



sciencevolution

ISSN: 2810-8728 (En línea)

4.4OCTUBRE - DICIEMBRE
2025Revisión Bibliográfica
116 - 131

Avances en Técnicas de Neuroimagen para el Diagnóstico de Cefaleas

Advances in Neuroimaging Techniques for the Diagnosis of Headaches

Karla Rocío Castro López (Autor Corresponsal)
krocio-88@hotmail.com ORCID: 0009-0009-5867-1601
Clínica San Erasmo, Upala, Costa Rica
Universidad de Ciencias Médicas UCIMED, San José, Costa Rica

Aceptación: 4 de noviembre de 2025

Publicación: 9 de diciembre de 2025

Resumen

Las cefaleas son un problema neurológico prevalente e incapacitante a nivel mundial, lo que dificulta su diagnóstico adecuado. Esta revisión tuvo como objetivo analizar la literatura documental sobre los avances significativos de las técnicas de neuroimagen y su impacto reportado en el diagnóstico de las cefaleas. Para ello, la revisión bibliográfica, implicó consultar 42 fuentes publicadas entre 2015 y 2025 obtenidas en PubMed, Scopus y ScienceDirect. Se utilizó el enfoque hermenéutico para la revisión de las técnicas estructurales y funciones. Se detectó que el uso de imágenes multimodales e inteligencia artificial incrementó la exactitud diagnóstica, pues se implementan biomarcadores, se optimizan las diferenciaciones de etiologías complejas y se ha logrado avanzar en la comprensión de los mecanismos fisiopatológicos del dolor, todo ello gracias a la superación de los inconvenientes en las imágenes convencionales. Sin embargo, se anotaron algunos inconvenientes con respecto a la estandarización de los protocolos y los problemas en el acceso a las tecnologías de última generación. Se concluyó que las técnicas avanzadas de neuroimagen son herramientas indispensables en el diagnóstico diferencial. Sin embargo, la transición hacia la medicina personalizada debe hacerse a través de criterios clínicos específicos para cada paciente y estrictas consideraciones éticas.

Abstract

Headaches represent a widespread and debilitating neurological problem worldwide, continually complicating accurate diagnosis. This review aimed to examine the major advances in neuroimaging techniques and how they have reshaped the way headaches are diagnosed. We conducted a literature review analyzing 42 sources published between 2015 and 2025 retrieved from PubMed, Scopus, and ScienceDirect. A hermeneutic approach was applied to examine both structural and functional techniques. The findings indicate that the use of multimodal imaging and artificial intelligence has increased diagnostic accuracy by enabling the identification of biomarkers, the differentiation of complex etiologies, and the understanding of the pathophysiological mechanisms of pain—all made possible by overcoming the limitations of conventional imaging. Despite these advances, certain constraints were observed regarding the standardization of protocols and access to advanced technologies. It was concluded that advanced neuroimaging techniques are indispensable tools for differential diagnosis. However, the transition toward personalized medicine must be guided by patient-specific clinical criteria and strict ethical considerations.



Palabras clave: Neuroimagen; Migraña; Trastornos de la Cefalea; Resonancia Magnética Funcional (fMRI); Imagen por Tensor de Difusión (DTI); Tomografía por Emisión de Positrones (PET); Imagen Multimodal; Inteligencia Artificial; Biomarcadores; Sistema Glinfático

Keywords: Neuroimaging; Migraine; Headache Disorders; Functional Magnetic Resonance Imaging (fMRI); Diffusion Tensor Imaging (DTI); Positron emission tomography (PET); Multimodal Imaging; Artificial Intelligence; Biomarkers; Glymphatic System



Introducción

Las cefaleas son uno de los trastornos más comunes del sistema nervioso. Se estima que su prevalencia mundial en adultos es de aproximadamente 50 % y que entre la mitad y las tres cuartas partes de las personas de 18 a 65 años han sufrido una cefalea en el 2024. Dentro de este grupo, un 30 % o más ha padecido migraña ([Organización Mundial de la Salud, OMS, 2025](#)). En particular, la migraña muestra una clara predominancia femenina, con una prevalencia anual casi tres veces mayor en mujeres que en hombres (17 % frente a 6 %) ([Gómez-Otalvaro y Serna-Vélez \(2015\)](#)). A pesar de las variaciones regionales, las cefaleas son un problema global que afecta a personas de todas las edades, razas, niveles de ingresos y zonas geográficas ([OMS, 2025](#)).

