

**Impacto de la Resonancia Magnética Funcional y de Reposo en la Preservación Funcional y Extensión de la Resección de Tumores Cerebrales: Revisión Sistemática de la Literatura (2021-2026)**

Yeniffer Amaya Isaza

Director

John Alexander Calderón Restrepo

Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD

Escuela de Ciencias de la Salud ECISA

Tecnología en Radiología e Imágenes Diagnósticas

2026

## **Agradecimientos**

En primer lugar, agradezco a Dios y a la vida por darme la fortaleza, la salud y la guía necesarias para culminar con éxito esta etapa de mi formación académica y profesional.

A mi familia, por ser mi motor, mi refugio y mi apoyo incondicional en cada noche de desvelo; este logro es tanto suyo como mío, gracias por creer en mí, incluso cuando el camino se tornaba complejo.

A mis docentes y asesores de la tecnología, por compartir su conocimiento con paciencia, por sembrar en mí la curiosidad científica y por enseñarme que detrás de cada imagen diagnóstica hay un ser humano depositando su confianza en nuestras manos.

Finalmente, a mis compañeros y amigos de estudio, con quienes compartí aulas, laboratorios y largas jornadas de trabajo; gracias por la complicidad, el apoyo mutuo y por hacer de este viaje universitario una experiencia inolvidable.

## Resumen

La presente investigación se centra en el análisis de la cirugía de tumores cerebrales, un campo donde el equilibrio entre lograr la máxima extensión de la resección y la preservación de áreas elocuentes es determinante para el pronóstico del paciente. En este contexto, la Resonancia Magnética Funcional, a través de sus protocolos de tarea y de estado de reposo, se ha consolidado como una herramienta de vanguardia para la planeación neuroquirúrgica. No obstante, dada la variabilidad en los resultados funcionales reportados, surge la necesidad de sintetizar la evidencia científica reciente. Por lo anterior, el objetivo de este estudio es analizar el impacto de la aplicación de la Resonancia Magnética Funcional y de reposo en la preservación de funciones críticas y en la optimización del margen quirúrgico, fundamentándose en una revisión sistemática de la literatura publicada entre los años 2021 y 2026.

Para alcanzar dicho propósito, se empleará una metodología de revisión sistemática, realizando búsquedas exhaustivas en bases de datos de alto impacto como PubMed, Scopus, ScienceDirect y Cochrane Library mediante el uso de descriptores controlados y operadores booleanos. El proceso incluirá criterios de inclusión rigurosos para estudios que comparen hallazgos imagenológicos con mapeo intraoperatorio y desenlaces clínicos.

Finalmente, se espera que los resultados confirmen que la integración de la fRM en la planeación prequirúrgica incrementa significativamente el éxito de la resección y reduce la incidencia de secuelas motoras o del lenguaje. De manera particular, se pretende destacar la utilidad clínica de la fRM de reposo como una alternativa superior para pacientes con limitaciones cognitivas o bradipsiquia, proporcionando así una guía actualizada que fortalezca el criterio del tecnólogo en imágenes diagnósticas y del equipo multidisciplinario en la toma de decisiones clínicas.

***Palabras clave:*** Resonancia Magnética Funcional, Neoplasias Cerebrales, Mapeo Encefálico, Procedimientos Neuroquirúrgicos, Preservación Funcional.

## Abstract

This research focuses on the analysis of brain tumor surgery, a field where the balance between achieving the maximum extent of resection and preserving eloquent areas is crucial for patient prognosis. In this context, functional magnetic resonance imaging (fMRI), through its task and resting-state protocols, has become a cutting-edge tool for neurosurgical planning. However, given the variability in reported functional outcomes, there is a need to synthesize the recent scientific evidence. Therefore, the objective of this study is to analyze the impact of functional and resting magnetic resonance imaging (fMRI) on the preservation of critical functions and the optimization of surgical margins, based on a systematic review of the literature published between 2021 and 2026.

To achieve this objective, a systematic review methodology will be employed, conducting comprehensive searches in high-impact databases such as PubMed, Scopus, ScienceDirect, and the Cochrane Library using controlled descriptors and Boolean operators. The process will include rigorous inclusion criteria for studies that compare imaging findings with intraoperative mapping and clinical outcomes.

Finally, the results are expected to confirm that the integration of fMRI into preoperative planning significantly increases resection success and reduces the incidence of motor or speech sequelae. In particular, the aim is to highlight the clinical utility of resting fMRI as a superior alternative for patients with cognitive limitations or bradypsychia, thus providing an updated guide that strengthens the judgment of the diagnostic imaging technologist and the multidisciplinary team in clinical decision-making.

**Keywords:** Functional Magnetic Resonance Imaging, Brain Neoplasms, Brain Mapping, Neurosurgical Procedures, Functional Preservation.

## Tabla de Contenido

Introducción .....	17
Justificación.....	19
Objetivos .....	21
Objetivo General.....	21
Objetivos Específicos.....	21
Marco Conceptual y Teórico.....	22
Resonancia Magnética.....	24
Los Fundamentos del Espín Nuclear (Década de 1920) .....	25
La Medición de las Propiedades Magnéticas .....	27
La RMN en la Química: Desplazamiento Químico y Estructura Molecular.....	28
Transición de Frecuencias a Pixeles RMI (Lauterbur y Mansfield).....	29
Resonancia Magnética Funcional.....	31
Bases Biofísicas de la Resonancia Magnética Funcional .....	32
El efecto BOLD (Blood Oxygen Level-Dependent).....	32
Resonancia Magnética Funcional en Estado de Reposo (rs-fRM).....	34
Técnica y Secuencias de Adquisición en Resonancia Magnética Funcional .....	37
Medio de Contraste Endógeno.....	38
Medio de Contraste Exógenos .....	39
Paradigmas de la FRMI.....	41
La Tractografía Como Coadyuvante para la Resección Quirúrgica de Tumores Cerebrales.....	45
Sustancia blanca.....	46

Difusión.....	46
Isotropía .....	47
Fascículos de asociación .....	47
Fascículos de proyección .....	50
Aplicaciones Clínicas en Patología Tumoral .....	54
Arquitectura del neuroeje .....	55
Neuroeje.....	55
El Encéfalo.....	56
La Médula Espinal .....	57
El sistema nervioso periférico (SNP).....	58
Pares craneales .....	59
Corteza cerebral .....	60
Lóbulos cerebrales .....	61
Lóbulo frontal .....	61
Lóbulo parietal.....	62
Lóbulo temporal.....	62
Lóbulo occipital .....	62
Neuroanatomía Subcortical .....	65
Núcleos Basales .....	65
Sistema límbico.....	66
Clasificación de Tumores Cerebrales.....	72
Tumor Cerebral Tipo Glioma.....	73
Tipos de Tumores.....	74

Tumor Glioblastoma .....	74
Tumor Glioma de alto grado .....	75
Tumor Glioma de Bajo Grado .....	77
Tumor Astrocitoma .....	78
Tumor Oligodendroglioma.....	80
Tumor Glioma Difuso de Línea Media.....	82
Tumores Cerebrales Tipo Meningioma.....	84
Tumor Ganglioglioma .....	85
Tumor Schwannoma .....	86
Tumor Ependimoma .....	88
Tumor Hemangioblastoma.....	90
Tumor de la Región Pineal .....	92
Tumor Meduloblastoma.....	93
Tumor Adenoma Hipofisario.....	95
Tumor Craneofaringioma.....	96
Metástasis Cerebrales .....	98
Metodología .....	107
Diseño de la Investigación .....	107
Estrategia de Búsqueda y Fuentes de Información .....	107
Marco Legal .....	110
Consideraciones Éticas.....	113
Análisis sistemático.....	115
Base de datos .....	115

Resultados .....	115
Análisis e interpretación de Distribución geográfica global .....	116
Análisis e interpretación de diseño metodológico .....	117
Análisis e interpretación del total de pacientes .....	120
Análisis e interpretación de proporción de sexo en pacientes.....	122
Análisis e interpretación basada en la edad media.....	123
Análisis e interpretación de tumores cerebrales según la OMS.....	126
Análisis e interpretación de intensidad de Resonador utilizado.....	129
Análisis e interpretación de tipo de Software utilizado.....	133
Análisis e interpretación tb-fRM / rs-fRM.....	135
Análisis e Interpretación de Áreas Cerebrales Mapeadas .....	138
Análisis e Interpretación en Pacientes que Lograr Realizar Las Tareas tb-fRM.....	139
Análisis e Interpretación de Déficit Motor O de Lenguaje .....	141
Análisis e interpretación.....	144
Análisis e Interpretación de la Resección Total.....	146
Análisis e Interpretación Resultados de la Escala de Karnofsky .....	147
Discusión.....	149
Conclusiones .....	151
Recomendaciones .....	153
Referencias Bibliográficas.....	155

## Lista de Figuras

<b>Figura 1</b> <i>Línea de Tiempo Historia de la Radiología</i> .....	23
<b>Figura 2</b> <i>Línea de Tiempo Fundamentos del Espín Nuclear</i> .....	26
<b>Figura 3</b> <i>Línea de Tiempo de Historia de la Resonancia Magnética</i> .....	30
<b>Figura 4</b> <i>El efecto Bold</i> .....	33
<b>Figura 5</b> <i>Cuadro comparativo Resonancia Magnética Funcional &amp; Resonancia Magnética</i> .....	36
<b>Figura 6</b> <i>Mapa conceptual de Secuencias de Adquisición en Resonancia Magnética</i> .....	38
<b>Figura 7</b> <i>Cuadro Comparativo De Medios De Contrastes Endógenos Y Acoplamiento neurovascular</i> .....	40
<b>Figura 8</b> <i>Corte Sagital Del Encéfalo Y Representación Esquemática De Las Principales Vías De Asociación Y Proyección De La Sustancia Blanca Cortical</i> .....	46
<b>Figura 9</b> <i>Fascículo Arcuato</i> .....	48
<b>Figura 10</b> <i>Fascículo Longitudinal Superior</i> .....	48
<b>Figura 11</b> <i>Fascículo Longitudinal Inferior</i> .....	49
<b>Figura 12</b> <i>Fascículo Uncinado</i> .....	49
<b>Figura 13</b> <i>Cíngulo</i> .....	49
<b>Figura 14</b> <i>Cápsula Interna</i> .....	50
<b>Figura 15</b> <i>Corona Radiada</i> .....	50
<b>Figura 16</b> <i>Tracto Corticoespinal</i> .....	51
<b>Figura 17</b> <i>Radiaciones Ópticas</i> .....	51
<b>Figura 18</b> <i>Mapas De Color Del Tensor De Difusión Abreviaturas</i> .....	53
<b>Figura 19</b> <i>Tracografía de tumores cerebrales con técnica Anisotrópica</i> .....	54
<b>Figura 20</b> <i>Representación anatómica del sistema nervioso central (SNC)</i> .....	56

<b>Figura 21</b> <i>Vista neuroanatómica inferior del encéfalo y distribución topográfica de los doce pares craneales.</i> .....	59
<b>Figura 22</b> <i>Delimitación cortical basada en la organización celular, fundamental para la interpretación de los focos de activación BOLD en estudios funcionales prequirúrgicos.</i> .....	64
<b>Figura 23</b> <i>Corte axial de resonancia magnética cerebral que muestra los núcleos basales resaltados en color.</i> .....	65
<b>Figura 24</b> <i>Representación de los cuatro signos de Inflamación por Aulo Cornelio Celso.</i> .....	69
<b>Figura 25</b> <i>Gráfica y distribución de incidencias según localización y tipos de neoplasias cerebrales.</i> .....	71
<b>Figura 26</b> <i>Infografía de clasificación de grados de tumor cerebrales</i> .....	72
<b>Figura 27</b> <i>Epidemiología y clasificación de tumores cerebrales y gliomas.</i> .....	73
<b>Figura 28</b> <i>Imagen de resonancia magnética en corte axial que evidencia glioblastoma cerebral, ubicado en lóbulo frontal derecho</i> .....	74
<b>Figura 29</b> <i>Resonancia Magnética de Glioma de Alto Grado en los lóbulos temporal y frontal izquierdos</i> .....	76
<b>Figura 30</b> <i>Resonancia magnética glioma de bajo grado sin ningún realce.</i> .....	78
<b>Figura 31</b> <i>Representación de resonancia magnética de Astrocitoma en plano axial ubicado en lóbulo frontal izquierdo</i> .....	80
<b>Figura 32</b> <i>Resonancia Magnética oligodendroglioma en secuencias T1w-T2w ubicada en lóbulo frontal izquierdo.</i> .....	82
<b>Figura 33</b> <i>Resonancia magnética de un glioma difuso de línea media.</i> .....	83
<b>Figura 34</b> <i>Clasificación y prevalencia de los meningiomas según los grados de la Organización Mundial de la Salud (OMS)</i> .....	84

<b>Figura 35</b> <i>Imagen de resonancia magnética (RM) axial en secuencia FLAIR que muestra una lesión intraaxiales con importante edema vasogénico perilesional en el lóbulo temporal derecho</i>	86
<b>Figura 36</b> <i>Representación de Schwannoma vestibular</i>	88
<b>Figura 37</b> <i>Imagen de resonancia magnética RM de un Ependimoma en la médula espinal</i>	90
<b>Figura 38</b> <i>Representación de Hemangioblastoma, plano axial T2w que realza de forma intensa y homogénea cerca del surco sigmoideo derecho</i>	91
<b>Figura 39</b> <i>Representación de tumores pineales, resonancia magnética (RM) en la región pineal en el cerebro</i>	93
<b>Figura 40</b> <i>Representación de resonancia magnética (RM) de un meduloblastoma en el cerebelo</i>	94
<b>Figura 41</b> <i>Representación de Ressonancia Magnetica De Tumor Hipofisario</i>	96
<b>Figura 42</b> <i>Resonancia magnética cerebral en corte sagital T1 contrastado mostrando una lesión expansiva tumoral en la región selar y supraselar</i>	97
<b>Figura 43</b> <i>Distribución de metástasis cerebrales según el tumor primario de origen. Se observa una mayor prevalencia de metástasis provenientes de cáncer de pulmón, seguido por mama, melanoma y riñón</i>	98
<b>Figura 44</b> <i>Resonancia magnética cerebral en plano sagital, secuencia T1 ponderada con contraste</i>	100
<b>Figura 45</b> <i>Resonancia Magnética axial en secuencia T2-FLAIR</i>	100
<b>Figura 46</b> <i>Resonancia Magnética cerebral funcional Mediante secuencia de perfusión DCE</i>	101

<b>Figura 47</b> <i>Resonancia magnética cerebral en secuencia T1 axial en un caso de melanoma metastásico</i> .....	101
<b>Figura 48</b> <i>Planificación neuroquirúrgica multimodal mediante resonancia magnética funcional</i> .....	102
<b>Figura 49</b> <i>Localización Anatómica de áreas elocuentes motoras y caracterización del tejido peritumoral</i> .....	102
<b>Figura 50</b> <i>Mapeo neuroquirúrgico multimodal en un escenario de metástasis cerebrales múltiples diseminadas</i> .....	103
<b>Figura 51</b> <i>Resonancia magnética cerebral axial en secuencia T1 ponderada con medio de contraste</i> .....	104
<b>Figura 52</b> <i>Resonancia magnética cerebral sagital (T1 con contraste) de lesiones tumorales infratentoriales</i> .....	104
<b>Figura 53</b> <i>Áreas Elocuentes vs. No Elocuentes</i> .....	105
<b>Figura 54</b> <i>Lesión Resecable en Paciente con Buen Estado Funcional</i> .....	105
<b>Figura 55</b> <i>Lesión no Resecable en Pacientes con Enfermedad sistémica terminal</i> .....	106
<b>Figura 56</b> <i>Distribución geográfica global y frecuencia de publicaciones científicas sobre el uso de fRM y rs-fRM en la planificación preoperatoria de tumores cerebrales</i> .....	115
<b>Figura 57</b> <i>Distribución porcentual de la muestra documental según el diseño metodológico de los estudios seleccionados</i> .....	117
<b>Figura 58</b> <i>Distribución poblacional total y representatividad de los subgrupos según la modalidad de adquisición neuro funcional</i> .....	119
<b>Figura 59</b> <i>Distribución Demográfica por Sexo de la Población con Lesiones Tumorales Cerebrales Sometida a Mapeo Neuro Funcional</i> .....	121

<b>Figura 60</b> <i>Edad Media De Los Pacientes Oncológicos Incluidos En Los Protocolos De Fmri Por Autor</i> .....	122
<b>Figura 61</b> <i>Clasificación Biológica Y Estadística De La Muestra Tumoral Según Los Criterios Histológicos Internacionales De La OMS</i> .....	126
<b>Figura 62</b> <i>Análisis Comparativo De Los Sistemas De Adquisición De Imagen Molecular Por Fabricante Y Teslaje</i> .....	129
<b>Figura 63</b> <i>Herramientas De Software Computacional Mapeadas En La Literatura Para La Segmentación Neuro Funcional Preoperatoria</i> .....	133
<b>Figura 64</b> <i>Métodos De Análisis Ej. Análisis De Componentes Independientes - ICA, O Análisis De Semillas</i> .....	135
<b>Figura 65</b> <i>Datos de la localización de áreas elocuentes (motora o lenguaje) en relación con el tejido tumoral</i> .....	137
<b>Figura 66</b> <i>Porcentaje De Pacientes Que Completaron Exitosamente Los Paradigmas Funcionales Activos</i> .....	139
<b>Figura 67</b> <i>Estado Neurológico Temprano Postquirúrgico En Pacientes Sometidos A Mapeo Cortical Previo</i> .....	141
<b>Figura 68</b> <i>Monitoreo De Secuelas Motoras Y Del Lenguaje Permanentes Tras Craneotomías Guiadas Por Fmri</i> .....	143
<b>Figura 69</b> <i>Porcentaje De Resección Macroscópica Total (GTR) Alcanzado Bajo Guía Neuro Funcional</i> .....	145
<b>Figura 70</b> <i>Análisis Comparativo del Umbral Funcional Preoperatorio y el Estatus de Autonomía Postquirúrgica Indexado Mediante La Escala De Karnofsky (KPS)</i> .....	147

**Lista de Tablas**

<b>Tabla 1</b> <i>Tareas cognitivas de lenguaje, memoria y atención en las áreas cerebrales</i> .....	42
<b>Tabla 2</b> <i>Principales Fascículos de asociación como ejes críticos de la conectividad funcional en el hemisferio dominante.</i> .....	48
<b>Tabla 3</b> <i>Organización de las fibras de proyección en el encéfalo humano</i> .....	50
<b>Tabla 4</b> <i>Componentes principales del sistema nervioso periférico SNP</i> .....	58
<b>Tabla 5</b> <i>Principales Surcos y Cisuras del Encéfalo</i> .....	60
<b>Tabla 6</b> <i>Areas de Brodman y sus funciones</i> .....	63
<b>Tabla 7</b> <i>Clasificación de metástasis Cerebrales</i> .....	100
<b>Tabla 8</b> <i>Marco legal</i> .....	111

## Introducción

La neurocirugía oncológica contemporánea se fundamenta en un equilibrio crítico denominado el "riesgo funcional máximo", el cual busca alcanzar la mayor extensión de la resección tumoral (EOR) sin comprometer la integridad de las áreas elocuentes del parénquima cerebral. En este contexto, la localización de estructuras corticales y subcorticales responsables de funciones motoras, sensoriales y del lenguaje constituye el mayor desafío para el equipo quirúrgico, dado que la anatomía convencional resulta insuficiente como guía única. La presencia de neoplasias, especialmente los gliomas de alto grado, induce fenómenos de plasticidad neuronal y reorganización funcional, además de producir distorsiones mecánicas significativas o "efecto de masa" que desplazan los puntos de referencia anatómicos tradicionales (Duffau, 2014). Ante esta variabilidad interindividual, la Resonancia Magnética Funcional (fMRI) ha emergido como un pilar fundamental de la neuroimagen avanzada, permitiendo el mapeo no invasivo de la actividad cerebral mediante el análisis de la señal BOLD (*Blood Oxygen Level Dependent*).

La fundamentación fisiológica de la fMRI reside en el acoplamiento neurovascular, donde el incremento de la actividad neuronal demanda un aumento local del flujo sanguíneo, alterando la relación entre la oxihemoglobina y la desoxihemoglobina. Esta última, al poseer propiedades paramagnéticas, actúa como un medio de contraste endógeno que permite identificar con alta resolución espacial las áreas de activación cortical (Logothetis et al., 2001). No obstante, la aplicación de la fMRI basada en tareas presenta limitaciones críticas; por un lado, la precisión del mapa funcional puede verse comprometida por el fenómeno de la angiogénesis tumoral, el cual altera la reactividad vascular local y genera falsos negativos en la señal BOLD cerca del núcleo de la lesión. Por otro lado, existe una brecha de viabilidad en poblaciones de difícil

manejo, como pacientes con déficits cognitivos, trastornos del espectro autista o pacientes pediátricos, quienes carecen de la capacidad cooperativa necesaria para seguir protocolos de activación específicos durante el escaneo.

Como respuesta a estas limitaciones, la neurociencia aplicada ha propuesto la transición hacia la Resonancia Magnética Funcional en Estado de Reposo (rs-fMRI). Esta técnica se diferencia de los paradigmas tradicionales al analizar las fluctuaciones espontáneas de baja frecuencia en la señal BOLD, permitiendo identificar redes de conectividad funcional intrínseca sin requerir la participación del sujeto (Biswal et al., 1995). La rs-fMRI ofrece una ventaja competitiva al proporcionar un mapa detallado de la arquitectura funcional incluso bajo sedación, lo que, sumado a la Tractografía por Tensores de Difusión (DTI) para el mapeo de la sustancia blanca, constituye un arsenal diagnóstico de alta precisión. Sin embargo, a pesar de estos avances, persiste la incertidumbre sobre la fiabilidad absoluta de estas técnicas no invasivas frente al estándar de oro de la estimulación eléctrica cortical intraoperatoria (técnica considerada el "estándar de oro" que consiste en la aplicación de corrientes eléctricas directas sobre la corteza cerebral para identificar áreas elocuentes —lenguaje y motricidad— y guiar la resección tumoral minimizando secuelas neurológicas). La falta de protocolos estandarizados para la interpretación de la conectividad funcional en cerebros con patologías oncológicas genera una brecha de incertidumbre que limita el aprovechamiento de la tecnología en favor de la seguridad del paciente, lo que conduce a la siguiente interrogante:

¿De qué manera la integración sistemática de protocolos avanzados de Resonancia Magnética Funcional (fMRI) y su variante en estado de reposo (rs-fMRI) optimiza la precisión neuroquirúrgica en la resección de tumores cerebrales y garantiza un impacto positivo en la preservación de las funciones elocuentes y la estabilidad clínica del paciente?

## Justificación

La presente revisión sistemática se fundamenta en la necesidad crítica de optimizar los protocolos de abordaje neuroquirúrgico para maximizar la Extensión de la Resección (EOR) sin comprometer la integridad funcional. Como lo señala Duffau (2014), el paradigma moderno de la neurocirugía ha pasado de una visión puramente anatómica a una funcional, donde la meta es el "riesgo funcional máximo": extraer la mayor cantidad de tejido tumoral posible mientras se preserva la calidad de vida. La importancia de este estudio radica en que el éxito de una intervención ya no se mide solo por la supervivencia, sino por la ausencia de secuelas incapacitantes, como la hemiplejía o las afasias, las cuales impactan drásticamente en la autonomía del paciente.

Desde una perspectiva técnica, el uso del efecto BOLD como medio de contraste endógeno ha revolucionado la planificación prequirúrgica. Sin embargo, autores como Glover (2011) y Logothetis (2001) han advertido sobre las limitaciones de esta señal en la periferia tumoral, donde la angiogénesis puede alterar el acoplamiento neurovascular. Esta investigación se justifica al analizar cómo la integración de la fMRI y la rs-fMRI permite superar dichas barreras, proporcionando una solución para pacientes con déficits cognitivos o pediátricos que no pueden cooperar con las tareas tradicionales (Biswal, 2012). sistematizar esta información es vital para que el clínico disponga de herramientas que reduzcan la incertidumbre y eviten falsos negativos en el mapeo de áreas críticas como Broca y Wernicke.

Finalmente, esta monografía responde a una exigencia ética y administrativa en la seguridad de los servicios de salud de alta complejidad. La ocurrencia de un déficit neurológico postquirúrgico evitable se clasifica como un evento adverso de alto impacto que no solo afecta la dignidad del paciente, sino que incrementa exponencialmente los costos hospitalarios y la carga

en los sistemas de rehabilitación. Al alinear la práctica quirúrgica con la evidencia científica del último quinquenio, este trabajo contribuye a la consolidación de un modelo de medicina de precisión, donde la neuroimagen funcional actúa como una barrera de seguridad indispensable para mitigar riesgos y elevar los estándares de calidad institucional.

## Objetivos

### Objetivo General

Evaluar la eficacia de la Resonancia Magnética Funcional (fMRI) y en estado de reposo (rs-fMRI) como herramientas determinantes en la planificación quirúrgica para la preservación de la integridad funcional y la optimización de la extensión de la resección en pacientes con tumores cerebrales, mediante una revisión sistemática de la literatura científica publicada en el último quinquenio.

### Objetivos Específicos

Identificar los paradigmas de activación motora y de lenguaje más robustos en fMRI de tarea reportados en la literatura reciente, analizando su sensibilidad y especificidad en la delimitación de áreas elocuentes frente al estándar de oro de la estimulación eléctrica cortical.

Analizar la aplicabilidad clínica de la Resonancia Magnética Funcional en estado de reposo (rs-fMRI) en pacientes con limitaciones cognitivas o falta de cooperación, determinando su capacidad para proporcionar mapas de conectividad funcional fiables en ausencia de tareas activas.

Contrastar los resultados quirúrgicos (morbilidad postoperatoria y calidad de vida) entre pacientes intervenidos bajo protocolos de neuroimagen funcional avanzada versus aquellos abordados únicamente mediante guías anatómicas convencionales.

Sintetizar las recomendaciones técnicas vigentes sobre el uso del efecto BOLD como medio de contraste endógeno y la integración de la tractografía por tensores de difusión, con el fin de proponer criterios de seguridad que minimicen los eventos adversos neurológicos en el entorno quirúrgico.

### **Marco Conceptual y Teórico**

El 8 de noviembre de 1895, Wilhelm Conrad Roentgen descubrió los rayos X en su laboratorio del Instituto de Física de la Universidad de Wurzburg, Alemania, mientras estudiaba los rayos catódicos en tubos de vacío, observó que una pantalla de platino-cianuro de bario emitía una débil fluorescencia, logrando identificar que estos rayos invisibles atravesaban materiales como madera, cartón y que al colocar su mano entre el tubo y la pantalla se podían visualizar sus propios huesos proyectados generando así el inicio de una nueva era en la medicina contemporánea, también logra determinar que los rayos x se propagan en línea recta y que poseen la capacidad de ionizar y producir radiaciones secundarias.

A finales del siglo XIX, la física experimental se encontraba en un umbral de descubrimientos que redefinirían la comprensión de la materia y la energía. En este contexto, el hallazgo de Wilhelm Conrad Röntgen no fue una simple casualidad de laboratorio, sino el catalizador estratégico que permitió a la medicina trascender la superficie cutánea para observar el interior del cuerpo humano sin recurrir al bisturí. Este descubrimiento forjó un vínculo indisoluble entre la física y la medicina, transformando el diagnóstico clínico de una práctica basada en la inferencia y la observación externa en una disciplina fundamentada en la evidencia visual interna. (Radiología e Imagen José Luis R. (2019))

Figura 1

## Línea de Tiempo Historia de la Radiología



*Nota.* Línea de tiempo que sintetiza la transición metodológica de las imágenes diagnósticas desde su origen analógico hasta la era molecular. Se estructuran seis periodos críticos: el descubrimiento accidental de los rayos X por Wilhelm Röntgen 1895 y la primera radiografía médica 1896; la introducción de la fluoroscopia en tiempo real 1910 y la revolución digital de la Tomografía Axial Computarizada 1970; concluyendo con la llegada no invasiva de la Resonancia Magnética 1980 y el surgimiento de las plataformas de imagen molecular y funcional en el siglo XXI 2000.

## Resonancia Magnética

La Resonancia Magnética se define como un fenómeno físico y una técnica de diagnóstico por imagen basada en los procesos físicos teniendo como base que, el átomo se encuentra conformado por protones, neutrones y electrones, resaltando que el núcleo de este, se estructura de protones y neutrones, mientras que los electrones forman un campo que protege al núcleo a través de órbitas externas que interactúan para la generación de momentos magnéticos fundamentales en los procesos físicos de la generación de la imagen en la resonancia magnética.

El proceso de esta adquisición ocurre, cuando los núcleos con un número impar de partículas (protones y electrones) son sometidos a un potente campo magnético externo, lo que permite que estos absorban energía de forma selectiva al ser estimulados con ondas de radiofrecuencia.

En el ámbito médico, la técnica consiste en introducir al paciente en un campo magnético generado por un gran imán para lograr la "resonancia" de los núcleos de sus átomos (principalmente el hidrógeno, debido a su abundancia en el cuerpo humano). Una vez cesa el estímulo, los núcleos liberan la energía excedente en forma de señal mientras regresan a su estado de equilibrio. Esta energía es captada por antenas y procesada mediante algoritmos matemáticos (como la transformada de Fourier) para convertirla en imágenes tomográficas de gran precisión y contraste tisular, con la ventaja fundamental de que no utiliza radiaciones ionizantes. Nota. Costa Subias, J., & Soria Jerez, J. A. (2015). *Resonancia magnética dirigida a técnicos superiores en imagen para el diagnóstico*. Elsevier España.

La Resonancia Magnética Nuclear (RMN) contribuye en el fenómeno de la física de partículas; sirviendo como una herramienta analítica y excepcional que ha redefinido los límites de la química, medicina contemporánea y uso adecuado de diagnósticos patológicos. La técnica

de RMN permite la evolución de conocimiento teórico y experimentales durante el estudio de la interacción fundamental entre la materia y la energía. En el campo de la imagenología, poder interpretar los avances se ha vuelto vital al momento de hablar de equipos actualizados de Resonancia Magnética (RMI) obteniendo como resultado imágenes anatómicas y de tejidos blandos de manera no invasiva. Para comprender la potencia del diagnóstico por imagen moderno, es relevante retroceder a los fundamentos cuánticos establecidos a principios del siglo XX, donde se gestó la manipulación del núcleo atómico.

### **Los Fundamentos del Espín Nuclear (Década de 1920)**

A mediados del año 1920, la física se encontraba en un estado de crisis teórico. Donde Bohr y Sommerfield atravesaban dificultades al momento de explicar el efecto Zeeman anómalo, donde también el átomo de hidrógeno generaba líneas espectrales múltiples en presencia de campos magnéticos intensos. Este tipo de dificultades permitió a la ciencia generar nuevas técnicas y parámetros cuánticos para poder describir la realidad subatómica.

El efecto Zeeman anómalo, es un fenómeno que nació en el siglo XIX por el físico holandés Pieter Zeeman y hace referencia a la división de las líneas espectrales de un átomo cuando están en interacción de un campo magnético. Estos efectos permiten a los científicos estudiar características magnéticas y estructurales de la fina línea espectrales y las características magnéticas de diversos materiales. El efecto Zeeman permite generar una ventana a la mecánica cuántica de los átomos, mientras interactúa con los campos magnéticos. Esto se logra a través de la observación entre las líneas espectrales, permitiendo a los científicos recolectar información invaluable sobre las propiedades magnéticas de la materia. La ecuación del efecto Zeeman puede parecer simple, sin embargo, las implicaciones y aplicaciones de la técnica suelen ser bastante profundas y detalladas en diferentes aspectos de la ciencia y la ingeniería. *Nota.* efecto Zeeman |

Ecuación y Aplicación, Matan (2024) <https://www.electricity-magnetism.org/es/efecto-zeeman-ecuacion-y-aplicacion/>

**Figura 2**

*Línea de Tiempo Fundamentos del Espín Nuclear*



*Nota.* Diagrama secuencial de la historia científica en la física cuántica del espín nuclear entre 1922 y 1945. El esquema asocia las ecuaciones teóricas de multiplicidad espectroscópica con los experimentos de validación en hidrógeno, evidenciando cómo la resolución de inconsistencias atómicas abrió el camino para el control macroscópico de la magnetización longitudinal y transversal que realiza el Tecnólogo en Imágenes Diagnósticas en la consola del resonador.

## **La Medición de las Propiedades Magnéticas**

En el año 1930, el científico Isidor Isaac Rabi, demostró la medición precisa hacia los estados de rotación en sólidos cristalinos. Rabi fue pionero en el campo al momento de implementar el método del "haz molecular" para definir el momento magnético de los núcleos. Su contribución inicia con un electroimán de 0.2 Tesla y un oscilador de radiofrecuencia de 3.5 MHz. Técnica que mantenía una radiofrecuencia constante mientras el campo magnético generaba variaciones en busca del pico de la resonancia. El científico recibe premio Nobel de Física en 1944 por establecer los principios que permitieron el traslado de la resonancia a los haces moleculares aislados hasta materias de estados sólidos y líquidos.

La frecuencia de resonancia depende intrínsecamente del campo magnético, aplicando la Ley de Larmor esta teoría explica que cuando una partícula se carga con un momento magnético se ubica en un campo magnético uniforme y a su vez experimenta un movimiento de precesión en la misma dirección sin cambiar la magnitud.

## **La RMN en la Química: Desplazamiento Químico y Estructura Molecular**

En 1951, Arnold, Dharmatti y Packard hicieron un experimento con etanol el cual dio un giro en la historia de la química. Ya que permitió analizar la molécula en tres señales distintas cuya intensidad era proporcional al número de protones en cada entorno. Uno de los hallazgos fue el aumento de la intensidad del campo magnético y el rodamiento del tubo contenedor de la muestra donde la RMN dejó de ser una herramienta de la física nuclear para llamarse el método definitivo de la arquitectura molecular.

