

# Navegación dinámica guiada por función en la resección de malformaciones arteriovenosas elocuentes: integración de realidad aumentada, tractografía y mapeo con paciente despierto

## *Function-guided dynamic navigation in the resection of eloquent arteriovenous malformations: integration of augmented reality, tractography, and awake mapping*

José Luis Acha<sup>1,2\*</sup> 

Luis Contreras<sup>1</sup> 

Adriana Bellido<sup>2</sup> 

### RESUMEN

La resección microquirúrgica de malformaciones arteriovenosas (MAV) en áreas cerebrales elocuentes exige un delicado equilibrio entre lograr una exclusión completa de la lesión y preservar la función neurológica. La neuronavegación convencional, aunque útil, puede perder precisión durante la cirugía debido al brain shift. Nuestro objetivo fue mostrar cómo la integración de realidad aumentada (RA), tractografía por DTI y mapeo cerebral con paciente despierto puede aportar una guía dinámica y funcional para la resección de MAV. Se presenta el caso de una paciente de 36 años con una MAV frontal izquierda grado II (Spetzler-Martin), intervenida mediante un protocolo Asleep–Awake–Asleep. Se fusionaron angiografía digital 3D, resonancia magnética y tractografía DTI del fascículo arqueado en un modelo holográfico de RA. Intraoperatoriamente, la RA permitió una visualización “transcortical” del nido y de los tractos de sustancia blanca, facilitando la adaptación en tiempo real frente al desplazamiento cerebral. Durante la fase despierta se realizó estimulación eléctrica cortical y subcortical para validar los límites funcionales. La guía por RA permitió una identificación precisa de los vasos aferentes y planos de disección, preservando las áreas del lenguaje. La angio-TC postoperatoria confirmó la resección completa, sin déficits neurológicos. La RA integrada al mapeo con paciente despierto compensa las limitaciones de la navegación estática y ofrece una herramienta dinámica para la cirugía de MAV en áreas elocuentes.

**Palabras clave:** Malformaciones arteriovenosas intracraneais; Mapeo cerebral; Conectómica; Neuronavegación; Desplazamiento cerebral; Realidad aumentada.

### ABSTRACT

Microsurgical resection of arteriovenous malformations (AVMs) in eloquent areas is challenged by the need for complete exclusion while preserving functional integrity. Conventional neuronavigation often loses precision due to intraoperative brain shift. We aimed to demonstrate the utility of integrating Augmented Reality (AR), DTI-tractography, and awake mapping to achieve dynamic, function-guided AVM resection. A 36-year-old female with a Spetzler-Martin Grade II left frontal AVM underwent resection using an Asleep–Awake–Asleep protocol. Preoperative 3D DSA, MRI, and DTI-tractography (focusing on the arcuate fasciculus) were fused into a holographic AR model. Intraoperatively, AR provided “transcortical” visualization of the nidus and white matter tracts, facilitating real-time recalibration for brain shift. Cortical and subcortical direct electrical stimulation was used during the awake phase to validate functional margins. AR-guided craniotomy and dissection allowed for precise identification of feeder arteries and gliotic planes while preserving critical language tracts. Continuous correlation between AR visualization and linguistic performance ensured safe resection. Postoperative CT angiography confirmed total nidus obliteration. The patient remained neurologically intact, with a modified Rankin Scale (mRS) score of 0 at the six-month follow-up. The integration of AR-based dynamic navigation and awake functional mapping facilitates precision connectomic neurosurgery for eloquent AVMs. This multimodal approach overcomes the limitations of static navigation, enhancing surgical accuracy and optimizing functional outcomes.

**Keywords:** Arteriovenous malformations, intracranial; Brain mapping; Connectomics; Neuronavigation; Brain shift; Augmented reality.

\*Hospital Nacional Dos de Mayo, Vascular Neurosurgery Service, Lima, Peru.

<sup>2</sup>Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Faculty of Medicine, Lima, Peru.