Este síntoma tan común en atención primaria afecta el área laboral, social e interpersonal del paciente, además de representar un costo social y financiero. Las cefaleas primarias como la migraña y las cefaleas tensionales, son tratadas frecuentemente en consulta general. Sin embargo, un grupo menor al 10 % de los pacientes presenta cefaleas secundarias, las cuales están asociadas a una causa subyacente, y en algunas ocasiones, puede significar un pronóstico negativo, amenazando incluso la vida. Por ello, si después de la evaluación médica inicial existe sintomatología sospechosa, deben realizarse las pruebas diagnósticas pertinentes, ya sean de imagen o laboratorios; esto permite descartar una cefalea secundaria e identificar un desorden primario específico para dar el tratamiento adecuado ([Orozco Cubero & Alfaro Guerra, 2022](#)).

En ese contexto, las contribuciones de la neurociencia, que integran hallazgos funcionales, estructurales y genéticos, han mejorado la comprensión de la cefalea. Específicamente, la neuroimagen funcional ha revelado una activación del hipotálamo ipsilateral durante los ataques de la cefalea en racimos, confirmando el rol central de esta estructura en la fisiopatología de la enfermedad. El conocimiento de los circuitos neurales involucrados aclara el origen del dolor (vinculado al sistema trigeminovascular), los síntomas autonómicos (derivados del reflejo trigémino-autonómico) y la periodicidad circadiana de las crisis (controlada por el sistema hipotalámico). Asimismo, estudiar a los biomarcadores neuroquímicos ha sido esencial para mejorar la comprensión de los mecanismos fisiopatológicos subyacentes; mientras la investigación genética, a través de estudios de asociación del genoma completo (GWAS), ha reconocido variantes relacionadas a la cefalea, sugiriendo una base inmunológica y una predisposición hereditaria ([San-Juan et al., 2024](#)).

Los avances científicos de neuroimagen, también han desarrollado herramientas útiles para la neurociencia moderna, con aplicaciones clínicas importantes, entre las que destacan el diseño de modalidades de imagen novedosas, técnicas de imagen dinámica en tiempo real y la integración de datos multimodales, mediante la combinación de aspectos anatómicos y funcionales para realizar análisis cerebrales más completos y ofrecer tratamientos mínimamente invasivos en diversas patologías cerebrales y medulares ([Bopp & Nimsky, 2025; Lv, 2024](#)).

En la actualidad, gracias a las tecnologías de neuroimagen es posible caracterizar con precisión las lesiones cerebrales causantes de la cefalea, diferenciándola de otras patologías intracraneales. Aunque las cefaleas primarias tienen manifestaciones clínicas definidas, ciertos signos y síntomas alertan sobre la existencia de una patología estructural causante de una cefalea secundaria. Es aquí donde los métodos de diagnóstico por imágenes cumplen una función relevante, puesto que permiten la detección e identificación de cefaleas con etiología compleja ([Shen et al. 2024; Cobeñas et al., 2016](#)).

Los métodos de imagen modernos ofrecen la posibilidad de cuantificar y analizar múltiples dimensiones de los cambios cerebrales de formas que antes resultaban imposibles. Los datos de neuroimagen son de gran volumen y elevada complejidad, dado que abarcan numerosas dimensiones relacionadas con la estructura, la función y la patología. Los patrones multivariados de alteraciones cerebrales asociadas a enfermedades suelen ser sutiles y se ven considerablemente confundidos por las variaciones anatómicas y funcionales significativas existentes entre diferentes poblaciones de pacientes. En ese sentido, comprender la interrelación entre las mediciones multimodales de neuroimagen y vincularlas con medidas cognitivas y clínicas, así como con factores de riesgo demográficos y genéticos, constituye un desafío que requiere una síntesis informada de los datos ([Erus et al., 2020](#)).

Algunos autores afirman que las pruebas de neuroimagen (TAC o Resonancia Magnética) deberían formar parte de la evaluación inicial de un paciente con cefalea, ya que su principal uso clínico es el de descartar los motivos o causas de cefaleas secundarias, es decir cuando existen signos de alarma o síntomas a tener en cuenta como la existencia de un cambio en el carácter del dolor ([Cid, 2019](#)). La práctica clínica de neuroimagen permite la identificación, de manera fiable, de síndromes de cefaleas trigémino-autonómicas. Un diagnóstico correcto, que se puede obtener gracias a esta distinción, es indispensable para el tratamiento, reflejando la necesidad de un estudio, relevante para solventar esta dificultad ([Obermann et al., 2018](#)). Para la aplicación de las pruebas de neuroimagen es necesaria una





valoración somática adecuada, a efectos de que no haya ningún daño médico ([Savatierra Baldeón, 2021](#)).