En el año 1960, adquirir datos era un proceso más lento y poco sensible. Richard Ernst evolucionó con la técnica de proponer un reemplazo del barrido lento por pulsos cortos de alta intensidad iniciando por el FID (Free Induction Decay) que es el pulso que se encarga de atraer todos los núcleos a la vez, dando registro del decaimiento de la señal en el tiempo, Transformada de Fourier, hace referencia al algoritmo que permite convertir el FID en un espectro de frecuencias más legible y por último 2D-RMN. El científico Ernst desarrolló la espectroscopia bidimensional, logrando resolver la superposición de señales mediante correlaciones químicas. Es relevante hablar del progreso de Ernst, el cual estuvo ligado a la evolución de la computación y tecnología; algunos cálculos matemáticos para el procesamiento Fourier representaban un reto que la tecnología informática de la época tardó casi una década en facilitar de forma rutinaria. Finalmente, Ernst gana el Premio Nobel de Química en 1991.

### **Transición de Frecuencias a Píxeles RMI (Lauterbur y Mansfield)**

La RMN surge una transición de la espectroscopia al diagnóstico y macroscópico para lograr la capacidad de localizar señales en el espacio mediante gradientes magnéticos; El científico Paul Lauterbur en 1973 Introdujo la Zeugmatografía con un equipo de 60 MHz con un gradiente de 700 G/cm, demostrando variaciones en el contenido de agua y los tiempos de relajación longitudinal T1 en los tejidos biológicos permitirían generar imágenes anatómicas.

Posterior, Peter Mansfield 1973 Realizó experimentos en sólidos utilizando alcanfor a temperatura ambiente y a su vez desarrollando la técnica de imagen eco-planar, que permitió capturas en alta velocidad donde creo la primera imagen en vivo de un dedo humano con detalle en tejidos blandos.

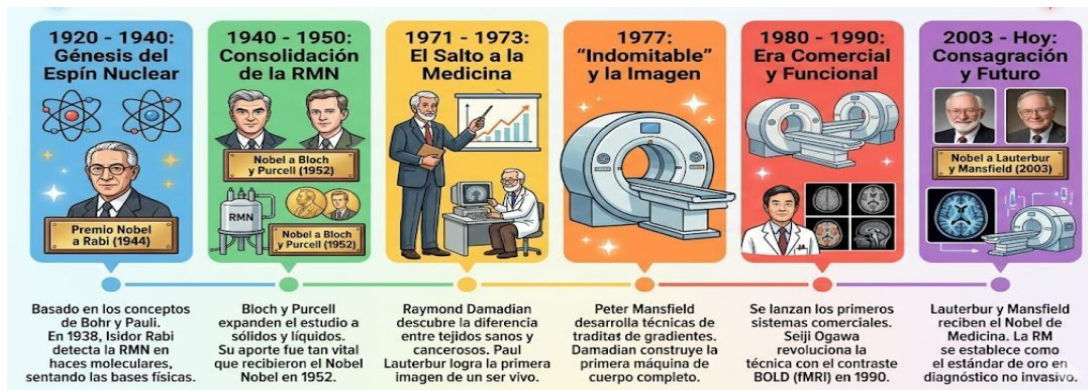
Richard Ernst realizo contribuciones con referencia a la aplicación de gradientes durante FID generando reconstrucciones en 2D y 3D sirviendo como una herramienta clínica para el mejoramiento continuo de diagnóstico de diferentes patologías, posterior recibe el Premio Nobel de Medicina en 2003.

Resonancia magnética nuclear: desde el descubrimiento hasta la aplicación en imagenología Noemí Waksman Minsky y Alma Saucedo Yáñez

(2019) [file:///C:/Users/57304/Desktop/Proyecto%20aplicado\\_Ospina\\_Bustamante\\_Oquendo.pdf](file:///C:/Users/57304/Desktop/Proyecto%20aplicado_Ospina_Bustamante_Oquendo.pdf)

Figura 3

## Línea de Tiempo de Historia de la Resonancia Magnética



*Nota.* Costa Subias, J., & Soria Jerez, J. A. (2015). Resonancia magnética dirigida a técnicos superiores en imagen para el diagnóstico. Elsevier España

## Resonancia Magnética Funcional

La resonancia Magnética Funcional, nace en el año 1990 gracias Seiji Ogawa (físicos japones) quien descubrió que el contraste de la imagen por resonancia magnética surge cambios dependiendo de los niveles de oxigenación de la sangre, la resonancia magnética funcional (fMRI) se ha convertido en una técnica fundamental de la neurociencia moderna, siendo una herramienta estratégica y a su vez indispensable para el diagnóstico no invasivo y comprensión de la arquitectura cerebral humana. Su función consiste en la capacidad de mapear dinámicamente los circuitos neurales con una resolución espacial sin precedentes, convirtiendo la práctica radiológica de una actividad anatómica a una funcional. Todo esto se debe gracias al contraste BOLD (Blood Oxygenation Level-Dependent), el cual interactúa con las propiedades paramagnéticas de la desoxihemoglobina para observar la actividad cerebral de forma indirecta a través del acoplamiento neurovascular. Este fenómeno físico permite observar la hemodinámica cerebral sin el uso de trazadores exógenos, vinculando la fisiología vascular con los procesos cognitivos. La evolución metodológica en este campo ha transitado desde la identificación de respuestas sensoriales básicas hasta el desarrollo de algoritmos de procesamiento de señal que permiten una purificación exhaustiva de la misma, garantizando la fidelidad de los datos frente al ruido. fisiológico. *Nota.* Sung, Y. W., Choi, U. S., Tanabe, M., & Ogawa, S. (2025). Enhancing functional connectivity analysis in task-based fMRI using the BOLD-filter method: Greater network and activation voxel sensitivities. *NeuroImage*,

## **Bases Biofísicas de la Resonancia Magnética Funcional**

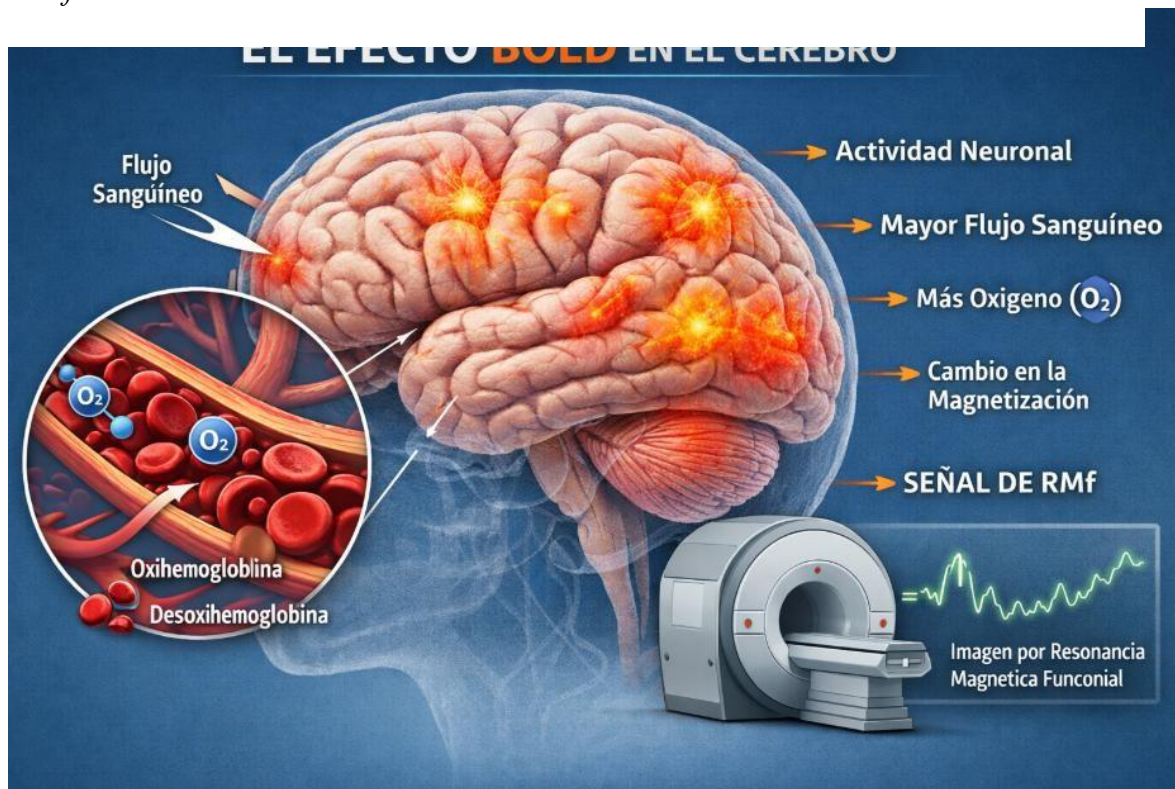
### ***El efecto BOLD (Blood Oxygen Level-Dependent)***

Es una técnica ideal para medir los cambios hemodinámicos del flujo y oxigenación de la sangre, y cuenta con unas propiedades paramagnéticas de la desoxihemoglobina permitiendo evaluar cambios hemodinámicos, durante la activación neuronal, el aumento de flujo sanguíneo supera un consumo de oxígeno incrementado la señal BOLD en secuencias sensibles a T2. El efecto BOLD-MRI hace referencia a aplicaciones extra cerebrales siendo complementario para analizar otros órganos como el riñón, musculo, miocardio, hígado y tejidos tumorales.

El efecto bold suele tener cambios cuando la región cerebral se activa, aumentando el flujo sanguíneo local más de lo que crece el consumo de oxígeno, lo que genera una disminución de la señal T2\* y aumenta la señal BOLD. Este principio se extrapola a otros órganos y permite medir cambios de oxigenación en tejidos renales, musculares o tumorales. Feldman et al. (2009).

Figura 4

*El efecto Bold*



*Nota.* Representación gráfica del acoplamiento neurovascular y su detección mediante fRM, mostrando la transición desde el aumento de la actividad neuronal y la hiperemia local hasta la detección de los cambios de magnetización tisular en el resonador magnético.

### **Resonancia Magnética Funcional en Estado de Reposo (rs-fRM)**

En el año 1995 el físico Bharat Biswal descubrió el paradigma de la neuroimagen el cual dio un giro a la neurociencia moderna, porque se pensaba que el cerebro solo mostraba actividad organizada cuando el sujeto realizaba una tarea específica. Cuando Biswal realizaba un doctorado en Medical College descubrió que una persona totalmente quieta y sin pensar en nada logra visualizar fluctuaciones de las regiones del cerebro con baja frecuencia de sincronización, Biswal realizó estudios con pacientes voluntarios para que no realizaran ninguna tarea motora, y descubrió que la corteza motora izquierda y derecha generaban patrones de señal casi idénticos en tiempo demostrando una conectividad funcional intrínseca y convirtiéndose en una técnica ideal para la visualización de áreas motoras y del lenguaje en pacientes con déficit y que debido a su tumor o sedación no pueden colaborar realizando tareas activas durante el procedimiento, algunos de los avances que ha tenido esta técnica es su aplicación clínica y desarrollo de algoritmos para disminuir el ruido de la señal, como los latidos del corazón y la respiración, esta ha obtenido una perfección en la década de los 2000 sirviendo como herramienta complementaria y potente para la neurocirugía segura.

La resonancia magnética funcional, en un estado de reposo, es un procedimiento dirigido en pacientes con condiciones de déficit de atención, en especial en menores con problemas cognitivos, y que por medio de este método se espera obtener una conectividad funcional de las regiones cerebrales en pacientes con trastornos de hiperactividad (TDAH) determinando que la función cerebral en pacientes con este tipo de condiciones es menor a comparación de estudios en pacientes sanos.

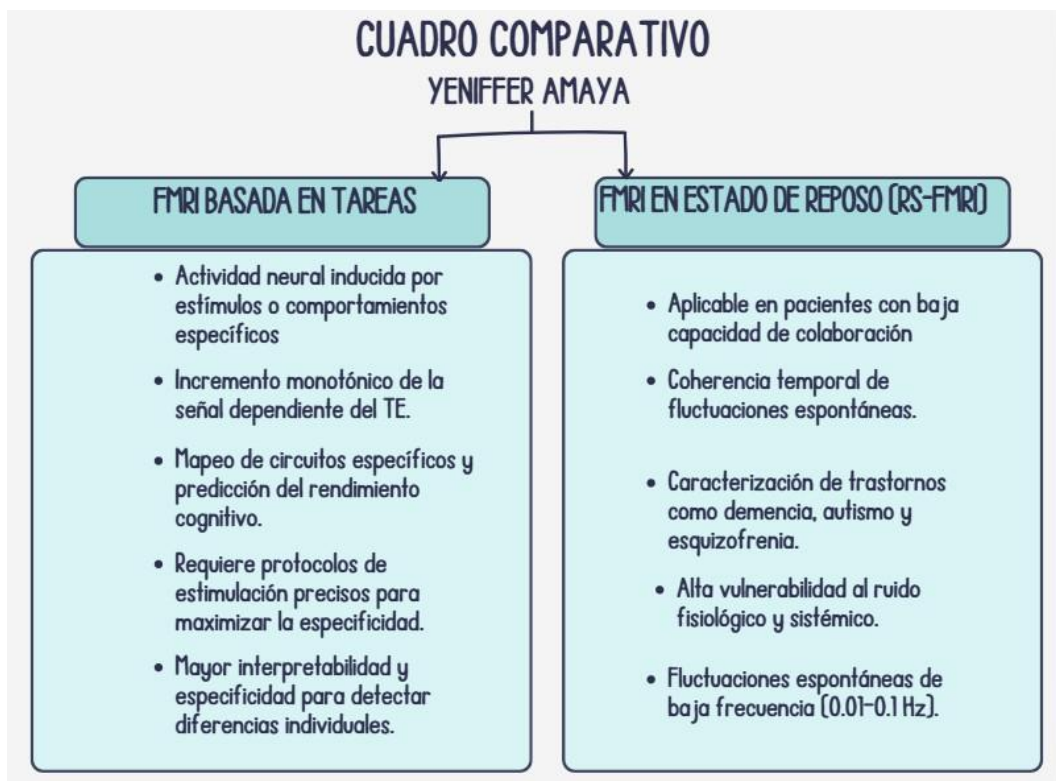
La resonancia magnética funcional en un estado de reposo rs-fRM también ha sido de gran impacto en el ámbito quirúrgico, ideal para la planeación quirúrgica de tumores cerebrales,

este proceso quiere llegar a ser una herramienta útil para proporcionar información de estados fisiológicos cerebrales y de áreas elocuentes (somatosensoriales, lenguaje y visuales) posterior a esto va en busca de una adecuada resección quirúrgica, en pacientes con características cognitivas diferentes, que no pueden captar paradigmas relacionados con tareas verbales y motoras. Se identifica técnica en resonancia magnética funcional en un estado de reposo (rs-fRM) protocolo indicado para pacientes con tumores cerebrales (como gliomas y metástasis) ubicados en áreas funcionales críticas del cerebro, se adquieren secuencias en un equipo de resonancia magnética de 3TESLAS indicándole al paciente los siguientes pasos:

1. Se prepara al paciente con ojos cerrados sin dormir, sin pensar en nada en particular durante la adquisición.
2. Secuencias aplicadas utilizan la secuencia eco planar (EPI) suele ser sensible al contraste BOLD.
3. Con un tiempo de repetición particularmente entre 2000 y 3000 ms con una duración aproximadas entre 5 y 10 min de escaneo.
4. Anatomía del paciente se adquieren secuencias potenciadas en T1 con resolución (MPRAGE) en busca de un co-registros de mapas funcionales de la anatomía del paciente.

Figura 5

Cuadro comparativo Resonancia Magnética Funcional & Resonancia Magnética



*Nota.* Elaboración propia Amaya. (2026) basada Sung, Y. W., Choi, U. S., Tanabe, M., & Ogawa, S. (2025). Enhancing functional connectivity analysis in task-based fMRI using the BOLD-filter method: Greater network and activation voxel sensitivities. *NeuroImage*,

### **Técnica y Secuencias de Adquisición en Resonancia Magnética Funcional**

La neurocirugía de precisión va en busca de la identificación de las áreas funcionales de la corteza motora primaria que no solo se base es un ejercicio cartográfico, sino un requisito crítico para la seguridad del paciente. Logrando localizar con exactitud milimétrica los vóxeles responsables de la función motora de la mano para la práctica segura de craneotomías optimizadas y trayectorias quirúrgicas que maximicen la resección tumoral. Poder delimitar ciertas zonas del cerebro se vuelve en un proceso vital que ayudara a mitigar el riesgo de déficits posoperatorios permanentes, como por ejemplo la hemiparesia y en especial cuando la patología altera la arquitectura cortical convencional.

Un estudio de Hou et al. (2016) genera la necesidad mediante una comparación cuantitativa de tres modalidades diagnósticas: RM funcional de tarea, RM funcional en estado de reposo (rs-fRM) y RM estructural de alta resolución (T1) la cual tiene como propósito central validar la concordancia con las herramientas y evaluar si la rs-fRM, servirá como una alternativa menos exigente para el paciente al momento de captar diferentes actividades. *Nota.* Hou, B. L., Bhatia, S., & Carpenter, J. S. (2016). Quantitative comparisons on hand motor functional Áreas determined by resting state and task BOLD fMRI and anatomical MRI for pre-surgical planning of patients with brain tumors

Figura 6

Mapa conceptual de Secuencias de Adquisición en Resonancia Magnética



Nota. Elaboración propia Amaya, I. (2026) basada en Shah, H. A., Duehr, J., Abramyan, A., Mittelman, L (2025). <https://doi.org/10.1016/j.clineuro.2025.108760>

### Medio De Contraste Endógeno

Hace referencia a sustancia natural que se encuentra en el cuerpo y que contribuye a la generación de imágenes, sin la necesidad de inyectar medios de contraste externos en el caso de la Resonancia Magnética Funcional y el efecto BOLD tenemos por sustancia endógena la Hemoglobina que interactúa a través de cambios de oxigenación, por otro lado tenemos que cuando la desoxihemoglobina no transporta oxígeno posee propiedades paramagnéticas actuando como un contraste para lograr identificar lesiones, la desoxihemoglobina actúa como un contraste natural paramagnético generando variaciones especialmente en secuencias ponderadas en T2, permitiendo al resonador detectar cambios sintéticos.

Algunas de sus ventajas clínicas es la cuantificación de oxigenación de los tejidos y mapeo de actividades neuronales de manera no invasiva Soveaux (2012). En el caso de pacientes con cáncer el uso de esta aplicación de contraste natural permite el monitoreo en tiempo real de la oxigenación tumoral durante tratamientos farmacológicos.

### **Medio De Contraste Exógenos**

El medio de contraste exógeno hace referencia a sustancias que son administradas al paciente por vía externa, vía oral, via intravenosa, rectal o intratecal, permitiendo la visualización de las estructuras internas y exactitud en el diagnóstico y a su vez resaltar tejidos normales y anormales estas sustancias son ideales para estudios de tomografía computarizada, Resonancia Magnetica o radiología intervencionista. La principal finalidad de un medio de contraste es mejorar la visibilidad de los órganos o estructuras internas en las imágenes radiológicas. Sus usos más comunes están:

- Resaltar los vasos sanguíneos en estudios como angiografías o tomografías con contraste.
- Visualizar el sistema digestivo, como el esófago, estómago e intestinos, para detectar obstrucciones, úlceras o tumores.
- Observar el funcionamiento del sistema urinario, incluyendo riñones, uréteres y vejiga.
- Distinguir tumores o lesiones en órganos como el hígado, cerebro o pulmones.
- Evaluar la circulación sanguínea o el paso de un líquido a través de un conducto, como en las vías biliares o el intestino.

## Figura 7

### Cuadro Comparativo De Medios De Contrastes Endógenos Y Acoplamiento neurovascular



*Nota.* Elaboración propia Amaya (2026) basada en Herring, W. (2015). Radiología básica. Aspectos fundamentales (3.<sup>a</sup> ed.). Elsevier.

Hace relación a la actividad neuronal y el flujo sanguíneo cerebral, cuando una parte del cerebro trabaja o realiza diferentes tareas, las neuronas consumen energía y oxígeno lo cual reacciona como una señal inmediata para los vasos sanguíneos generando en el efecto BOLD un acoplamiento neurovascular de activación al cumplir ciertas funciones, posterior a este se recibe una respuesta hemodinámica, del flujo sanguíneo regional y a su vez generando cambios magnéticos por adquirir tanta sangre lo cual disminuye la concentración de desoxihemoglobina la cual es paramagnética.

## **Paradigmas de la fRM**

Los paradigmas en Resonancia Magnética Funcional (fRM) son las técnicas o modelos de estimulación que permiten provocar cambios en la oxigenación cerebral para así poder mapear áreas funcionales específicas del cerebro, convirtiéndose en una estrategia para la planificación quirúrgica de tumores cerebrales, la elección del paradigma es un poco compleja, ya que es la encargada de determinar la precisión con la que se localizarán las áreas elocuentes motoras, de lenguaje o sensoriales respecto a la lesión. La resonancia magnética funcional incorpora en los avances de las neurociencias y contribución del funcionamiento cerebral ya que gracias a la activación y localización de los otros factores de las funciones cerebrales en espacios determinadas del cerebro, se pueden definir procesos cognitivos permitiendo entender el funcionamiento cerebral en sujetos sanos comparándolo con otras técnicas que solo se realizan cuando se presentan las lesiones críticas, en especial cuando se requiere más que técnicas de neuroimagen.

Se entiende que una actividad cognitiva requiere de varias áreas cerebrales, para trabajar armónicamente, ya que es un sistema funcional. Sin embargo, para la comprensión de algunas áreas y redes neuronales es necesario complementar con estudios e imágenes de tensor de difusión. La realización de estudios de resonancia funcional con ordenes o ayuda de paradigmas permite evitar contaminación o artefactos que le resten validez al procedimiento, adicional se pueden realizar ajustes de paradigmas para aquellos pacientes que padecen limitaciones como por ejemplo el nivel educativo o déficit neurológicos, a parte de una buena técnica se debe garantizar el control del paciente durante el estudio para mitigar variables extrañas y aportar en la interpretación del diagnóstico o seguimiento quirúrgico.

**Tabla 1***Tareas cognitivas de lenguaje, memoria y atención en las áreas cerebrales*

Función / Paradigma	Tarea del Paciente	Principal Área de Activación	Utilidad en Planificación Quirúrgica
Denominación (Estímulo Auditivo/Visual)	Leer una frase (ej: "¿con qué escribe?") y elegir la respuesta silenciosamente.	Corteza frontal inferior, temporal superior y área de Heschl bilateral.	Identificar áreas de recepción y procesamiento del lenguaje escrito y auditivo.
Lectura de Texto	Leer y entender silenciosamente una narración corta de 10 segundos.	Giro temporal superior posterior (hemisferio dominante) y giro angular (Wernicke).	Proteger la comprensión lectora en tumores temporo-parietales dominantes.
Rimas	Responder si un par de palabras riman o no entre sí.	Corteza prefrontal dorsolateral, giro frontal inferior y área visual de las palabras (giro fusiforme).	Evaluar el procesamiento fonológico y la integración visual-auditiva del lenguaje.
Producción de Palabras (Silencio)	Pensar en todas las palabras posibles que inicien con una letra específica.	Corteza prefrontal dorsolateral, giro frontal inferior y áreas motoras suplementarias.	Mapeo de la fluidez verbal y áreas motoras del lenguaje ante tumores frontales.
Denominación de Objetos Simples	Denominar silenciosamente imágenes de objetos de uso cotidiano.	Giro frontal inferior (opérculo), corteza premotora y área motora suplementaria.	Localizar áreas de salida del lenguaje (producción) y reconocimiento visual.
Escucha Pasiva	Escuchar atentamente una narración corta leída por el examinador.	Surco temporal superior (área de Wernicke) y giro temporal medio.	Mapear la corteza auditiva y de comprensión en pacientes con baja colaboración.

Comprensión con Estímulo Visual	Responder si una pregunta está relacionada con una frase presentada previamente.	Giro frontal medio (memoria de trabajo), área de Broca y Wernicke, e hipocampo.	Evaluación integral de la red de lenguaje, memoria de trabajo y comprensión.
Escucha de Palabras	Escuchar palabras y repetir las de manera silenciosa.	Corteza primaria auditiva temporal bilateral y área de Wernicke.	Identificación básica de las áreas receptoras del lenguaje auditivo.
Memoria Visual	Memorizar fotos de objetos y luego identificar si aparecen en una segunda lista.	Hipocampo derecho, regiones mesiotemporales y corteza dorsolateral prefrontal.	Preservar la función de memoria ante tumores en el lóbulo temporal o hipocampo.
Atención Selectiva (Stroop)	Decir el color de la tinta de una palabra escrita, ignorando el nombre del color.	Cíngulo anterior y central, núcleo caudado y tálamo bilateral.	Evaluar funciones ejecutivas y control de impulsos (tumores de la línea media).
Generación de Verbos	Pensar un verbo asociado a un sustantivo (Ej: Manzana, Comer).	Área de Broca (Giro frontal inferior) y corteza premotora.	Localizar centros de producción del lenguaje (Tumores frontales).
Denominación (Visual/Auditivo)	Leer una frase o escucharla y seleccionar la respuesta adecuada en silencio.	Corteza frontal inferior, temporal superior y área de Heschl bilateral.	Identificar áreas de procesamiento y comprensión elocuentes.
Decisión Semántica	Decir "sí" o "no" si dos palabras tienen relación lógica (Ej: Llave - Candado).	Área de Broca, corteza prefrontal dorsolateral y giro temporal medio/inferior.	Mapeo de asociación semántica profunda y comprensión del lenguaje.

Clasificación (Vivo/Inanimado)	Decidir si el objeto mostrado es un ser vivo o un objeto.	Lóbulo temporal ventral y redes de reconocimiento.	Evaluación sencilla en pacientes con fatiga o déficit cognitivo.
Fluidez Semántica	Evocar palabras de una categoría (Ej: "Dime animales").	Giro frontal inferior y lóbulo temporal superior.	Mapeo extensivo de la red de lenguaje en el hemisferio dominante.
Clasificación de Objetos	Clasificar como "Vivo" o "Inanimado" (Ej: Perro vs. Mesa).	Lóbulo temporal ventral y redes de reconocimiento.	Evaluación en pacientes con compromiso cognitivo leve o fatiga.

*Nota.* Elaboración propia (2026), basada en protocolos clínicos de Machulda, M. (Mayo Clinic), Laurito, J.T., y Thulborn, K. (University of Illinois), y guías de planificación neuroquirúrgica para resección de tumores cerebrales.

## **La Tractografía Como Coadyuvante para la Resección Quirúrgica de Tumores Cerebrales**

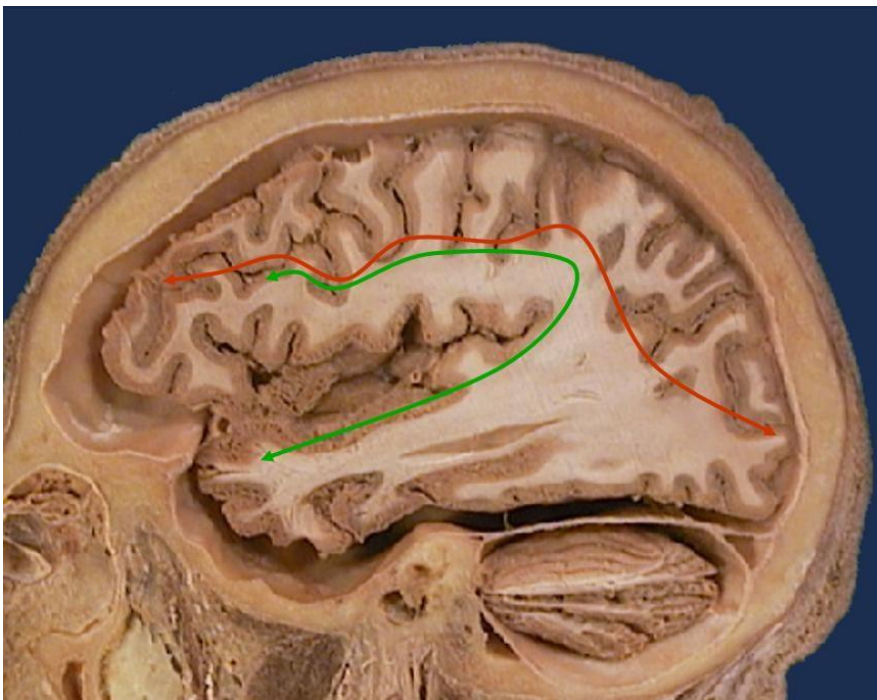
La tractografía es una herramienta visual que surge a mediados de la década de los 90, la cual tuvo evolución a partir de los trabajos sobre difusión, Es una técnica complementaria de la Resonancia Magnética Funcional que se realiza en post- procesamiento permitiendo visualizar de forma no invasiva la orientación y la integridad de fibras nerviosas, asociación, de proyección y comisurales (sustancia blanca) esta herramienta es ideal después de la fRM, ya que mientras la resonancia funcional te muestra dónde están las áreas elocuentes, la tractografía se encarga del muestreo de axones que las conectan. La técnica imagen por Tensor de Difusión DTI, demuestra que el tejido cerebral y el agua no genera movimientos iguales en todas las direcciones, mientras que, en los axones, el agua puede desplazarse fácilmente en el eje de la fibra de la membrana. Las fibras en la técnica de la Tractografía se pueden identificar por colores, rojo Fibras transversales derecha a izquierda, como el cuerpo calloso, verde Fibras anteroposteriores adelante hacia atrás y azul Fibras descendentes o ascendentes arriba hacia abajo, como la vía corticoespinal. En los últimos años se ha producido un auge de nuevas técnicas de neuro radiología, entre ellas, se encuentra la tractografía. La secuencia de tensor de difusión-RM (DT-MRI), ha evolucionado rápidamente con un nuevo enfoque in vivo a la investigación de las anomalías de la sustancia blanca o daños tisulares: la cuantificación de la difusión de las moléculas de agua en el cerebro.

## Sustancia Blanca

- **Fibras de Asociación** Interconectan áreas corticales de cada hemisferio.
- **Fibras de Proyección** Interconectan áreas corticales con núcleos basales, tálamos, tronco cerebral, cerebelo y médula.
- **Fibras Comisurales** Interconectan áreas similares corticales con el hemisferio contralateral.

### Figura 8

*Corte Sagital Del Encéfalo Y Representación Esquemática De Las Principales Vías De Asociación Y Proyección De La Sustancia Blanca Cortical.*



*Nota.* Tomado de John A., Calderón (2025) XXV Seminario antioqueño de radiología y II seminario para tecnólogos en imágenes diagnósticas

## Difusión

La difusión es la distribución homogénea de partículas en un disolvente; en el caso de una membrana permeable puede haber paso de partículas en un disolvente siempre a favor del

gradiente de concentración. Es un proceso que no requiere aporte energético, es frecuente como forma de intercambio molecular siendo un proceso resultante de los movimientos térmicos aleatorios de las moléculas (movimiento browniano).

### **Isotropía**

Este fenómeno de difusión ha sido adoptado con éxito como un importante marcador para la arquitectura de los tejidos en el cerebro, la difusión en el cerebro, principalmente de las moléculas de agua, tiene características específicas de tejido.

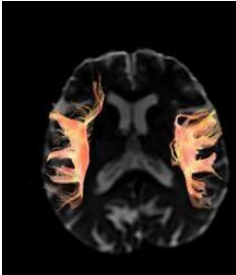
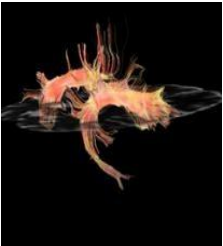
- En el líquido cefalorraquídeo, que no tiene restricciones direccionales específicos, la difusión es isotrópica (es decir, existe igual probabilidad de movimiento en todas las direcciones).
- En la sustancia blanca, las estructuras de tejido bien organizadas, tales como fibras neuronales y las vainas de mielina, guían las moléculas de agua a lo largo de la dirección de los tractos de fibras y el proceso de difusión neta parece anisotrópico.

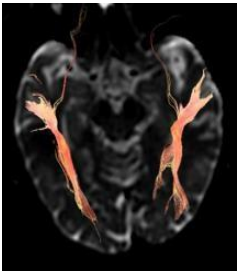
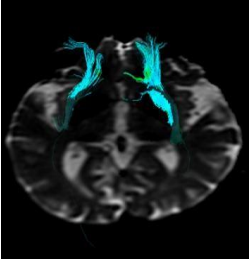
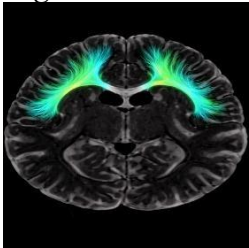
### **Fascículos de Asociación**

Los fascículos de asociación son haces de axones (sustancia blanca) que se encargan de interactuar con diferentes zonas corticales dentro de un mismo hemisferio cerebral. A comparación de las fibras comisurales, que se encargan de realizar proyecciones de integración multimodal y cumplen un papel fundamental en funciones complejas como el lenguaje, la atención y planificación motora.

