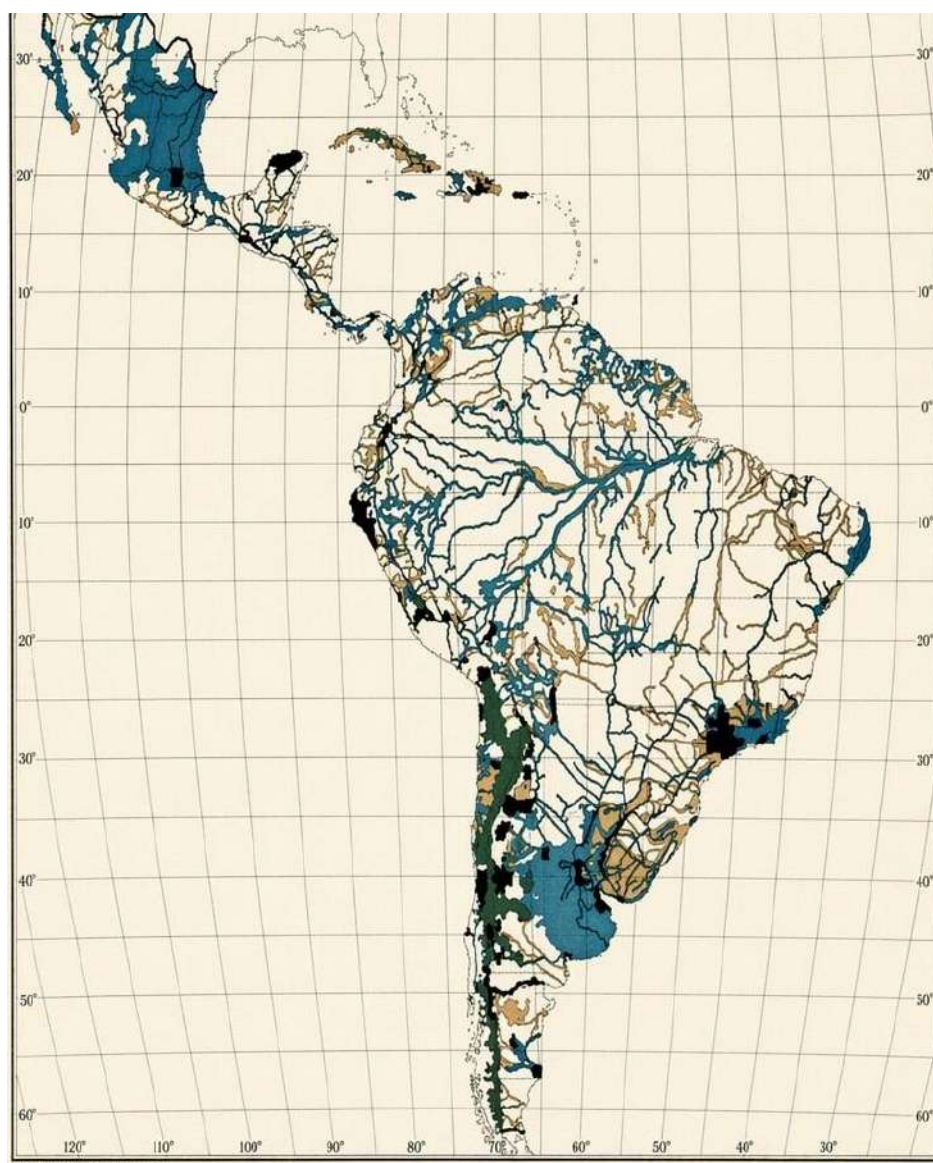


Revista Latinoamericana de Difusión Científica



Volumen 8 - Número 15
Julio – Diciembre 2026
Maracaibo – Venezuela

Realidad aumentada en visualización de vascularización tumoral del sistema nervioso central: Una revisión sistemática

DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.21418674>

Taina Oberto*, Adan Castellano**, Mauricio Rosales***, Zulimar Suárez****, Ricardo Silva*****, María Matera*****, Andrés Granados*****, Adel Al Awad*****

RESUMEN

La cirugía de tumores del sistema nervioso central (SNC) presenta desafíos críticos por la complejidad anatómica, el riesgo de sangrado masivo y el fenómeno del brain shift. La realidad aumentada (RA) surge como una tecnología capaz de superponer modelos tridimensionales sobre el campo quirúrgico para guiar la disección, esta revisión sistemática se propone analizar el impacto de la realidad aumentada en la visualización de la angioarquitectura tumoral cerebral y su contribución a la disminución de complicaciones intraoperatorias. Para ello, se realizó un estudio bajo directrices PRISMA 2020 en las bases de datos PubMed, ScienceDirect y Google Scholar de los últimos 5 años. Se incluyeron 8 artículos originales tras un proceso de cribado independiente de 879 registros iniciales. Los estudios analizados (182 pacientes) mostraron que la RA permite alcanzar tasas de resección total de entre el 70,9% y el 100%. Asimismo, la tecnología redujo los tiempos quirúrgicos hasta en un 47% en comparación con métodos convencionales, reportando errores de registro mínimos de 0,86 mm en sistemas integrados al microscopio y de 2-3 mm en visores inalámbricos. Se concluye que la realidad aumentada optimiza la percepción tridimensional de la vasculatura, reduce la carga cognitiva del cirujano y mejora significativamente la seguridad y eficiencia en los abordajes neuro-oncológicos.

PALABRAS CLAVE: Neurocirugía, Realidad aumentada, Vascularización tumoral, Neurooncología.