Ahora la neuroimagen también empieza a capitalizar el uso de la IA para el análisis de datos neuroimagenológicos de alta complejidad ([Tushita et al., 2025](#)). La IA muestra un avance continuo y mejora tanto la precisión como la escalabilidad y la capacidad predictiva, abriendo la puerta hacia una medicina más personalizada y en línea con la práctica actual. Estas técnicas de neuroimagen altamente eficaces pueden dar paso a la revelación de ciertos aspectos profundamente personales de la función cerebral del paciente, lo cual supone incluir criterios éticos, que planteen directrices que hablen de la privacidad de la información la obtención del consentimiento informado y el impacto social ([Bopp & Nimsky, 2025](#)).

Debido a las tecnologías de vanguardia y los retos mencionados líneas arriba, es imperativa la necesidad de la sistematización del conocimiento reciente en torno a las técnicas de neuroimagen aplicadas al diagnóstico de las cefaleas. Por ello, el presente estudio analiza la literatura documental sobre los avances significativos de las técnicas de neuroimagen y su impacto reportado en el diagnóstico de las cefaleas. A su vez, describe las principales técnicas de neuroimagen avanzadas aplicadas al estudio de las cefaleas y demuestra su utilidad para mejorar la precisión diagnóstica o facilitar el diagnóstico diferencial de las cefaleas primarias; identifica las limitaciones reportadas en la literatura y discute las implicaciones futuras de estos avances tecnológicos en la práctica clínica para el diagnóstico de cefaleas.

Método

Tipo de Revisión

Se realizó una revisión de tipo narrativa. El tipo de revisión narrativa se utilizó para organizar, categorizar y sintetizar los hallazgos relevantes de artículos científicos y documentos especializados, facilitando un análisis sobre los avances significativos de las técnicas de neuroimagen y su impacto en el diagnóstico de las cefaleas. Este tipo de revisión es adecuado porque permitió realizar un análisis crítico y una síntesis informada de los datos, fundamental para superar el desafío de vincular las mediciones multimodales de neuroimagen con factores clínicos, demográficos y genéticos.

Estrategia de Búsqueda

En la búsqueda bibliográfica se consultaron bases de datos académicas de revistas indexadas, entre ellas: PubMed, Scopus, ScienceDirect, SciELO, Latindex y Google Scholar. La búsqueda se delimitó a publicaciones comprendidas entre los años 2015 y 2025, con el fin de asegurar la actualidad, pertinencia y calidad científica de las fuentes recopiladas.

Para la recolección de información se utilizaron palabras clave en español e inglés relacionadas con el objeto de estudio, tales como: "neuroimagen", "cefalea", "diagnóstico", "resonancia magnética", "PET", "fMRI", "SPECT", "DTI", "avances tecnológicos", "inteligencia artificial", así como sus equivalentes en inglés: "neuroimaging", "headache", "diagnosis", "magnetic resonance imaging", "artificial intelligence".

Criterios de Inclusión y Exclusión

Con el fin de asegurar la validez y relevancia de la información, se establecieron los siguientes criterios de selección:

Criterios de Inclusión

- Se incluyeron producciones académicas de revistas indexadas, en español o inglés, publicadas entre 2015 y 2025, que abordaran el uso de técnicas de neuroimagen estructural y funcional aplicadas al diagnóstico de cefaleas.
- Se consideraron estudios que examinaran los avances tecnológicos, aplicaciones clínicas o la integración de inteligencia artificial en neuroimagen, siempre que los resultados tuvieran relevancia médica o neurológica y contaran con revisión por pares.

Criterios de Exclusión

- El uso de tesis, literatura gris y artículos sin revisión por pares fueron excluidos.
- Se descartaron investigaciones centradas únicamente en tratamientos farmacológicos o terapéuticos sin relación con la neuroimagen, así como estudios experimentales con animales o modelos in vitro.
- Se omitieron fuentes con metodologías poco definidas o con información insuficiente para el análisis interpretativo.