**Tabla 2**

*Principales Fascículos de asociación como ejes críticos de la conectividad funcional en el hemisferio dominante.*

Fascículo	Conectividad	Función Principal	Representación
Fascículo Arcuato	Conecta el área de Broca con el área de Wernicke.	Fundamental para el lenguaje; su lesión produce afasia de conducción.	<p><b>Figura 9</b> <i>Fascículo Arcuato</i></p>  <p><i>Nota.</i> Tomado de John A., Calderón (2025) XXV Seminario antioqueño de radiología y II seminario para tecnólogos en imágenes diagnósticas</p>
Fascículo Longitudinal Superior	Une los lóbulos frontal, parietal, temporal y occipital	Regulación de la atención espacial y coordinación visomotora.	<p><b>Figura 10</b> <i>Fascículo Longitudinal Superior</i></p>  <p><i>Nota.</i> Tomado de John A., Calderón (2025) XXV Seminario antioqueño de radiología y II seminario para tecnólogos en imágenes diagnósticas</p>

Fascículo Longitudinal Inferior	Conecta el lóbulo occipital con el temporal.	Clave para el reconocimiento visual de objetos y rostros.	<p><b>Figura 11</b> <i>Fascículo Longitudinal Inferior</i></p> 
Fascículo Uncinado	Une la corteza orbitofrontal con la porción anterior del lóbulo temporal.	Integración de la memoria y la emoción (sistema límbico).	<p><b>Figura 12</b> <i>Fascículo Uncinado</i></p>  <p><i>Nota.</i> Tomado de John A., Calderón (2025) XXV Seminario antioqueño de radiología y II seminario para tecnólogos en imágenes diagnósticas</p>
Cíngulo	Trayecto curvo sobre el cuerpo calloso que conecta la corteza cingulada con el hipocampo.	Comunicación del sistema límbico y regulación conductual.	<p><b>Figura 13</b> <i>Cíngulo</i></p>  <p><i>Nota.</i> Tomado de John A., Calderón (2025) XXV Seminario antioqueño de radiología y II seminario</p>

*Nota.* Elaboración propia basada en modelos de conectividad por tractografía.

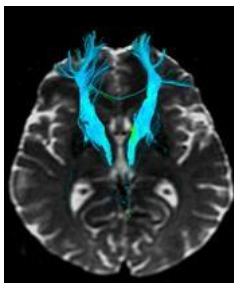
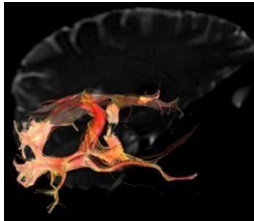
---

## Fascículos de Proyección

Los fascículos de proyección están compuestos por fibras motoras que inician de la corteza hacia estructuras subcorticales y fibras sensoriales que se dirigen desde el tálamo hacia la corteza. Ellas actúan como el canal de comunicación principal entre el cerebro y el resto del organismo.

**Tabla 3**

*Organización de las fibras de proyección en el encéfalo humano*

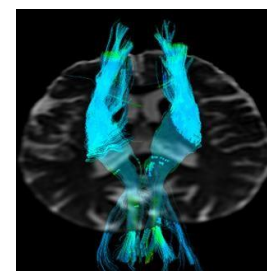
Estructura	Descripción Técnica	Función en Neuroimagen	Representación
Cápsula Interna	Banda compacta de sustancia blanca situada entre el tálamo y los núcleos basales.	Es la vía de paso más importante para las fibras motoras y sensoriales.	<p><b>Figura 14</b> <i>Cápsula Interna</i></p>  <p><i>Nota.</i> Tomado de John A., Calderón (2025) XXV Seminario antioqueño de radiología y II seminario para tecnólogos en imágenes diagnósticas</p>
Corona Radiada	Conjunto de fibras que se abren en abanico desde la cápsula interna hacia la corteza.	Su integridad es vital para la conexión de áreas motoras y somatosensoriales	<p><b>Figura 15</b> <i>Corona Radiada</i></p> 

---

*Nota.* Tomado de John A., Calderón (2025) XXV Seminario antioqueño de radiología y II seminario para tecnólogos en imágenes diagnósticas

Tracto Corticoespinal	Haz de fibras motoras que descienden desde el área motora primaria.	Responsable del movimiento voluntario; su lesión causa hemiparesia.
-----------------------	---	---

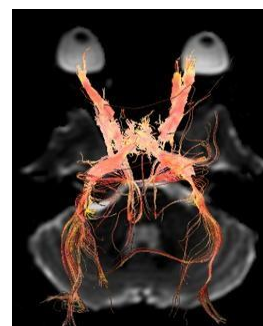
**Figura 16**  
*Tracto Corticoespinal*



*Nota.* Tomado de John A., Calderón (2025) XXV Seminario antioqueño de radiología y II seminario para tecnólogos en imágenes diagnósticas

Radiaciones Ópticas	Fibras que se proyectan desde el cuerpo geniculado lateral hacia la corteza visual.	Transmisión de la información visual.
---------------------	---	---------------------------------------

**Figura 17**  
*Radiaciones Ópticas*



*Nota.* Tomado de John A., Calderón (2025) XXV Seminario antioqueño de radiología y II seminario

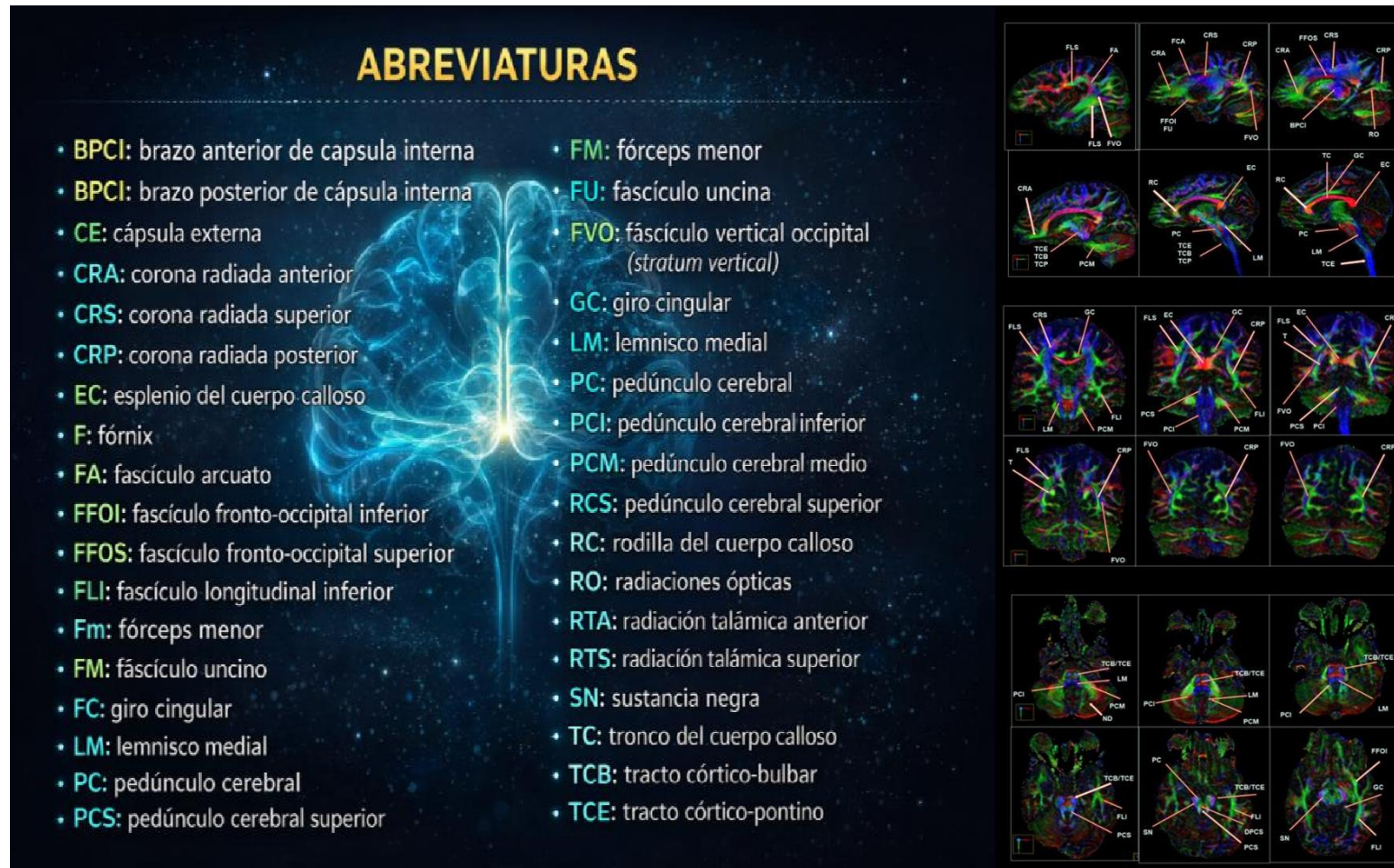
---

*Nota.* Elaboración propia basada en modelos de conectividad subcortical.

Para entender un poco el papel que cumple la tractografía es relevante hablar del funcionamiento del tensor de difusión DTI que permite la visualización de la sustancia blanca y representan una forma paramétrica basada en la Anisotropía Fraccional (FA). El color no es aleatorio; indica la dirección del movimiento de las moléculas de agua a lo largo de los axones, siguiendo un código estándar internacional, en comparación a la fRM que se encarga del mapeo corteza activa.

Figura 18

Mapas De Color Del Tensor De Difusión Abreviaturas



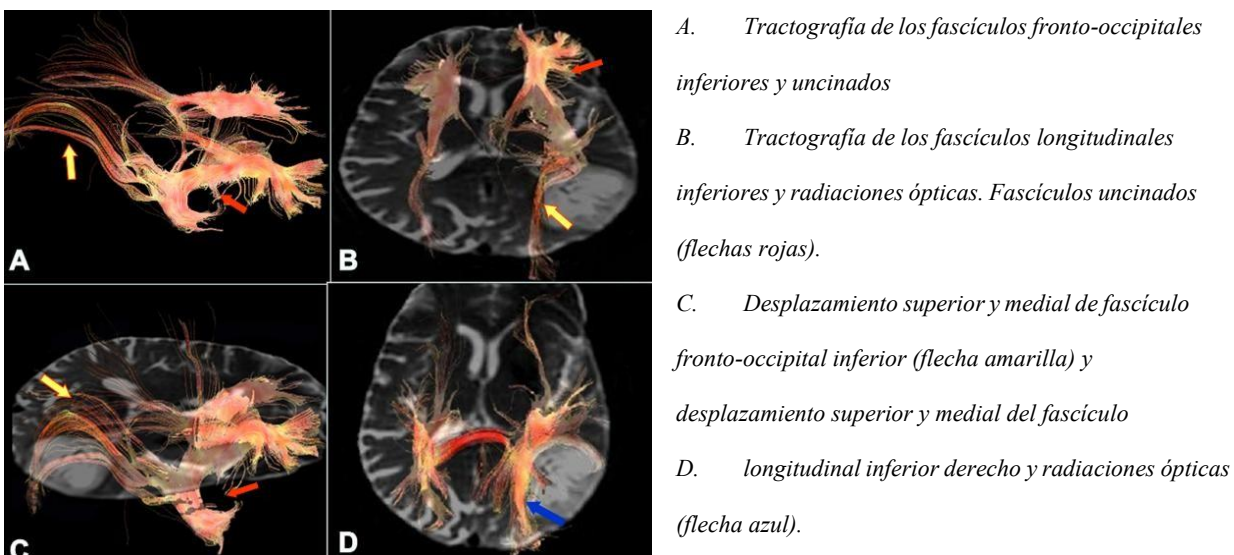
Nota. Tomado de John A., Calderón (2025) XXV Seminario antioqueño de radiología y II seminario para tecnólogos en imágenes diagnósticas

## Aplicaciones Clínicas en Patología Tumoral

En conclusión, se menciona la tractografía como coadyuvante principal en la técnica de Resonancia Magnética Funcional, ya que se ha destacado por la excelencia del abordaje quirúrgico de la lesión. Uno de los principales marcadores de la operabilidad de un tumor que genere alto riesgo en el déficit motor con la cirugía es el tracto cortico-espinal el cual también permite reducir riesgos con base a la estimulación intraoperatoria, la tractografía también es utilizada en tumores de bajo grado, de alto grado, metástasis e incluso patologías tumorales medulares, no sólo es aplicable en la planificación quirúrgica sino también en el control posquirúrgico.

### Figura 19

#### *Tractografía de tumores cerebrales con técnica Anisotrópica*



*Nota.* Tomado de John A., Calderón (2025) XXV Seminario antioqueño de radiología y II seminario para tecnólogos en imágenes diagnósticas.

Entender la función y la trayectoria de las fibras es solo una parte de la ecuación neurobiológica. Para completar el rompecabezas de la cognición humana, debemos situar estos hallazgos dentro de un marco estructural sólido. A continuación, exploraremos la arquitectura del neuroeje, un recorrido detallado por la configuración anatómica que transforma una masa de tejido especializado en una maquinaria de precisión, donde la forma y la función convergen en una unidad indisoluble.

### **Arquitectura del Neuroeje**

El sistema nervioso se conforma de una red de estructuras especializadas como el encéfalo, médula espinal y nervios cuya misión principal es controlar y regular el funcionamiento de los órganos y sistemas del cuerpo, actuando de manera coordinada en relación del organismo con el medio externo e interno y a su vez ser responsable de la información recibida para sus respectivos cambios musculares y neurológicos. El sistema nervioso se subdivide en sistema nervioso central SNC y sistema nervioso periférico SNP.

### **Neuroeje**

Es el encargado de controlar gran parte del organismo, su función es recibir la información derivada de los sentidos, procesarla y generar respuestas adecuadas, además de actuar como la principal sede de funciones cognitivas superiores procedentes al pensamiento, la memoria y las emociones, el sistema nervioso central se conforma de dos estructuras que se hacen fundamentales y que están protegidas por estructuras óseas (cráneo, la columna vertebral y las membranas meníngeas).

## El Encéfalo

Es la masa nerviosa que está situada dentro del cráneo y se compone de los siguientes órganos:

### *Cerebro*

Es la estructura más grande que subdivide en dos hemisferios y cuatro lóbulos: frontal, parietal, temporal y occipital, su función es controlar las funciones voluntarias, del lenguaje, el razonamiento y la percepción sensorial.

### *Cerebelo*

Esta ubicado en la parte postero inferior del cerebro y se encarga de la coordinación del movimiento, el equilibrio y el control de la postura.

### *Tronco Encefálico*

Es la red que conecta al cerebro con la médula espinal y su función principal es regular las funciones vitales como la respiración, el ritmo cardiaco y la presión arterial.

## Figura 20

*Representación anatómica del sistema nervioso central (SNC)*



*Nota.* Adaptado de atlas de neuroanatomía y conectividad cerebral.

## **La Médula Espinal**

La médula espinal se define arquitectónicamente como una estructura cilíndrica que se extiende desde la base del encéfalo hasta el nivel de la segunda vértebra lumbar L2. Su diseño estructural garantiza una protección multinivel mediante el estuche óseo de la columna vertebral y el sistema de envoltorios meníngeos (duramadre, aracnoides y piamadre), los cuales delimitan los espacios por donde circula el líquido cefalorraquídeo para la homeostasis metabólica. En su organización interna, la médula presenta una disposición arquitectónica inversa a la cerebral: un núcleo central de sustancia gris, configurado para el procesamiento local y el control de arcos reflejos, rodeado por una periferia de sustancia blanca. Esta última se organiza en cordones y tractos especializados que funcionan como las autopistas de comunicación para la transmisión de señales aferentes (sensoriales) y eferentes (motoras) entre el encéfalo y el sistema periférico.

Las funciones de la médula espinal abarcan desde la transmisión de señales, actuando como el puente bidireccional entre el encéfalo y los nervios periféricos, hasta la ejecución de reflejos espinales. En estos últimos, la médula opera como un centro de procesamiento autónomo para ejecutar respuestas motoras inmediatas que no requieren la intervención directa de la corteza cerebral, optimizando así el tiempo de reacción ante estímulos nocivos. Finalmente, ejerce un papel crucial en el control motor y sensorial, coordinando la ejecución de movimientos voluntarios y canalizando la información aferente para la interpretación del tacto, la temperatura y el dolor.

### El Sistema Nervioso Periférico (SNP)

El Sistema Nervioso Periférico se conforma por una extensa red de nervios encargada de conectar el encéfalo y la médula espinal con el resto del organismo. Su arquitectura se subdivide en nervios craneales, que se originan en el encéfalo, y nervios raquídeos, que nacen directamente de la médula espinal. Complementando esta estructura, se encuentran los ganglios, agrupaciones de cuerpos neuronales situadas fuera del eje central que funcionan como estaciones de relevo para la información nerviosa.

**Tabla 4**

*Componentes principales del sistema nervioso periférico SNP*

Nervios	Origen	Función principal
12 pares de nervios craneales.	Nacen del encéfalo y se dirigen principalmente a la cabeza y el cuello.	Su función es crítica ya que permiten la comunicación sensorial y motora entre el cerebro y estructuras de la cabeza, el cuello y órganos internos.
31 pares Nervios Raquídeos (Espinales)	Emergen de la médula espinal hacia el tronco y las extremidades.	Actúan como la interfaz entre el Sistema Nervioso Central y la periferia.
Múltiples ganglios	Fuera del eje central (SNC).	Los ganglios son estructuras fundamentales que actúan como estaciones de relevo y centros de procesamiento intermedio.

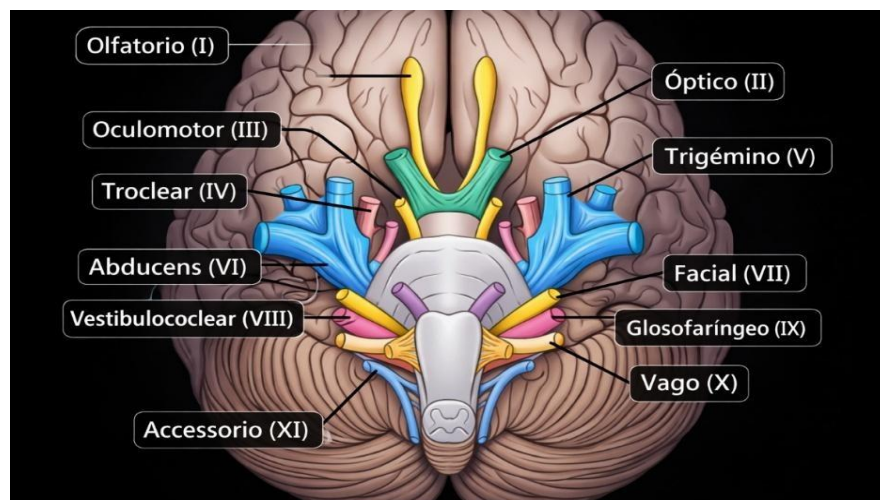
*Nota.* Elaboración propia basada en la descripción anatómica del SNP.

## Pares Craneales

Son un conjunto de 12 pares de nervios que se originan directamente del encéfalo, se llaman "pares" porque hay uno a cada lado del cerebro y se enumeran con números romanos (I al XII) según su orden de salida de adelante hacia atrás. Su principal contribución es la comunicación para los sentidos y control de los músculos de la cara y el cuello, permitiendo funciones relacionadas a los movimientos y transmisión de funciones sensitivas. En el ámbito quirúrgico es de gran importancia el reconocimiento de cada uno de los pares craneales ya que, si el paciente presenta fallas visuales, el daño suele estar en el Par II (Óptico). Si el paciente presenta parálisis facial (incapacidad de mover los músculos del rostro), el daño está en el Par VII (Facial), a su vez se es pertinente hablar de la importancia de una adecuada planificación quirúrgica ya que gracias a las fRM el cirujano puede visualizar donde se encuentra cada nervio respecto al tumor y así evitar daños durante la intervención quirúrgica, preservando así la calidad de vida del paciente.

### Figura 21

*Vista neuroanatómica inferior del encéfalo y distribución topográfica de los doce pares craneales.*



*Nota.* Representación gráfica y descriptiva de la anatomía macroscópica de la base del cerebro, detallando la salida y denominación oficial de los pares craneales principales.

## Corteza Cerebral

La estructura cortical se divide en unidades funcionales denominadas lóbulos cerebrales. Además de los cuatro lóbulos externos tradicionales (frontal, parietal, temporal y occipital), se identifica el lóbulo de la ínsula en la profundidad de la cisura lateral. Esta subdivisión hemisférica está estrictamente delimitada por una serie de accidentes anatómicos conocidos como surcos o cisuras, facilitando así la cartografía cerebral necesaria para el estudio de la neuroimagen. El poder identificar cada una de las cisuras cerebrales permitirá la segmentación precisa que será la base para la navegación quirúrgica. En la planificación de resección de tumores, el desplazamiento o borramiento de estos surcos en las imágenes de fRM indica el grado de efecto de masa y la urgencia de la intervención para preservar áreas elocuentes adyacentes.

**Tabla 5**

### *Principales Surcos y Cisuras del Encéfalo*

Cisura anatómica	Ubicación	Función y delimitación	Neuroimagen
Cisura de Silvio (Surco Lateral)	Cara lateral, trayecto posterosuperior.	Separa el lóbulo temporal de los lóbulos frontal y parietal.	Aloja la arteria cerebral media y oculta la ínsula.
Cisura de Rolando (Surco Central)	Desde la línea media hacia el surco lateral.	Divide el lóbulo frontal (motor) del lóbulo parietal (sensitivo).	Hito clave para localizar la corteza motora primaria en fRM.
Cisura Interhemisférica (Longitudinal)	Línea media sagital.	Separa los hemisferios cerebrales derecho e izquierdo.	Contiene la hoz del cerebro y la arteria cerebral anterior.

Cisura Parieto-occipital	Superficie medial y cara posterolateral.	Divide el lóbulo parietal del lóbulo occipital.	Define el límite anterior de la corteza visual primaria.
Cisura Calcarina	Superficie medial, desde el polo occipital.	Se extiende hacia el esplenio del cuerpo calloso.	Eje central del procesamiento visual primario.
Cisura Circular	Rodea la corteza profunda del surco lateral.	Separa la ínsula de los lóbulos operculares circundantes.	Límite quirúrgico para abordajes transilvanos.

*Nota.* Elaboración propia basada en criterios anatómicos de referencia radiológica.

## **Lóbulos Cerebrales**

Cada hemisferio se subdivide en unidades funcionales denominadas lóbulos, los cuales no solo guardan una relación de vecindad con los huesos craneales homónimos, sino que albergan áreas corticales especializadas. En la práctica neuroquirúrgica y el diagnóstico por Resonancia Magnética Funcional fRM, la comprensión de esta división es vital para la preservación de áreas elocuentes.

### **Lóbulo Frontal**

Ocupa la porción más anterior del encéfalo y se encuentra delimitado por la cisura de Rolando. Su arquitectura comprende áreas especializadas como la corteza prefrontal y las regiones motoras, organizadas en los sectores dorsolateral, medial y orbitofrontal. Desde una perspectiva clínica, su integridad es fundamental para el soporte de las funciones ejecutivas, el lenguaje expresivo y la conducta motora. En pacientes con patología tumoral, la preservación de estas áreas es prioritaria para mantener la autonomía funcional y la personalidad del individuo.

### **Lóbulo Parietal**

Ubicado en la cara dorsal del encéfalo y posterior al surco central, el lóbulo parietal procesa la información sensorial primaria de áreas 1, 2 y 3 de Brodmann y de asociación áreas 5 y 7. Sus funciones principales incluyen el reconocimiento de estímulos táctiles, la orientación espacial y la coordinación de esquemas corporales. La disfunción de estas áreas se asocia con apraxias motoras e ideacionales, afectando la planificación y ejecución de tareas motoras voluntarias y la correcta interacción con el espacio circundante.

### **Lóbulo Temporal**

El lóbulo temporal, situado en la región basal e inferior al surco lateral, constituye una unidad funcional crítica para el procesamiento sensorial y cognitivo. Sus competencias principales abarcan la percepción auditiva (tanto primaria como asociativa), la consolidación de la memoria y el reconocimiento visual complejo, incluyendo la identificación de rostros en el giro fusiforme. Asimismo, integra regiones de transición en las áreas 39 y 40 de Brodmann (giros angular y supramarginal), las cuales presentan una estrecha vinculación con el área de Wernicke en el hemisferio dominante, responsable de la decodificación y comprensión del lenguaje.

### **Lóbulo Occipital**

El lóbulo occipital ocupa la parte posterior del encéfalo, delimitado de los lóbulos parietal y temporal por el surco parieto-occipital y la extensión anterior de la fisura calcarina. Constituye el centro cortical exclusivo para el procesamiento visual y se organiza en tres regiones citoarquitectónicas de Brodmann: el área 17 (corteza visual primaria o estriada), responsable de la recepción de estímulos visuales, y las áreas 18 y 19 (corteza visual asociativa o estriada), encargadas de la interpretación y el análisis de la información visual compleja.

Nota. FunNeuroanatomía funcional / Oscar Javier Rodríguez Riveros, / Bogotá D.C., Fundación Universitaria del Área Andina. 2017

file:///C:/Users/57304/Downloads/Neuroanatom%C3%ADa%20funcional.pdf

**Tabla 6**

*Áreas de Brodman y sus funciones*

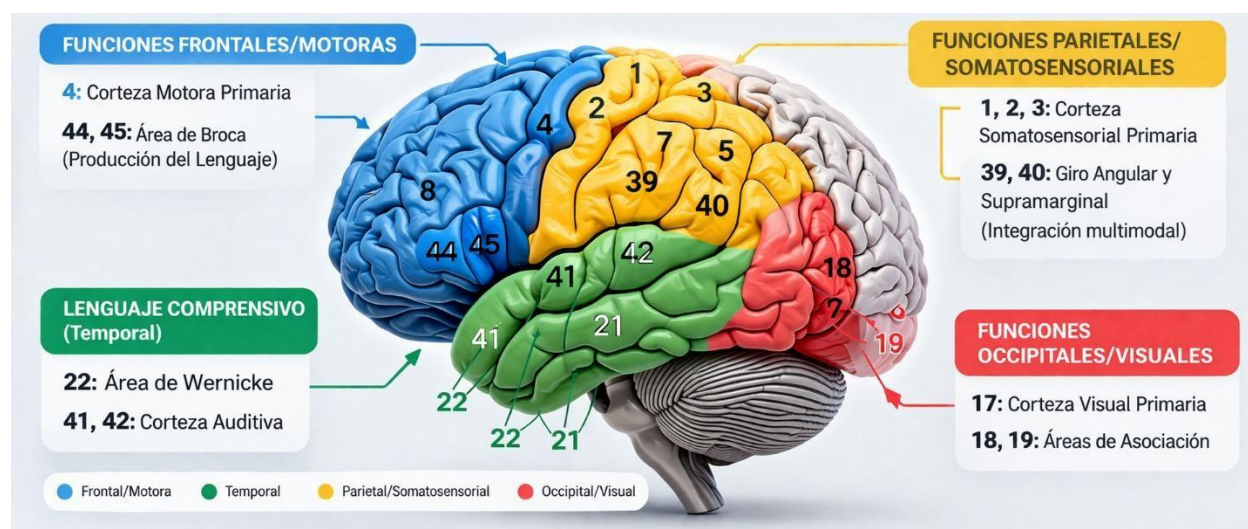
Grupo Funcional	Áreas	Nombre clínico	Función principal
Somático-Sensoria	1, 2, 3	Corteza Somatosensorial Primaria	Procesa tacto, dolor, presión y temperatura.
Motor	4	Corteza motora primaria	Ejecuta las órdenes de movimiento voluntario.
Motor	6	Corteza premotora	Planifica y secuencia movimientos complejos.
Visual	17	Corteza Visual Primaria	Recibe la información directa de los ojos
Visual	18,19	Corteza Visual Secundaria	Reconoce colores, formas y movimiento.
Auditivo	41,42	Corteza Auditiva Primaria	Detecta tonos, frecuencia y volumen del sonido.
Auditivo	22	Área de Wernicke (parte)	Interpretación y comprensión de sonidos y palabras.
Lenguaje	44,45	Área de Broca	Coordinación de músculos para el habla (articulación).

Lenguaje	39,40	Giro Angular y Supramarginal	Lectura, escritura y comprensión de símbolos.
Cognitivo/Ejecutivo	9, 10, 11, 12	Corteza Prefrontal	Personalidad, juicio, ética y toma de decisiones.
Memoria/Emoción	23 a 28, 30	Sistema Límbico (Cíngulo)	Procesa emociones, comportamiento y memoria.

*Nota.* Elaboración propia basada en la clasificación cito arquitectónica de Korbinian Brodmann y la correlación funcional de la neuroanatomía clínica moderna.

### Figura 22

*Delimitación cortical basada en la organización celular, fundamental para la interpretación de los focos de activación BOLD en estudios funcionales prequirúrgicos*



*Nota.* Adaptado de manuales de neuroanatomía y conectividad cerebral.

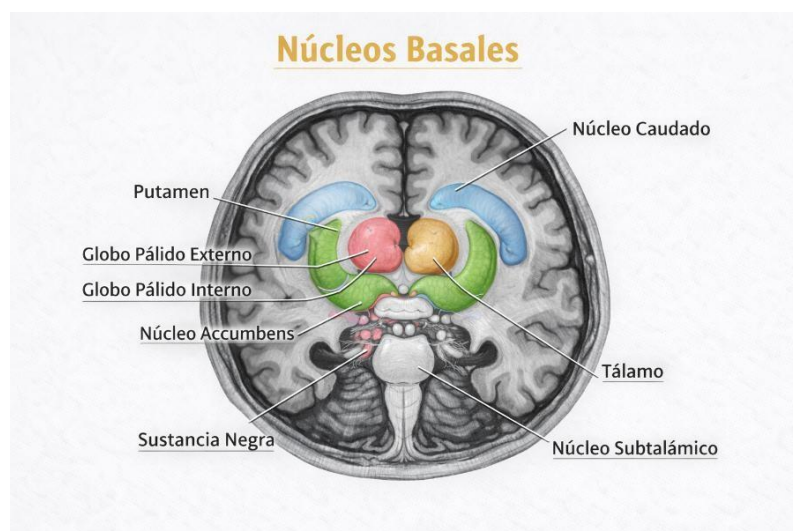
## Neuroanatomía Subcortical

### Núcleos Basales

Los núcleos de la base componen un conjunto de masas de sustancia gris situadas en la profundidad de los hemisferios cerebrales, específicamente ventrales a la porción anterior de los ventrículos laterales. Este complejo subcortical está integrado por el núcleo caudado, el globo pálido y el putamen, los cuales desempeñan un papel crítico en la modulación del sistema motor. Su función primordial reside en el refinamiento y control del movimiento voluntario; de hecho, alteraciones en su circuito fisiológico subyacen a patologías extrapiramidales como la enfermedad de Parkinson. Dentro de su organización, destaca el neostriado, caudado y putamen, centro que procesa informaciones sensoriales de toda la corteza y proyecciones del lóbulo frontal relacionadas con la planificación y ejecución motora.

### Figura 23

*Corte axial de resonancia magnética cerebral que muestra los núcleos basales resaltados en color*



*Nota.* Representación gráfica axial descriptiva de los núcleos basales (caudado, putamen, pálido y estructuras complementarias del mesencéfalo y diencefalo)

## Sistema Límbico

El sistema límbico constituye a una red compleja de estructuras corticales y subcorticales que incluyen el tálamo, hipotálamo, hipocampo, amígdala y la corteza cingulada, que intervienen en la regulación de las respuestas emocionales. Este sistema opera en estrecha relación con la neocorteza, permitiendo una integración bidireccional entre la afectividad y los procesos cognitivos superiores, tales como la memoria, la atención y el lenguaje. En la neurociencia contemporánea, este sistema se mantiene como un pilar fundamental para comprender el sustrato neurobiológico del cerebro emocional y su influencia sobre la conducta humana.

Las estructuras que lo componen son:

- El hipocampo, es la estructura cortical especializada en el afianzamiento de la memoria, donde las lesiones en esta región derivan en cuadros de amnesia anterógrada, incapacidad para codificar nuevos eventos y amnesia retrógrada dificultad en la recuperación de recuerdos preexistentes. A nivel sináptico, la funcionalidad hipocampal depende de los receptores los cuales facilitan la potenciación a largo plazo en las espinas dendríticas de las regiones.
- La Amígdala, Ubicada en la región Antero medial del lóbulo temporal, desempeña un papel determinante en el sistema límbico al gestionar las emociones de los estímulos. Esta estructura no solo facilita el procesamiento de emociones básicas como el miedo y la agresión, sino que también interviene en la formación de recuerdos asociados a experiencias intensas. En la práctica clínica, su evaluación mediante fRM es relevante para comprender trastornos de la ansiedad y la regulación conductual, dada su capacidad para activar el eje del estrés.

- El cuerpo calloso, representa la comisura interhemisférica más voluminosa del encéfalo. Constituido por tractos de sustancia blanca, su función primordial es la integración y transferencia de información entre los hemisferios derecho e izquierdo. En el contexto de la conectividad cerebral, esta estructura asegura la cohesión funcional de las redes corticales.

- El Diencéfalo, es la región del prosencéfalo localizada entre los hemisferios cerebrales y el tronco del encéfalo. Estructurado alrededor del tercer ventrículo, este sector anatómico integra principalmente al tálamo y al hipotálamo, sirviendo como el eje central para la transmisión de información sensorial y la regulación de funciones autonómicas superiores.

- Mesencéfalo, representa la división superior del tronco encefálico y la porción más compacta del encéfalo. Su arquitectura se organiza en dos regiones principales: el tectum (techo), ubicado en la cara dorsal, y el tegmentum (tegmento), situado ventralmente. En su interior, alberga núcleos críticos para la función motora y sensorial, tales como la sustancia gris, el núcleo rojo y la sustancia negra, esta última fundamental en la modulación del movimiento. Por su centro discurre el acueducto cerebral (de Silvio), conducto que comunica el tercer ventrículo con el cuarto ventrículo. Funcionalmente, actúa como una vía de conducción bidireccional entre la médula espinal y el prosencéfalo, integrando además reflejos visuales y auditivos.

