra C, Regli L. Machine intelligence in cerebrovascular and endovascular neurosurgery. En: Di Ieva A, Suero Molina E, Liu S, Russo C, editores. *Computational Neurosurgery*. Adv Exp Med Biol. Cham: Springer; 2024. p. 489-503. Doi: 10.1007/978-3-031-64892-2_23
3. Akhtar M, Farooqi HA, Nabi R. Letter to the editor regarding "Use of artificial intelligence software to detect intracranial aneurysms: a comprehensive stroke center experience". *World Neurosurg*. 2024;191:349-50.
4. Windermere SA, Shah S, Hey G, McGrath K, Rahman M. Applications of artificial intelligence in neurosurgery for improving outcomes through diagnostics, predictive tools, and resident

- education. *World Neurosurg.* 2025;197:123809.
5. Patil A, Serrato P, Cleaver G, Limbania D, See AP, Huang KT. Employing large language models safely and effectively as a practicing neurosurgeon. *Acta Neurochir (Wien).* 2025;167(1):101. Doi: 10.1007/s00701-025-06515-6
6. Char DS, Shah NH, Magnus D. Implementing machine learning in health care—addressing ethical challenges. *N Engl J Med.* 2018;378(11):981-3. Doi: 10.1056/NEJMp1714229
7. Valor Yébenes JA. Alan Turing y el origen de la inteligencia artificial: la superación de la intuición. *Naturaleza y Libertad Rev Estud Interdisciplinarios.* 2024;(18). Doi: 10.24310/nyl.18.2024.19496
8. Çöllüoğlu B, Dikici Ş. Transforming neurosurgical practice with large language models: comparative performance of ChatGPT-Omni and Gemini in complex case management. *World Neurosurg.* 2025;199:124103. Doi: 10.1016/j.wneu.2025.124103
9. Bocanegra-Becerra JE, Neves Ferreira JS, Simoni G, Hong A, Rios-García W, Eraghi MM, y col. Machine learning algorithms for neurosurgical preoperative planning: a scoping review. *World Neurosurg.* 2025;194:123465. Doi: 10.1016/j.wneu.2024.11.048
10. Li W, Gumera A, Surya S, Edwards A, Basiri F, Eves C. The role of artificial intelligence in diagnostic neurosurgery: a systematic review. *Neurosurg Rev.* 2025;48(1):393. Doi: 10.1007/s10143-025-03512-2
11. Priyadharshini S, Ramkumar K, Prasath VBS, Venkatesh S. Web-based AI-driven framework combining multi-modal data with CNN and LLM for Parkinson's disease diagnosis. *Sci Rep.* 2025;15(1):38556. Doi: 10.1038/s41598-025-22448-7
12. Twala B. AI-driven precision diagnosis and treatment in Parkinson's disease: a comprehensive review and experimental analysis. *Front Aging Neurosci.* 2025;17:1638340. Doi: 10.3389/fnagi.2025.1638340
13. Lucas A, Revell A, Davis KA. Artificial intelligence in epilepsy—applications and pathways to the clinic. *Nat Rev Neurol.* 2024;20(6):319-36. Doi: 10.1038/s41582-024-00965-9
14. Loushy I, Sperling MR. Artificial intelligence for epilepsy decision support. *Epilepsia.* 2025 Nov 21. Doi: 10.1111/epi.18709. Epub ahead of print. PMID: 41269050.
15. Ervin B, Arya R. Artificial intelligence and machine learning in neuromodulation for epilepsy. *J Clin Neurophysiol.* 2025 Jul 2;42(6):493-504. Doi: 10.1097/WNP.0000000000001186
16. Jirsa V, Wang H, Triebkorn P, y col. Personalised virtual brain models in epilepsy. *Lancet Neurol.* 2023;22(5):443-54. Doi: 10.1016/S1474-4422(23)00008-X
17. Khalighi S, Reddy K, Midya A, Pandav KB, Madabhushi A, Abedalthagafi M. Artificial intelligence in neuro-oncology: advances and challenges in brain tumor diagnosis, prognosis, and precision treatment. *NPJ Precis Oncol.* 2024;8(1):80. Doi: 10.1038/s41698-024-00575-0