Extracción de Datos

Los estudios se agruparon de acuerdo con categorías temáticas emergentes, tales como:

- Epidemiología de la Cefalea
- El Papel de la Neuroimagen en el Diagnóstico de las Cefaleas
- Técnicas de Neuroimagen
- Técnicas de Neuroimagen Estructurales
- Técnicas de Neuroimagen Funcionales
- La Influencia de la IA en la Neuroimagen
- Impacto y Futuro de la Neuroimagen

El procesamiento de los estudios se efectuó de manera manual.

Análisis de la Información

Se aplicó el método hermenéutico para el análisis interpretativo de las 42 fuentes revisadas. Este enfoque permitió interpretar los hallazgos desde una perspectiva crítica y comparativa, destacando los aportes científicos más significativos y sus implicaciones clínicas en el diagnóstico neurológico contemporáneo.

Limitaciones Metodológicas

La búsqueda de información se realizó exclusivamente en bases de datos seleccionadas, por lo que es posible que algunas investigaciones relevantes no hayan sido incluidas por limitaciones de acceso o disponibilidad. Asimismo, la revisión se restringió a publicaciones en español e inglés comprendidas entre 2015 y 2025, lo que podría haber limitado la inclusión de estudios en otros idiomas o de períodos previos con aportes importantes.

Desarrollo y Discusión

Epidemiología de la Cefalea

La cefalea constituye uno de los trastornos neurológicos más frecuentes y representa un motivo habitual de consulta tanto en atención primaria como en neurología. De acuerdo con [Gómez-Otalvaro y Serna-Vélez \(2015\)](#), se define como la presencia de dolor ubicado por encima de la línea imaginaria que une ambos cantos oculares externos hasta el centro del canal auditivo externo; cuando el dolor se origina por debajo de esta línea, se considera dolor facial. Desde el punto de vista fisiopatológico, el dolor cefálico se explica por dos vías principales: la primera es la activación de los nociceptores en respuesta a una lesión tisular, constituyendo una respuesta fisiológica normal; y la segunda, la existencia de daño o disfunción en las vías del dolor del sistema nervioso central o periférico.

En términos clínicos, las cefaleas se dividen en primarias y secundarias, tal como lo señala [Pascual \(2019\)](#). Las cefaleas primarias representan aproximadamente el 90% de las consultas y su diagnóstico se fundamenta en criterios clínicos, dado que la exploración física y los estudios complementarios suelen ser normales. Por su parte, las cefaleas secundarias, constituyen menos del 10% de los casos, y se caracterizan por tener una causa etiológica subyacente identificable, es decir, un "apellido etiológico". Un pequeño porcentaje de estas (menos del 1%) corresponde a cefaleas secundarias potencialmente graves, que requieren atención inmediata.

Tabla 1
Tipos de cefaleas más relevantes

Tipo de Cefalea	Categoría	Frecuencia en consultas	Característica principal
Migraña	Primaria	La más relevante (2/3 de consultas por cefalea primaria)	Discapacitante, dolor moderado-severo, pulsátil, con fotofobia y fonofobia.
Cefalea de tensión	Primaria	Más prevalente, pero menos consultada	Menos discapacitante que la migraña.
Cefalea en racimos	Primaria	< 5% de las consultas	Otro tipo de cefalea primaria destacada.
Cefaleas secundarias	Secundaria	< 10% de las consultas	Tienen una causa subyacente identificable. Requieren descartar signos de alarma.

Nota: Tabla realizada a partir de los datos obtenidos en el estudio de [Pascual \(2019\)](#).





Desde un punto de vista epidemiológico, [Gómez-Otalvaro y Serna-Vélez \(2015\)](#) señalaron que la cefalea afecta aproximadamente al 47 % de la población adulta a nivel mundial, con una marcada predominancia en mujeres, especialmente en el caso de la migraña (17 % frente al 6 % en hombres). Esta diferencia se ha relacionado con factores hormonales, genéticos y ambientales que influyen en la susceptibilidad y en la respuesta al dolor. Además, las cefaleas crónicas pueden generar un impacto significativo en la calidad de vida, el desempeño laboral y el bienestar emocional de los pacientes.