Received May 9, 2026  
Accepted May 14, 2026



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## 1 INTRODUCCIÓN

El tratamiento microquirúrgico de las malformaciones arteriovenosas (MAV) en áreas elocuentes representa uno de los desafíos más complejos en la neurocirugía vascular contemporánea. El objetivo principal es la exclusión completa de la lesión para prevenir hemorragias futuras, manteniendo intacta la funcionalidad neurológica. Tradicionalmente, la planificación quirúrgica se ha basado en la escala de Spetzler-Martin<sup>1</sup>, la cual evalúa el tamaño, el drenaje venoso y la elocuencia anatómica. Sin embargo, este sistema no contempla la variabilidad individual en la arquitectura funcional cerebral ni los fenómenos de plasticidad neuronal inducidos por la propia malformación<sup>2</sup>.

La neurocirugía orientada a la conectómica sugiere que la localización anatómica por sí sola es insuficiente para predecir el impacto funcional<sup>3</sup>. Por lo tanto, el monitoreo intraoperatorio en tiempo real se ha convertido en una herramienta indispensable. En este escenario, la craneotomía con el paciente despierto (*awake mapping*) permite una evaluación dinámica del lenguaje y de la función motora<sup>4</sup>. No obstante, la navegación convencional

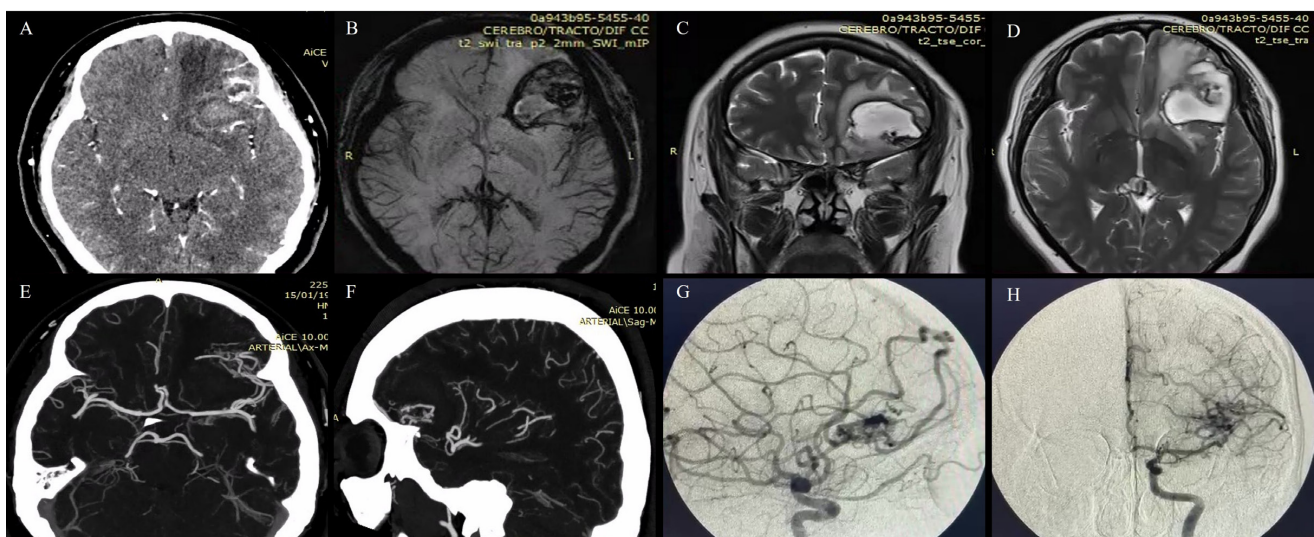
basada en imágenes preoperatorias estáticas pierde precisión debido al desplazamiento cerebral (*brain shift*) tras la apertura de las cisternas<sup>5</sup>.

La integración de la Realidad Aumentada (RA) y la tractografía por Imágenes de Tensor de Difusión (DTI) surge como una solución para proporcionar una visualización “transcortical” dinámica, asistiendo al cirujano en la delimitación del nido y de los tractos de sustancia blanca adyacentes<sup>6,7</sup>.