18. Rafanan J, Ghani N, Kazemeini S, Nadeem-Tariq A, Shih R, Vida TA. Modernizing neuro-oncology: the impact of imaging, liquid biopsies, and AI on diagnosis and treatment. *Int J Mol Sci.* 2025;26(3):917. Doi: 10.3390/ijms26030917
19. Chadha S, Sritharan DV, Hager T, D'Souza R, Aneja S. Emerging trends in artificial intelligence in neuro-oncology. *Curr Oncol Rep.* 2025;27(8):951-62. Doi: 10.1007/s11912-025-01688-w
20. Voigtlaender S, Nelson TA, Karschnia P, Vaio EJ, Kim MM, Lohmann P, y col. Value of artificial intelligence in neuro-oncology. *Lancet Digit Health.* 2025;100876. Doi: 10.1016/j.landig.2025.100876
21. Zhang H, Ma W, Zhou X, y col. Artificial intelligence in cerebrovascular disease management: a comprehensive review of risk prediction, diagnosis, therapeutic optimization, and clinical translation. *Vasc Health Risk Manag.* 2025;21:949-64. Doi: 10.2147/VHRM.S555592
22. Kunapinun A, Suthakorn J, Siravaman D, Songsaeng D. Toward AI-powered neurovascular intervention: from imaging to XR-robotic convergence. *Stroke.* 2025. Doi: 10.1161/STROKEAHA.125.053121
23. Adida S, Legarreta AD, Hudson JS, y col. Machine learning in spine surgery: a narrative review. *Neurosurgery.* 2024;94(1):53-64. Doi: 10.1227/neu.0000000000002660
24. Bcharah G, Gupta N, Panico N, y col. Innovations in spine surgery: a narrative review of current integrative technologies. *World Neurosurg.* 2024;184:127-36. Doi: 10.1016/j.wneu.2023.12.124
25. Charles YP, Lamas V, Ntilikina Y. Artificial intelligence and treatment algorithms in spine surgery. *Orthop Traumatol Surg Res.* 2023;109(1S):103456. Doi: 10.1016/j.otsr.2022.103456
26. Scheer JK, Ames CP. Artificial intelligence in spine surgery. *Neurosurg Clin N Am.* 2024;35(2):253-62. Doi: 10.1016/j.nec.2023.11.001
27. Łajczak PM, Jóźwik K, Jaldin Torrico C. Current applications of the three-dimensional printing technology in neurosurgery: a review. *J Neurol Surg A Cent Eur Neurosurg.* 2025;86(3):304-20. Doi: 10.1055/a-2389-5207
28. Palmisciano P, Jamjoom AAB, Taylor D, Stoyanov D, Marcus HJ. Attitudes of patients and their relatives toward artificial intelligence in neurosurgery: a cross-sectional study. *World Neurosurg.* 2020;138:e627-e633. Doi: 10.1016/j.wneu.2020.03.029
29. De Bartolo Villar M, Baldocini M, Campero A. Inteligencia artificial en neuralgia del trigémino y del espasmo hemifacial. *Rev Argent Neurocir.* 2024;39:17-23. Doi: 10.59156/revista.v39i01.699
30. Obermeyer Z, Powers B, Vogeli C, Mullainathan S. Dissecting racial bias in an algorithm used to manage the health of populations. *Science.* 2019;366(6464):447-53. Doi: 10.1126/science.aax2342
31. Shinnars L, Smith S, Grace P, Stephens A, Aggar C. Exploring patient perceptions of artificial intelligence in healthcare. *Health Inf Manag J.* 2020;49(1):3-10. Doi: 10.1177/1833358319853040
32. U.S. Food and Drug Administration (FDA). Artificial Intelligence/Machine Learning (AI/ML)-Based Software as a Medical Device (SaMD) Action Plan. Silver Spring, MD: FDA; 2021 [citado 19 Ene 2026]. Disponible en: <https://www.fda.gov/medical-devices/software-medical-device-samd/artificial-intelligence-and-machine-learning-software-medical-device>.
33. Parlamento Europeo, Consejo de la Unión Europea. Reglamento