Asimismo, [Almeida et al. \(2024\)](#) señalaron que la pandemia de COVID-19 introdujo un nuevo fenotipo clínico caracterizado por la aparición de cefalea persistente post-COVID. Los efectos neurológicos de la infección sobre el sistema nervioso central fueron reportados desde el inicio de la pandemia y pueden deberse a mecanismos asociados a enfermedad sistémica subyacente, disfunción inmunitaria, vasculopatías o complicaciones de cuadros prolongados y hospitalización. Los hallazgos en neuroimagen suelen ser inespecíficos, destacándose lesiones de sustancia blanca hiperintensas en T2 y alteraciones de susceptibilidad que sugieren patología microvascular, las cuales se han vinculado a enfermedad de pequeños vasos, procesos inflamatorios y secuelas postinfecciosas que podrían participar en la fisiopatología del síndrome post-COVID. En ese contexto, las técnicas avanzadas de resonancia magnética, como la imagen por tensor de difusión y la resonancia magnética funcional (fMRI), han permitido identificar alteraciones más prevalentes en pacientes con síntomas neurológicos, aunque la ausencia de correlaciones estructurales claras con síntomas frecuentes como la fatiga o la cefalea han limitado su aplicación clínica directa.

La fisiopatología y la epidemiología de la neuroimagen nos permiten entender su función en el diagnóstico o el manejo de la cefalea. Según [Shen et al. \(2024\)](#), la identificación de la etiología y de los mecanismos fisiopatológicos incrustados es un reto clínico muy importante, pese a que el empleo de técnicas de neuroimagen ha transformado la evaluación diagnóstica de las cefaleas, facilitando la observación de las alteraciones estructurales y funcionales del cerebro que antes eran inaccesibles mediante métodos clínicos convencionales.

En la misma línea, la investigación llevada a cabo por, [Wang et al. \(2018\)](#), determinó que en el diagnóstico habitual de la cefalea primaria, el recurso a la neuroimagen solamente se arbitra en determinadas situaciones clínicas, como por ejemplo en el caso de la migraña retinal. Estos datos han sido recabados a partir del uso de TC e IRM, que en algunas ocasiones presentaron anomalías morfológicas a partir de la identificación de casos con hidrocefalia, con tumores en garganta y nariz, con infartos o con schwannoma acústico y con angioma cavernoso. No consideraron significativas las lesiones de sustancia blanca y tampoco se hallaron diferencias importantes en la tasa de anomalías entre pacientes con cefalea primaria y controles sanos.

El Rol de la Neuroimagen en el Diagnóstico de las Cefaleas

El uso de las diferentes técnicas de neuroimagen promueve la comprensión estructural y funcional del cerebro, comenzando a clarificar la información adicional necesaria para hacer el diagnóstico diferencial de las cefaleas. Estas técnicas, según [Yen et al. \(2023\)](#) permiten observar de forma no invasiva la estructura y la actividad cerebral, facilitando el estudio de procesos cognitivos y conductuales como la percepción, atención, memoria y regulación emocional. Además, a través de su aplicación se obtienen distintos niveles de resolución espacial y temporal, lo que posibilita investigar la actividad cerebral a diversas escalas.

Sin embargo, [Eigenbrodt et al. \(2021\)](#) advirtieron que la neuroimagen debe reservarse exclusivamente para casos con sospecha clínica fundada de cefalea secundaria. En dichas situaciones, la neuroimagen permite confirmar o descartar causas secundarias del dolor de cabeza, pero en ausencia de estos signos de alarma, esta no es necesaria en la evaluación diagnóstica rutinaria de la migraña, puesto que en algunos casos, puede resultar perjudicial, especialmente cuando implica exposición a radiación ionizante, como ocurre con la tomografía computarizada (TC). Cuando la neuroimagen está indicada para la investigación de posibles cefaleas secundarias, se recomienda preferir la resonancia magnética (RM) frente a la TC, debido a que proporciona una resolución más alta y no conlleva exposición a radiación ionizante. Asimismo, se debe considerar que la RM puede detectar hallazgos clínicamente insignificantes, como lesiones de la sustancia blanca, quistes aracnoideos o meningiomas, los cuales, pese a carecer de relevancia patológica, pueden generar alarma en el paciente y conducir a la realización de pruebas complementarias innecesarias. Esto es una consideración importante, según mencionaron [Yen et al. \(2023\)](#) y [Jang et al. \(2019\)](#), quienes además agregaron que la elección de la técnica de neuroimagen debe basarse en criterios de sospecha clínica y costo-beneficio. También, indicaron que la RM es preferida sobre la TC cuando se requiere una resolución superior sin exposición a radiación.