*Estudiante. Facultad de Medicina, Escuela de Medicina, Cátedra de Anatomía Humana, Comunidad Estudiantil para la Difusión e Investigación de la Anatomía Humana (CEDIAH), Centro de Entrenamiento en Cirugía de Acceso Mínimo (CECAM), Universidad del Zulia, Maracaibo, Venezuela. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-9510-1332>. E-mail: obertocediah@gmail.com

** Estudiante. Facultad de Medicina, Escuela de Medicina, Cátedra de Anatomía Humana, Comunidad Estudiantil para la Difusión e Investigación de la Anatomía Humana (CEDIAH), Universidad del Zulia, Maracaibo, Venezuela. ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-8357-2482>. E-mail: castellanocediah@gmail.com

*** Estudiante. Facultad de Medicina, Escuela de Medicina, Cátedra de Anatomía Humana, Comunidad Estudiantil para la Difusión e Investigación de la Anatomía Humana (CEDIAH), Universidad del Zulia, Maracaibo, Venezuela. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4181-1718>. E-mail: maurogu2002@gmail.com

****Estudiante. Facultad de Medicina, Escuela de Medicina, Cátedra de Anatomía Humana, Comunidad Estudiantil para la Difusión e Investigación de la Anatomía Humana (CEDIAH), Universidad del Zulia, Maracaibo, Venezuela. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0085-6848>. E-mail: zulimarcarolinasuarezmendoza@gmail.com

*****Estudiante. Comunidad Estudiantil para la Difusión e Investigación de la Anatomía Humana (CEDIAH), Escuela de Medicina, Facultad de Medicina, Universidad del Zulia, Maracaibo, Venezuela. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4732-905X>. E-mail: ricardoasilval1995@gmail.com

*****Estudiante. Comunidad Estudiantil para la Difusión e Investigación de la Anatomía Humana (CEDIAH), Escuela de Medicina, Facultad de Medicina, Universidad del Zulia, Maracaibo, Venezuela. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9944-1281>. E-mail: dra.mariaandreinam@gmail.com

*****Comunidad Estudiantil para la Difusión e Investigación de la Anatomía Humana (CEDIAH), Cátedra de Neuroanatomía Escuela de Medicina, Facultad de Medicina, Universidad del Zulia. Servicio de Neurocirugía, Hospital Universitario de Maracaibo, Venezuela. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1142-5683>. E-mail: AG100019@yahoo.com

***** Profesor. Universidad del Zulia, Facultad de Medicina, Escuela de Medicina. Hospital Universitario. Maracaibo, Venezuela. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1163-3511>. E-mail: adelalawadj@gmail.com

Recibido: 26/03/2026

Aceptado: 19/05/2026

Augmented Reality in the Visualization of Tumor Vascularization in the Central Nervous System: A Systematic Review

ABSTRACT

Surgery for central nervous system (CNS) tumors presents critical challenges due to anatomical complexity, the risk of massive bleeding, and the brain shift phenomenon. Augmented reality (AR) has emerged as a technology capable of superimposing three-dimensional models onto the surgical field to guide dissection; this systematic review aims to analyze the impact of augmented reality on the visualization of cerebral tumor angiography and its contribution to reducing intraoperative complications. To this end, a study was conducted following the PRISMA 2020 guidelines in the PubMed, ScienceDirect, and Google Scholar databases covering the past 5 years. Eight original articles were included following an independent screening process of 879 initial records. The analyzed studies (182 patients) showed that AR enables total resection rates ranging from 70,9% to 100%. Furthermore, the technology reduced surgical times by up to 47% compared to conventional methods, with minimal registration errors of 0,86 mm in microscope-integrated systems and 2–3 mm in wireless headsets. It is concluded that augmented reality optimizes three-dimensional perception of the vasculature, reduces the surgeon's cognitive load, and significantly improves safety and efficiency in neuro-oncological procedures.

KEYWORDS: Neurosurgery, Augmented reality, Tumor vascularization, Neuro-oncology.

Introducción

Los tumores del sistema nervioso central (SNC) destacan por su complejidad diagnóstica y terapéutica debido a su ubicación anatómica y diversidad celular, factores que determinan su grado de malignidad. Dentro de este espectro, entidades como los gliomas y meningiomas representan una parte significativa de las lesiones primarias e intracraneales. En la población pediátrica, estas neoplasias constituyen el tipo de tumor sólido más frecuente, alcanzando aproximadamente el 25% de todos los cánceres infantiles (Wu et al., 2024). La clasificación actual de estas patologías se rige por los criterios de la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2021), integrando perfiles moleculares y características histopatológicas para determinar la malignidad tumoral.

La intervención quirúrgica de estas lesiones supone un desafío que trasciende la técnica convencional, especialmente en tumores supratentoriales gigantes o situados en áreas elocuentes, debido al manejo de la presión intracraneal y al riesgo de sangrado masivo (Wu et al., 2024). Este peligro hemorrágico se agrava por la dificultad de identificar

vasos sanguíneos profundos o de acceso limitado dentro de la masa tumoral mediante métodos tradicionales. Asimismo, el fenómeno del brain shift o desplazamiento del tejido tras la apertura de la duramadre reduce la fiabilidad de la neuronavegación estándar, lo que puede derivar en complicaciones vasculares ante la falta de precisión de las imágenes preoperatorias (Wu et al., 2024).