- (UE) 2024/1689 por el que se establecen normas armonizadas en materia de inteligencia artificial (Ley de Inteligencia Artificial). Diario Oficial de la Unión Europea. 12 de julio de 2024; L
34. Tangsrivimol JA, Schonfeld E, Zhang M, Veeravagu A, Smith TR, Härtl R, y col. Artificial intelligence in neurosurgery: a state-of-the-art review from past to future. *Diagnostics* (Basel). 2023;13(14):2429. Doi: 10.3390/diagnostics13142429
35. Reyes JS, Lohia VN, Almeida T, Niranjana A, Lunsford LD, Hadjipanayis CG. Artificial intelligence in neurosurgery: a systematic review of applications, model comparisons, and ethical implications. *Neurosurg Rev*. 2025;48:455-72. Doi: 10.1007/s10143-025-03597-9
36. Senders JT, Staples P, Mehrtash A, Cote DJ, Taphoorn MJB, Reardon DA, y col. An online calculator for the prediction of survival in glioblastoma patients using classical statistics and machine learning. *Neurosurgery*. 2020;86(2):E184-E192. Doi: 10.1093/neuros/nyz403
37. Jiménez-Ponce F. Artificial intelligence in medicine. *Rev Med Hosp Gen Méx*. 2024;87(2):39-41. Doi: 10.24875/hgmx.m24000049
38. Hatherley JJ. Limits of trust in medical AI. *J Med Ethics*. 2020;46(7):478-81. Doi: 10.1136/medethics-2019-105935
39. Topol EJ. Deep medicine: how artificial intelligence can make healthcare human again. New York: Basic Books; 2019.
40. Park SH, Han K, Jang HY, Smith TR, Härtl R. Clinician-centered AI: a framework for human-computer collaboration in medicine. *JAMA*. 2025;333(8):711-2. Doi: 10.1001/jama.2024.27654
41. Koryciński M, Ciecierski KA, Niewiadomska-Szynkiewicz E. Decision support systems in neurosurgery: current applications and future directions. *Sensors* (Basel). 2025;25(24):7415. Doi: 10.3390/s25247415
42. Yangi K, Hong J, Gholami AS, y col. Deep learning in neurosurgery: a systematic literature review with a structured analysis of applications across subspecialties. *Front Neurol*. 2025;16:1532398. Doi: 10.3389/fneur.2025.1532398
43. Szmyd B, Podstawka M, Wiśniewski K, y col. AI-driven innovations in neuroradiology and neurosurgery: scoping review of current evidence and future directions. *Cancers* (Basel). 2025;17(16):2625. Doi: 10.3390/cancers17162625
44. El-Hajj VG, Gharios M, Edström E, Elmi-Terander A. Artificial intelligence in neurosurgery: a bibliometric analysis. *World Neurosurg*. 2023;171:152-158.e4. Doi: 10.1016/j.wneu.2022.12.087
45. Yilmaz R, Browd S, Donoho DA. Controversies in artificial intelligence in neurosurgery. *Neurosurg Clin N Am*. 2025;36(1):91-100. Doi: 10.1016/j.nec.2024.08.008
46. AbuAlrob MA, Mesraoua B. Harnessing artificial intelligence for the diagnosis and treatment of neurological emergencies: a comprehensive review of recent advances and future directions. *Front Neurol*. 2024;15:1485799. Doi: 10.3389/fneur.2024.1485799

COMENTARIO

Los autores abordan un tema de alta actualidad y relevancia para la neurocirugía contemporánea: la incorporación de la inteligencia artificial en el diagnóstico, la planificación quirúrgica, la educación médica y la comunicación médico-paciente. El manuscrito tiene como fortaleza principal una visión amplia y actualizada, con búsqueda estructurada en PubMed, Scopus y Web of Science, e incluye no solo aplicaciones clínicas sino también aspectos éticos, regulatorios y desafíos específicos para Latinoamérica.

La inteligencia artificial representa una oportunidad extraordinaria para la neurocirugía. Puede ayudarnos a diagnosticar mejor, planificar con mayor precisión, anticipar riesgos, optimizar procesos y mejorar la enseñanza. Es destacable sin embargo, la baja proporción de estudios prospectivos y la necesidad de validación externa antes de trasladar estas herramientas a la práctica rutinaria.

Finalmente, cabe destacar que su valor no resulta solo de la sofisticación del algoritmo, depende de nuestra capacidad para incorporarla con criterio clínico, rigor científico y responsabilidad ética. Esta herramienta no reemplaza la experiencia neuroquirúrgica, la potencia.

Mauro Ruella

Servicio de Neurocirugía, Fundación para la Lucha contra las Enfermedades Neurológicas de la Infancia (FLENI),
Ciudad de Buenos Aires, Argentina