En conjunto, la literatura revisada sugiere que la neuroimagen puede ser una herramienta efectiva en el diagnóstico de las cefaleas, siempre y cuando su uso esté clínicamente justificado, contribuyendo a mejorar la precisión diagnóstica, optimizar los recursos y reducir los riesgos derivados de estudios



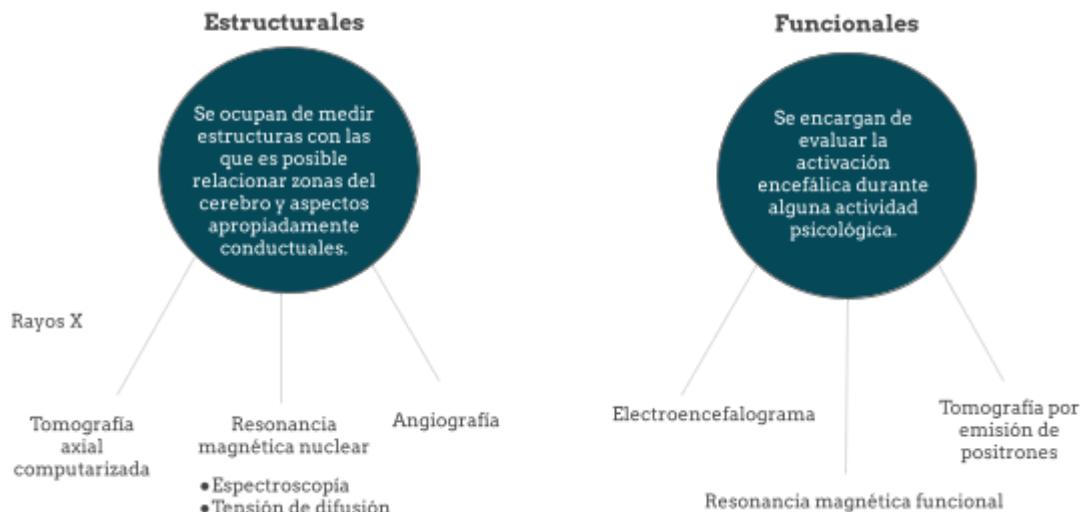
innecesarios.

Técnicas de Neuroimagen

Savatierra Baldeón (2021) definió las técnicas de neuroimagen como herramientas que valoran un aspecto o característica del cerebro y traducen la información recibida en una imagen gráfica para su estudio posterior. Estas se dividen en dos tipos: estructurales y funcionales.

Gráfico 1

Tipos de técnicas de neuroimagen



Nota: Gráfico extraído de Savatierra Baldeón (2021).

Esta diferencia resulta clave para identificar lesiones o alteraciones anatómicas asociadas con cefaleas secundarias y para obtener información sobre los patrones de activación cerebral relacionados con las cefaleas primarias, especialmente la migraña.

En la *praxis* clínica, los avances en la neurociencia han logrado evitar procedimientos invasivos o cirugías innecesarias, fortaleciendo el carácter predictivo y preventivo del diagnóstico. Un ejemplo de ello es el estudio de caso documentado por Shen et al. (2024), en el cual la aplicación combinada de técnicas avanzadas, entre ellas la espectroscopía por resonancia magnética (MRS), transferencia de saturación por intercambio químico (CEST), imagen por resonancia magnética dinámica con contraste (DCE-MRI), movimiento incoherente intravoxel (IVIM) y modelo exponencial extendido (SEM), permitieron analizar patrones de perfusión, difusión y metabolismo cerebral, evidenciando características distintas a las observadas en tumores cerebrales comunes. En consecuencia, al paciente con cefalea persistente se le diagnosticó un goma sifilítico cerebral, que había pasado inadvertido con la resonancia convencional. Este tipo de casos ilustra cómo la neuroimagen avanzada puede redefinir el abordaje clínico de las cefaleas y contribuir a un diagnóstico diferencial más preciso.