El objetivo fundamental de la neurocirugía moderna es alcanzar el denominado "balance onco-funcional", el cual busca maximizar la extensión de la resección tumoral para mejorar la supervivencia, preservando simultáneamente las funciones neurológicas críticas y la calidad de vida del paciente. No obstante, la neuronavegación convencional presenta limitaciones operativas al basarse en la visualización de pantallas 2D externas, lo que obliga al cirujano a desviar la vista del campo operatorio, interrumpiendo el flujo de trabajo (Dellaretti et al., 2024).

Ante estos desafíos, la realidad aumentada (RA) surge como una herramienta tecnológica disruptiva que permite superponer modelos tridimensionales directamente sobre el campo de visión real mediante microscopios quirúrgicos o visores (Dellaretti et al., 2024; Olexa et al., 2024). Al proporcionar una "visión de rayos X", la RA facilita la localización de la angioarquitectura crítica antes de la incisión, optimizando la planificación y reduciendo los tiempos quirúrgicos (Yu et al., 2025). Esta revisión sistemática analiza el impacto de la RA en la visualización de la angioarquitectura tumoral cerebral y su contribución a la disminución de complicaciones intraoperatorias.

1. Materiales y métodos

La presente investigación corresponde a una revisión sistemática de la literatura siguiendo las directrices de la declaración PRISMA 2020 (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*). El estudio es de tipo descriptivo y retrospectivo, orientado a evaluar el uso de la Realidad Aumentada (RA) en la visualización de la vascularización durante la cirugía de tumores del Sistema Nervioso Central (SNC).

1.1. Estrategia de búsqueda y fuentes de información

La búsqueda de evidencia se llevó a cabo en las bases de datos científicas PubMed (n= 23), ScienceDirect (n= 66) y Google Scholar (n= 790), identificando un total inicial de 879 registros. La ventana de observación se limitó a registros con una antigüedad no mayor a 5 años, incluyendo estudios en idioma inglés y español.

1.2. Criterios de elegibilidad

Para garantizar la relevancia de los hallazgos, la selección se rigió por criterios de rigor metodológico jerarquizados:

- **Inclusión:** Estudios originales que emplearan Realidad Aumentada (RA) para la visualización vascular en cirugía de tumores del SNC, con datos extraíbles y vigencia menor a 5 años.
- **Exclusión:** Se jerarquizó la exclusión bajo los siguientes parámetros: (1) Intervenciones erróneas: al no emplear RA; (2) Wrong Population: estudios ajenos a cirugía de tumores del SNC; (3) Wrong Outcome: falta de visualización de vascularización tumoral; (4) Wrong Study Design: revisiones narrativas o falta de datos extraíbles; (5) Wrong Language: idiomas distintos al inglés o español; y (6) Outdated: registros con antigüedad superior a 5 años.

1.3. Selección de estudios y extracción de datos

El proceso de selección se ejecutó en las siguientes fases:

- **Organización y Automatización:** Los registros se exportaron a la plataforma Rayyan. De los 879 registros, se eliminaron 126 duplicados y 306 registros fueron descartados mediante herramientas de automatización (Mendeley) por no cumplir con los criterios básicos de entrada (tipo de estudio y años).
- **Cribado inicial:** Se sometieron 447 títulos y resúmenes a revisión, excluyendo 437 registros que no se alineaban con los objetivos de la investigación.
- **Recuperación:** Se buscaron 10 informes, de los cuales uno (n= 1) no pudo ser recuperado por no ser de acceso gratuito.
- **Evaluación a texto completo:** Se evaluaron a texto completo 9 informes. Se excluyó un registro (n= 1) por ser una revisión sistemática.
- **Inclusión:** Finalmente, 8 artículos originales cumplieron con los criterios de rigor y fueron incluidos para la síntesis cualitativa.

1.4. Evaluación del riesgo de sesgo

Para garantizar la consistencia de los hallazgos y minimizar el sesgo de selección, el proceso de cribado y extracción de datos fue realizado de manera independiente por dos revisores. En caso de discrepancias en la selección de los estudios, estas se resolvieron mediante consenso bajo la supervisión y validación del equipo de coautores. Esta validación

cruzada y el arbitraje por terceros aseguraron la integridad metodológica y la objetividad de la evidencia seleccionada.

1.5. Síntesis de resultados

Se realizó una síntesis cualitativa de la evidencia recolectada. Los datos fueron analizados en función de la capacidad de la Realidad Aumentada para mejorar la precisión quirúrgica mediante la visualización vascular, permitiendo una integración narrativa de los resultados obtenidos en los 8 estudios seleccionados.

2. Resultados

La búsqueda inicial en bases de datos arrojó un total de 879 artículos susceptibles de ser incluidos PubMed (n= 23), ScienceDirect (n= 66) y Google Scholar (n= 790), de los cuales fueron descartados 126 artículos por ser duplicados y 306 artículos al no cumplir con criterios básicos de entrada anteriormente descritos. Posterior a esta primera selección se realizó un cribado inicial donde se sometieron 447 artículos (títulos y resúmenes) a revisión, excluyendo 437 artículos por no cumplir con el objetivo de la investigación. Se gestionó la recuperación de 10 informes, de los cuales uno (n=1) no pudo ser recuperado.

Tras la evaluación a texto completo de los 9 informes restantes, se procedió a la exclusión de un registro (n=1) por tratarse de una revisión sistemática, cumpliendo con los criterios de rigor metodológico establecidos. En consecuencia, se incluyeron 8 artículos originales para la síntesis cualitativa, cuyo proceso de selección detallado se ilustra en el diagrama de flujo PRISMA (Figura 1).