## 2 DESCRIPCIÓN DEL CASO

### Presentación clínica

Paciente mujer de 36 años, diestra, que acudió con antecedentes de crisis convulsivas tónico-clónicas focales. El examen neurológico inicial no mostró déficits (mRS 0). Los estudios de imagen (RM y DSA) revelaron una MAV frontal basal izquierda de 2.8 cm, irrigada por ramas de la arteria cerebral media y con drenaje venoso superficial. Fue clasificada como Grado II de Spetzler-Martin. (Figura 1).



**Figura 1.** Caracterización multimodal de una MAV frontal izquierda. A: Tomografía Computarizada (TC, vista axial) que demuestra una lesión ocupante de espacio con componentes hemorrágicos y/o calcificados en la región frontal izquierda; B: Resonancia Magnética (RM) utilizando una secuencia de Imagen Ponderada en Susceptibilidad (SWI) que resalta el contenido hemorrágico o los depósitos de hemosiderina dentro de la lesión; C: RM en T2 (corte coronal) que muestra el efecto de masa y el edema perilesional circundante; D: RM en T2 (corte axial) que representa la arquitectura interna de la malformación y su relación con el ventrículo lateral; E: Angio-TC (ATC) con reconstrucción MIP axial que demuestra la irrigación vascular de la lesión originada en la arteria cerebral media izquierda; F: Reconstrucción sagital de Angio-TC que muestra la extensión anteroposterior del nido vascular; G: Angiografía por Sustracción Digital (DSA) en proyección lateral de la arteria carótida interna izquierda, identificando el nido de la malformación arteriovenosa (MAV); H: DSA en proyección anteroposterior (AP) que describe la arquitectura del nido y su drenaje venoso.

### Planificación multimodal y realidad aumentada

Se realizó la integración de datos de DSA 3D con secuencias de RM estructural y DTI. La tractografía se centró en el fascículo arqueado y el tracto corticoespinal. Estos datos se cargaron en un software de realidad aumentada para generar un modelo holográfico, lo que permitió la visualización de la profundidad del nido y su relación con las fibras de asociación del lenguaje.