Técnicas de Neuroimagen Estructurales

Savatierra Baldeón (2021) mencionaron que las técnicas estructurales de neuroimagen son capaces de examinar la morfología cerebral y detectar alteraciones anatómicas para explicar la presencia de cefaleas secundarias. Algunas de las técnicas que destacan son:

Tomografía Computarizada (TC) y Angiografía por TC (ATC)

Jang et al. (2019) establecieron que la TC debe realizarse apenas se presente la sospecha de una hemorragia subaracnoidea (HSA). En ese contexto, la ATC complementa la TC al posibilitar la identificación precisa de aneurismas intracraneales en pacientes con cefalea en trueno. No obstante, los autores mencionaron que estos procedimientos, aunque convenientes, exponen al paciente a radiación; que conllevan el riesgo de causar reacciones alérgicas al medio de contraste, así como la posibilidad de disfunción renal como reacción adversa. En términos de rendimiento diagnóstico, la RM es más sensible que la TC para detectar cefaleas secundarias, lo cual evidencia una limitación relativa de esta técnica. La neuroimagen de rutina en pacientes con cefalea no es rentable y su uso excesivo sin una indicación clara representa un gasto sanitario innecesario; que puede detectarse hallazgos clínicamente insignificantes, como sinusitis, lo que implica el riesgo de ofrecer resultados falsos positivos que generen ansiedad en el paciente y conduzcan a evaluaciones adicionales innecesarias. En ciertos contextos clínicos, como en la cefalea en racimos o en los trastornos autonómicos trigeminales tipo SUNCT, es recomendable considerar la RM en lugar de la TC.





Imagen por Resonancia Magnética (RM) y Angiografía por RM (ARM)

La RM es más sensible que la TC para detectar cefaleas secundarias, por ello, [Jang et al. \(2019\)](#), recomendaron su uso en pacientes mayores de 50 años con cefalea de nuevo inicio o en casos de cefaleas autonómicas del trigémino, como la cefalea en racimos. Por su parte, la ARM es útil para identificar aneurismas intracraneales pequeños (de 3–4 mm). Sin embargo, tanto la RM como la ARM presentan desventajas que incluyen el alto costo operativo; el prolongado tiempo de adquisición de imágenes en comparación con métodos como la TC; el acceso limitado a estos equipos, considerado un factor restrictivo; la necesidad de mayor experiencia técnica para interpretar las imágenes obtenidas mediante RM/ARM en relación con las tomografías computarizadas; y, en el caso específico de la ARM, la evidencia disponible es limitada, lo que indica que la utilidad de esta técnica en pacientes con cefalea aún es reducida.

Espectroscopía por Resonancia Magnética (MRS)

[Sun et al. \(2025\)](#) afirmaron que la espectroscopía por MRS constituye un método no invasivo que permite estudiar *in vivo* el metabolismo tisular mediante la medición de determinados núcleos atómicos, principalmente el hidrógeno (^1H), puesto que los pacientes con migraña presentan alteraciones en el metabolismo energético cerebral y modificaciones en la conectividad funcional. En concreto, [Chen et al. \(2024\)](#) destacaron que la secuencia MEGA-PRESS posibilita la determinación precisa de las concentraciones de ácido gamma-aminobutírico (GABA) y del complejo glutamato/glutamina (Glx). Esta secuencia utiliza la técnica de edición por diferencia J (J-difference editing), la cual permite resolver señales superpuestas y, por tanto, detectar de manera cuantitativa y exacta las variaciones en los niveles de GABA y Glx. La tecnología MEGA-PRESS ha sido ampliamente utilizada en el estudio de estos metabolitos en el cerebro de diversas poblaciones, incluyendo personas sanas y pacientes con enfermedad de Alzheimer, enfermedad de Parkinson y migraña. Actualmente, esta técnica se considera uno de los métodos más fiables y utilizados para la medición de GABA.

Sin embargo, según [Sun et al. \(2025\)](#) las limitaciones del uso de la MRS son, entre otras, la todavía no enteramente establecida relación entre los biomarcadores del metabolismo energético y la severidad de la cefalea, lo que constituye una dificultad para su uso clínico, determinando que la técnica muestra cambios en el metabolismo relacionados con la migraña pero no establece una relación causal. También se reconoce que los niveles de metabolitos, como NAA/tCr o Cho/tCr, dependen del tiempo y de la fase del ciclo migrañoso, complicando la estandarización y la interpretación. A esto se suma la falta de consenso en torno a biomarcadores como lactato, glutamato, GABA y NAA, que, aunque relacionados con disfunción mitocondrial y estrés oxidativo, aún no están validados como indicadores diagnósticos o pronósticos. Aunque la MRS es segura y no invasiva, su utilidad clínica sigue siendo limitada por la ausencia de criterios interpretativos uniformes.