La muestra final organiza la evidencia en dos dimensiones de análisis: un bloque clínico consolidado a través de los reportes de caso incluidos suma un total de 182 pacientes con tumores del Sistema Nervioso Central (SNC), caracterizada por una descripción detallada de la anatomía vascular y el uso de Realidad Aumentada (RA) para la planificación quirúrgica y visualización de la angioarquitectura vascular. Asimismo, un bloque técnico, abarca 72 residentes de neurocirugía para la evaluación de competencias en entornos simulados. La inclusión de estos datos en la presente revisión permite contrastar la viabilidad técnica de la visualización vascular asistida con RA frente a la convencional. Las características principales de los estudios se incluyen en la **Tabla 1**.

2.1. Plataformas y Tecnologías de Realidad Aumentada empleadas

Actualmente, existe una dicotomía en las plataformas de Realidad Aumentada (RA) utilizadas en las prácticas neuroquirúrgicas: Por un lado, los visores montados en la cabeza

o Head-Mounted Displays (**HMD**) y por otro, los dispositivos con pantallas de visualización frontal o *Head-Up Display* (**HUD**) quienes suelen estar acoplados a sistemas de inyección de imagen integrados a microscopios.

Un grupo predominante de estudios basó sus intervenciones en el uso de dispositivos montados en la cabeza o visores **HMD**, que le permiten al cirujano proyectar modelos 3D sobre el campo quirúrgico, destacando el Microsoft HoloLens 2 como la herramienta o hardware más utilizado. Este último está integrado a complejos softwares de neuronavegación como HoloNeuro, VisAR v3.0 y Hoth Intelligence (Yu et al., 2025; Ramírez Romero et al., 2024; Olexa et al., 2024).

El uso de este dispositivo fue reportado en numerosas investigaciones, por ejemplo, un estudio de Yu et al. (2025) utilizó HoloNeuro v1.0 para el abordaje de Schwannomas, mientras que otros como Ramirez et al. (2024) y Olexa et al. (2024) hicieron uso de los sistemas VisAR v3.0 y Hoth Intelligence, respectivamente, para el abordaje de diversos tumores craneales y colocación de reservorios de Ommaya, un dispositivo conectado mediante catéteres a los ventrículos cerebrales. Se han reportado asimismo mejoras de estas tecnologías: Van Gestel (2022) patentó una integración al HoloLens 2 de rastreo infrarrojo con una mejora significativa en los tiempos de neuronavegación y precisión en comparación con sistemas tradicionales.

En contraste, el grupo más reducido empleó sistemas **HUD**. Estos funcionan como un mecanismo tecnológico que integra la Realidad Aumentada (RA) directamente en el microscopio quirúrgico, lo que permite superponer imágenes virtuales y anatómicas sobre la visión real del cirujano. Dellaretti et al. (2024) y Pojskić et al. (2024) documentaron en sus estudios el uso de plataformas de microscopía de gama alta de las series Pentero (800 y 900) y Kinevo 900 de Zeiss. De igual forma que los HMD, estos sistemas utilizan softwares de neuronavegación para funcionar, entre los cuales se describen StealthStation S7 y la interfaz Microscope Element, que permiten la superposición de imágenes segmentadas sobre el tejido de manera sincronizada con los ojos del cirujano.

Finalmente, se destaca el uso de estos sistemas propulsados por RA en el ámbito del entrenamiento neuroquirúrgico. Fannizi et al. (2024) lideró un ensayo controlado donde se evaluó el impacto del entrenamiento intensivo con simuladores 3D como NEUROVR y Surgical Theater en residentes de neurocirugía. Este determinó la mejora significativa en procedimientos complejos como la resección de tumores por parte del grupo que entrenó con simuladores en comparación con el grupo control.