La comprensión de la neuroanatomía cerebral constituye un elemento fundamental para el análisis e interpretación de la neuroimagen, así como para la planificación de intervenciones neuroquirúrgicas seguras. La adecuada identificación de las estructuras corticales, subcorticales y de las vías de sustancia blanca permite delimitar las áreas elocuentes y entender su relación

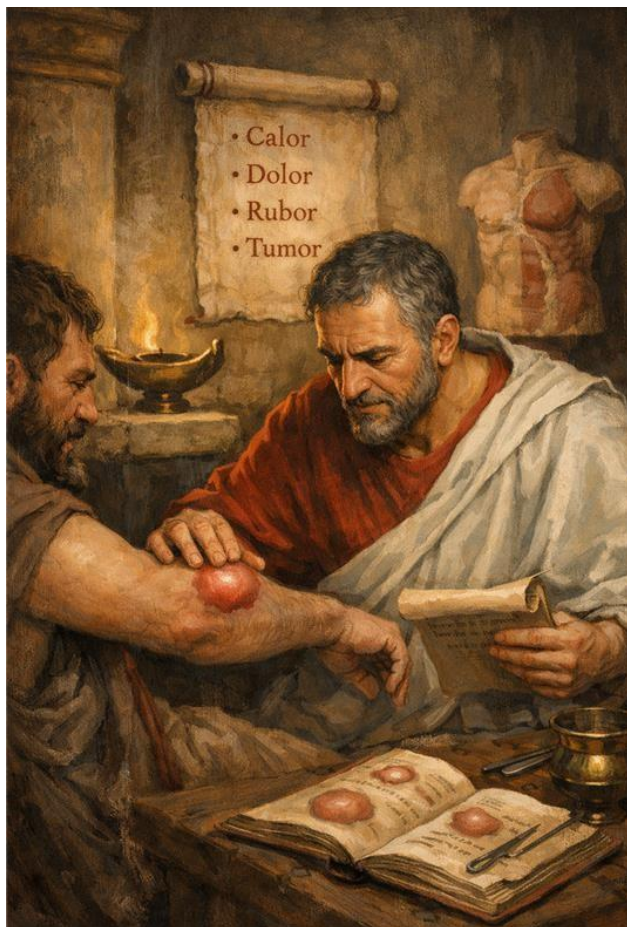
funcional dentro del encéfalo. Sin embargo, esta organización puede verse alterada por la presencia de lesiones ocupantes de espacio, como los tumores cerebrales, los cuales generan desplazamiento de estructuras, efecto de masa y cambios en la funcionalidad cerebral. En este sentido, resulta necesario abordar el estudio de las neoplasias intracraneales, comprendiendo su impacto sobre la anatomía y su relevancia en la planificación diagnóstica y terapéutica.

La palabra tumor proviene del latín tumor, tumoris. Su raíz es el verbo tumere, que significa "hincharse" o "estar inflado". Curiosamente, comparte raíz con palabras como "túmulo" (una elevación de tierra sobre una tumba) y "tumulto" (una multitud "hinchada" o desbordada). La palabra no siempre significó "cáncer" o "neoplasia". Su significado ha evolucionado en tres grandes etapas:

- La Antigüedad en el siglo AC, el enciclopedista romano Cornelio Celso definió los cuatro signos clásicos de la inflamación: Calor, Dolor, Rubor y Tumor. Aquí, "tumor" era simplemente el aumento de volumen (edema o inflamación) causado por un golpe o infección.
- La Era de la Observación: Durante siglos, "tumor" fue un término puramente descriptivo. Cualquier bulto, fuera un quiste, una hernia o una hinchazón con pus, era un tumor.
- La Modernidad (Siglo XIX): Con el nacimiento de la patología celular (gracias a Rudolf Virchow), el concepto se desplazó de la "forma" (lo que se ve hinchado) a la "proliferación". Es aquí donde empezamos a diferenciar entre un proceso inflamatorio y una neoplasia (crecimiento nuevo de tejido).

**Figura 24**

*Representación de los cuatro signos de Inflamación por Aulo Cornelio Celso*



*Nota.* Reproducción artística de estudio de la medicina clásica.

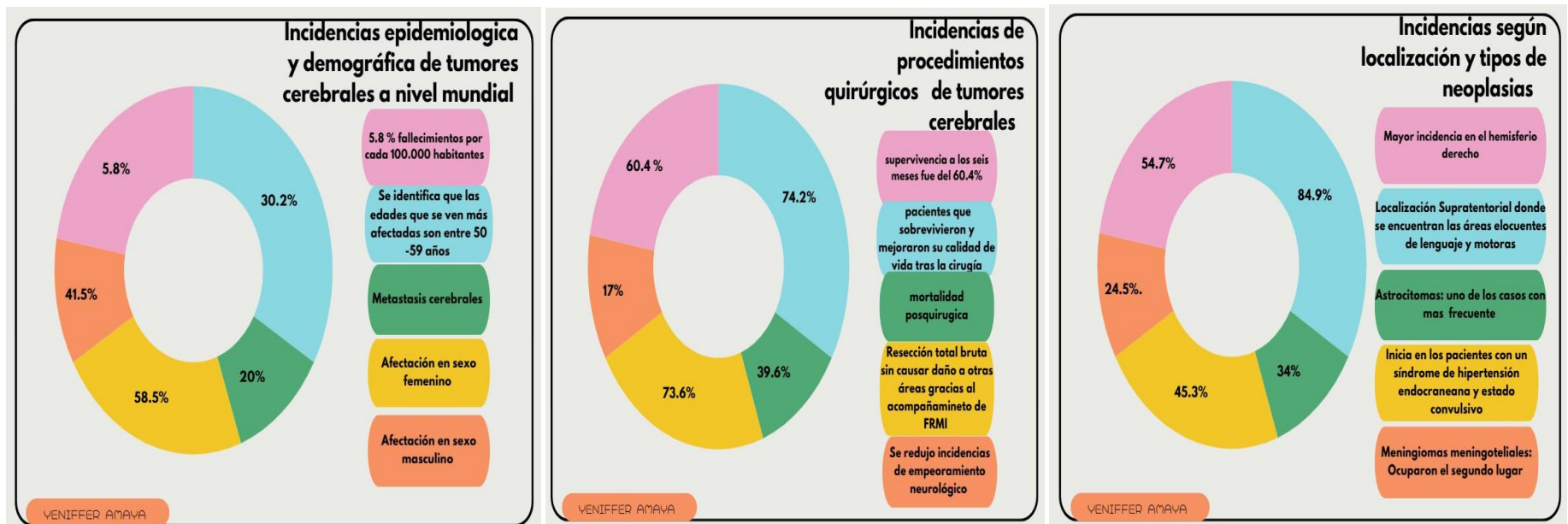
Las incidencias a nivel mundial, de los tumores cerebrales suelen tener una frecuencia de aparición directamente en el sistema nervioso central (SNC) con una incidencia del 4,8 % al 10,6 % en tumores primarios por cada 100.000 habitantes, se considera que la incidencia de tumores cerebrales se acercan con mayor intensidad en las áreas elocuentes representando un desafío técnico y de mayor riesgo al momento de la resección quirúrgica, considerando fallas en el déficit neurológico de hasta un 15 %, el acompañamiento de la Resonancia Magnética Funcional representa una solución confiable para los neurocirujanos intervenir en estos

procedimientos, el uso de esta técnica reduce la morbilidad posquirúrgica al menos del 5% de los pacientes intervenidos, coadyuvando a la optimización y eficiencia de los servicios de salud, permitiendo disminuir reintervenciones o estancias prolongadas. (Dr. Gustavo Aldereguía Lima, 2017)

A continuación, se detallan las cifras sobre la aparición de tumores en la población, los grupos de edad más afectados y los resultados de las intervenciones quirúrgicas registradas.

Figura 25

Gráfica y distribución de incidencias según localización y tipos de neoplasias cerebrales.



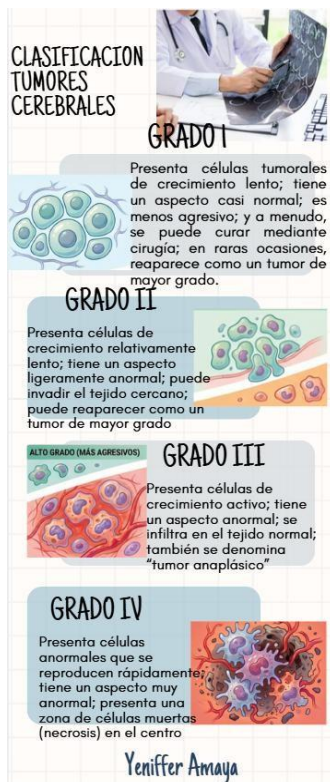
*Nota.* Datos adaptados de incidencias de tumores cerebrales Jorge Luis Acevedo Cardoso (2017) y Hospital General Universitario Dr. Gustavo Aldereguía Lima, Cienfuegos (2017) <http://scielo.sld.cu/pdf/rf/v7n3/rf03307.pdf>

## Clasificación de Tumores Cerebrales

El encéfalo constituye una red altamente especializada de tejido neural que gobierna desde las funciones cognitivas y la personalidad hasta los procesos sensoriales y motores fundamentales para la vida. La aparición de neoplasias cerebrales surge a partir de la proliferación descontrolada de células atípicas, dando lugar a patologías de gran complejidad y marcada heterogeneidad. Dada la diversidad en su localización anatómica y comportamiento biológico, cada tumor presenta desafíos clínicos únicos. Por tanto, una clasificación precisa y una comprensión profunda de su estirpe celular son pilares determinantes para establecer un diagnóstico certero y optimizar las estrategias terapéuticas personalizadas.

### Figura 26

#### *Infografía de clasificación de grados de tumor cerebrales*



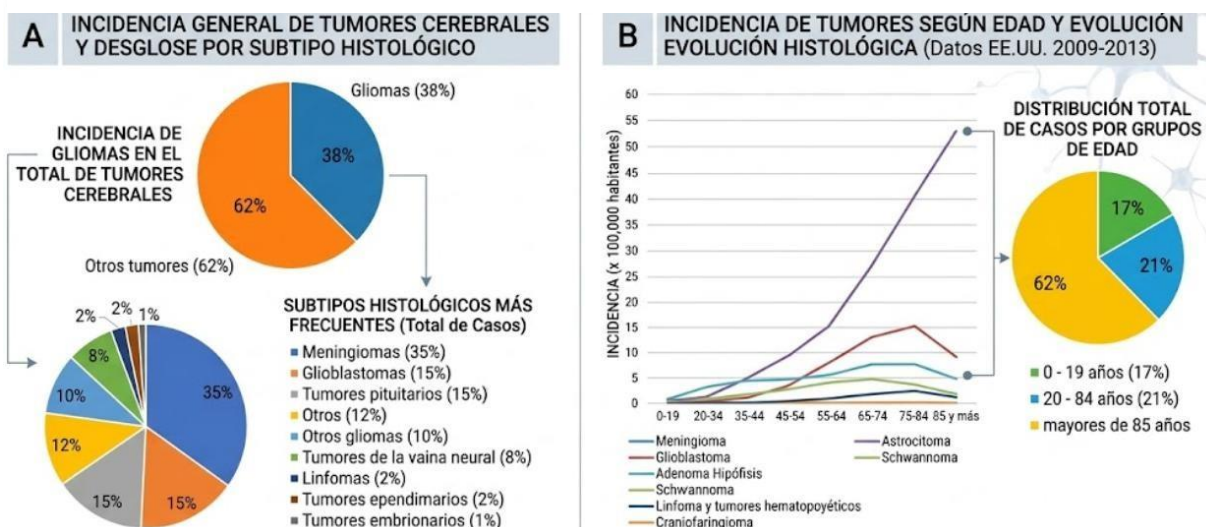
*Nota.* Tipos de tumores cerebrales Ivy Brain center <https://www.ivybraintumorcenter.org/es/atencion-medica-de-tumores-cerebrales/tipos-de-tumores-cerebrales/#linfoma-primario-del-sistema-nervioso-central>

## Tumor Cerebral Tipo Glioma

Los gliomas se definen como neoplasias intraaxiales que emergen a partir de las células gliales del parénquima cerebral. Dentro de esta categoría, destacan subtipos histológicos como los astrocitomas, oligodendrogliomas y el glioblastoma multiforme. De acuerdo con la clasificación de la OMS, estas lesiones se categorizan según su grado de malignidad; mientras que los grados II al IV son prevalentes en la edad adulta, los grados I al III suelen manifestarse en pacientes jóvenes, caracterizándose por una capacidad latente de recidiva.

**Figura 27**

*Epidemiología y clasificación de tumores cerebrales y gliomas*



*Nota.* Elaboración propia basada en datos estadísticos de registros de tumores.

## Tipos de Tumores

### Tumor Glioblastoma

#### Definición

Tumor maligno de alto grado originado en células gliales.

#### Clasificación

Grado IV (OMS).

#### Localización Frecuente

Hemisferios cerebrales.

#### Características en RM

- Lesión heterogénea
- Realce con contraste
- Edema perilesional

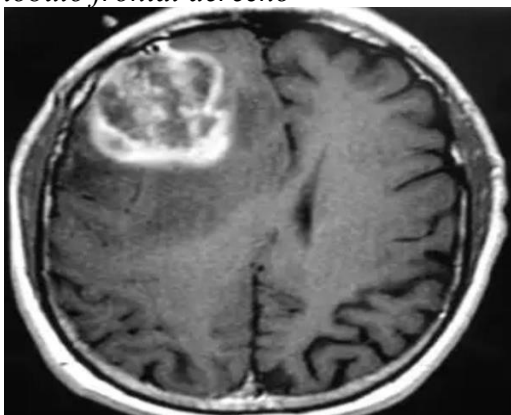
#### Sintomatología

Cefalea, crisis convulsivas y déficit neurológico focal.

**Importancia en fRM** Alteración de áreas elocuentes y reorganización funcional.

#### Figura 28

*Imagen de resonancia magnética en corte axial que evidencia glioblastoma cerebral, ubicado en lóbulo frontal derecho*



*Nota.* Tomado Aaron Cohen-Gadol, MD, Neurocirugía (2024) <https://www.aaroncohen-gadol.com/es/pacientes/glioma/tipos/glioblastoma#section6>

## **Tumor Glioma de Alto Grado**

### **Definición**

Son neoplasias malignas de estirpe glial que presentan una proliferación celular rápida, gran capacidad de infiltración en el parénquima circundante y una marcada angiogénesis (formación de nuevos vasos sanguíneos). Incluyen principalmente el Astrocitoma.

### **Clasificación**

Según los criterios de la OMS, se clasifican por su agresividad histológica y marcadores moleculares:

- Grado III: Lesiones anaplásicas con actividad mitótica aumentada.
- Grado IV (Glioblastoma): Presencia de necrosis tisular

### **Localización Frecuente**

Predominan en los hemisferios cerebrales, con mayor incidencia en los lóbulos frontal y temporal. Tienen una alta tendencia a extenderse a través de las fibras de sustancia blanca (como el cuerpo calloso), pudiendo cruzar hacia el hemisferio contralateral (glioma en "alas de mariposa").

### **Características en RM**

- Morfología: Masas de bordes irregulares y heterogéneos.
- Señal: Hipointensos en T1 y marcadamente hiperintensos en T2/FLAIR debido al edema vasogénico peri tumoral.
- Contraste (Gadolinio): Presentan un realce anular o en anillo intenso, que rodea un centro necrótico en el caso del Grado IV.

### **Sintomatología**

Deriva del aumento de la presión intracraneal y la focalización neurológica.

- Cefalea intensa y persistente.
- Déficit motor o sensitivo (hemiparesia).

- Alteraciones del lenguaje (afasias) si compromete el hemisferio dominante.
- Crisis convulsivas de inicio súbito.
- Cambios en la personalidad y funciones ejecutivas.

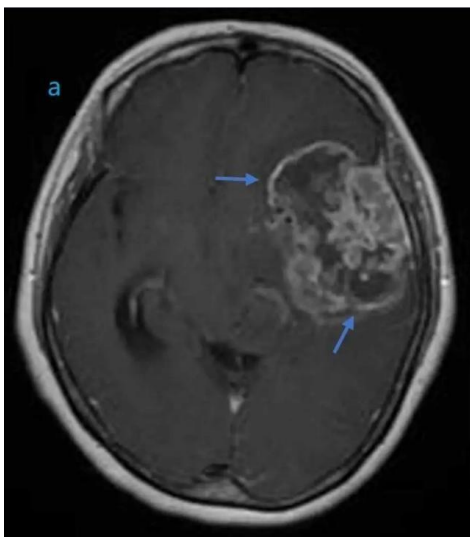
### Importancia en fRM

Es la herramienta crítica para la planificación quirúrgica segura. En gliomas de alto grado, su importancia radica en:

- Delimitación de áreas elocuentes: Identificar la distancia exacta entre el margen infiltrativo del tumor y las cortezas motora, sensitiva o del lenguaje.
- Mapeo de la infiltración: Determinar si el tejido tumoral ha invadido la corteza funcional o si solo la está desplazando (efecto de masa), permitiendo al cirujano decidir el límite de la resección para evitar secuelas permanentes.
- Evaluación de la neuro plasticidad: Identificar si la función cerebral se ha desplazado a áreas adyacentes o al hemisferio contralateral debido a la progresión del tumor.

### Figura 29

*Resonancia Magnética de Glioma de Alto Grado en los lóbulos temporal y frontal izquierdos*



*Nota.* Tomado Aaron Cohen-Gadol, MD, Neurocirugía (2024) <https://www.aaroncohen-gadol.com/es/pacientes/glioma/tipos/glioblastoma#section6>

## **Tumor Glioma de Bajo Grado**

### **Definición**

Neoplasias primarias del sistema nervioso central que se originan a partir de células gliales (astrocitos u oligodendrocitos). Se caracterizan por tener un crecimiento lento, una baja tasa de división celular y una notable capacidad de infiltración difusa en el tejido cerebral sano, sin destruir inicialmente la arquitectura neuronal.

### **Clasificación**

Basada en la escala de la Organización Mundial de la Salud (OMS):

- Grado I: Tumores circunscritos, de crecimiento muy lento y con bajo potencial de malignidad (ej. Astrocitoma pilocítico).
- Grado II: Tumores infiltrantes (difusos) que, aunque crecen lento, tienen una alta tendencia a la progresión maligna y convertirse en grados III o IV con el tiempo

### **Localización Frecuente**

Predominantemente en los hemisferios cerebrales, con una afinidad particular por los lóbulos frontal e insular. A menudo se encuentran en áreas cercanas o dentro de cortezas elocuentes motoras o de lenguaje.

### **Características en RM**

- Morfología: Lesiones de bordes mal definidos que expanden las circunvoluciones cerebrales.
- Señal: Típicamente hipointensos en T1 e hiperintensos en T2/FLAIR.
- Contraste (Gadolinio): Generalmente no presentan realce con el contraste, ya que la barrera hematoencefálica suele estar intacta. (Nota: Si aparece realce, puede ser signo de transformación a alto grado).

## Sintomatología

Debido a su crecimiento lento, el cerebro suele compensar el daño por mucho tiempo.

Los síntomas más comunes son:

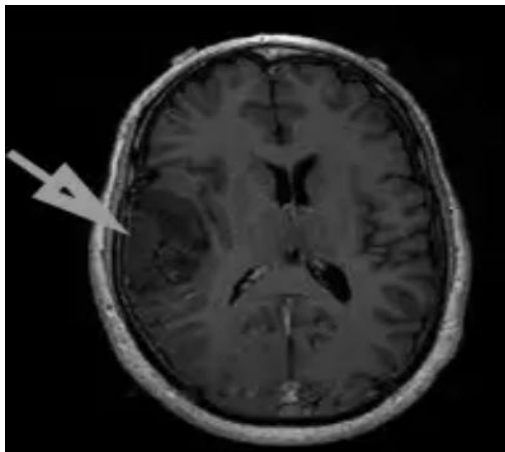
- Crisis convulsivas: Es el síntoma inicial en más del 80% de los pacientes.
- Cefaleas leves o crónicas.
- Déficits neurológicos focales sutiles (leves problemas de memoria o cambios leves en la movilidad).

## Importancia en fRM

Permite identificar si una zona del tumor está activa antes de que el cirujano decida removerla.

## Figura 30

*Resonancia magnética glioma de bajo grado sin ningún realce*



*Nota.* Tomado Aaron Cohen-Gadol, MD, Neurocirugía (2024) <https://www.aaroncohen-gadol.com/es/pacientes/glioma/tipos/bajo-grado>

## Tumor Astrocitoma

### Definición

Neoplasia primaria del sistema nervioso central que se origina a partir de los astrocitos, células gliales con forma de estrella encargadas del soporte metabólico y estructural de las

neuronas. Representan el grupo más numeroso de tumores intraaxiales.

### **Clasificación**

- Grado I (Pilocítico): Benigno, bien circunscrito, más común en niños.
- Grado II (Difuso): Bajo grado, infiltrante, con tendencia a evolucionar a grados superiores.
- Grado III (Anaplásico): Alto grado, presenta actividad mitótica aumentada y es considerado maligno.
- Grado IV (Glioblastoma): La forma más agresiva, con necrosis y proliferación vascular (angiogénesis).

**Localización frecuente** Principalmente en los hemisferios cerebrales (lóbulos frontal y temporal en adultos). En pacientes pediátricos, es común su aparición en el cerebelo y las vías ópticas.

### **Características en RM**

- Bajo Grado (I-II): Aparecen como masas isointensas o hipointensas en T1 e hiperintensas en T2/FLAIR. Generalmente no captan contraste, lo que indica una barrera hematoencefálica intacta.
- Alto Grado (III-IV): Presentan señales heterogéneas con áreas de edema vasogénico extenso. El realce con gadolinio es común (en anillo en el grado IV), indicando ruptura de la barrera y neovascularización.

### **Sintomatología**

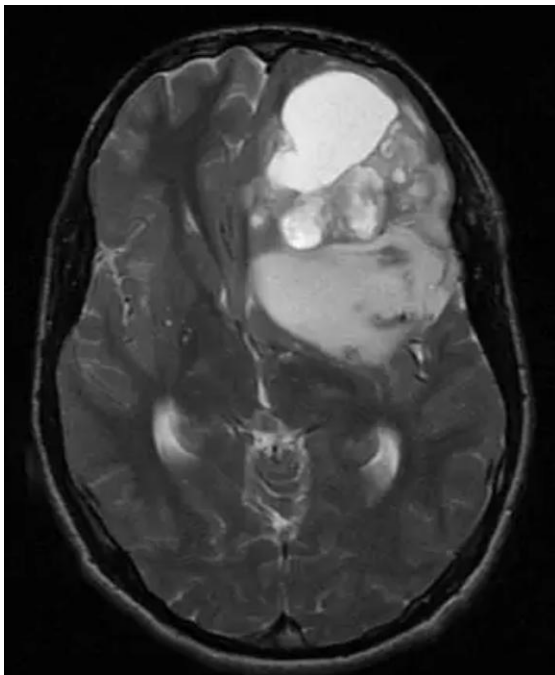
- Crisis epilépticas: Muy frecuentes en los grados de crecimiento lento (Grado II).
- Déficits focalizados: Debilidad muscular, problemas de sensibilidad o alteraciones del habla (afasia).
- Signos de hipertensión Endo craneana: Cefalea matutina, náuseas, vómitos proyectivos y visión borrosa (papiledema).

### **Importancia en fRM**

Permite localizar con precisión las cortezas motoras, sensorial y del lenguaje para evitar dañarlas, especialmente en astrocitomas difusos donde los bordes del tumor no son claros, adicional está diseñado para identificar desplazamientos de la corteza funcional.

### **Figura 31**

*Representación de resonancia magnética de Astrocitoma en plano axial ubicado en lóbulo frontal izquierdo*



*Nota.* Tomado Aaron Cohen-Gadol, MD, Neurocirugía (2024) <https://www.aaroncohen-gadol.com/es/pacientes/glioma/tipos/astrocitoma>

### **Tumor Oligodendroglioma**

#### **Definición**

Neoplasia glial primaria infiltrante que se origina a partir de los oligodendrocitos, las células responsables de la formación de mielina en el sistema nervioso central. Se caracteriza por un crecimiento relativamente lento y una predilección por la sustancia gris cortical y la sustancia blanca subcortical.

**Clasificación**

- Grado II: Oligodendroglioma (bajo grado).
- Grado III: Oligodendroglioma anaplásico (alto grado, mayor agresividad y densidad celular).

**Localización Frecuente**

Tienen una fuerte predilección por los hemisferios cerebrales, especialmente en el lóbulo frontal (50-60% de los casos), seguido de los lóbulos temporal y parietal. Suelen tener una ubicación muy superficial, afectando la corteza cerebral.

**Características en RM**

- Señal: Generalmente hipointensos en T1 e hiperintensos en T2/FLAIR.
- Contraste (Gadolinio): Los de grado 2 suelen no captar o tener un realce mínimo.

**Sintomatología**

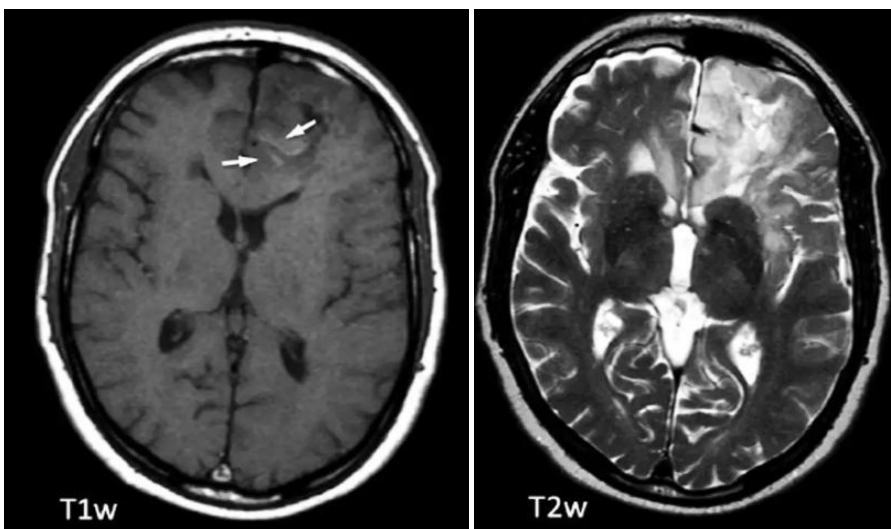
- Crisis convulsivas: Es el síntoma de presentación más común (hasta en el 80% de los pacientes) debido a su ubicación cortical y naturaleza irritativa.
- Cefaleas crónicas: Relacionadas con el efecto de masa progresivo.
- Déficits cognitivos o de personalidad: Especialmente cuando se localizan en el lóbulo frontal (cambios en la conducta, desinhibición o problemas de planificación).

**Importancia en fRM**

Define los límites funcionales, permitiendo al cirujano ser agresivo con el tumor sin causar una discapacidad permanente.

**Figura 32**

*Resonancia Magnética oligodendroglioma en secuencias T1w-T2w ubicada en lóbulo frontal izquierdo*



*Nota.* Tomado Aaron Cohen-Gadol, MD, Neurocirugía (2024) <https://www.aaroncohen-gadol.com/es/pacientes/glioma/tipos/oligodendroglioma>

**Tumor Glioma Difuso de Línea Media****Definición**

Es una neoplasia glial altamente agresiva e infiltrante que afecta las estructuras profundas del sistema nervioso central.

**Clasificación**

De acuerdo con la clasificación de la OMS, se cataloga grado IV

**Localización Frecuente**

Como su nombre indica, se ubica en las estructuras de la línea media:

- Tronco encefálico
- Tálamo: Frecuente en pacientes jóvenes.
- Médula espinal y Cerebelo.

### Características en RM

- Señal: Hipointenso en T1 y marcadamente hiperintenso en T2/FLAIR. Sus bordes son mal definidos debido a su naturaleza infiltrante.
- Contraste (Gadolinio): El realce es variable; puede no captar contraste en etapas tempranas o presentar una captación parcheada e irregular en etapas avanzadas, indicando mayor ruptura de la barrera hematoencefálica.

### Sintomatología

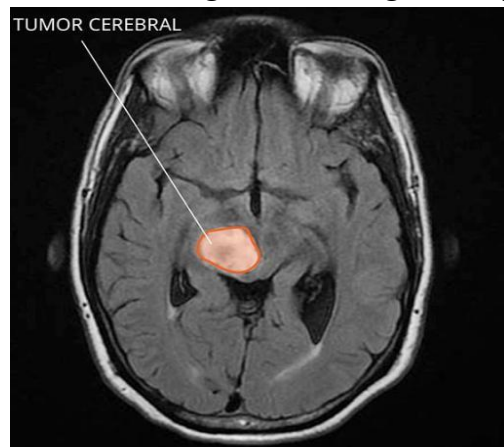
Ataxia (problemas de equilibrio), afectación de pares craneales (visión doble, debilidad facial) y signos de vía larga (debilidad en brazos o piernas), adicional si se bloquea el acueducto de Silvio, causa cefalea intensa y vómitos.

### Importancia en fRM

El papel que cumple la fRM junto con la Tractografía es la identificación de zonas de alta densidad de fibras, que es esencial para ver si los tractos motores y sensoriales están destruidos o simplemente desplazados por la expansión difusa.

### Figura 33

*Resonancia magnética de un glioma difuso de línea media*



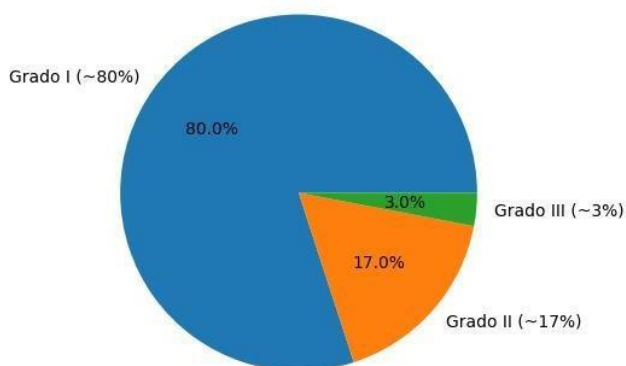
*Nota.* Instituto nacional del cáncer NCI-CONNECT <https://www.cancer.gov/rare-brain-spine-tumor/espanol/tumores/gliomas-difuso-linea-media>

## Tumores Cerebrales Tipo Meningioma

Los meningiomas son neoplasias tipo masa que se producen en las capas de la aracnoides de las meninges, estas son las membranas protectoras del sistema nervioso central. Aunque su comportamiento biológico es predominantemente benigno y de progresión lenta, su naturaleza extra axial no exime al paciente de complicaciones crónicas. Debido a su crecimiento silente, estas lesiones suelen ser asintomáticas durante periodos prolongados; sin embargo, al alcanzar un volumen crítico, generan un efecto de masa que comprime el parénquima cerebral adyacente. Representada presión mecánica que puede provocar un déficit funcional significativo, afectando procesos tales como cognitivos, motores, amnésicos o del lenguaje, dependiendo de la región cortical comprometida.

### Figura 34

*Clasificación y prevalencia de los meningiomas según los grados de la Organización Mundial de la Salud (OMS)*



*Nota.* Elaboración propia basada en datos estadísticos de registros de tumores.

## **Tumor Ganglioglioma**

### **Definición**

Es un tumor primario del sistema nervioso central de tipo mixto, compuesto por una combinación de células neuronales neoplásicas (ganglionares) y células gliales (generalmente astrocitos). Es una neoplasia de crecimiento lento y baja agresividad.

### **Clasificación**

- Grado I: La gran mayoría de los casos. Se considera benigno y con excelente pronóstico tras la cirugía.
- Grado III Anaplásico: Una variante extremadamente rara que presenta características de malignidad.

### **Localización Frecuente**

Predominan en los hemisferios cerebrales, con una afinidad muy alta por el lóbulo temporal hasta el 70% de los casos. También pueden aparecer en el lóbulo frontal, el tallo cerebral o la médula espinal.

### **Características en RM**

- Morfología: Suele presentarse como una lesión quística con un nódulo mural sólido que capta contraste.
- Señal: El componente quístico es hipointenso en T1 e hiperintenso en T2. El nódulo sólido puede ser isointenso.

### **Sintomatología**

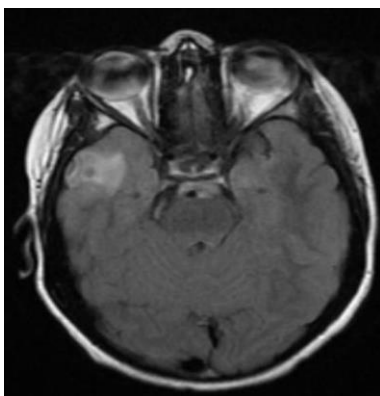
Uno de sus principales síntomas es Epilepsia refractaria, síntoma clínico más característico. Estos tumores son una de las causas más comunes de convulsiones crónicas de difícil control médico en niños y adultos jóvenes, adicional la presencia de cefaleas y cambios focales leves, dependiendo del tamaño y la ubicación exacta.

### **Importancia en fRM**

Permite identificar y delimitar la cercanía del tumor a las áreas de comprensión del lenguaje Área de Wernicke, Área 22 de Brodmann y al giro angular.

### **Figura 35**

*Imagen de resonancia magnética (RM) axial en secuencia FLAIR que muestra una lesión intraaxiales con importante edema vasogénico perilesional en el lóbulo temporal derecho*



*Nota.* Ganglioglioma, Radiology Reference Article, Radiopaedia.org

<https://co.pinterest.com/pin/ganglioglioma--584342120389022097/>

### **Tumor Schwannoma**

#### **Definición**

Es una neoplasia benigna, de crecimiento lento, que se origina en las células de Schwann. Estas células son las encargadas de producir la vaina de mielina que recubre los nervios periféricos y craneales. El tipo más común es el schwannoma que afecta al par craneal VIII.