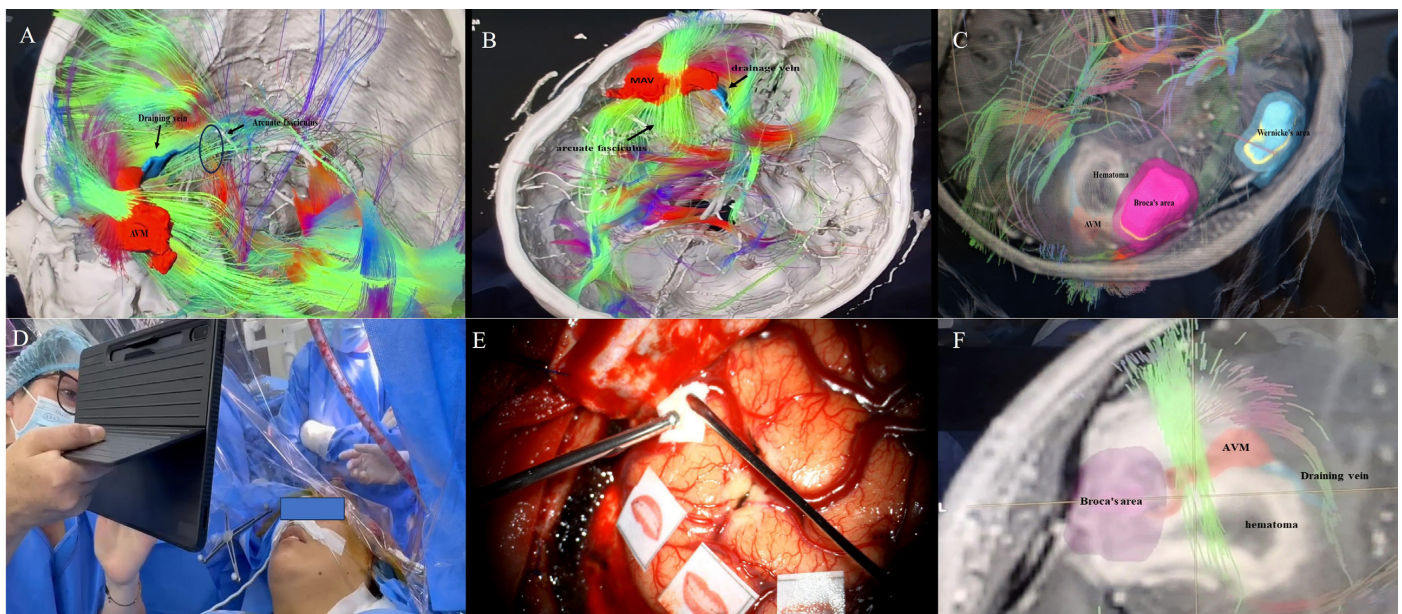
### Procedimiento quirúrgico

Se seleccionó un protocolo *Asleep-Awake-Asleep* (Dormido-Despierto-Dormido). Tras una craneotomía guiada por RA para optimizar la exposición, se inició la fase despierta. Se realizó el mapeo cortical y subcortical mediante estimulación eléctrica directa (60 Hz, 2-4 mA). La paciente completó tareas de denominación de objetos sin interferencias.

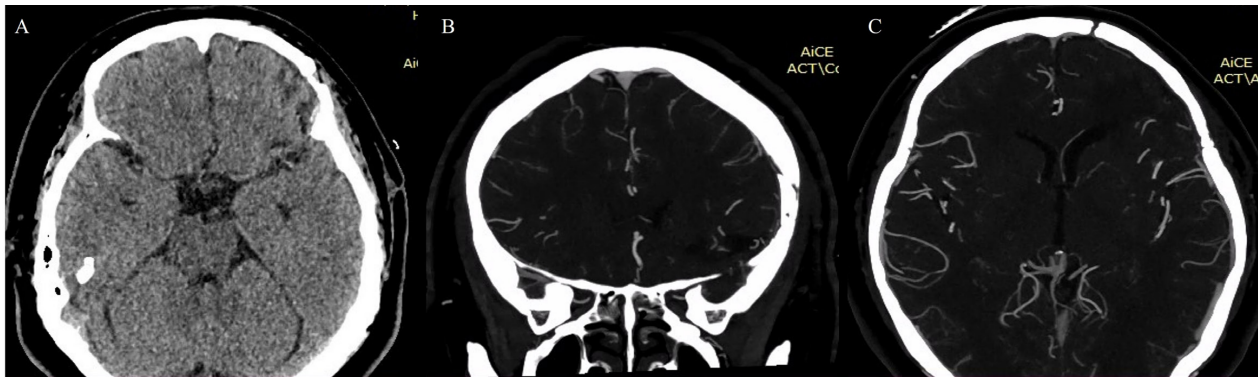
La RA se utilizó para proyectar los contornos de la MAV sobre la superficie cerebral, facilitando la identificación de las arterias aferentes. A medida que avanzaba la disección, se empleó la RA para recalibrar los puntos de referencia anatómicos, permitiendo una navegación dinámica<sup>8,9</sup>. La resección se llevó a cabo siguiendo los planos glióticos, preservando las venas de drenaje hasta lograr la desconexión arterial completa. (Figura 2)

### Evolución postoperatoria y resultados

La paciente despertó sin nuevos déficits neurológicos. Una angio-TC realizada a las 24 horas confirmó la ausencia de restos del nido. Fue dada de alta al quinto día postoperatorio. En el seguimiento a los seis meses, permanece libre de crisis convulsivas y con una función cognitiva intacta (mRS 0). (Figura 3)