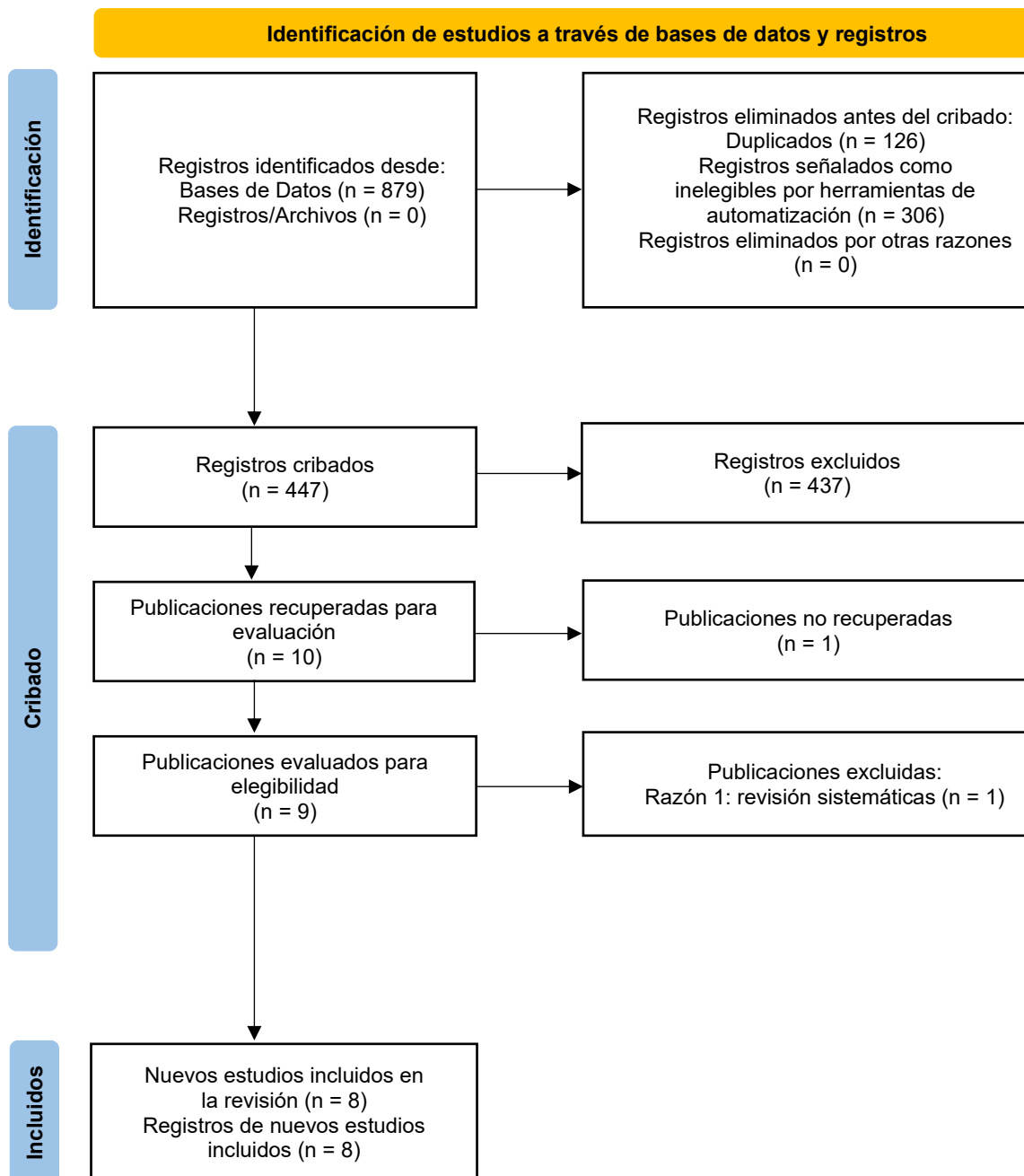


Figura 1. Diagrama de flujo PRISMA del proceso de selección de evidencia científica.

El diagrama ilustra las fases de identificación, cribado, elegibilidad e inclusión de los estudios siguiendo las directrices de la declaración PRISMA 2020. El proceso se inició con la identificación de 879 registros en las bases de datos PubMed, ScienceDirect y Google Scholar. Tras la eliminación de duplicados (n=126) y el descarte automatizado (n=306), se cribaron 447 títulos y resúmenes. Finalmente, tras la evaluación a texto completo de los informes recuperados, se incluyeron 8 artículos originales para la síntesis cualitativa, excluyendo registros por no cumplir los objetivos o por tratarse de revisiones previas

2.2. Visualización Anatómica y Preservación Vascular

En el abordaje de patologías craneales, Wu et al. (2024) documentaron que en caso de tumores supratentoriales gigantes pediátricos, la RA favoreció la técnica quirúrgica, proporcionando al equipo neuroquirúrgico una mayor conciencia espacial tridimensional de las estructuras intracraneales específicas. Asimismo, señalaron que se logró identificar con mucha mayor precisión la ubicación de los vasos de alimentación en relación al tumor, evitando lesiones en áreas críticas como la corteza motora y los vasos cerebrales adyacentes.

En el contexto de abordajes mínimamente invasivos, Olexa et al. (2024) reportaron que la RA permitió crear una reconstrucción 3D completa de la vasculatura, ventrículos, el tumor y quistes tumorales, mejorando la precisión del procedimiento mediante el trazado de trayectorias exactas en tiempo real. Aunado a lo anterior, el estudio reportó que estas representaciones permitieron al equipo quirúrgico anticipar posibles obstáculos anatómicos durante la colocación del reservorio de Ommaya. Del mismo modo, Dellaretti et al. (2024), en su serie de casos, señalaron que la RA fue utilizada con éxito para guiar la incisión de piel y la craneotomía en el 100% de los casos.

En lo que respecta a tumores de nervio periférico, Yu et al. (2025) indicaron que el uso de tecnología HMD superó a la resonancia magnética (RM), específicamente en visualización tumor - arteria - nervio durante la resección de schwannomas del plexo braquial, sumado a una planificación quirúrgica mucho más intuitiva, aumentando la seguridad del procedimiento durante la resección de estos tumores.

A nivel espinal, Pojskić et al. (2024), describieron una serie de casos sobre tumores intradurales como meningiomas, schwannomas y ependimomas, donde el uso de la RA mejoró la orientación intraoperatoria de los cirujanos, del mismo modo, reportan una sinergia de la RA con el ultrasonido intraoperatoria tridimensional (3D - iUS) permitiendo actualizar la navegación y las proyecciones anatómicas en tiempo real durante la cirugía.

2.2. Resultados Quirúrgicos: Extensión de la Resección, Precisión y Tiempos

La aplicación de la RA mostró un impacto positivo en la Extensión de la Resección, las series de casos reportaron tasas de resección total (GTR) de entre el 70,9% y el 77,5%. Dicho beneficio se atribuye a la capacidad de la tecnología para delimitar con precisión los márgenes tumorales y visualizar angioarquitectura crítica oculta a la visión directa por el parénquima.