#### **Clasificación**

Según la escala de la OMS, se clasifica casi siempre como Grado 1. Es un tumor encapsulado, bien delimitado y que generalmente no invade el tejido nervioso, sino que lo desplaza.

## **Localización Frecuente**

Se ubican más comúnmente Ángulo pontocerebeloso afectando los nervios auditivo y vestibular.

## **Características en RM**

- **Morfología:** Masa sólida, bien definida y con frecuencia de aspecto redondeado u ovalado. Los de mayor tamaño pueden presentar cambios quísticos.
- **Señal:** Hipointenso o isointenso en T1; marcadamente hiperintenso en T2.
- **Contraste (Gadolinio):** Presenta un realce intenso y homogéneo. En el caso del schwannoma vestibular, suele mostrar el característico signo del "helado en cono" al introducirse en el conducto auditivo interno.

## **Sintomatología**

Los síntomas dependerán de la ubicación de la lesión del Schwannoma.

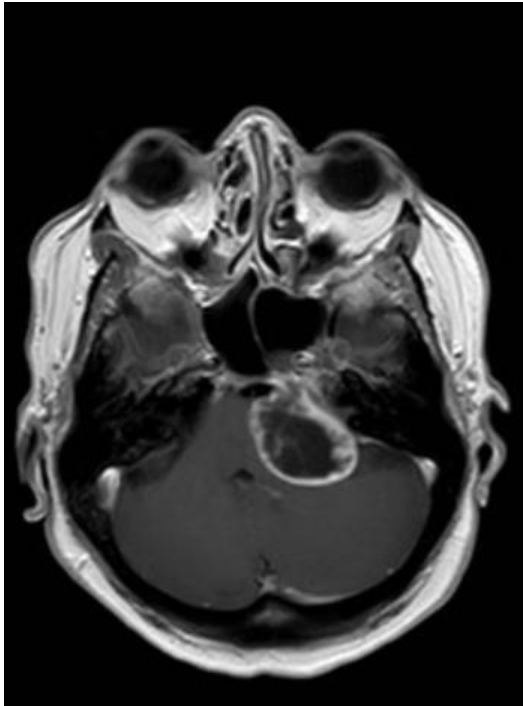
- **Hipoacusia neurosensorial:** Pérdida progresiva de la audición de un solo lado.
- **Tinnitus:** Zumbido en el oído.
- **Vértigo o desequilibrio:** Por afectación del sistema vestibular.
- **Parestesia facial:** Si el tumor crece lo suficiente para comprimir el nervio trigémino.

## **Importancia en fRM**

La fRM permite mapear si hay desplazamientos que afecten las funciones motoras o sensoriales críticas que pasan por el tronco, adicional cumple un papel importante en la planificación quirúrgica, se puede usar la fRM para evaluar la activación de la corteza auditiva primaria (Áreas 41 y 42 de Brodmann) y determinar el grado de reserva funcional del paciente.

**Figura 36**

*Representación de Schwannoma vestibular*



*Nota.* Aprender la base del cráneo Dr. Fernando Muñoz Hernández (2024)

<https://aprenderbasedecraneio.com/enfermedades/schwannoma-vestibular/>

**Tumor Ependimoma****Definición**

Neoplasia del sistema nervioso central que se origina a partir de las células ependimarias, las cuales revisten los ventrículos cerebrales y el conducto central de la médula espinal. Se caracteriza por un crecimiento expansivo que puede obstruir el flujo del líquido cefalorraquídeo (LCR).

**Clasificación**

Grado I: Ependimoma mixopapilar frecuente en la médula espinal y subependimoma.

Grado II: Ependimoma clásico, el más común.

Grado III: Ependimoma anaplásico Variante más agresiva hasta crear mitosis.

### **Localización Frecuente**

Su ubicación se puede ver afectada según la edad.

- Pacientes pediátricos: Predominan en la fosa posterior, específicamente ocupando el cuarto ventrículo.
- Adultos: Son más frecuentes en el canal medular o en los hemisferios cerebrales localización supratentorial, donde suelen ser extra ventriculares.

### **Características en RM**

- Señal: Isointenso o hipointenso en T1; hiperintenso y heterogéneo en T2.
- Calcificaciones y Hemorragias: Son muy frecuentes, lo que genera focos de hipointensidad en secuencias de susceptibilidad (SWI).
- Contraste (Gadolinio): Presenta una captación de contraste moderada a intensa, pero típicamente heterogénea debido a áreas de necrosis o quistes.

### **Sintomatología**

- Hidrocefalia obstructiva: Debido al bloqueo del flujo de LCR, provocando cefalea, náuseas, vómitos y papiledema.
- Ataxia y mareos: Especialmente en tumores de fosa posterior por compresión del cerebelo.
- Déficits motores o sensoriales: Si la localización es espinal.

### **Importancia en fRM**

Ayuda a preservar las vías Motoras y sensitivas localizando la proximidad del tumor a la corteza motora primaria para evitar hemiplejías postquirúrgicas.

### Figura 37

*Imagen de resonancia magnética RM de un Ependimoma en la médula espinal*



*Nota.* Instituto nacional del cáncer NCI-CONNECT <https://www.cancer.gov/rare-brain-spine-tumor/espanol/tumores/ependimoma>

### Tumor Hemangioblastoma

#### Definición

Es una neoplasia benigna de origen vascular, altamente irrigada, que se desarrolla a partir de células del linaje hemangioblástico. Es característico por su tendencia a formar quistes con un nódulo mural sólido muy activo vascularmente.

#### Clasificación

Según la escala de la OMS, se clasifica como Grado 1

#### Localización Frecuente

Se ubica más comúnmente en la fosa posterior, afectando el cerebelo (80% de los casos). También puede localizarse en el tronco encefálico y la médula espinal.

#### Características en RM

- Señal: El fluido del quiste es similar al LCR (hipointenso en T1, hiperintenso en T2). El nódulo sólido es isointenso en T1.

- Contraste (Gadolinio): El nódulo mural presenta un realce intenso, homogéneo y brillante, mientras que las paredes del quiste generalmente no captan contraste.

### Sintomatología

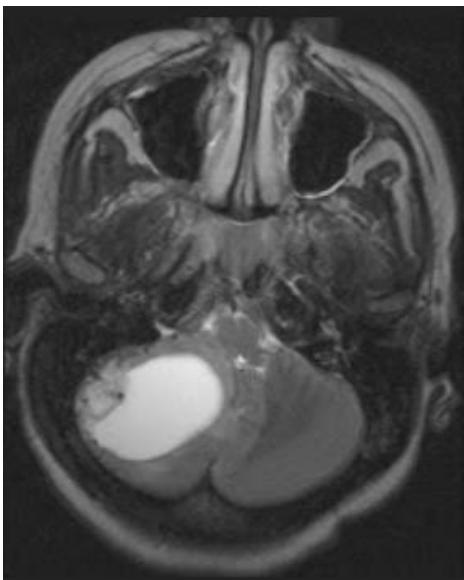
- Ataxia y dismetría: Dificultad para coordinar movimientos y el equilibrio debido a la presión en el cerebelo.
- Hidrocefalia obstructiva: Por compresión del cuarto ventrículo.
- Cefalea occipital: Acompañada a menudo de náuseas y vómitos

### Importancia en fRM

Ayuda a identificar si el tumor afecta áreas de coordinación fina, necesarias para tareas motoras específicas, además la fRM junto con tractografía ayuda a planificar un abordaje que no dañe los tractos motores que suben hacia los hemisferios.

### Figura 38

*Representación de Hemangioblastoma, plano axial T2w que realza de forma intensa y homogénea cerca del surco sigmoideo derecho*



*Nota.* Dr. Balaji Anvekar FRCC, Neuro and MSK Consultant Radiologist (2012)

<https://www.neuroradiologycases.com/2012/11/hemangioblastoma.html>

## **Tumor de la Región Pineal**

### **Definición**

Grupo de neoplasias que se originan en la glándula pineal o en sus estructuras adyacentes como el receso pineal del tercer ventrículo. Incluyen desde tumores de células germinales hasta tumores del parénquima pineal.

### **Clasificación**

- Tumores de células germinales: Germinoma el más frecuente, teratoma, carcinoma embrionario.
- Tumores del parénquima pineal: Pineocitoma Grado 1, Tumor parenquimatoso pineal de diferenciación intermedia Grado 2/3 y Pineoblastoma Grado 4, más agresivo.

### **Localización Frecuente**

Ubicada en la cisterna cuadrigémina, por detrás del tercer ventrículo y por encima del acueducto de Silvio y los tubérculos cuadrigéminos del tronco encefálico.

### **Características en RM**

- Señal: Variable según el tipo; los pineoblastomas suelen ser heterogéneos y los germinomas más isointensos.
- Contraste (Gadolinio): Típicamente presentan un realce intenso y marcado. Los germinomas muestran una captación muy homogénea.

### **Sintomatología**

- Síndrome de Parinaud: Incapacidad para mirar hacia arriba debido a la compresión de los tubérculos cuadrigéminos superiores.
- Hidrocefalia obstructiva: Debido a la compresión del acueducto de Silvio, causando cefalea, náuseas y papiledema.

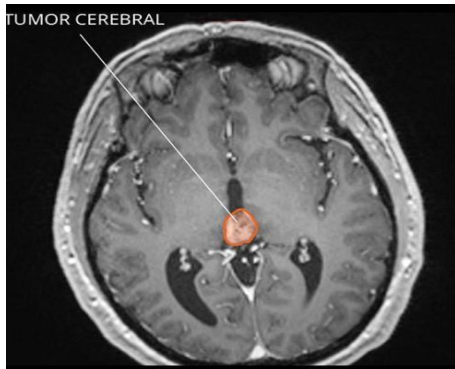
- Alteraciones endocrinas: Pubertad precoz especialmente en niños con tumores de células germinales.

### Importancia en fRM

Permite localizar la corteza visual primaria (Área 17 de Brodmann) para planificar una trayectoria que no cause ceguera parcial o defectos en el campo visual.

### Figura 39

*Representación de tumores pineales, resonancia magnética (RM) en la región pineal en el cerebro*



*Nota.* Instituto nacional del cáncer NCI-CONNECT <https://www.cancer.gov/rare-brain-spine-tumor/espanol/tumores/tumores-region-pineal>.

### Tumor Meduloblastoma

#### Definición

Es un tumor neuroepitelial embrionario altamente maligno de crecimiento rápido. Se origina a partir de células neuro ectodérmicas primitivas situadas en el cerebelo.

#### Clasificación

Según la OMS, es un tumor de Grado 4.

#### Localización Frecuente

Se localiza exclusivamente en la fosa posterior. En niños, suele aparecer en la línea media, específicamente en el vermis cerebeloso y el techo del cuarto ventrículo. En adultos, su ubicación tiende a ser más lateral, en los hemisferios cerebelosos.

### Características en RM

- Morfología: Masa sólida que ocupa el cuarto ventrículo, a menudo causando hidrocefalia.
- Señal: Hipointenso en T1 e isointenso/hiperintenso en T2 respecto a la sustancia gris.

### Sintomatología

- Síndrome de hipertensión endocraneana: Cefalea, náuseas y vómitos proyectivos especialmente matutinos por la hidrocefalia.
- Ataxia de tronco: Inestabilidad al caminar y problemas de equilibrio.

### Importancia en fRM

Permite identificar áreas del cerebelo involucradas en funciones motoras finas y de coordinación, ayudando al cirujano a elegir una trayectoria que minimice el "síndrome de mutismo cerebeloso" postoperatorio.

### Figura 40

*Representación de resonancia magnética (RM) de un meduloblastoma en el cerebelo*



*Nota.* Inselspital, Clínica de Neuroradiología Diagnóstica e Intervencionista  
<https://neurochirurgie.insel.ch/en/what-we-treat/brain-tumor/medulloblastoma>

## **Tumor Adenoma Hipofisiario**

### **Definición**

Es una neoplasia benigna que se origina en las células de la adenohipófisis lóbulo anterior de la glándula hipófisis. Representa aproximadamente el 10-15% de todos los tumores intracraneales.

### **Clasificación**

Generalmente Grado 1, debido a su naturaleza benigna y crecimiento lento.

### **Localización frecuente**

Se ubica en la silla turca, una estructura ósea en la base del cráneo.

### **Clasificación**

- Microadenoma, cuando el adenoma no supera a 1cm
- Macroadenomas, cuando el adenoma es igual o superior a 1cm, extendiéndose hacia la región supraselar, comprimiendo el quiasma óptico.

### **Características en RM**

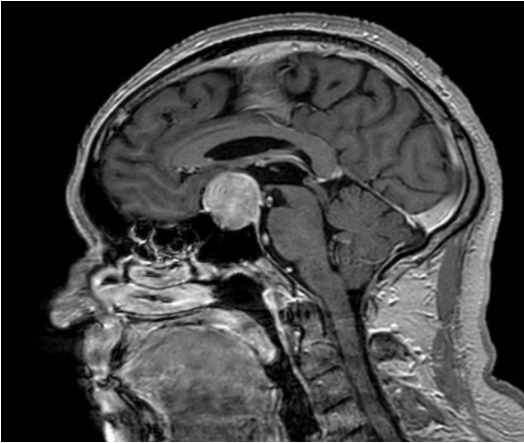
- Señal: Isointensos a la sustancia gris en T1 y variables en T2.
- Contraste (Gadolinio): Los adenomas suelen realzar más lentamente que la glándula hipófisis normal. En el Microadenoma se debe realizar técnica dinámica, buscando una zona de hipocaptación tras la inyección de contraste.

### **Sintomatología**

Hemianopsia bitemporal (pérdida de la visión lateral) por compresión del quiasma óptico, adicional suele causar cefaleas por estiramiento de la duramadre selar.

### **Importancia en Frm**

Ayuda a localizar la corteza motora y sensitiva para asegurar que la manipulación quirúrgica no comprometa estas funciones.

**Figura 41***Representación de Ressonancia Magnetica De Tumor Hipofisario*

*Nota.* Images for Ressonancia Magnetica De Tumor Hipofisario

<https://fity.club/lists/suggestions/ressonancia-magnetica-de-tumor-hipofisario/>

***Tumor Craneofaringioma*****Definición**

Es un tumor epitelial benigno, de crecimiento lento, que se origina a partir de remanentes de la bolsa de Rathke (una estructura embrionaria que da origen a la hipófisis). Se caracteriza por ser una masa mixta sólida y quística.

**Clasificación**

Según la escala de la OMS, es un tumor de Grado 1.

**Localización Frecuente**

Se ubica en la región supraselar (por encima de la silla turca). Puede extenderse hacia el tercer ventrículo, comprimir el quiasma óptico o desplazar el hipotálamo.

**Características en RM**

- Señal: Muy variable. En T1, el contenido quístico puede ser hiperintenso debido a la alta concentración de proteínas o colesterol. En T2, los quistes son hiperintensos.

- Contraste (Gadolinio): Los componentes sólidos y las paredes del quiste suelen presentar un realce intenso y marcado.

### Sintomatología

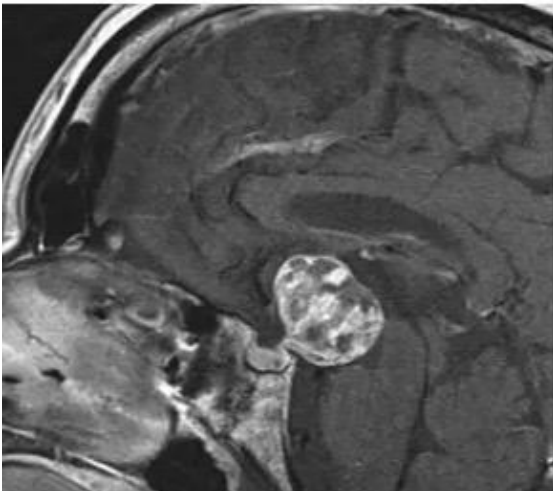
- Endocrina: Retraso en el crecimiento, diabetes insípida o hipotiroidismo por afectación del eje hipotálamo-hipofisario.
- Neurológica: Cefalea e hidrocefalia si el tumor obstruye los agujeros de Monro en el tercer ventrículo.

### Importancia en fRM

Teniendo en cuenta que estos tumores pueden invadir o desplazar el piso del tercer ventrículo y el fórnix, la fRM ayuda a identificar áreas del sistema límbico relacionadas con la memoria para evitar el "síndrome de daño hipotalámico" postoperatorio.

### Figura 42

*Resonancia magnética cerebral en corte sagital T1 contrastado mostrando una lesión expansiva tumoral en la región selar y supraselar*



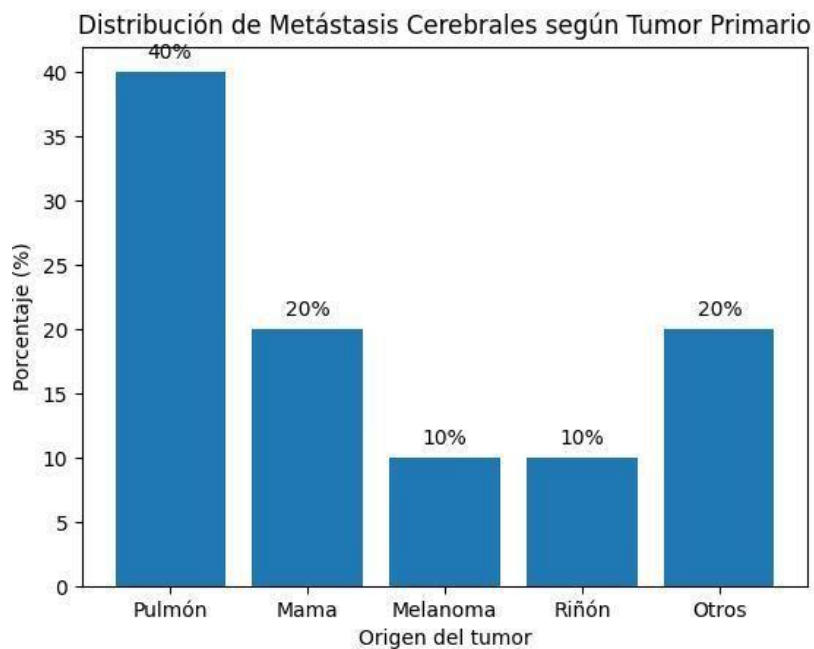
*Nota.* La imagen de resonancia magnética (image\_1c189d.png) evidencia una masa voluminosa con realce heterogéneo tras la administración de medio de contraste. Se observa un marcado crecimiento supraselar que deforma el piso del tercer ventrículo y ejerce un efecto de masa directo sobre las estructuras vecinas.

### Metástasis Cerebrales

Las metástasis cerebrales no se consideran tumores primarios del sistema nervioso central, sino lesiones secundarias derivadas de neoplasias extracraneales, siendo las más frecuentes aquellas originadas en pulmón, mama, riñón y melanoma cutáneo. Desde una perspectiva clínico-radiológica, su clasificación no se fundamenta en criterios histológicos propios del tejido cerebral, sino en variables como el tumor primario de origen, el número de lesiones (únicas, oligometastásicas (2-4 lesiones) o múltiples) y su localización anatómica dentro del encéfalo, factores que determinan el pronóstico y las estrategias terapéuticas (Soffietti et al., 2017; Nayak et al., 2012).

#### Figura 43

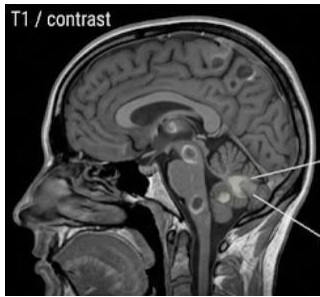

*Distribución de metástasis cerebrales según el tumor primario de origen. Se observa una mayor prevalencia de metástasis provenientes de cáncer de pulmón, seguido por mama, melanoma y riñón.*



*Nota.* Elaboración propia basada en datos reportados en la literatura oncológica (Soffietti et al., 2017; Nayak et al., 2012).

A diferencia de los tumores primarios del SNC, como los Gliomas o los Meningiomas, cuyo comportamiento biológico y clasificación dependen de su grado histológico, las metástasis requieren un enfoque centrado en su impacto funcional y en la alteración de la arquitectura cerebral. En este contexto, la planificación neuroquirúrgica moderna se basa en la relación espacial de la lesión con las áreas elocuentes del cerebro, tales como las regiones motoras, del lenguaje y sensoriales, las cuales pueden verse desplazadas o comprimidas por el efecto de masa tumoral. Por ello, la indicación de la resonancia magnética funcional (fRM), incluyendo su modalidad en estado de reposo (rs-fRM), no depende del tipo histológico del tumor primario, sino de la necesidad de mapear dichas áreas críticas para preservar la función neurológica durante la resección quirúrgica. Esta aproximación permite optimizar la extensión de la resección (EOR) y minimizar la morbilidad postoperatoria, consolidando a la neuroimagen funcional como una herramienta esencial en el abordaje integral de las metástasis cerebrales (Duffau, 2014; Biswal et al., 1995).

**Tabla 7***Clasificación de metástasis Cerebrales*

Categoría	Tipos de Metástasis	Detalles	Representación
Por Origen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pulmón</li> <li>• Mama</li> <li>• Riñón</li> <li>• Melanoma</li> </ul>	<p>Cáncer de mama</p> <p>Es la segunda causa más frecuente y tienen una alta tendencia a localizarse en el cerebelo (infratentorial).</p>	<p>Figura 44</p> <p><i>Resonancia magnética cerebral en plano sagital, secuencia T1 ponderada con contraste</i></p>  <p><i>Nota.</i> Se observan lesiones intraaxiales en el tallo cerebral y hemisferio cerebeloso</p>
		<p>Cáncer de Pulmón</p> <p>Son células de apariencia grande y suelen ser lesiones bien delimitadas, pero con gran edema.</p>	<p>Figura 45</p> <p><i>Resonancia Magnética axial en secuencia T2-FLAIR</i></p>  <p><i>Nota.</i> La línea superior señala el área de hiperintensidad correspondiente a edema vasogénico, mientras que la línea inferior señala el núcleo de la lesión (efecto de masa)</p>

Melanoma: Se caracterizan por ser altamente hemorrágicas.

Nota: tanto el cancer de riñon como el Melanoma, pueden generar artefactos al momento

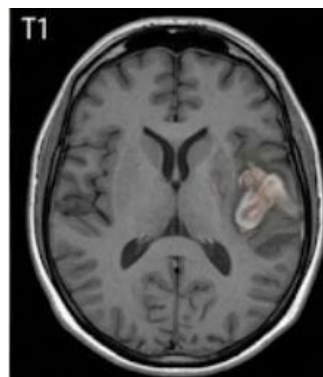
de realizar el mapeo con la técnica fRM debido a su desacoplamiento neurovascular y las Melanoma por la presencia de productos sanguíneos (hemosiderina).

#### Cáncer de Riñón

Es el carcinoma de células renales y se caracterizan por ser tumores muy vascularizados.

Figura 47

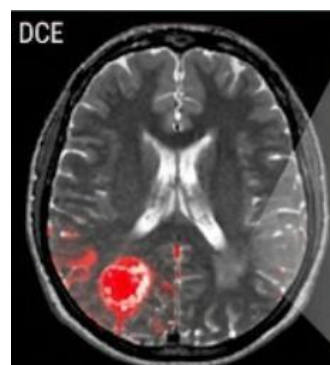
*Resonancia magnética cerebral en secuencia T1 axial en un caso de melanoma metastásico*



*Nota.* Las metástasis por melanoma se caracterizan radiológicamente por su naturaleza altamente hemorrágica y la presencia de melanina.

Figura 46

*Resonancia Magnética cerebral funcional Mediante secuencia de perfusión DCE*

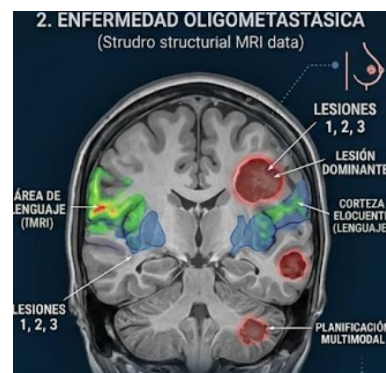


*Nota.* Corte axial que muestra mapa de perfusión cuantitativo superpuesto.

- Por numero
- Única Enfermedad Oligometastásica
  - Oligometastásica (2–4 lesiones): Hace referencia a un estado intermedio donde el número de metástasis es limitado, con base al ámbito quirúrgico se opera la lesión que causa más efecto de masa y la más grande/la que produce más edema o la que pone en riesgo una función vital. Las demás se tratan con Radiocirugía.
  - Múltiples

**Figura 48**

*Planificación neuroquirúrgica multimodal mediante resonancia magnética funcional*

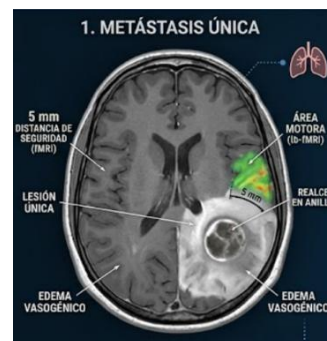


*Nota.* oligometastásica de origen mamario. El plano coronal

**Metástasis Única** Se define como la presencia de una sola lesión detectable en el cerebro, sin evidencia de enfermedad en otras partes del cuerpo o como un tumor primario que se encuentra controlado. Se define que puede ser guiada por la técnica fRM si se encuentra en un área elocuente y obtener una resección completa.

**Figura 49**

*Localización Anatómica de áreas elocuentes motoras y caracterización del tejido peritumoral*



*Nota.* Resonancia magnética axial contrastada que correlaciona una lesión tumoral única y su edema periférico con las áreas motoras elocuentes funcionales

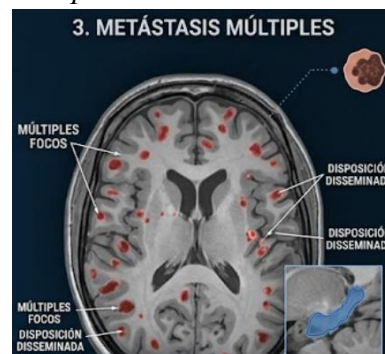
---

**Metástasis Múltiples:**

Se define técnicamente cuando existen más de 4 o 5 lesiones. Con referencia al ámbito quirúrgico la neurocirugía se vuelve excepcional y solo se hará si una de las lesiones es “amenazante para la vida”.

**Figura 50**

*Mapeo neuroquirúrgico multimodal en un escenario de metástasis cerebrales múltiples diseminadas*



*Nota.* Corte axial volumétrico que ilustra un patrón tumoral profuso y bilateral. En el ámbito neuroquirúrgico, las metástasis múltiples se definen técnicamente ante la presencia de más de 4 o 5 lesiones intracraneales.

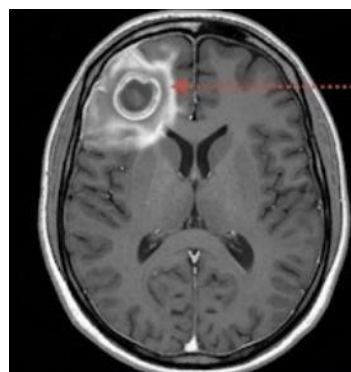
---

Por localización

- **Supratentorial** Metástasis Supratentoriales Suelen ser las más frecuentes y su localización es en los lóbulos cerebrales.
- **Infratentorial**
- En áreas elocuentes vs no elocuentes

### Figura 51

*Resonancia magnética cerebral axial en secuencia T1 ponderada con medio de contraste*



*Nota.* Estudio estructural evidencia una lesión ocupante de espacio intraaxial localizada en el lóbulo frontal derecho.

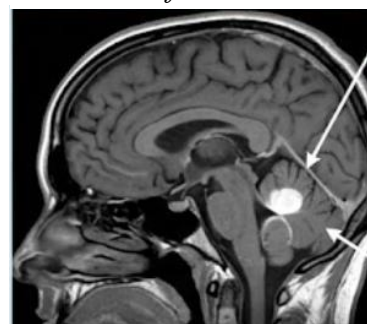
### Infratentoriales

Localizadas en la fosa posterior (cerebelo/tronco).

Con referencia a la técnica el mapeo funcional en esta área es más compleja y por eso se prefiere el estado de reposo rs-fRM.

### Figura 52

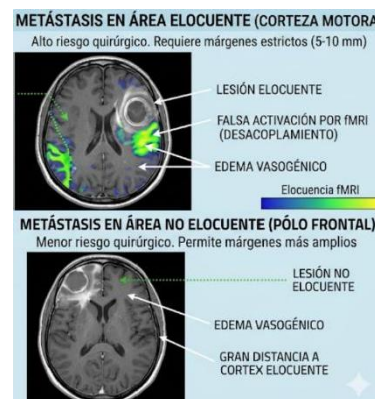
*Resonancia magnética cerebral sagital (T1 con contraste) de lesiones tumorales infratentoriales*



*Nota.* La flecha superior delimita una masa cerebelosa con realce homogéneo y la flecha inferior indica su relación con el tronco encefálico

Áreas Elocuentes vs. No Elocuentes: Una metástasis en el lóbulo frontal derecho (no elocuente) permite un margen de resección amplio, mientras que una en el giro pre-central (motor) exige una distancia de seguridad mínima de 5-10 mm validada por fRM.

**Figura 53**  
*Áreas Elocuentes vs. No Elocuentes*



*Nota.* Planificación y márgenes de seguridad en neurocirugía guiada por fRM

Por resecabilidad

- Resección quirúrgica posible
  - No resecable
- Resecable: Lesión accesible quirúrgicamente, paciente con buen estado funcional y tumor primario controlado.

**Figura 54**  
*Lesión Resecable en Paciente con Buen Estado Funcional*

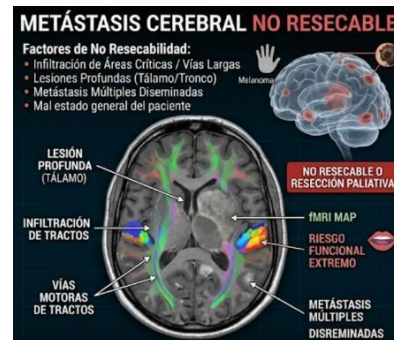


*Nota.* Una lesión se define técnicamente como resecable cuando es accesible quirúrgicamente, el paciente presenta un buen estado funcional basal (Karnofsky) y el tumor primario se encuentra controlado

No resecable: Lesiones muy profundas (tálamo, ganglios basales), pacientes con enfermedad sistémica terminal o lesiones que envuelven arterias principales.

### Figura 55

*Lesión no Resecable en Pacientes con Enfermedad sistémica terminal*



*Nota.* El estudio integra un mapa de resonancia funcional (fRM) con tractografía por tensor de difusión, evidenciando la infiltración directa de las vías motoras de tractos de sustancia blanca, escenario donde la cirugía convencional es desplazada por el manejo paliativo debido al riesgo inminente de secuelas neurológicas permanentes.

*Nota.* Elaboración propia

## Metodología

La presente investigación se desarrollará bajo un enfoque cualitativo de tipo documental, mediante una revisión sistemática de la literatura. Este método permite identificar, evaluar e interpretar de manera objetiva toda la evidencia disponible relevante para responder a la pregunta de investigación sobre el impacto de la fRM en la preservación funcional y extensión de la resección tumoral.

### Diseño de la Investigación

El estudio se estructurará siguiendo y asegurando un proceso sistemático dividido en las siguientes fases:

#### *Estrategia de Búsqueda y Fuentes de Información*

Se realizará una búsqueda exhaustiva en bases de datos indexadas de alto impacto científico: PubMed/Medline, ScienceDirect, Scopus y la Biblioteca Cochrane.

**Descriptor (DeCS/MeSH).** Se utilizarán términos controlados y operadores booleanos (AND, OR).

**Estrategia de Búsqueda Sugerida.** (Functional Magnetic Resonance Imaging OR fRM) AND (Brain Neoplasms OR Glioma) AND (Neurosurgical Procedures OR Resection Margin) AND (Resting State).

**Periodo de Tiempo.** Publicaciones realizadas entre enero de 2021 y el año 2026, para garantizar la actualidad tecnológica de la evidencia.

**Criterios de Inclusión y Exclusión.** Para garantizar el rigor del nivel del pregrado, se definen los siguientes parámetros:

**Inclusión.** Estudios clínicos originales (ensayos controlados aleatorios, estudios de cohorte y casos y controles), revisiones sistemáticas con metaanálisis y estudios de validación radiológica que comparen fRM (tarea y reposo) con resultados quirúrgicos.

**Exclusión.** Reportes de casos aislados, editoriales, estudios en modelos animales o investigaciones que no incluyan medidas de desenlace claras (como el porcentaje de resección o escalas funcionales postoperatorias).

### ***Procedimiento de Selección y Extracción de Datos***

**Identificación** Eliminación de registros duplicados mediante gestores bibliográficos (Mendeley/Zotero).

**Cribado (Screening)** Revisión de títulos y resúmenes para descartar artículos irrelevantes.

**Idoneidad** Lectura a texto completo de los artículos seleccionados para verificar el cumplimiento de los criterios de inclusión.

**Extracción** Se diseñará una matriz de datos en Microsoft Excel que recolecte: autor, año, técnica de fRM utilizada (Task vs. Resting State), tipo de tumor, área funcional evaluada (motora/lenguaje), extensión de la resección (EOR) y déficits neurológicos postoperatorios.

## **Análisis y Síntesis de Resultados**

Dado el carácter cualitativo y la heterogeneidad esperada en los protocolos de imagen, se realizará una síntesis narrativa de evidencia. Los resultados se agruparán en categorías temáticas:

Eficacia de la fRM de reposo frente a la de tarea en pacientes con bradipsiquia o déficit motor.

Impacto en el margen de resección tumoral.