**Figura 2.** Planificación multimodal y uso intraoperatorio de Realidad Aumentada (RA). Protocolo de validación funcional continua, integrando correlación anatómica y funcional. (A) Modelo 3D lateral: Relación espacial entre el nido (rojo), la vena de drenaje (azul) y el fascículo arqueado (verde/amarillo), definiendo el corredor quirúrgico para preservar los trectos del lenguaje; (B) Proyección craneal: Profundidad de la lesión y afectación de fibras subcorticales, delimitando los márgenes de resección funcional; (C) RA intraoperatoria: Superposición digital del nido (púrpura), hematoma (rosado) y ventrículo (cian); la transparencia cortical virtual guía la craneotomía y la disección inicial en tiempo real; (D) Fase despierta: Evaluación de tareas de lenguaje dentro del protocolo *Asleep-Awake-Asleep*, con correlación inmediata entre el desempeño lingüístico y la navegación multimodal en tiempo real; (E) Mapeo cortical: Estimulación bipolar para identificar áreas críticas del lenguaje, definiendo márgenes funcionales que permiten ajustes a la planificación preoperatoria; (F) Conectómica asistida por RA: Proyección intraoperatoria del nido, drenaje venoso y fascículo arqueado sobre el campo quirúrgico, compensando el *brain shift* y guiando una disección precisa basada en la respuesta funcional de la paciente. Abreviaturas: RA: realidad aumentada; MAV: malformación arteriovenosa.



**Figura 3.** Evaluación radiológica postoperatoria y estado vascular. (A) TC sin contraste: Cavidad quirúrgica frontal basal izquierda sin complicaciones hemorrágicas ni isquémicas, ni efecto de masa; posicionamiento adecuado del colgajo óseo y de la osteosíntesis; (B) Angio-TC: Reconstrucción que confirma la obliteración completa del nido, sin cortocircuitos (*shunts*) arteriovenosos residuales y con preservación de la arquitectura vascular adyacente; (C) Correlación clínica: La concordancia entre los hallazgos radiológicos y la preservación del lenguaje (mRS 0) respalda la precisión del protocolo basado en la validación funcional continua (RA + mapeo con paciente despierto), logrando una resección completa sin morbilidad neurológica añadida. Abreviaturas: TC: tomografía computarizada; mRS: escala de Rankin modificada; RA: realidad aumentada.

### 3 DISCUSIÓN

La resección de las MAV en áreas elocuentes requiere un nivel de precisión que la navegación convencional no siempre garantiza<sup>10</sup>. La Realidad Aumentada (RA) ofrece una ventaja sustancial al permitir que el cirujano mantenga el enfoque en el campo quirúrgico mientras recibe información sobre estructuras ocultas<sup>11</sup>. En este caso, fue crucial para comprender la volumetría del nido y evitar la entrada accidental en áreas de sustancia blanca identificadas mediante DTI<sup>12</sup>.

El uso del mapeo con el paciente despierto en la patología vascular proporciona una red de seguridad biológica incomparable<sup>13</sup>. Si bien el monitoreo motor es de gran utilidad, la evaluación del lenguaje solo es posible con un paciente despierto. La sinergia entre la RA y el mapeo permite una “cirugía vascular de precisión”<sup>14</sup>. Finalmente, la capacidad de compensar el desplazamiento cerebral (*brain shift*) a través de la RA aumenta la confianza durante la disección de vasos profundos<sup>15</sup>.

### 4 CONCLUSIÓN

La integración de la navegación dinámica mediante realidad aumentada, combinada con tractografía avanzada y mapeo

funcional con el paciente despierto, representa un cambio de paradigma en el tratamiento de las MAV en áreas elocuentes. Este enfoque multimodal supera las limitaciones de la neuronavegación estática tradicional, proporcionando una guía en tiempo real que se adapta a las variaciones anatómicas intraoperatorias. La capacidad de visualizar simultáneamente la arquitectura vascular y las redes neuronales críticas facilita una resección radical con un perfil de seguridad optimizado, asegurando la preservación de la integridad funcional y la calidad de vida de la paciente.