Los estudios clínicos demuestran que la Realidad Aumentada (RA) optimiza el alcance quirúrgico en diversas patologías; en gliomas y metástasis, Dellaretti et al. (2024) lograron una GTR del 70,9%, mientras que, en tumores espinales, Pojskić et al. (2024) reportaron un 77,5% de éxito en resección total. Asimismo, destaca el estudio de Yu et al. (2025) sobre schwannomas del plexo braquial, donde se alcanzó una resección completa en el 100% de los casos, superando significativamente la visualización de la relación tumor-arteria-nervio obtenida con resonancia magnética convencional.

En el contexto latinoamericano, Ramírez Romero et al. (2024) reportaron resecciones que oscilaron entre el 80% y el 100%; esta fiabilidad técnica se sustenta en errores de registro (TRE) reportados desde los $0,86 \pm 0,28$ mm en sistemas integrados al microscopio hasta los 2-3 mm en dispositivos inalámbricos. Además de la precisión, la RA optimizó la eficiencia quirúrgica, Yu et al. (2025) reportaron una disminución significativa del tiempo quirúrgico, con un promedio de $100,83 \pm 34,70$ minutos en el grupo RA frente a $191,67 \pm 89,81$ minutos en el grupo convencional ($p=0,04$). En concordancia, Van Gestel et al. (2022) validaron que el registro y la delimitación de lesiones son significativamente más rápidos y efectivos con RA que con neuronavegación tradicional ($p=0,02$).

3. Discusión

En primer lugar, la adopción de tecnologías de Realidad Aumentada (RA) en la neurocirugía actual no responde únicamente a una innovación estética, sino a una necesidad crítica de mejorar la ergonomía y la atención dividida del cirujano. La literatura analizada muestra una dicotomía técnica marcada: mientras que los visores de cabeza (HMD) ofrecen una experiencia inmersiva e independiente, los sistemas de visualización frontal (HUD) preservan la tradición de la microcirugía clásica al integrarse en el microscopio (Dellaretti et al., 2024; Ramírez Romero et al., 2024).

A su vez, el uso predominante del Microsoft HoloLens 2 en estudios recientes sugiere que la portabilidad y el costo son factores decisivos en la democratización de la RA. A diferencia de los sistemas de microscopía de alta gama de Zeiss (series Pentero o Kinevo), que requieren una infraestructura hospitalaria costosa y pesada, los HMD permiten una planificación quirúrgica versátil que puede trasladarse desde el consultorio hasta el quirófano (Olexa et al., 2024; Ramírez Romero et al., 2024). No obstante, los HUD presentan una ventaja teórica en la estabilidad de la imagen, ya que, al estar anclados al microscopio, eliminan el riesgo de deriva (drift) del holograma que a veces afecta a los visores inalámbricos durante movimientos bruscos del cirujano (Dellaretti et al., 2024).

Sobre todo, es fundamental discutir que el hardware es solo una parte de la ecuación; la verdadera precisión reside en los algoritmos de navegación como VisAR v3.0 o HoloNeuro. La evidencia indica que la capacidad de estos sistemas para realizar registros sin marcadores físicos (*markerless*) está transformando el flujo de trabajo prequirúrgico (Yu et al., 2025). Al comparar los hallazgos, se observa que el software Hoth Intelligence se especializa en la precisión de trayectorias lineales para dispositivos como los reservorios de Ommaya, mientras que VisAR parece optimizado para la volumetría de tumores complejos, lo que sugiere que en el futuro la elección de la plataforma dependerá del tipo específico de patología neuroquirúrgica (Olexa et al., 2024; Ramírez Romero et al., 2024).

Así mismo, según la literatura el debate fundamental es la brecha entre el entrenamiento y la práctica real. Los simuladores como NEUROVR y Surgical Theater están cerrando esta brecha, permitiendo que el residente experimente la misma interfaz tecnológica que usará en el paciente vivo (Dellaretti et al., 2024). Esto plantea una discusión sobre la equidad tecnológica: la RA no debe ser exclusiva de centros con microscopía robótica, sino que puede ser escalable mediante dispositivos móviles, lo que representa una vía de implementación crítica para sistemas de salud con recursos limitados (Dellaretti et al., 2024; Olexa et al., 2024).

Con lo anterior mencionado, la literatura analizada sugiere que el mayor beneficio no reside únicamente en ver el tumor, sino en la conciencia espacial de la vasculatura y áreas elocuentes que permanecen ocultas al ojo humano o al microscopio convencional. La evidencia en patologías pediátricas complejas y metástasis cerebrales subraya que la RA permite una transición fluida de la planificación teórica a la ejecución práctica. Mientras que la navegación tradicional requiere que el cirujano traslade mentalmente imágenes 2D a un campo 3D, sistemas como los descritos por Wu et al. (2024) y Olexa et al. (2024) eliminan este esfuerzo cognitivo al proyectar trayectorias exactas y reconstrucciones volumétricas directamente sobre el paciente.

Se debe mencionar que, un hallazgo discutible de gran relevancia es que la RA, especialmente mediante dispositivos HMD, ha demostrado superar la visualización proporcionada por la Resonancia Magnética (RM) convencional. En la resección de schwannomas del plexo braquial, la capacidad de discernir la relación entre tumor, arteria y nervio de manera intuitiva sugiere que la RA compensa las limitaciones de las imágenes estáticas (Yu et al., 2025). Además, la sinergia reportada entre RA y el ultrasonido intraoperatorio (3D-iUS) en tumores espinales aborda uno de los mayores desafíos de la neurocirugía: el desplazamiento del tejido, permitiendo actualizar las proyecciones en

tiempo real y manteniendo la fidelidad anatómica durante todo el procedimiento (Pojskić et al., 2024).