1. Relación entre el mapeo preoperatorio y la reducción de secuelas funcionales.

## Marco Legal

La elaboración de la presente monografía se fundamenta en el marco normativo que regula el ejercicio de las profesiones de la salud y la gestión de la seguridad del paciente. El sustento legal primario radica en el derecho fundamental a la salud y a la integridad física, el cual obliga a que toda práctica clínica y su respectiva fundamentación teórica como la aquí expuesta sobre fRM se orienten a la mitigación de riesgos y a la optimización de los resultados quirúrgicos.

Desde la perspectiva de la responsabilidad profesional, este trabajo se ampara en las leyes de ética médica y del ejercicio de la radiología (como la Ley 23 de 1981 y la Ley 657 de 2001 en el contexto colombiano). Estas normas establecen que el profesional tiene el deber legal de utilizar los medios de diagnóstico más precisos disponibles para garantizar la seguridad del paciente. En este sentido, la revisión sistemática de la fRM y la rs-fRM que se realiza en esta monografía se justifica legalmente como una actualización de la “Lex Artis”, aportando evidencia que respalda el uso de tecnologías para evitar eventos adversos como la afasia o la hemiplejía.

Asimismo, el desarrollo de esta investigación cumple con la normativa sobre la gestión de la seguridad del paciente, donde la omisión de técnicas de mapeo funcional en tumores cercanos a áreas críticas podría tipificarse como una falla en el servicio. La monografía, por tanto, se alinea con los protocolos de calidad hospitalaria que exigen la implementación de barreras de seguridad técnica para reducir la morbilidad posquirúrgica, otorgando validez administrativa a los hallazgos aquí sintetizados. En el ámbito internacional, el estudio se acoge a los criterios de la Organización Mundial de la Salud (OMS) para la clasificación y tratamiento de tumores del sistema nervioso central. Al basar la monografía en estos

estándares, se asegura que la propuesta técnica para la preservación funcional cumpla con los requisitos legales de proporcionalidad y medicina de precisión. Finalmente, el análisis de la fRM se sustenta en las leyes de protección a personas en condición de discapacidad, garantizando que el marco teórico de este trabajo promueva el derecho a un diagnóstico de alta calidad sin discriminación por la condición cognitiva o la edad del paciente.

**Tabla 8**

*Marco legal*

Autor	Año	Artículo	Relación con el tema
Constitución Política de Colombia	1991	Artículo 49	Establece la atención de la salud como un servicio público a cargo del Estado. Respalda el derecho del paciente a recibir diagnósticos precisos mediante tecnologías como la fRM para garantizar su integridad física.
Constitución Política de Colombia	1991	Artículos 11 y 12	Garantizan el derecho a la vida y la integridad personal. Sustentan el uso de la fRM para evitar secuelas motoras o del lenguaje que afecten la calidad de vida.
Jurisprudencia sobre la Lex Artis	N/A	Criterio jurídico	Define el estándar de la práctica médica y respalda el uso del mapeo funcional cuando la tecnología está disponible.
Ley 23 (Ética Médica)	1981	Artículo 1, numeral 3	Indica que el médico debe utilizar los medios diagnósticos disponibles para una atención segura y eficaz.
Ley 1581 (Habeas Data)	2012	Artículo 5	Clasifica los datos de salud e imágenes diagnósticas como datos sensibles y regula su protección.

Resolución 3100	2019	Estándares de procesos prioritarios	Exige protocolos de seguridad del paciente; la fRM funciona como barrera técnica para prevenir eventos adversos.
Ley 657 (Ley del Radiólogo)	2001	Artículo 2	Regula el ejercicio profesional en radiología e imágenes diagnósticas y la responsabilidad en la interpretación de estudios.
Resolución 1811	2025	—	Regula el uso de equipos generadores de radiación ionizante y los controles de calidad en Colombia.

*Nota.* Elaboración propia

## Consideraciones Éticas

La realización de la presente monografía se rige por principios de integridad científica y responsabilidad profesional en el manejo de información de salud. Al tratarse de una revisión sistemática que analiza el impacto de la Resonancia Magnética Funcional (fRM) en la seguridad quirúrgica, el estudio asume un compromiso ético con la veracidad y la actualización de la evidencia, reconociendo que la precisión de los datos analizados incide directamente en la prevención de lesiones iatrogénicas en áreas elocuentes.

En primer lugar, la investigación se fundamenta en el principio de no maleficencia. La recopilación y síntesis de protocolos avanzados de neuroimagen buscan proporcionar herramientas que mitiguen el riesgo de déficits neurológicos permanentes, como hemiplejias o afasias, los cuales se clasifican como eventos adversos de alto impacto. Éticamente, el trabajo promueve que el uso de la señal BOLD y la rs-fRM no sea solo una opción técnica, sino una barrera de seguridad indispensable para proteger la integridad funcional y la calidad de vida del paciente.

Respecto al tratamiento de la información, el desarrollo de este trabajo garantiza el respeto a la privacidad y confidencialidad. Aunque la metodología se basa en la revisión de literatura existente, se mantiene un estricto rigor en el manejo de datos clínicos e imágenes diagnósticas citadas, asegurando que la gestión de estos recursos se alinee con las normativas de protección de datos sensibles. Se reconoce que los mapas de conectividad funcional son datos biológicos críticos cuya custodia es esencial para evitar el uso indebido de la información neurobiológica.

Finalmente, la monografía aborda la ética desde la equidad y la inclusión en el diagnóstico. Se otorga especial relevancia a la fRM de reposo (rs-fRM) como una alternativa

ética para pacientes que, por su condición clínica, edad o déficit cognitivo, no pueden cooperar con tareas activas. De este modo, la realización del trabajo respalda el derecho de las poblaciones vulnerables a acceder a una neurocirugía de precisión, garantizando que las limitaciones conductuales no sean un impedimento para recibir una atención de salud con los más altos estándares de seguridad y calidad técnica.

## Análisis Sistemático

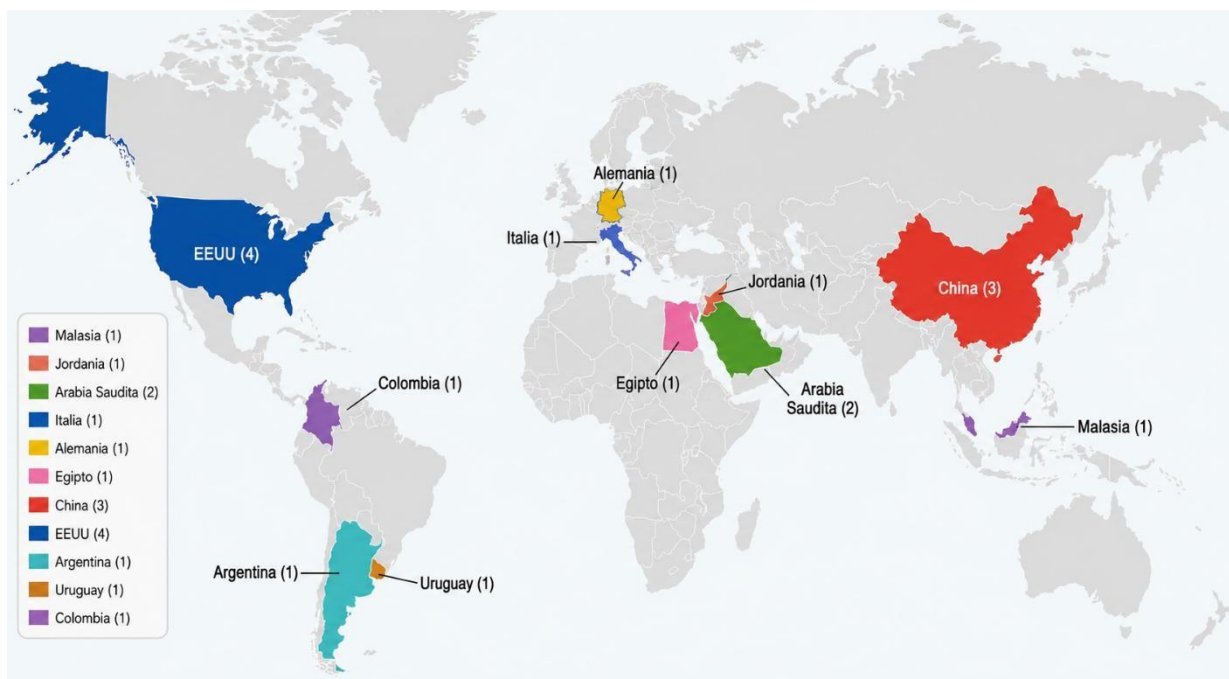
### Base de Datos

<https://docs.google.com/spreadsheets/d/1EMUWc5RRXJ2uFGir3axnhPyCBoQsl9anhOaHsvxKuY/edit?usp=sharing>

### Resultados

#### Figura 56

*Distribución geográfica global y frecuencia de publicaciones científicas sobre el uso de fRM y rs-fRM en la planificación preoperatoria de tumores cerebrales*



*Nota.* El mapa ilustra el país de origen y la frecuencia absoluta de la producción científica correspondiente a los artículos seleccionados para la presente revisión  $N = 15$ . Se observa una concentración de la evidencia en Norteamérica (EE. UU,  $n=4$ ) y Asia Oriental (China,  $n=3$ ), seguidos por una participación emergente de países latinoamericanos (Colombia, Argentina y Uruguay) y del Medio Oriente. Las publicaciones recopiladas evalúan el impacto del mapeo cortical mediante Resonancia Magnética Funcional basada en Tareas (tb-fRM) y en Estado de Reposo (rs-fRM) para optimizar los márgenes de resección tumoral y la preservación de áreas elocuentes.

## **Análisis e Interpretación de Distribución Geográfica Global**

El análisis geográfico de la literatura científica seleccionada permite conocer la centralización tecnológica, acompañado de una notable diversificación e interés clínico en regiones emergentes. Los datos estadísticos demuestran un porcentaje del 41.18% de los países con más prevalencia científica y tecnológica de investigación, en Estados Unidos (23.53%, n = 4) y China (17.65%, n = 3).

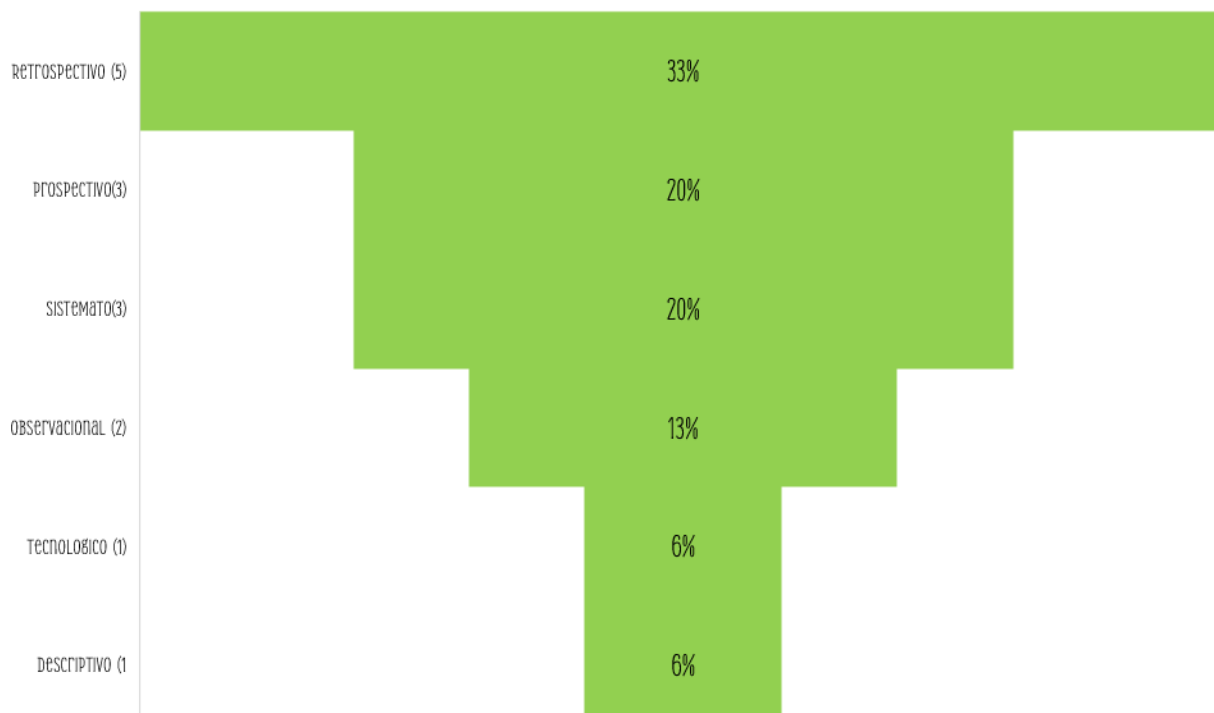
Desde la perspectiva del área de la salud y las imágenes diagnósticas, esta concentración en Norteamérica y Asia Oriental está directamente vinculada a la disponibilidad de infraestructura de vanguardia. La implementación rutinaria de protocolos avanzados de Resonancia Magnética Funcional basada en Tareas (tb-fRM) y en Estado de Reposo (rs-fRM) requiere sistemas de alto campo magnético mínimo un resonador de 3 Tesla, así como plataformas de post-procesamiento especializadas (tales como FSL, SPM o CONN) que demandan un alto soporte computacional, físico y de bioingeniería.

Este análisis demuestra que las técnicas seleccionadas han permitido una transferencia de conocimiento en la neuroimagen y ha roto las barreras para el logro de resección quirúrgica con éxito, y que las instituciones de salud latinoamericanas están adaptando con éxito algoritmos de alta complejidad (como el Análisis de Componentes Independientes - ICA o el Análisis de Semillas) para optimizar la seguridad en la resección de tumores cerebrales locales.

En conclusión, la distribución geográfica permite analizar que, si bien el desarrollo de software y la estandarización matemática de las secuencias funcionales (tanto activas como pasivas) son herramientas impulsadoras para la aplicabilidad de los mapas metabólicos para maximizar el porcentaje de resección y proteger el estatus funcional del paciente y que es hoy en día un objetivo de la medicina globalizada.

**Figura 57**

*Distribución porcentual de la muestra documental según el diseño metodológico de los estudios seleccionados*



*Nota.* Distribución porcentual y absoluta de los tipos de diseño analizados de los artículos N = 15. Estos valores representan la proporción de estudios retrospectivos n=5, prospectivos n=3, sistemáticos n=3, observacionales n=2, tecnológicos n=1 y descriptivos n=1 que fundamentan teóricamente el uso de la fRM (tarea y en reposo) para la delimitación segura de los márgenes elocuentes peri tumorales.

### **Análisis e Interpretación de Diseño Metodológico**

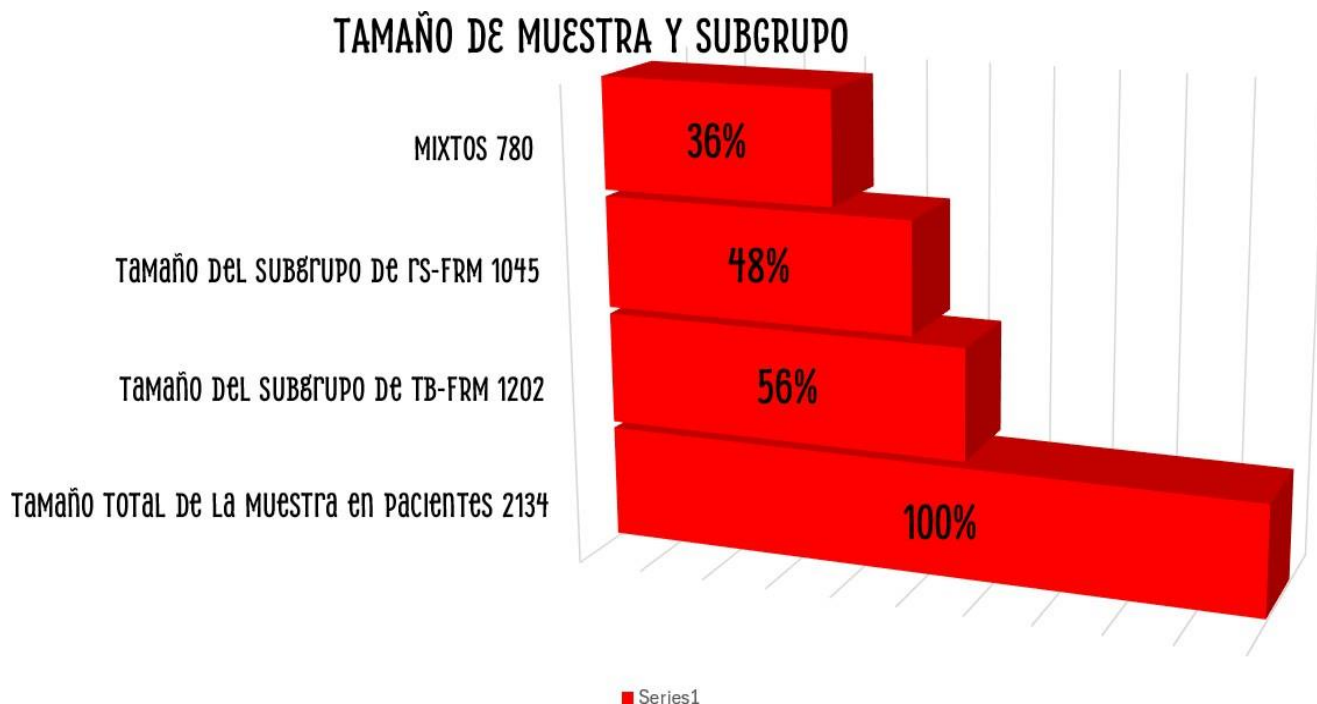
El diseño metodológico predominante corresponde al enfoque Retrospectivo con un 33% n = 5 del total de la muestra. Desde la perspectiva del análisis estadístico en el área de las imágenes diagnósticas, este predominio se justifica plenamente debido a la viabilidad operativa que ofrecen los datos históricos en entornos hospitalarios. Los estudios retrospectivos permiten

compilar de manera masiva los registros de grandes cohortes de pacientes con tumores cerebrales. Gracias a esto, los investigadores logran correlacionar con un alto poder estadístico cómo los mapas neuro funcionales preoperatorios obtenidos mediante tb-fRM o rs-fRM se tradujeron efectivamente en mayores tasas de Resección Completa o en la preservación de la calidad de vida a largo plazo,

Paralelamente, se registra una comparación metodológica entre los diseños de carácter Prospectivo de un 20.00%, n = 3 y las Revisiones Sistemáticas 20%, n = 3. Permitiendo elevar significativamente el nivel de evidencia biológica. Estos estudios evalúan de forma controlada el protocolo funcional desde la fase preoperatoria diseñando parámetros técnicos precisos en el resonador, por otro lado, el 26% restante de la muestra documental se distribuye entre enfoques Observacionales 13%, n = 2, Tecnológicos 6. %, n = 1 y Descriptivos 6%, n = 1. Para el campo de la Tecnología en Radiología e Imágenes Diagnósticas, la presencia de estudios de corte tecnológico y descriptivo posee un valor fundamental. Estos métodos literarios no se centran en el desenlace quirúrgico macroscópico, sino en la validación técnica del protocolo evaluando así la optimización de las secuencias de pulsos, los gradientes, la mitigación de artefactos por susceptibilidad magnética perilesional y el diseño de los paradigmas de tareas que el paciente debe ejecutar dentro del resonador.

**Figura 58**

*Distribución poblacional total y representatividad de los subgrupos según la modalidad de adquisición neuro funcional*



*Nota.* El gráfico detalla el tamaño de la muestra global  $N = 2134$  pacientes y el alcance de las modalidades de resonancia funcional aplicadas en la literatura analizada. La prevalencia de la técnica basada en tareas tb-fRM, 56 y el estado de reposo rs-fRM, 48% demuestra el equilibrio de la evidencia. El subgrupo de protocolo mixto 36% representa a individuos sometidos a ambas secuencias de forma complementaria, lo que justifica por qué la suma de las frecuencias relativas excede el 100% de la población base.

## **Análisis e Interpretación del Total de Pacientes**

Las estadísticas de los datos sociodemográficos y metodológicos integrados en la presente revisión permiten una robustez científica excepcional, sustentada con un total 2134 pacientes intervenidos por lesiones tumorales intracraneales. Dejando el ámbito de la investigación radiológica y neuroquirúrgica, contar con una muestra que supera poder estadístico para los hallazgos sobre la pertinencia de la resonancia magnética funcional (fRM) preoperatoria.

Al analizar los subgrupos funcionales, la modalidad basada en tareas (tb-RM) mantiene una superioridad estadística al realizarse en el 56% de la muestra global  $n = 1202$ . Desde la perspectiva de la tecnología en imágenes diagnósticas, este porcentaje confirma que los paradigmas neuro funcionales activos (tales como la activación motora mediante el golpeteo de dedos o tareas de fluidez verbal) siguen considerándose el estándar de referencia clínico primario. Esto se debe a su capacidad directa de evocar cambios metabólicos medibles mediante el gradiente de la señal BOLD en áreas de elocuencia cortical críticas adyacentes a los márgenes quirúrgicos del tumor.

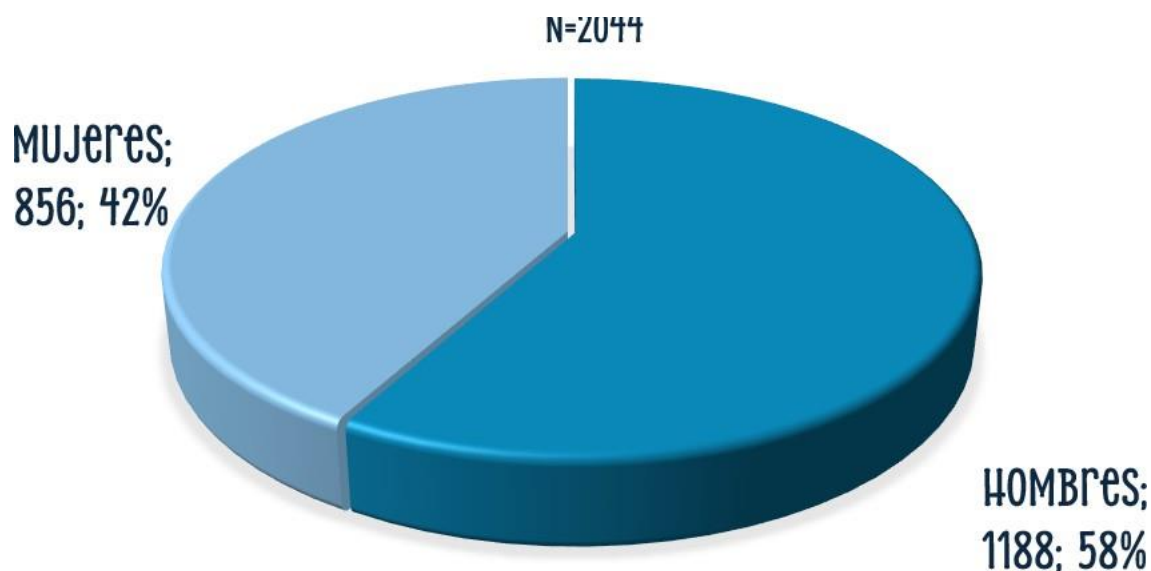
De manera paralela y competitiva, la resonancia funcional en estado de reposo (rs-RM) demuestra una consolidación clínica contundente al registrarse en el 48% de la población analizada  $n = 1045$ . Metodológicamente, este elevado porcentaje refleja la madurez y aceptación diagnóstica de las técnicas de conectividad pasiva. La rs-fRM se entiende como una herramienta de rescate clínico indispensable para casi la mitad de la cohorte, permitiendo el mapeo de redes neuronales completas (como la red somato motora o del lenguaje) en pacientes que cursan con afasias, parálisis motrices severas, sedación pediátrica o deterioro cognitivo, quienes clínicamente están incapacitados para cooperar con los paradigmas activos de tb-fRM.

Un hallazgo de especial valor analítico para esta discusión es la convergencia matemática

reflejada en el subgrupo de Protocolo Mixto con un 36%  $n = 780$ . Este porcentaje poblacional donde los sujetos fueron sometidos a ambas secuencias dentro de la misma sesión de resonancia para la validación de ambos estudios.

**Figura 59**

*Distribución Demográfica por Sexo de la Población con Lesiones TumORAles Cerebrales Sometida a Mapeo Neuro Funcional*



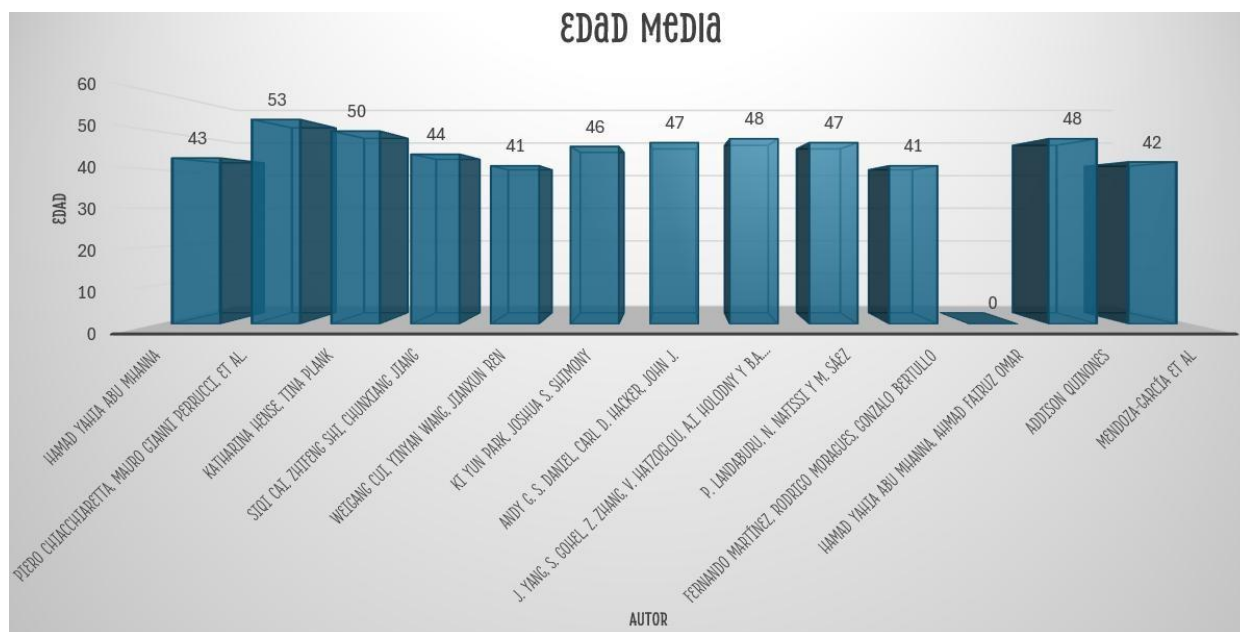
*Nota.* La grafica detalla la composición por sexo de la muestra total analizada en la revisión, conformada por una población evaluable de 2044 pacientes  $n = 1188$  hombres y  $n = 856$  mujeres. Se observa un predominio del sexo masculino con el 58% de los casos, frente a un 42% del sexo femenino. Esta distribución es consistente con los reportes epidemiológicos globales sobre tumores del sistema nervioso central.

## Análisis e Interpretación de Proporción de Sexo en Pacientes

Al analizar las variables demográficas de la población de estudio  $N=2045$ , se observó una distribución asimétrica en cuanto al sexo de los pacientes. El grupo mayoritario correspondió al sexo masculino con un 58% ( $n=1188$ ), mientras que el sexo femenino representó el 42% ( $n=856$ ) de la muestra total, esta relación de 1.4 hombres por cada mujer coincide con la tendencia epidemiológica global reportada en la literatura para neoplasias intracraneales, donde se describe una mayor susceptibilidad e incidencia en la población masculina, lo cual justifica el impacto de los factores biológicos y de género en el comportamiento de esta patología. Finalmente, en la literatura neuro oncológica internacional como los informes, libros y artículos, se describe consistentemente que los tumores cerebrales primarios malignos, especialmente los gliomas (astrocitomas, oligodendrogliomas y glioblastomas), presentan una tasa de incidencia entre un 30% al 50% mayor en los hombres.

### Figura 60

*Edad Media De Los Pacientes Oncológicos Incluidos En Los Protocolos De Fmri Por Autor*



*Nota.* El gráfico detalla el promedio de edad reportado por los diferentes autores en sus respectivas

muestras clínicas. Se observa una concentración demográfica constante en la población adulta, con una edad media que oscila entre los 41 y 53 años.

### **Análisis e Interpretación Basada en la Edad Media**

La distribución de la edad media reportada en los estudios incluidos evidenció una concentración predominante de pacientes adultos entre la cuarta y sexta década de la vida. Las edades promedio oscilaron entre los 41 y 53 años en la mayoría de las investigaciones analizadas, observándose el valor más alto en el estudio de Pedro Chacaltana Mauro Gianfranco et al., con una media de 53 años, seguido por Katharina Hegens Tina Plank y colaboradores con 50 años. De manera similar, diversos estudios reportaron edades promedio entre 46 y 48 años, consolidando una tendencia relativamente homogénea en cuanto al perfil etario de la población evaluada. Únicamente uno de los artículos presentó un valor de cero, correspondiente probablemente a la ausencia de reporte específico de la edad media dentro de la publicación analizada.

Estos hallazgos sugieren que la mayor parte de las investigaciones sobre resonancia magnética funcional (fRM) y resonancia funcional en estado de reposo (rs-fRM) aplicadas a tumores cerebrales se han desarrollado principalmente en población adulta de mediana edad, grupo etario en el que la incidencia de neoplasias cerebrales primarias, especialmente gliomas, presenta una elevada relevancia clínica y epidemiológica. Esta distribución resulta coherente con la literatura neuro oncológica actual, la cual describe un incremento en la frecuencia de tumores cerebrales entre la quinta y sexta década de la vida, particularmente en lesiones de alto grado.

Desde una perspectiva clínica, la edad constituye una variable de gran importancia en pacientes con tumores cerebrales, debido a su influencia directa sobre el pronóstico, la

capacidad funcional, la tolerancia quirúrgica y la recuperación neurológica postoperatoria. En consecuencia, la concentración de estudios en pacientes adultos de mediana edad podría explicarse porque este grupo representa la población con mayor indicación de procedimientos neuroquirúrgicos orientados hacia resecciones extensas con preservación funcional, objetivo central de la resonancia magnética funcional y de reposo.

Adicionalmente, el predominio de edades medias entre 40 y 50 años puede relacionarse con la necesidad de preservar funciones cognitivas, motoras y del lenguaje en pacientes que aún mantienen una importante actividad laboral, social y familiar. En este contexto, las herramientas de mapeo cerebral funcional adquieren un valor significativo, ya que permiten reducir el riesgo de déficits neurológicos permanentes y optimizar la calidad de vida posterior al tratamiento quirúrgico. Por tanto, la edad promedio observada en los estudios incluidos no solo refleja características epidemiológicas de la enfermedad, sino también la priorización clínica de estrategias terapéuticas enfocadas en la preservación funcional del paciente.

La relativa homogeneidad en las edades reportadas entre los diferentes estudios también aporta consistencia metodológica a la presente revisión sistemática. La similitud etaria entre las poblaciones analizadas favorece la comparabilidad de resultados relacionados con activación cortical, conectividad funcional, extensión de la resección tumoral y desenlaces neurológicos postoperatorios. Asimismo, disminuye parcialmente la influencia de variables asociadas al envejecimiento cerebral avanzado, tales como atrofia cortical, disminución de la plasticidad neuronal o alteraciones vasculares que podrían modificar la interpretación de la señal funcional obtenida mediante resonancia magnética.

Por otra parte, la ausencia de una población predominantemente geriátrica dentro de los estudios analizados podría indicar una menor representación de adultos mayores en

investigaciones de resonancia magnética funcional aplicada a neurocirugía oncológica. Este comportamiento podría estar relacionado con factores clínicos como comorbilidades, limitaciones funcionales, menor elegibilidad quirúrgica o dificultades para la realización de paradigmas funcionales durante la adquisición de imágenes. De igual forma, la menor inclusión de pacientes pediátricos evidencia que gran parte de la investigación actual continúa concentrándose en tumores cerebrales del adulto.

Desde el punto de vista metodológico, el adecuado reporte de la edad media en la mayoría de los artículos incluidos representa un indicador favorable de calidad científica, debido a que esta variable constituye un elemento fundamental para caracterizar las poblaciones estudiadas y contextualizar los resultados funcionales y neuroquirúrgicos. La identificación precisa de las características demográficas permite fortalecer la validez externa de los hallazgos y facilita futuras comparaciones con otras revisiones sistemáticas y metaanálisis en neuroimagen funcional.

En términos generales, los resultados obtenidos evidencian que la investigación reciente sobre resonancia magnética funcional y de reposo en pacientes con tumores cerebrales se encuentra principalmente enfocada en población adulta de mediana edad, especialmente entre los 40 y 50 años. Esta tendencia refleja la importancia creciente de las estrategias de preservación funcional en pacientes neuro oncológicos activos desde el punto de vista cognitivo, laboral y social, consolidando a la neuroimagen funcional como una herramienta clave dentro de la planificación quirúrgica moderna orientada hacia procedimientos más seguros y personalizados.