### REFERENCIAS

- Spetzler RE, Martin NA. A proposed grading system for arteriovenous malformations. *J Neurosurg.* 1986;65(4):476-83. <https://doi.org/10.3171/jns.1986.65.4.0476>. PMID:3760956.
- Hervey-Jumper SL, Berger MS. Role of language and cognitive mapping in resection of gliomas in critical areas. *Neurosurgery.* 2016;79(4):503-14. doi: 10.1227/NEU.0000000000001273.
- Duffau H. The huge plasticity of the orofacial motor cortex: from brain mapping to perisylvian connectomics. *World Neurosurg.* 2016;93:403-408. doi: 10.1016/j.wneu.2016.06.015
- Gabarrós A, Young WL, McDermott MW, Lawton MT. Language and motor mapping during resection of brain arteriovenous malformations: indications, feasibility, and utility. *Neurosurg Focus.* 2011;30(2):E11. <https://doi.org/10.3171/2010.10.FOCUS10214>

5. Meola A, Cutolo F, Carbone M, Cagnazzo F, Ferrari M, Ferrari V. Augmented reality in neurosurgery: a systematic review. *Neurosurg Rev.* 2017;40(4):537-48. <https://doi.org/10.1007/s10143-016-0732-9>. PMID:27154018.
6. Zhang G, Yang J, Yang K, et al. Effectiveness of multimodal navigation-guided microsurgery for brain AVMs. *Front Neurol.* 2023;14:1154321. <https://doi.org/10.3389/fneur.2023.1154321>
7. Shinozaki S, Kato Y. Minimally invasive microsurgery for AVM using 3D-navigation and DTI. *Asian J Neurosurg.* 2022;17(4):556-561. <https://doi.org/10.1055/s-0042-1757223>
8. Cannizzaro D, Zaed I, Safa A, et al. Augmented reality in neurosurgery: state of the art and future projections. A systematic review. *Front Surg.* 2022;9:864792. doi:10.3389/fsurg.2022.864792
9. Najera E, Lockard G, Saez-Alegre M, Piper K, Jean WC. Mixed reality in neurosurgery: redefining the paradigm for arteriovenous malformation planning and navigation to improve patient outcomes. *Neurosurg Focus.* 2024;56(1):E5. doi:10.3171/2023.10.FOCUS23637
10. Harikrishna A, Chatzidakis S, Ishak A, et al. Awake craniotomy in patients with arteriovenous malformation: a systematic review and meta-analysis. *Med Int (Lond).* 2024;4(4):42. doi:10.3892/mi.2024.166
11. Semione G, Almeida GO, Lepine HL, et al. Awake craniotomy for eloquent brain arteriovenous malformations: a systematic review and individual patient data meta-analysis. *World Neurosurg.* 2025;195:123609. doi:10.1016/j.wneu.2024.123609
12. Silva LL, Tuncer MS, Vajkoczy P, Picht T, Rosenstock T. Distinct approaches to language pathway tractography: comparison of anatomy-based and functional mapping techniques. *J Neurosurg.* 2021;136(2):589-600. doi:10.3171/2020.12.JNS204028
13. Satoh M, Nakajima T, Yamaguchi T, Watanabe E, Kawai K. Evaluation of augmented-reality based navigation for brain tumor surgery. *J Clin Neurosci.* 2021;94:305-314. doi:10.1016/j.jocn.2021.10.033
14. Han H, Gao D, Ma L, et al. Long-term outcomes of microsurgery and stereotactic radiosurgery for arteriovenous malformations: a propensity score-matched analysis. *Int J Surg.* 2023;109(12):3983-3992. doi:10.1097/JIS9.0000000000000751
15. Magnani M, Rustici A, Zoli M, et al. Connectome-based neurosurgery in primary intra-axial neoplasms: beyond the traditional modular conception of brain architecture. *Life (Basel).* 2024;14(1):136. doi:10.3390/life14010136

**CORRESPONDING AUTHOR**

José Luis Acha

E-mail: [jacha@crp.com.pe](mailto:jacha@crp.com.pe)

*Funding:* none.

*Conflict of interests:* none.

**Ethics Committee Approval:** The study was approved by the Institutional Ethics Committee of Hospital Nacional Dos de Mayo.

**Informed consent:** Informed consent was obtained from the patient for the publication of this case report and accompanying images.

**Institution:** Hospital Nacional Dos de Mayo, Lima, Peru.