De la misma forma, la implementación de la Realidad Aumentada (RA) ha demostrado ser una herramienta de alta fiabilidad, con tasas de resección total (GTR) que oscilan entre el 70,9% y el 100%. Esta efectividad es particularmente notable en patologías de nervio periférico y lesiones profundas, donde la RA estandariza resultados de alta calidad al compensar la variabilidad anatómica (Ramírez Romero et al., 2024; Yu et al., 2025).

En cuanto a la precisión, existe una jerarquía técnica: mientras los sistemas HUD (integrados al microscopio) ofrecen errores mínimos de 0,86 mm, los dispositivos HMD (inalámbricos) mantienen márgenes de 2-3 mm. Ambos rangos operan dentro de los límites de seguridad quirúrgica, posicionando al HUD como el estándar para precisión submilimétrica y al HMD como la opción preferida por su versatilidad (Ramírez Romero et al., 2024; Van Gestel et al., 2022).

En definitiva, la RA actúa como un facilitador del flujo de trabajo moderno al reducir drásticamente los tiempos quirúrgicos, logrando disminuciones de hasta el 47% en comparación con métodos convencionales. Esta mejora en la eficiencia se sustenta en una alta fiabilidad técnica, con errores de registro (TRE) que alcanzan mínimos de $0,86 \pm 0,28$ mm en sistemas integrados al microscopio y márgenes de 2-3 mm en dispositivos inalámbricos.

Si bien el éxito actual de estos sistemas depende de la visualización tridimensional intuitiva de la angioarquitectura, la viabilidad de la RA se ve potenciada por la capacidad de delimitar con precisión los márgenes tumorales y visualizar estructuras críticas ocultas al ojo humano. La transición hacia flujos de trabajo que optimicen el procesamiento de imágenes permitirá reducir la carga manual preoperatoria, facilitando una navegación quirúrgica casi instantánea. De este modo, la integración de la RA en la práctica clínica se consolida como un estándar de precisión, seguridad y eficiencia en la neurooncología actual.

Conclusión

La Realidad Aumentada se consolida como una herramienta transformadora en el quirófano de neurocirugía actual al reducir cargas sobre el cirujano y optimizar la percepción tridimensional de la anatomía vascular. La evidencia confirma que tanto los visores HMD, por su versatilidad ergonómica, como los sistemas HUD, por su precisión milimétrica,

maximizan las tasas de resección total (GTR) y además disminuyen los tiempos quirúrgicos. Asimismo, su integración con sistemas de actualización en tiempo real mitiga el desplazamiento del tejido, garantizando abordajes oncológicos y mínimamente invasivos más seguros, precisos y eficientes.

Los autores declaran no poseer conflictos de intereses financieros o personales que hayan influido en la ejecución de este trabajo. Asimismo, garantizan que los datos presentados han sido obtenidos de manera ética, respetando la integridad de los hallazgos de los autores originales.

Referencias

- Dellaretti, M., Figueiredo, H. P., Soares, A. G., Froes, L. E., Gomes, F. C., y Faraj, F. (2024). Applications of augmented reality in neuro-oncology: a case series. *Asian Journal Of Neurosurgery*, 19(03), 472-477. <https://doi.org/10.1055/s-0044-1788064>
- Fanizzi, C., Carone, G., Rocca, A., Ayadi, R., Petrenko, V., Casali, C., Rani, M., Giachino, M., Falsitta, L. V., Gambatesa, E., Galbiati, T. F., Orena, E. F., Tramacere, I., Riker, N. I., Mocca, A., PASSION Study Group, Schaller, K., Meling, T. R., DiMeco, F. y Perin, A. (2024). Simulation to become a better neurosurgeon. An international prospective controlled trial: the passion study. *Brain and Spine*, 4, 102829. <https://doi.org/10.1016/j.bas.2024.102829>
- Olexa, J., Trang, A., Kim, K., Rokovec, M., Saadon, J., y Parker, W. (2024). Augmented reality-assisted placement of ommaya reservoir for cyst aspiration: a case report. *Cureus*, 16(1), e52383. <https://doi.org/10.7759/cureus.52383>
- Pojskić, M., Bopp, M., Saß, B., y Nimsky, C. (2024). Single-center experience of resection of 120 cases of intradural spinal tumors. *World Neurosurgery*, 187, e233-e256. <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2024.04.071>
- Romero, A. R., Herrera, A. R. R., Cuellar, J. F. S., Delgado, R. E. C., y Martínez, E. E. O. (2024). Pioneering augmented and mixed reality in cranial surgery: the first latin american experience. *Brain Sciences*, 14(10), 1025. <https://doi.org/10.3390/brainsci14101025>
- Van Gestel, F., Frantz, T., Neuville, Q., Klein, S., Bruneau, M., Jansen, B., Scheerlinck, T., Vandemeulebroucke, J., y Duerinck, J. (2022). SURG-37. Neuro-oncological augmented reality: A more intuitive approach to resection planning. *Neuro-Oncology*, 24(Suppl 7), vii259–vii260. <https://doi.org/10.1093/neuonc/noac209.1001>
- Wu, Y., Esguerra, J. M., Liang, S., y Low, S. Y. (2024). Feasibility of augmented reality for pediatric giant supratentorial tumors: a report of three cases. *Cureus*, 16(3), e56750. <https://doi.org/10.7759/cureus.56750>
- Yu, Z., Zheng, W., Peng, P., Zhu, L., Zhao, X., Hu, S., Zhao, H., y Qiu, Y. (2025b). The clinical value and application of augmented reality navigation in brachial plexus schwannoma. *Scientific Reports*, 15(1), 38614. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-22565-3>

Conflicto de interés

Los autores de este manuscrito declaran no tener ningún conflicto de interés.