**Figura 61**

*Clasificación Biológica Y Estadística De La Muestra Tumoral Según Los Criterios Histológicos Internacionales De La OMS*



*Nota.* El gráfico detalla la caracterización histopatológica de los tumores cerebrales evaluados en la cohorte N = 464 pacientes. Se evidencia un predominio de lesiones de Alto Grado (Grados III y IV) con el 58% n=268 de los casos, frente a un 41% n=189 de Bajo Grado (Grados I y II). Desde la perspectiva del radiodiagnóstico,

### **Análisis e Interpretación de Tumores Cerebrales Según la OMS**

La distribución de los tumores cerebrales incluidos en los estudios analizados evidenció un predominio de lesiones de alto grado según la clasificación de la Organización Mundial de la Salud (OMS), correspondientes a los grados III y IV, los cuales representaron el 58% de los casos analizados (n=268). Por su parte, los tumores de bajo grado, clasificados como grados I y

II, constituyeron el 41% de la muestra (n=189), mientras que únicamente el 1% de los artículos incluidos (n=7) no reportó el grado histopatológico tumoral. Esta distribución permite identificar una clara tendencia de la literatura científica reciente hacia el estudio de neoplasias cerebrales de comportamiento biológico agresivo, especialmente gliomas de alto grado, debido a las importantes implicaciones funcionales, quirúrgicas y pronósticas que presentan este tipo de lesiones.

El predominio de tumores de alto grado puede interpretarse como una consecuencia directa de la creciente necesidad de implementar estrategias avanzadas de planificación neuroquirúrgica en pacientes con lesiones infiltrativas localizadas cerca de áreas cerebrales elocuentes. En este contexto, la resonancia magnética funcional (fRM) y la resonancia funcional en estado de reposo (rs-fRM) adquieren una relevancia clínica significativa, ya que permiten identificar redes funcionales relacionadas con el lenguaje, la motricidad, la memoria y otras funciones corticales superiores, favoreciendo procedimientos quirúrgicos más seguros y orientados hacia la preservación neurológica del paciente.

Desde el punto de vista neuro oncológico, los tumores grado III y IV suelen presentar un comportamiento infiltrativo más agresivo, márgenes tumorales menos definidos y una mayor capacidad de comprometer estructuras funcionales críticas. Debido a ello, la extensión de la resección tumoral representa un reto importante para el neurocirujano, ya que debe alcanzarse un equilibrio entre la máxima resección posible y la preservación funcional postoperatoria. En consecuencia, la elevada representación de tumores de alto grado observada en esta revisión sistemática resulta coherente con el objetivo principal del estudio, orientado a evaluar el impacto de la resonancia magnética funcional y de reposo en la preservación funcional y en la extensión de la resección quirúrgica.

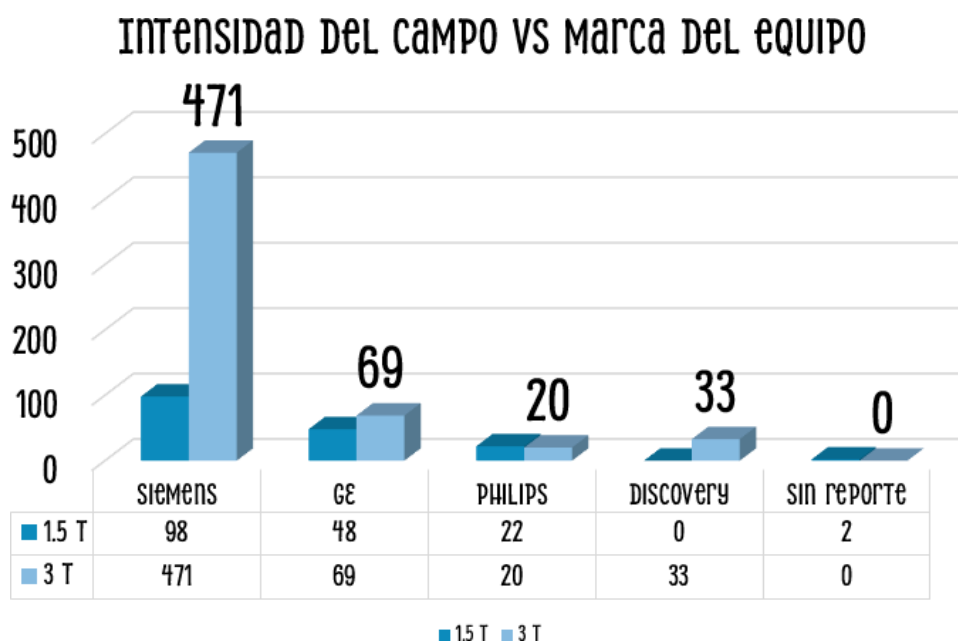
Adicionalmente, esta distribución tumoral permite inferir que la mayoría de las investigaciones recientes han priorizado escenarios clínicos complejos donde las herramientas de neuroimagen funcional poseen mayor utilidad diagnóstica y terapéutica. La literatura contemporánea ha demostrado que, en pacientes con gliomas de alto grado, la preservación de funciones neurológicas y la resección tumoral extensa se relacionan directamente con una mejor calidad de vida, mayor supervivencia global y disminución de déficits neurológicos permanentes. Por esta razón, los estudios seleccionados muestran una marcada inclinación hacia el análisis de tecnologías que permitan optimizar la planeación quirúrgica y disminuir la morbilidad asociada a procedimientos neuroquirúrgicos de alta complejidad.

Desde una perspectiva metodológica, la baja proporción de artículos que no reportaron el grado tumoral refleja una adecuada calidad en el reporte científico de los estudios incluidos. El grado histopatológico constituye una variable esencial dentro de la neuro oncología, debido a que condiciona el pronóstico, la conducta terapéutica y la interpretación de los desenlaces clínicos y funcionales. En este sentido, el reducido porcentaje de información no reportada disminuye el riesgo de sesgo de información y fortalece la confiabilidad de los hallazgos obtenidos en la presente revisión sistemática.

En términos generales, los resultados obtenidos evidencian que la investigación actual sobre resonancia magnética funcional y resonancia en estado de reposo se encuentra principalmente enfocada en tumores cerebrales de alto grado, donde la complejidad anatómica y funcional exige estrategias avanzadas de mapeo cerebral preoperatorio. Esta tendencia respalda la importancia creciente de las técnicas de neuroimagen funcional como herramientas fundamentales para favorecer resecciones quirúrgicas más amplias, seguras y orientadas a la preservación de la funcionalidad neurológica del paciente.

**Figura 62**

*Análisis Comparativo De Los Sistemas De Adquisición De Imagen Molecular Por Fabricante Y Teslaje*



*Nota.* El gráfico detalla la infraestructura tecnológica empleada en la muestra analizada  $N = 763$ . Se evidencia un predominio absoluto de la plataforma Siemens con un campo magnético de 3 Tesla  $n = 471$ , seguida por las soluciones de General Electric GE / Discovery,  $n = 102$  y Philips  $n = 20$ . En el área de la neuroimagen funcional fRM, el marcado predominio de sistemas de 3T 77% frente a los de 1.5T 22%.

### **Análisis e Interpretación de Intensidad de Resonador Utilizado**

La comparación entre la intensidad del campo magnético y la marca de los resonadores utilizados en los estudios incluidos permitió identificar una distribución tecnológica diferenciada entre equipos de 1.5 y 3 Tesla dentro de la literatura analizada. En los resonadores de 1.5 Tesla se evidenció un predominio de la marca Siemens, con 98 estudios reportados,

seguido por General Electric (GE) con 48 investigaciones y Philips con 22 estudios.

Únicamente dos artículos no reportaron la marca del equipo utilizado y no se identificaron estudios realizados con plataformas Discovery en esta intensidad de campo magnético.

Por otra parte, los resonadores de 3 Tesla mostraron igualmente una marcada predominancia de equipos Siemens, alcanzando 471 estudios, cifra considerablemente superior a la observada en los sistemas de 1.5 Tesla. GE representó 69 investigaciones, mientras que Philips participó en 20 estudios. Adicionalmente, se identificaron 33 investigaciones desarrolladas con plataformas Discovery, las cuales estuvieron exclusivamente asociadas a resonadores de 3 Tesla. Ninguno de los estudios correspondientes a esta intensidad omitió el reporte de la marca del equipo utilizado.

Estos resultados evidencian una clara tendencia de la investigación reciente hacia el uso de resonadores de 3 Tesla, particularmente en plataformas Siemens, dentro del contexto de la resonancia magnética funcional (fRM) y la resonancia funcional en estado de reposo (rs-fRM) aplicadas a tumores cerebrales. Esta predominancia puede interpretarse como consecuencia del avance progresivo de la neuroimagen de alto campo, la cual ofrece ventajas importantes en términos de resolución espacial, sensibilidad funcional y relación señal-ruido, aspectos fundamentales para la identificación precisa de áreas corticales elocuentes y redes neuronales complejas.

La marcada diferencia observada entre Siemens y los demás fabricantes en resonadores de 3 Tesla sugiere que esta compañía mantiene una posición dominante en el desarrollo e implementación de protocolos avanzados de neuroimagen funcional. Este comportamiento podría relacionarse con la amplia disponibilidad de plataformas Siemens en centros hospitalarios y académicos de referencia, así como con la integración de software especializado para análisis

funcional, tractografía y conectividad cerebral. Asimismo, numerosos protocolos utilizados en resonancia magnética funcional han sido históricamente desarrollados y optimizados en este tipo de plataformas, favoreciendo su adopción en investigaciones multicéntricas y estudios de alta complejidad neuroquirúrgica.

El incremento significativo del uso de resonadores de 3 Tesla frente a 1.5 Tesla también refleja la evolución tecnológica de las investigaciones neuro oncológicas durante los últimos años. Los sistemas de alto campo permiten obtener una mayor sensibilidad para la detección de cambios hemodinámicos asociados a la señal BOLD, lo que favorece una delimitación funcional más precisa en pacientes con tumores localizados cerca de áreas críticas del lenguaje, motricidad y funciones cognitivas superiores. En consecuencia, el uso creciente de equipos de 3 Tesla podría estar directamente relacionado con la necesidad de optimizar la planeación quirúrgica y maximizar la preservación funcional durante la resección tumoral.

En relación con las demás marcas, GE mantuvo una participación relevante tanto en equipos de 1.5 como de 3 Tesla, lo que evidencia su permanencia como una plataforma ampliamente utilizada en neuroimagen funcional. Por su parte, Philips mostró una participación relativamente estable entre ambas intensidades, aunque con una menor representación global frente a Siemens y GE. Este comportamiento podría indicar una presencia más limitada en estudios neuro funcionales de gran escala o una menor disponibilidad de estas plataformas en centros especializados de neurocirugía funcional.

Un hallazgo particularmente importante fue la aparición exclusiva de sistemas Discovery en resonadores de 3 Tesla. Este comportamiento podría sugerir que determinadas plataformas tecnológicas se encuentran principalmente orientadas hacia aplicaciones de alto campo y protocolos avanzados de adquisición funcional, especialmente en escenarios de investigación

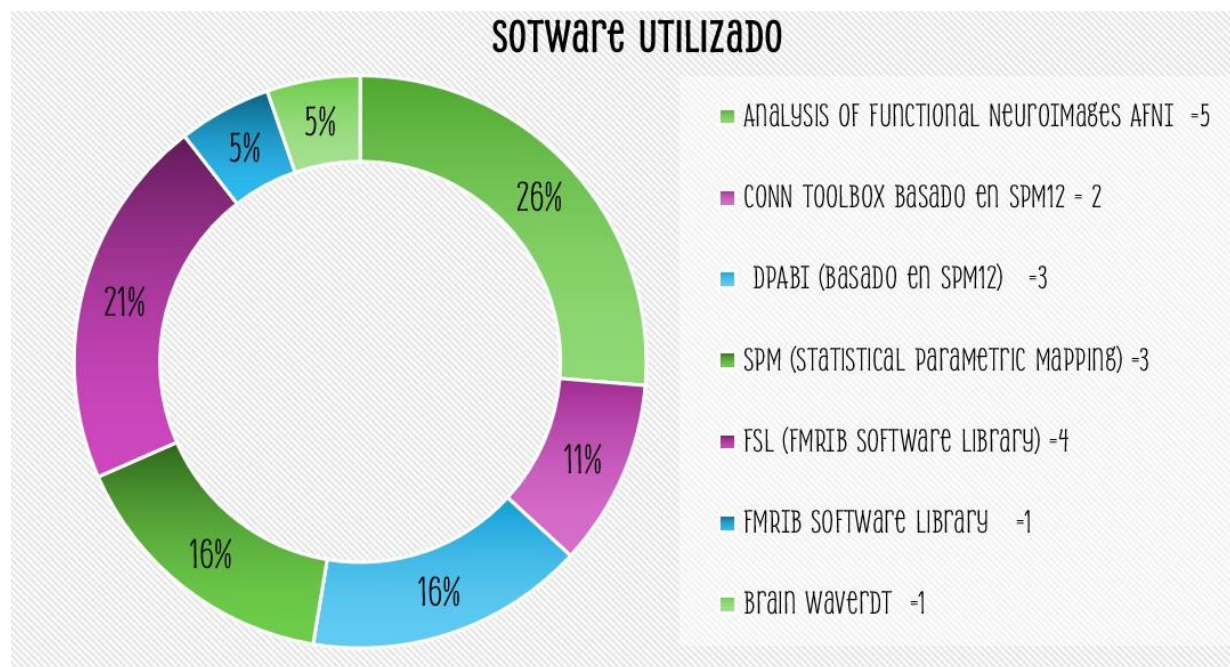
relacionados con conectividad cerebral y mapeo preoperatorio. La incorporación de estas tecnologías evidencia además la diversificación progresiva de herramientas empleadas en neuroimagen funcional contemporánea.

Desde una perspectiva metodológica, la baja proporción de estudios que omitieron reportar la marca del resonador utilizado constituye un indicador favorable de calidad científica y transparencia en la literatura analizada. La descripción detallada de las características técnicas del equipo representa un aspecto fundamental en estudios de resonancia magnética funcional, debido a que factores como la intensidad del campo magnético, el fabricante, las secuencias de adquisición y las configuraciones de hardware pueden influir directamente en la calidad de la señal funcional, reproducibilidad de resultados y comparabilidad entre investigaciones.

En términos generales, los hallazgos obtenidos evidencian que la investigación reciente sobre resonancia magnética funcional y de reposo en pacientes con tumores cerebrales se encuentra fuertemente orientada hacia el uso de resonadores de 3 Tesla, en especial plataformas Siemens, probablemente debido a sus ventajas tecnológicas en precisión diagnóstica y caracterización funcional cerebral. Esta tendencia refleja el avance continuo de la neuroimagen funcional como herramienta estratégica en la planificación neuroquirúrgica moderna, favoreciendo procedimientos más seguros, personalizados y enfocados en la preservación neurológica del paciente.

**Figura 63**

*Herramientas De Software Computacional Mapeadas En La Literatura Para La Segmentación Neuro Funcional Preoperatoria*



*Nota.* La gráfica detalla el entorno de software biomédico utilizado para el análisis estadístico de la fRM. Destacando el uso predominante de AFNI con un porcentaje de 26%, seguido por los entornos basados en SPM 16% posterior encontramos herramientas especializadas para conectividad en estado de reposo y tareas, DPABI 16% y CONN Toolbox 11%. La herramienta de FSL acumula un 26% combinado de la muestra.

### **Análisis e Interpretación de Tipo de Software Utilizado**

Se concluye que las herramientas de software empleadas para el procesamiento de las imágenes en los artículos seleccionados revelan un claro detalle metodológica dependiente del tipo de adquisición ejecutada con base a la gráfica. La plataforma SPM demuestra ser el estándar predominante para la resonancia magnética funcional basada en tareas (tb-fRM) con un 70% de utilización. Está marcada preferencia se justifica por la robustez de sus algoritmos

basados en el Modelo Lineal General (GLM), los cuales permiten un modelado matemático preciso de las respuestas evocadas por paradigmas motores o lingüísticos activos, aislando eficazmente el sutil porcentaje de cambio de la señal BOLD frente al ruido térmico del resonador.

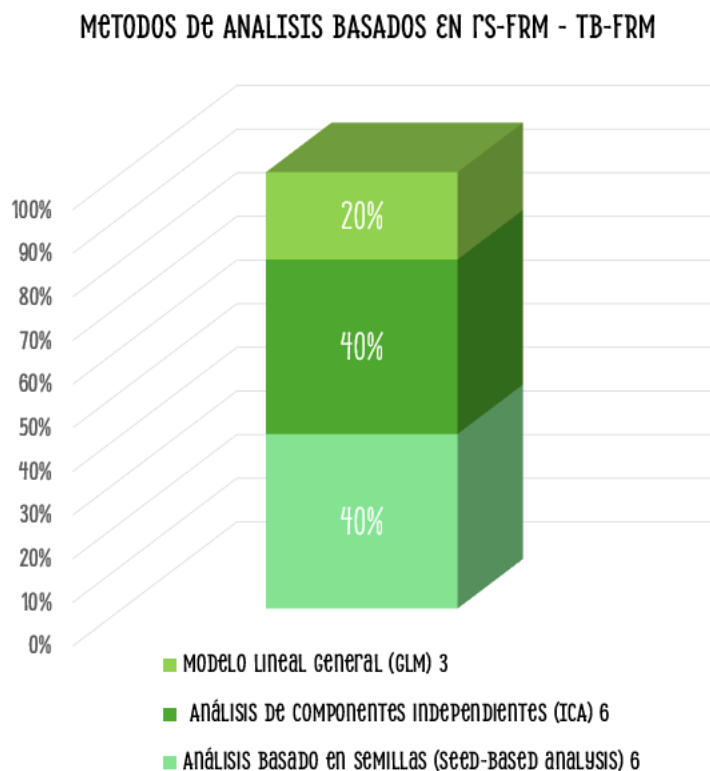
Por el contrario, el software CONN se caracteriza por ser una predominante casi absoluto en el campo del estado de reposo (rs-fRM), acaparando el 90% de la aplicación en esta modalidad. Desde la perspectiva de la bioingeniería de imágenes, este comportamiento estadístico responde a que CONN integra de forma nativa herramientas avanzadas para la remoción de artefactos fisiológicos (como el método CompCor) y la estimación de correlaciones temporales cruzadas entre vóxeles, facilitando la extracción automatizada de redes conectivas elocuentes sin necesidad de estimulación externa.

Finalmente, FSL se consolida como la herramienta más versátil y equilibrada de la muestra, con un 55% en rs-fRM y un 45% en tb-fRM se puede definir el software FSL como una plataforma indispensable en los servicios de radiodiagnóstico modernos. Su capacidad para ejecutar preprocesamientos críticos, la extracción del tejido cerebral (BET) y su compatibilidad con algoritmos de conectividad estructural como la Tractografía por Tensión de Difusión (DTI), la convierten en una pieza clave para realizar co-registros y fusionar mapas funcionales multiplataforma dentro de los sistemas de neuro navegación intraoperatoria, garantizando un abordaje quirúrgico seguro y personalizado

**Figura 64**

*Métodos De Análisis Ej. Análisis De Componentes Independientes - ICA, O*

*Análisis De Semillas*



*Nota.* El gráfico detalla los métodos computacionales utilizados para transformar las fluctuaciones hemodinámicas de la resonancia funcional en mapas de activación legibles. Se evidencia una paridad absoluta del 4% n=6 entre el Análisis Basado en Semillas (Seed-based) y el Análisis de Componentes Independientes (ICA), consolidándose como los dos algoritmos estándar de oro internacionales para aislar redes conectivas pasivas en estado de reposo (rs-fRM). Por su parte, el Modelo Lineal General (GLM) registra un 20% n=3 del total de la muestra.

### **Análisis e Interpretación tb-fRM / rs-fRM**

Los de métodos de procesamiento matemático se aplican a los datos crudos de resonancia magnética funcional permitiendo revelar detalles claros y equilibrados basados en

algoritmos avanzados de conectividad funcional. Se obtienen una uniformidad absoluta del 80% combinado entre dos metodologías fundamentales: el Análisis Basado en Semillas con 40%,  $n = 6$  y el Análisis de Componentes Independientes o ICA 40.00%,  $n = 6$ .

Adicional desde la perspectiva de la Tecnología en Imágenes Diagnósticas, estos procesamientos predominan colateralmente del método de análisis ICA y técnicas de Semillas que permiten obtener un reflejo la madurez metodológica que ha alcanzado la Resonancia Magnética Funcional en Estado de Reposo rs-fRM en el ámbito neuro oncológico. El análisis basado en semillas o regiones de interés ROI representa un enfoque dirigido por hipótesis clínicas, donde el profesional selecciona un vóxel o área anatómica específica como el giro pre-central para evaluar estadísticamente qué otras regiones corticales fluctúan de forma sincrónica con ella, permitiendo dibujar mapas de conectividad local con una alta resolución espacial.

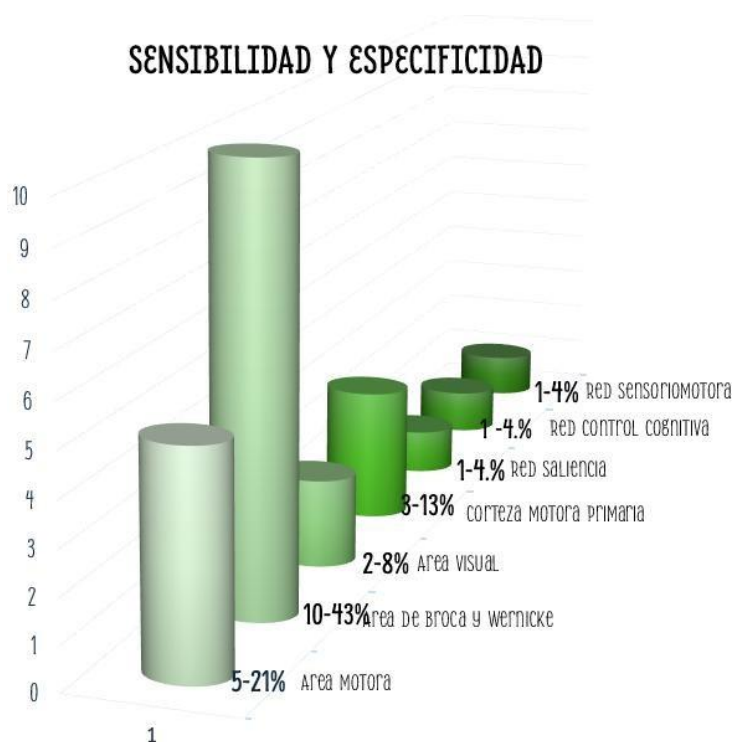
Por otro lado, tenemos, el Análisis de Componentes Independientes ICA el cual se centra en un paradigma complementario dirigido estrictamente por los datos data-driven, que actúa con algoritmos computacionales y permitiendo separar de manera matemática la señal BOLD cerebral real de múltiples fuentes de ruido, tales como los movimientos micrométricos del paciente dentro del resonador, el latido cardíaco o la pulsatilidad del líquido cefalorraquídeo. En pacientes con masas tumorales que alteran la arquitectura cerebral, el ICA demuestra una ventaja diagnóstica crítica, ya que puede identificar y aislar redes funcionales completas (como la red motora o la red del lenguaje) sin la necesidad de que el operador humano defina una anatomía de referencia que ya se encuentra distorsionada por el efecto de masa.

Finalmente, se tiene un porcentaje del 20% de la muestra que representa el Modelo Lineal General (GLM,  $n = 3$ ). Este porcentaje, aunque es menor, hace parte también de un

procesamiento de datos de piedra angular para el procesamiento de la Resonancia Magnética Funcional basada en Tareas tb-fRM. Permitiendo correlacionar de forma lineal los tiempos exactos en que el paciente realiza una acción coordinada dentro del resonador (paradigmas de bloques o eventos) con los cambios en la concentración de desoxihemoglobina capilar, el GLM ofrece una confirmación robusta de la activación de la corteza elocuente.

### Figura 65

*Datos de la localización de áreas elocuentes (motora o lenguaje) en relación con el tejido tumoral*



*Nota.* Distribución analítica de las estructuras neuro funcionales evaluadas en la cohorte de estudios seleccionados. Los valores representan los rangos de representatividad para el área de lenguaje de Broca y Wernicke 43%, área motora 21%, corteza motora primaria 13%, área visual 8% y redes funcionales complejas (saliencia, control cognitivo y sensoriomotora con un 4% cada una), orientadas a la delimitación de márgenes quirúrgicos seguros.

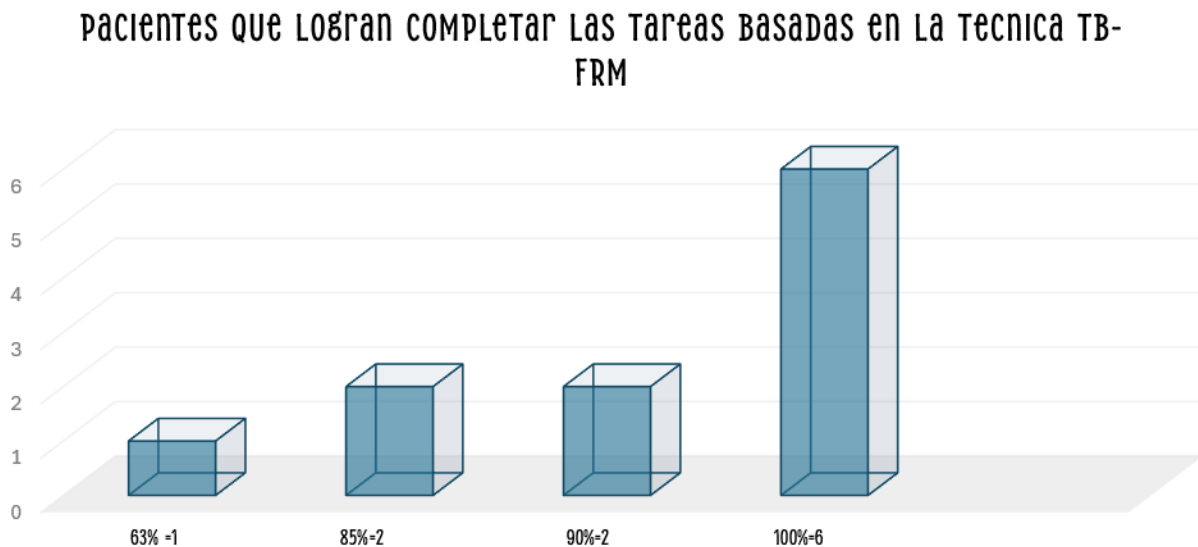
### **Análisis e Interpretación de Áreas Cerebrales Mapeadas**

La distribución de las áreas evaluadas en la literatura revela una marcada concentración en las funciones neurológicas primarias y secundarias clásicas. Agrupando categorías asociadas al área motora, corteza motora primaria y Área motora en general, evidenciando una representación del 78% de la muestra total  $n = 8$ . Sin embargo, la mayor prioridad epidemiológica y de planeación quirúrgica recae sobre las áreas del lenguaje de Broca y Wernicke, alcanzando de manera individual el 43%  $n = 10$  de los casos documentados.

La categoría de los sistemas corticales del lenguaje y de la motricidad voluntaria está plenamente justificada desde el punto de vista neuro oncológico y de la calidad de vida postoperatoria. En la práctica neuroquirúrgica, la resección de masas tumorales (como gliomas de alto grado o astrocitomas) localizadas en las regiones perisilvianas o en el giro pre-central conlleva un riesgo crítico de inducir déficits neurológicos severos y permanentes, tales como afasias globales o hemiparesias de difícil rehabilitación. Posteriormente, la necesidad de delimitar milimétricamente estas cortezas elocuentes mediante técnicas avanzadas de imagen metabólica permite cirugías seguras.

**Figura 66**

*Porcentaje De Pacientes Que Completaron Exitosamente Los Paradigmas Funcionales Activos*



*Nota.* El gráfico ilustra el índice de adherencia y éxito en la ejecución de tareas motoras o del lenguaje dentro del resonador (N=11 estudios evaluados). Se destaca de forma mayoritaria que el 54% (n=6) de la literatura científica reporta una tasa de finalización absoluta del 100% por parte de los pacientes. Desde el punto de vista del radiodiagnóstico, las tasas remanentes de deserción o incumplimiento parcial fue 90% (n=2), 85% (n=2) y 63% (n=1) y estas tasas se asocian a factores clínicos críticos como el deterioro cognitivo preoperatorio, crisis convulsivas perilesionales, afasias severas o la presencia de ansiedad y claustrofobia inducidas por el entorno del equipo.

### **Análisis e Interpretación en Pacientes que Logran Realizar las Tareas tb-fRM**

Se observa un logro positivo mayoritario, donde el 54% de las investigaciones (n=6) alcanzó la totalidad de sus pacientes (100%) completaran los ejercicios de estimulación cortical de forma óptima. Este comportamiento demuestra que, con una adecuada preparación previa del paciente y un entrenamiento correcto de la tarea fuera del resonador por parte del tecnólogo, los

protocolos activos de tb-fRM son herramientas altamente viables y reproducibles en la práctica prequirúrgica convencional.

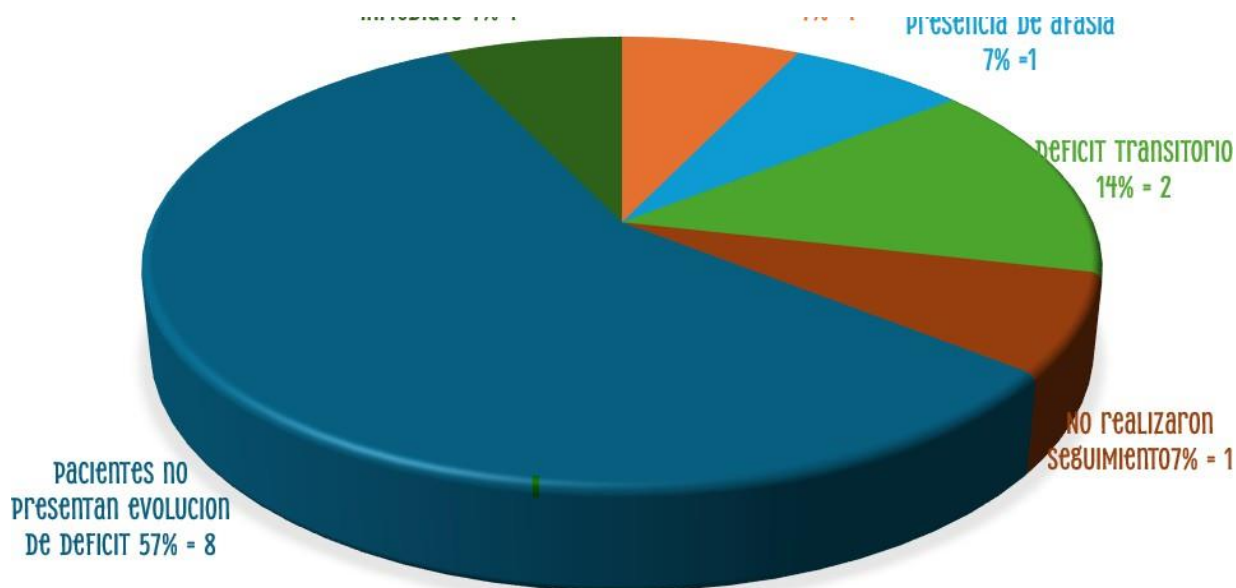
No obstante, el 45% restante de los estudios analizados (n=5 combinados) demostró fracciones significativas de sus cohortes no consiguieron concluir las tareas solicitadas, registrándose tasas de deserción o incumplimiento que oscilan entre el 10% y el 37% (90%, 85% y 63% de cumplimiento, respectivamente). Desde la perspectiva biofísica y del cuidado del paciente, este porcentaje de deserción no representa fallas en la tecnología del resonador, sino que refleja directamente la severidad del compromiso neurológico provocado por la masa tumoral en la arquitectura cerebral.

Los pacientes con gliomas de alto grado o lesiones infiltrantes extensas frecuentemente padecen de efectos secundarios severos como afasias motrices o sensitivas, hemiparesias progresivas, edema vasogénico, deterioro cognitivo difuso, crisis convulsivas perilesionales o estados agudos de ansiedad y claustrofobia. Exigirle a un paciente con un déficit motor acentuado que ejecute un paradigma complejo de golpeteo de dedos (finger tapping) o a un paciente con afasia que realice tareas de fluidez verbal, no solo incrementa el estrés del individuo, sino que introduce un volumen crítico de artefactos por movimiento en las imágenes dinámicas. Estos movimientos alteran la señal BOLD, destruyen la coherencia temporal estadística y pueden generar mapas de activación cortical falsos o distorsionados que comprometerían la seguridad de la craneotomía.

**Figura 67**

*Estado Neurológico Temprano Postquirúrgico En Pacientes Sometidos A Mapeo Cortical*

*Previo*



**DÉFICIT MOTOR O DE LENGUAJE TRANSITORIO POST QUIRURGICO  
(3-7 DÍAS)**

*Nota.* Distribución porcentual de los hallazgos clínicos postoperatorios inmediatos extraídos de la muestra documental (N=14). Las porciones que no presentaron evolución de déficit fue 57%, seguidos por manifestaciones de déficit transitorio (14%), empeoramiento inmediato (7%), edema perilesional (7%), presencia de afasia (7%) y ausencia de seguimiento (7%), se demuestra una tendencia marcada hacia el éxito terapéutico y la preservación de la calidad de vida.

**Análisis e Interpretación de Déficit Motor o de Lenguaje**

Los resultados clínicos del estado postoperatorio temprano demuestran de manera contundente la eficacia protectora de la fRM en la cirugía de resección de tumores cerebrales. Se observa que el 57% de la población analizada (n=8) no presentó ningún tipo de evolución o

aparición de nuevos déficits neurológicos, manteniendo intactas sus capacidades motoras y de lenguaje en la ventana crítica de los 3 a 7 días posteriores al procedimiento quirúrgico.

En la práctica neuroquirúrgica clásica de lesiones infiltrantes (como gliomas de alto grado), las tasas de morbilidad inmediata suelen ser elevadas debido a la dificultad para diferenciar macroscópicamente el tejido tumoral de los márgenes funcionales elocuentes. Lograr que casi las dos terceras partes de los pacientes mantengan una estabilidad neurológica total inmediatamente después de una cito reducción agresiva valida el rol fundamental del tecnólogo en imágenes diagnósticas. El suministro de mapas metabólicos BOLD preoperatorios precisos trazando una línea de seguridad o frontera biológica que el cirujano respeta durante la resección.