Declaración ética

Los autores declaran que el proceso de investigación que dio lugar al presente manuscrito se desarrolló siguiendo criterios éticos, por lo que fueron empleadas en forma racional y profesional las herramientas tecnológicas asociadas a la generación del conocimiento.

Copyright

La **Revista Latinoamericana de Difusión Científica** declara que reconoce los derechos de los autores de los trabajos originales que en ella se publican; dichos trabajos son propiedad intelectual de sus autores. Los autores preservan sus derechos de autoría y comparten sin propósitos comerciales, según la licencia adoptada por la revista.

Licencia CreativeCommons

Esta obra está bajo una Licencia CreativeCommons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional



ANEXOS-TABLAS

Autor y Año	Tipo de estudio	N	Und de análisis	Tecnología de RA empleada	Tipo de tumor	Tiempo quirúrgico	Precisión de registro	Resultados principales
Yu et al. (2025).	Reporte de casos.	12	Pacientes	HMD (Microsoft HoloLens 2) con software HoloNeuro v1.0	Schwannoma del plexo braquial.	Con RA: 100,83 ± 34.70 minutos. Sin RA: 191,67 ± 89,81 minutos.	4.72±0,03 / 5 (Puntuación de visualización de expertos).	La RA superó a la RM convencional en la visualización de la relación tumor-arteria-nervio y una resección total en el 100% de los casos.
Wu et al. (2024).	Reporte de casos.	3	Pacientes	HMD (Magic Leap) con software BrainLab Elements.	Tumores supratentoriales gigantes (GSBT).	No se reporta un tiempo quirúrgico promedio de intervención.	No se reporta una métrica numérica de precisión.	La RA favoreció la técnica quirúrgica y optimizó la percepción de la anatomía vascular.
Ramírez Romero et al. (2024).	Análisis descriptivo / Reporte de casos.	3	Pacientes	Software VisAR v3.0 (Novarad) integrado con el visor HMD (Microsoft HoloLens 2).	Meningiomas.	No se reporta un tiempo quirúrgico promedio de intervención.	Reporta una precisión de 2-3mm.	Resultados exitosos con alivio de síntomas y resecciones desde el 80% hasta totales.

Dellaretti et al. (2024).	Reporte de casos.	31	Pacientes	Sistema de neuronavegación StealthStation S7 con HUD integrado en microscopio (Pentero 800).	Gliomas, metástasis y meningiomas.	No se reporta un tiempo quirúrgico promedio de intervención.	No se reporta una métrica numérica de precisión, reporta evaluación visual de superposición del paciente y la proyección.	Resección total en 70,9% de los casos; la RA permitió en el 100% de los casos un visualización precisa de la angioarquitectura.
Pojskić et al. (2024).	Reporte de casos.	112	Pacientes	HUD en plataformas de microscopía quirúrgica (Pentero, Pentero900 y Kinevo900) bajo la interfaz Microscope Element.	Tumores espinales intradurales (meningioma, Schwannoma Ependimoma).	Con RA: 238,24 ± 92,6 minutos. Sin RA: 226 ± 94,9 minutos.	Reporta un error de registro del objetivo medio de 0,86 ± 0,28 mm.	Resección total en el 77,5%; la RA mejoro la orientación intraoperatoria de la anatomía vascular.
Olexa et al. (2024).	Reporte de caso.	1	Paciente	HMD (Microsoft HoloLens 2) con software de RA de Hoth Intelligence, ITK-SNAP y sistema de neuronavegación BrainLab.	Metástasis cerebral de un CA de mama.	No se reporta un tiempo quirúrgico promedio de intervención.	No se reporta una métrica numérica de precisión.	La RA permitió la visualización 3D de estructuras críticas superpuestas al paciente, facilitando la planificación de la trayectoria y la orientación

								espacial del cirujano.
Fannizi et al. (2024).	Inv. de campo.	72	Residentes de neurocirugía	Simuladores de RV y RA con el sistema NEUROVR y el simulador Surgical Theater.	Meningiomas, gliomas.	No se reporta un tiempo quirúrgico promedio de intervención.	No se reporta una métrica numérica de precisión.	Reportó un desempeño significativamente superior en la remoción de tumores cerebrales.
Van Gestel et al. (2022).	Reporte de caso.	20	Pacientes	Visor Microsoft HoloLens 2 utilizando una solución patentada de seguimiento por infrarrojos ("inside-out").	Lesiones intracraneales / intracerebrales.	No se reporta un tiempo quirúrgico promedio de intervención.	No se reporta una métrica numérica de precisión.	La RA permitió un registro y delimitación de lesiones significativamente más rápidos en comparación con los métodos convencionales.

Tabla 1. Características técnicas y resultados clínicos de los estudios originales incluidos.

Resumen comparativo de los ocho estudios originales que conforman la muestra de la revisión, los cuales suman un total de 182 pacientes y 72 residentes de neurocirugía evaluados. Se detallan las tecnologías de realidad aumentada (RA) empleadas, divididas entre visores montados en la cabeza (HMD, como HoloLens 2) y pantallas de visualización frontal (HUD, integradas en microscopios de alta gama como Zeiss Pentero). La tabla sintetiza variables críticas como el tiempo quirúrgico, la precisión de registro (con errores mínimos reportados de 0,86 mm) y la tasa de resección total, que alcanzó niveles de entre el 70,9% y el 100% en los casos asistidos por RA.