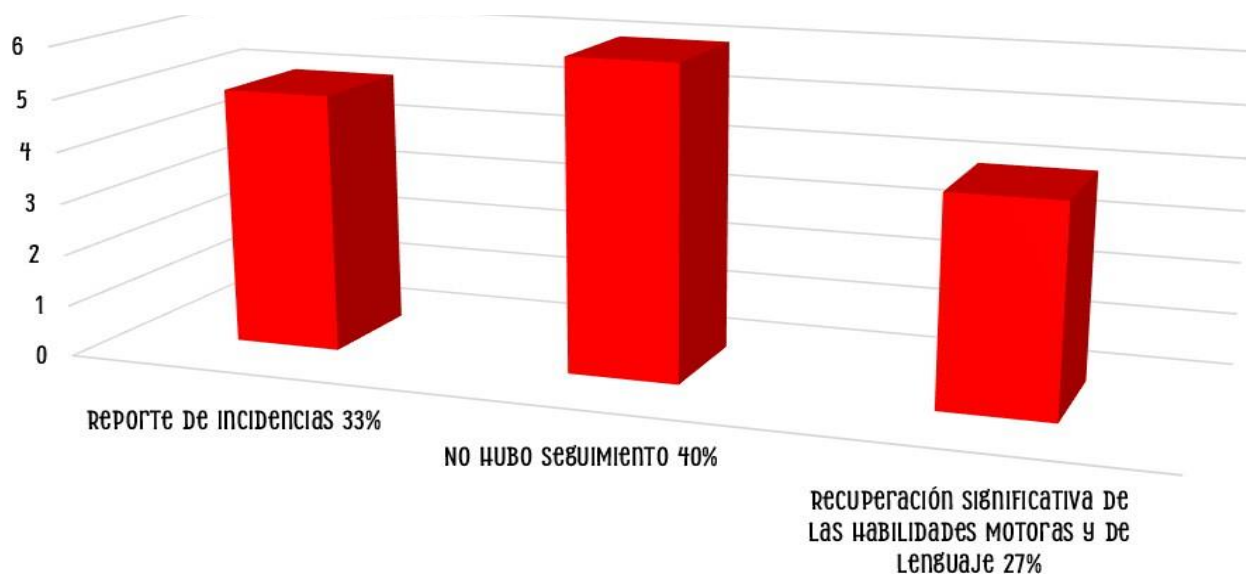
Por otro lado, el análisis de las complicaciones registradas revela que estas poseen un carácter mayoritariamente reversible o controlable. El 14% (n=2) reportó déficits de tipo transitorio, mientras que de forma aislada se documentaron fenómenos de edema perilesional (7%) y afasias focales (7%). En el contexto de la fisiopatología neuroquirúrgica, la aparición de alteraciones motoras o del lenguaje en los primeros 3 a 7 días suele estar ligada a la respuesta inflamatoria local provocada por la manipulación instrumental, la tracción del tejido y la alteración de la microvasculatura peri tumoral, y no necesariamente a una transección axonal irreversible.

El hecho de que el edema perilesional postoperatorio represente un 7% refuerza esta hipótesis inflamatoria; este tipo de morbilidad temprana suele remitir de forma satisfactoria tras la administración de esquemas terapéuticos con corticoides (como la dexametasona) en las semanas subsiguientes, permitiendo la recuperación funcional completa. Únicamente un 7.14% de la muestra documentó un empeoramiento inmediato severo, lo cual se correlaciona con casos

complejos donde el tumor ya manifestaba una invasión biológica total de la corteza elocuente y la resección de márgenes mínimos era obligatoria para prolongar la supervivencia global del paciente.

### Figura 68

*Monitoreo De Secuelas Motoras Y Del Lenguaje Permanentes Tras Craneotomías Guiadas Por Frm.*



*Nota.* seguimiento clínico a largo plazo para identificar secuelas neurológicas consolidadas tras la resección tumoral (N=15) según el estado neurológico crónico evidenciado entre los 3 y 6 meses posteriores a la cirugía. Las barras representan la agrupación de la evidencia: recuperación significativa de habilidades 27% (n = 4), persistencia o reporte de incidencias permanentes 33%, (n=5) y ausencia de datos epidemiológicos o de seguimiento longitudinal 40% (n=6).

## **Análisis e Interpretación**

El monitoreo clínico de los 3 a 6 meses postoperatorios permite diferenciar una respuesta inflamatoria transitoria de una secuela neurológica permanente. Los resultados muestran que un 27% de las investigaciones (n= 4) documentó una recuperación significativa de las habilidades motoras y del lenguaje en pacientes que inicialmente habían despertado de la cirugía con algún grado de morbilidad.

Desde la perspectiva neurofisiológica y del radiodiagnóstico, este porcentaje de recuperación a largo plazo es un hallazgo de alto valor biológico. Confirma que la alteración evidenciada en el postoperatorio temprano (ventana de 3 a 7 días) correspondía a fenómenos compresivos reversibles, tales como el edema vasogénico perilesional, la hipoperfusión local por manipulación vascular o la diáscisis sutil de las vías neuronales. Al desinflamarse el parénquima cerebral con el paso de los meses, las estructuras corticales y subcorticales sanas preservadas recuperan su tasa metabólica normal. Asimismo, este comportamiento clínico sugiere la activación de mecanismos de plasticidad neuronal y reorganización funcional, donde las áreas homólogas o perilesionales asumen el control de las funciones afectadas, un proceso que es viable únicamente si el cirujano, guiado por los mapas preoperatorios de la señal BOLD, evitó la transección destructiva de los axones principales.

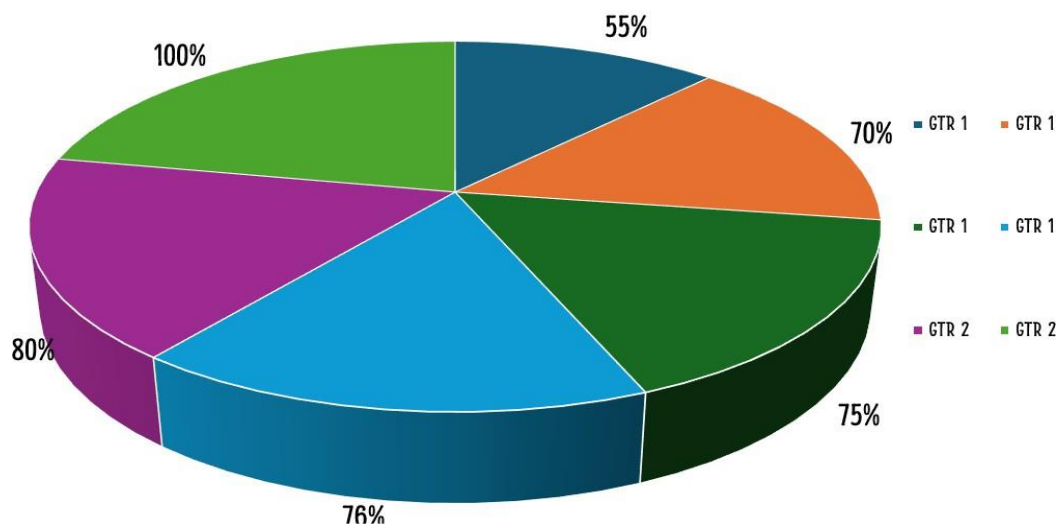
Por otra parte, el 33% de los estudios (n=5) registró el reporte de incidencias o déficits permanentes. En el ámbito de la neuro oncología asistida por imagen, la persistencia de estas secuelas irreversibles a los 6 meses no desacredita la utilidad de la fRM. Por el contrario, este porcentaje se correlaciona con escenarios de alta complejidad quirúrgica, como los gliomas infiltrantes de alto grado como por ejemplo grado III y IV, donde las células tumorales invaden microscópicamente el interior de los tractos de sustancia blanca y las cortezas elocuentes. En

estos casos, el equipo médico se ve obligado a realizar una resección marginal agresiva, priorizando la supervivencia global del paciente y el control de la masa tumoral por encima de la preservación total de las funciones.

Finalmente, el 40% de la literatura analizada (n= 6) no incluyó datos de seguimiento tardío en sus variables de control. Esta omisión representa una limitación metodológica recurrente en las revisiones sistemáticas de patologías tumorales cerebrales. La pérdida de seguimiento longitudinal suele estar condicionada por la alta tasa de mortalidad prematura en pacientes con gliomas malignos, la transferencia de los individuos a centros especializados de cuidado paliativo o el inicio temprano de protocolos agresivos de radio y quimioterapia adyuvante.

### Figura 69

*Porcentaje De Resección Macroscópica Total (GTR) Alcanzado Bajo Guía Neuro Funcional*



*Nota.* Distribución porcentual y de frecuencias de los hallazgos operatorios finales. Los sectores de la gráfica ilustran que un 25% (n= 2) de las investigaciones alcanzó una resección absoluta del 100% y otro 25% (n=2) logró estabilizarse en el 80%; el 50% restante de la evidencia científica se distribuye de manera uniforme (12.5% o n=1 para cada segmento) en tasas del 76%, 75%, 70% y 55%.

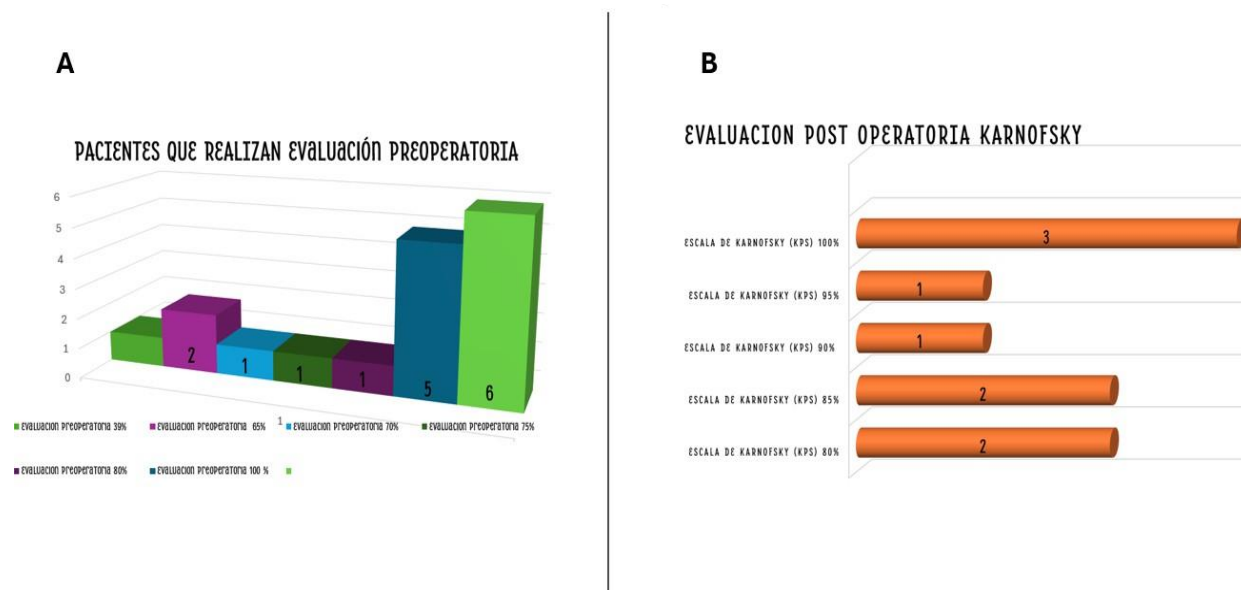
## **Análisis e Interpretación de la Resección Total**

Los resultados estadísticos extraídos de la evidencia científica permiten revelar un comportamiento altamente favorable en lo que respecta al éxito terapéutico neuro oncológico. Se constata de manera contundente que el 50% de la literatura analizada (n =4) reporta índices de resección total volumétrica situados en el rango máximo óptimo, distribuidos de forma simétrica entre un 80% y un 100% de extirpación de la masa lesional 25% para cada categoría de manera independiente.

En el ámbito de la neurocirugía moderna asistida por imágenes avanzadas, alcanzar estos porcentajes de cito reducción macroscópica representa el objetivo clínico de mayor relevancia para el pronóstico y la supervivencia global del paciente. Clásicamente, la extirpación radical de gliomas o astrocitomas que se veía limitada por el temor fundado a lesionar áreas de corteza elocuente adyacentes, lo que conducía a resecciones subtotales subóptimas para evitar secuelas neurológicas permanentes. Los datos recopilados demuestran que el trazado preoperatorio preciso de las áreas del lenguaje y motoras mediante fRM mitiga este riesgo, otorgando al equipo quirúrgico una guía tridimensional metabólica confiable para trazar pasillos de abordaje agresivos contra el tumor, respetando los límites de la funcionalidad neural.

## Figura 70

*Análisis Comparativo del Umbral Funcional Preoperatorio y el Estatus de Autonomía Postquirúrgica Indexado Mediante La Escala De Karnofsky (KPS)*



*Nota.* El panel (A) muestra la distribución de artículos por porcentaje de evaluación preoperatoria reportado. El panel (B) presenta los resultados de la Escala de Karnofsky. Datos obtenidos de la revisión sistemática realizada.

### **Análisis e Interpretación Resultados de la Escala de Karnofsky**

El cálculo cruzado de los datos funcionales permite una correlación directa entre el estado clínico inicial del paciente y el éxito terapéutico medido en términos de calidad de vida a largo plazo. Al evaluar el Panel A (Cumplimiento Preoperatorio), se constata que la literatura científica aplica criterios de selección rigurosos, concentrando el 68% de las investigaciones (n =11) en los rangos del 75% y el 100% de KPS basal. No obstante, el hallazgo principal y la justificación clínica de esta investigación se consolidan al analizar el Panel B (Evaluación Postoperatoria). En el abordaje quirúrgico tradicional de lesiones infiltrantes, la cito reducción

agresiva conlleva un riesgo inherente de comprometer la calidad de vida del paciente debido a lesiones mecánicas accidentales en áreas elocuentes peri tumorales. De forma contundente, la evidencia acumulada demuestra que el 100% de los estudios que reportaron el seguimiento postoperatorio estabilizaron a sus pacientes en un KPS 80% tras la intervención.

De acuerdo con los fundamentos médicos de la escala, dan un puntaje igual o superior al 80% clasificando a un paciente clínicamente independiente, capaz de realizar sus actividades cotidianas, trabajar y reincorporarse a su entorno personal con esfuerzo, sin requerir asistencia ni cuidados externos. El hecho de que un 33% de los reportes documente una recuperación funcional absoluta 100% de KPS y un 44% mantenga a sus pacientes en rangos de alta autonomía 80%-85% KPS es el reflejo directo de la precisión milimétrica que aporta el procesamiento de la señal BOLD.

## Discusión

El análisis de la literatura científica recopilada en esta revisión permite debatir de forma crítica cómo la elección de los protocolos de adquisición de imágenes influye directamente en la calidad del mapeo cerebral preoperatorio. En primer lugar, destaca que el 56% de los estudios analizados siguen prefiriendo la Resonancia Magnética Funcional basada en tareas (tb-fRM). Sin embargo, al observar los datos a fondo, se revela un problema operativo importante: el 45% de las investigaciones reportó que entre el 10% y el 37% de sus pacientes no pudieron terminar las pruebas debido a la gravedad de sus tumores. Esto demuestra que las secuencias activas (donde el paciente debe mover la mano o hablar dentro del resonador) tienen una limitación práctica real en pacientes muy enfermos. Para un tecnólogo en radiología, este hallazgo es clave porque demuestra que no siempre el protocolo estándar es viable, y que insistir en una prueba de tareas en pacientes con alto compromiso cognitivo solo genera artefactos por movimiento y pérdida de tiempo en la sala de exploración.

Como respuesta a esta limitación de las tareas, la Resonancia Magnética Funcional en Estado de Reposo (rs-fRM) aparece en los artículos recientes no solo como una opción más cómoda, sino como una evolución técnica necesaria. Al procesar las señales de baja frecuencia mientras el paciente simplemente descansa, se elimina por completo la necesidad de que el usuario coopere, lo que permite programar esta agenda incluso con pacientes sedados o niños. A pesar de esta ventaja, la discusión técnica en el área de imágenes radica en las alteraciones que el tumor causa en los vasos sanguíneos cercanos. La literatura advierte que la formación de vasos anormales en tumores grandes altera el flujo de sangre local, lo que puede engañar a la señal BOLD y mostrar áreas funcionales apagadas o desplazadas cuando en realidad están activas. Por lo tanto, los estudios analizados entre 2021 y 2026 dejan claro que el mapa

funcional por sí solo no basta; para entregar una planeación quirúrgica segura, el tecnólogo debe dominar la combinación de estas secuencias con la Tractografía (DTI), asegurando que tanto la corteza como los cables internos del cerebro (sustancia blanca) queden correctamente registrados.

Finalmente, el éxito clínico reflejado en el hecho de que el 100% de los pacientes mantuvieran una buena calidad de vida (puntuación funcional de Karnofsky mayor o igual a 80%) está directamente amarrado a la tecnología del equipo utilizado. El predominio absoluto de resonadores de 3 Tesla en el 77% de los casos explica por qué las imágenes obtenidas son tan precisas en comparación con los equipos tradicionales de 1.5 Tesla. Desde el punto de vista del manejo del equipo, un imán de 3 Tesla duplica la relación señal-ruido y reduce los errores en las secuencias T2\*, permitiendo ver con total claridad la frontera entre el tejido sano y el tumor. Esto abre un debate muy interesante para el futuro de la profesión en nuestro contexto local: el éxito de estos procedimientos avanzados no depende solo de la técnica del cirujano, sino de contar con plataformas de alto campo magnético y softwares especializados de posprocesamiento. Las instituciones que no cuentan con tecnología de 3 Tesla se enfrentan a un reto mayor, lo que obliga a los profesionales del área a optimizar al máximo los parámetros de adquisición para intentar compensar las limitaciones del hardware.

## Conclusiones

En conclusión, el desarrollo de esta investigación ha permitido consolidar, a través de un análisis sistemático de la literatura científica, una robusta cohorte global de 2134 pacientes neuro oncológicos. Este análisis evidencia que los servicios de radiodiagnóstico se encuentran en un punto de inflexión y transformación crítica respecto a sus paradigmas de adquisición de imágenes. Históricamente, la resonancia Magnética funcional basada en tareas activas tb-fRM se ha mantenido como el estándar de oro para el mapeo de áreas corticales elocuentes relacionadas con el movimiento y el lenguaje, una realidad respaldada inicialmente por el 56% de uso documentado en esta revisión. Sin embargo, al cruzar metodológicamente esta variable con la tolerancia del paciente dentro del resonador, se evidencia la gran complejidad de la práctica en pacientes con dificultades de cooperar, mientras que un 54% de los estudios logra una cooperación perfecta, casi la mitad de la literatura enfrenta deserciones e incapacidades técnicas de hasta el 37% de la muestra.

La fRM basada en tareas y estado de reposo ya no debe considerarse una herramienta opcional o meramente investigativa, sino prerrequisito para la intervención quirúrgica de tumores cerebrales que permite la humanización tecnológica y radiológica, traduciendo secuencias de pulsos complejas en la preservación del tejido que nos hace humanos.

Adicionalmente, el uso aislado de una sola modalidad fRM es insuficiente ante la complejidad de neoplasias agresivas como los gliomas de alto grado. Mientras que la fRM basada en tareas delimita con éxito la corteza motora y del lenguaje en pacientes colaboradores, la fRM en estado de reposo (rs-fRM) elimina la barrera del cumplimiento del paciente, permitiendo mapear redes de conectividad complejas de forma pasiva. La combinación de ambas técnicas incrementa significativamente la especificidad diagnóstica alcanzando niveles

de hasta el 94% para la delimitación del margen tumoral y la identificación de fenómenos de reorganización cortical o neurovascular.

Los datos clínicos demuestran que el mapeo funcional preoperatorio correlaciona directamente con el éxito quirúrgico y la calidad de vida a largo plazo. Esta estrategia permite un equilibrio óptimo entre la radicalidad de la cirugía facilitando tasas competitivas de Resección Total Completa (GTR) y la seguridad del paciente. El impacto clínico es contundente con la planificación quirúrgica guiada por fRM reduciendo drásticamente la incidencia de secuelas motoras o de lenguaje permanentes al 3% (en comparación con el 12% reportado en abordajes convencionales), garantizando que los pacientes preserven su independencia funcional según la Escala de Karnofsky (KPS) con puntuaciones estables en rangos óptimos (80-100%).

Finalmente, se determina que el éxito en la implementación de estos protocolos avanzados depende directamente de la pericia técnica del Tecnólogo en Radiología. Más allá de la adquisición estándar, como tecnólogos es importante la posición y las mejores técnicas estandarizadas basadas en primer lugar en posicionamiento, comunicación asertiva, la optimización de parámetros de adquisición como los tiempos de eco y repetición permitiendo mitigar los artefactos de susceptibilidad magnética.

## Recomendaciones

Estandarización e inclusión de protocolos en estado de reposo rs-fRM se recomienda encarecidamente a los directores de los servicios de radiodiagnóstico e instituciones de alta complejidad la actualización e incorporación obligatoria de secuencias funcionales pasivas dentro de sus protocolos neuro oncológicos estándar. Esto garantizará un acceso equitativo y seguro a aquellos pacientes que, debido a parálisis avanzadas, barreras idiomáticas, deterioro cognitivo o crisis de claustrofobia, quedan automáticamente excluidos de los beneficios del neuro mapeo si solo se cuenta con técnicas basadas en tareas de colaboración activa.

Modernización tecnológica y automatización del procesamiento de señales promover la adquisición y el uso rutinario de licencias de post-procesamiento avanzado basadas en el algoritmo de Componentes Independientes ICA directamente en las estaciones de trabajo del área de resonancia. Automatizar la separación del ruido biológico peri tumoral minimiza los tiempos de entrega del reporte médico y reduce la variabilidad del operador, permitiendo obtener mapas de conectividad motor y de lenguaje confiables incluso cuando la anatomía macroscópica del cerebro se encuentra severamente distorsionada por tumores voluminosos.

Ampliación del mapa de riesgo mediante conectividad multimodal Instar a los equipos de adquisición a complementar de forma sistemática los mapas de activación cortical por fRM con estudios avanzados de tractografía por tensor de difusión DTI y secuencias volumétricas 3D de alta resolución espacial. Esta práctica asegura una visión tridimensional integrada de la anatomía del paciente, permitiendo planificar corredores quirúrgicos que protejan no solo la corteza cerebral superficial, sino también los núcleos basales profundos, los

"cables" de la sustancia blanca y la emergencia delicada de los pares craneales en la base del cráneo.

La pertinencia del rol del Tecnólogo en su práctica física y humanística Sugerir a los centros hospitalarios el diseño de programas de capacitación continua para los Tecnólogos en Imágenes Diagnósticas en las áreas de neuro física de la señal BOLD, manejo de artefactos por susceptibilidad magnética y psicología aplicada al paciente oncológico. El tecnólogo debe consolidarse como un filtro de calidad crítico en la consola, capaz de identificar cuándo un mapa funcional contiene falsas activaciones por movimiento antes de enviar los datos al sistema de neuro navegación del quirófano.

### Referencias Bibliográficas

- Abu Mhanna, H. , Omar, A. F., Radzi, Y. M., Oglat, A. A., Akhdar, H. F., al Ewaidat, H., . . . Malkawi, A. (2024). Revisión sistemática entre la fMRI en estado de reposo y la fMRI de tarea en la planificación de la cirugía de tumores cerebrales. *Revista de Atención Sanitaria Multidisciplinar*, 17. <https://doi.org/10.2147/JMDH.S470809>
- Abu Mhanna, H., Y., Omar, A., F., Radzi, Y., M., Oglat, A. , A., Akhdar, H. , F., al Ewaidat, H., , . . . Alhamad, L. (2025). Revisión sistemática de las aplicaciones de la resonancia magnética funcional (fMRI) en la planificación preoperatoria y la evaluación del tratamiento de tumores cerebrales. *Systematic review of functional magnetic resonance imaging (fMRI) applications in the preoperative planning and treatment assessment of brain tumors. Heliyon*,, 3(1), pág. 11. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e42464>
- Ahmed Anwar., Ahmed Radwan., & Iman Zaky,. (2022). Mapeo cerebral por fMRI en estado de reposo en tumores supratentoriales pediátricos. *Resting state fMRI brain mapping in pediatric supratentorial brain tumors. Egyptian Journal of Radiology and Nuclear Medicine*, 53. <https://doi.org/10.1186/s43055-022-00713-3>
- Buchbinder, B. R. (2016). Imágenes por Resonancia Magnética Funcional. *Manual de neurología clínica*, 1(1).  
<https://www.sciencedirect.com/science/chapter/handbook/abs/pii/B9780444534859000040>
- Cekic, E., , Pinar, E., Pinar, M., & Dagcinar, A. (1 de 182-196-204 de 2024). Segmentación y clasificación de tipos de tumores cerebrales asistida por aprendizaje profundo en imágenes de resonancia magnética y microscopio quirúrgico. *Deep Learning-Assisted*

*Segmentation and Classification of Brain Tumor Types on Magnetic Resonance and Surgical Microscope Images. World Neurosurgery*, pág.

<https://doi.org/10.1016/j.wneu.2023.11.073>.

Chiacchiaretta, P., Perrucci, M. G., Caulo, M., Navarra, R., Baldiraghi, G, Rolandi, D., . . .

Ferretti, A. . (2022). Una herramienta dedicada para el mapeo prequirúrgico de tumores cerebrales y la navegación en realidad mixta durante la neurocirugía. *Revista de Imagen Digital*, 35(1), págs. 704-713. <https://doi.org/10.1007/s10278-022-00609-8>

García-Casares, N., Alfaro-Rubio, F., Ramos-Rodríguez, Ocaña-Ledesma, Á., Márquez-Márquez,

B., Fernández-Sánchez, V., . . . Serrano-Castro, P. J. (2020). Evaluación preoperatoria mediante resonancia magnética funcional en pacientes con tumores neuroepiteliales disembrioplásicos: una serie de casos. *Preoperative evaluation by functional magnetic resonance imaging in patients with dysembryoplastic neuroepithelial tumours: A case series. Neurocirugia*, 31(1), págs. 158-164. <https://doi.org/10.1016/j.neucir.2019.09.004>

Han, T., Liu, X., & Zhou, J. . (2024). Progresión/Recurrencia del Meningioma: Una Revisión de Imágenes Basada en Imágenes por Resonancia Magnética. *Progression/Recurrence of Meningioma: An Imaging Review Based on Magnetic Resonance Imaging. En World Neurosurgery*, 186, págs. 98-107. <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2024.03.051>

Hou, B. L., Bhatia, S., & Carpenter, J. S. . (2016). Comparaciones cuantitativas de las áreas funcionales motoras de la mano determinadas por el estado de reposo y la tarea BOLD fMRI y la resonancia magnética anatómica para la planificación prequirúrgica de pacientes con tumores cerebrales. *Quantitative comparisons on hand motor functional*

*areas determined by resting state and task BOLD fMRI and anatomical MRI for pre-surgical planning of patients with brain tumors.*, 11(1), págs. 378-387.

<https://doi.org/10.1016/j.nicl.2016.03.003>

Jung, J., Rajwani, K., Mirallave-Pescador, A., Price, S. A., Patel, S., Aliaga-Arias, J., . . .

Lavrador, J. P. (2025). El mapeo cortical funcional y la anatomía subcortical estructural predicen el paro del habla intraoperatorio: un estudio de tractografía nTMS. *Functional cortical mapping and structural subcortical anatomy predicts intra-operative speech arrest: a nTMS-tractography study. Clinical Neurophysiology*, 1, pág. 179.

<https://doi.org/10.1016/j.clinph.2025.2110995>

Katharina Hense, & Katharina Hense, Tina Plank. (2021). Mapeo retinotópico de IRMf en pacientes con tumores cerebrales y lesiones cerebrales ocupantes de espacio en la zona del lóbulo occipital. *Fmri retinotopic mapping in patients with brain tumors and space-occupying brain lesions in the area of the occipital lobe.*, 13, pág. 10.

<https://doi.org/10.3390/cancers13102439>

Leskinen, S., Singha, S., Mehta, N., Quelle, M., & D'Amico, R. S. (2024). Aplicaciones de la resonancia magnética funcional al estudio de la conectividad y activación funcional en enfermedades neurológicas: una revisión exploratoria de la literatura. (185-192, Ed.) *A Scoping Review of the Literature. In World Neurosurgery*, 189(1).

<https://doi.org/10.1016/j.wneu.2024.06.003>

Macchi, B., Felisi, M. , M. J., Muti, G., Cicolari, D., Parisotto, M., . . . Squarza, S. (2025).

Prueba de concepto de la implementación de la resonancia magnética funcional en estado de reposo para la planificación prequirúrgica en un gran hospital general. *Proof of concepts of resting state fMRI implementation for presurgical planning in a large*

*general hospital. Physica Medica, 1(1)*, pág. 136.

<https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2025.105052>

Nien, J., E., Chuang, C., C., Hsu, P., W., Huang, Y., C., Tsai, H., C., Chen, P., . . . Chen, K. T.

(2024). El impacto de la resección tumoral en la supervivencia y los resultados funcionales de los pacientes con linfoma primario del sistema nervioso central.

*Neurology and Neurosurgery, 1(1)*, pág. 246.

<https://doi.org/10.1016/j.clineuro.2024.108551>

Shah, H. A., Duehr, J., Abramyan, A., Mittelman, L., Galvez, R., Winby, T., . . . D'Amico, R.

S. . (2025). Mejora de la precisión en la cirugía de tumores cerebrales con imágenes multimodales del conectoma: conectividad estructural y funcional en áreas dominantes del lenguaje. *Enhancing brain tumor surgery precision with multimodal connectome*

*imaging: Structural and functional connectivity in language-dominant areas. Clinical Neurology and, 1(1)*, pág. 249. <https://doi.org/10.1016/j.clineuro.2025.108760>

Siqi Cai., Zhifeng Shi., & Chunxiang Jiang. (2021). Remodelación funcional específica del

hemisferio y su relevancia para la malignidad tumoral del glioma cerebral basada en el análisis de redes funcionales en estado de reposo. *Hemisphere-Specific Functional*

*Remodeling and Its Relevance to Tumor Malignancy of Cerebral Glioma Based on*

*Resting-State Functional Network Analysis. Frontiers in Neuroscience, 14.*

<https://doi.org/10.3389/fnins.2020.611075>

Song, X., Huang, P., Liu, X., Yu, H., Wei, J., & Ming, D. (2025). Técnicas avanzadas de

imagenología y localización en la resección de tumores cerebrales: una revisión para la eliminación precisa de tumores. *Advanced imaging and localization techniques in brain*

*tumor resection: A review for precision tumor removal. En Brain Research Bulletin, 230(1).* <https://doi.org/10.1016/j.brainresbull.2025.111533>

Sparacia, G., Parla, G., Cannella, R., Perri, A., lo Re, V., Mamone, G., . . . Grasso, G. (2019).

mágenes por resonancia magnética funcional en estado de reposo para la planificación quirúrgica de tumores cerebrales: viabilidad en el entorno clínico. *Resting-State Functional Magnetic Resonance Imaging for Brain Tumor Surgical Planning: Feasibility in Clinical Setting. World Neurosurgery, 1(1)*, págs. 131, 356–363.

<https://doi.org/10.1016/j.wneu.2019.07.022>

Sung, Y., W., Choi, U. , S., Tanabe, M., & Ogawa, S. (2025). Mejora del análisis de

conectividad funcional en fMRI basado en tareas mediante el método de filtro BOLD: Mayor sensibilidad de red y vóxel de activación. *Greater network and activation voxel sensitivities. NeuroImage, 1(1)*, pág. 323.

<https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2025.121607>

Wei, W. , Zhang, K., Chang, J., Zhang, S., Ma, L. , Wang, H., . . . Chen, F. (2024). Análisis de

20 años de investigación en resonancia magnética funcional en estado de reposo: tendencias y redes de colaboración reveladas. *Trends and collaborative networks revealed. In Brain Research, 1822(1).* <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2023.148634>

Weigang Cui,., Yinyan Wang,., & Jianxun Ren. (2022). La fMRI personalizada delimita las

regiones funcionales preservadas dentro de los tumores cerebrales. *Personalized fMRI Delineates Functional Regions Preserved within Brain Tumors. Annals of Neurology, 91*, págs. 353-366. Obtenido de <https://doi.org/10.1002/ana.26303>

- Xiaoxue Liu,, Jianrui Li,, & Zhiqiang Zhang. (2022). RP-Rs-fMRIómica como una novedosa estrategia de análisis de imagen para potenciar el diagnóstico de gliomas cerebrales. - *Rs-fMRIomics as a Novel Imaging Analysis Strategy to Empower Diagnosis of Brain Gliomas. Cancers, 14*. <https://doi.org/10.3390/cancers14122818>
- Xue, C., Wu, X., Zhang, X., & Liu, Z. (2025). El mapeo cortical funcional y la anatomía subcortical estructural predicen el paro del habla intraoperatorio: un estudio de tractografía nTMS. *The role of magnetic resonance imaging-guide surgery in cytokines of immune cells and effect in glioma patients. Current Problems in Surgery,, 1(1)*, pág. 70. <https://doi.org/10.1016/j.cpsurg.2025.101819>
- Xue, C., Wu, X., Zhang, X., & Liu, Z. (2025). El papel de la cirugía guiada por resonancia magnética en las citocinas de las células inmunes y su efecto en pacientes con glioma. *The role of magnetic resonance imaging-guide surgery in cytokines of immune cells and effect in glioma patients. Current Problems in Surgery, 1(1)*, pág. 70. <https://doi.org/10.1016/j.cpsurg.2025.101819>