Tensor de Difusión (DTI)

La DTI, según [Tae et al. \(2018\)](#) es una técnica de imagen médica no invasiva empleada para investigar la estructura de la materia blanca cerebral. Esta se fundamenta en las diferencias del movimiento browniano de las moléculas de agua dentro del tejido cerebral, lo que permite inferir la organización, integridad y conectividad de las fibras neuronales. Además, facilita la evaluación de cambios microestructurales asociados a diversas enfermedades neurológicas, su progresión y la respuesta a tratamientos. Cada escalar derivado del tensor de difusión aporta información específica sobre el estado microestructural del tejido.

Tabla 3
Escalares DTI

Escalar DTI	Nombre Completo	Descripción /Significado Biológico	Interpretación Clínica
FA	Anisotropía Fraccional	Mide la asimetría de la difusión del agua dentro de un voxel	Valores bajos indican daño axonal o pérdida de organización en la materia blanca
AD	Difusividad Axial	Evalúa la difusión del agua a lo largo del eje principal de los axones	Su disminución refleja daño axonal o degeneración de fibras
RD	Difusividad Radial	Cuantifica la difusión del agua en dirección perpendicular al eje axonal	Su aumento se asocia con desmielinización o daño de la vaina de mielina
MD	Difusividad Media	Representa el promedio del movimiento molecular del agua en todas las direcciones	Se incrementa ante edema, necrosis o cambios en la celularidad
MO	Modo	Índice de anisotropía que distingue entre tipos de geometría de difusión (lineal, planar o esférica)	Útil en tractografía de regiones con fibras cruzadas o complejas





Nota: Tabla realizada a partir de los datos obtenidos en el estudio de [Tae et al. \(2018\)](#).

El uso de DTI ha permitido explorar el sistema glinfático. Por ejemplo, [Messina et al. \(2025\)](#) emplearon el índice DTI-ALPS para analizar la función glinfática y, aunque no hallaron diferencias significativas en dicho índice entre pacientes y controles, sí identificaron una disminución de la fracción de volumen extracelular (EVF por sus siglas en inglés) y un aumento de la fracción de volumen intracelular (IVF por sus siglas en inglés) en pacientes con migraña durante la crisis y en aquellos con migraña crónica con uso excesivo de medicación. Estos hallazgos sugieren un posible deterioro de la depuración glinfática en fases agudas y en procesos de cronificación.

En cuanto a las limitaciones y desafíos del DTI, [Yen et al. \(2023\)](#) mencionaron que esta técnica asume un modelo simplificado de la difusión de agua en el tejido biológico, el cual no captura por completo las propiedades microestructurales complejas del tejido cerebral, dificultando así la interpretación y cuantificación precisa de los indicadores de difusión; que presenta dificultades para resolver configuraciones de fibras complejas, como regiones con cruces de fibras o dispersión en la orientación, lo que conduce a reconstrucciones inexactas de los tractos de materia blanca y a estimaciones erróneas de conectividad; que es sensible al ruido y a distintos artefactos, entre ellos el movimiento del paciente y las distorsiones por susceptibilidad magnética, factores que degradan la calidad de la imagen y afectan la fiabilidad de las métricas de difusión; y que alcanzar una alta resolución espacial representa un desafío debido a los tiempos de adquisición prolongados y a la susceptibilidad a distorsiones en la imagen, lo cual limita la capacidad de resolver estructuras de materia blanca a pequeña escala. Asimismo, indicaron que, aunque se han desarrollado técnicas como HARDI para mejorar la resolución angular y capturar de manera más adecuada las fibras que se cruzan, la reconstrucción precisa de tractos complejos continúa siendo un reto, y que tanto la calidad de la imagen como la precisión de la tractografía pueden verse comprometidas por factores técnicos y biológicos.

Técnicas de Neuroimagen Funcionales

Las técnicas funcionales de neuroimagen permiten estudiar la actividad cerebral en tiempo real y comprender cómo las distintas regiones del cerebro interactúan durante procesos cognitivos o en respuesta al dolor. [Savatierra Baldeón \(2021\)](#) indicó que estas técnicas no solo facilitan la localización de las áreas activadas ante determinados estímulos, sino que también contribuyen a correlacionar dichas respuestas con la percepción y modulación del dolor cefálico. Entre las más utilizadas se encuentran:

Electroencefalograma (EEG)

[Zhang et al. \(2023\)](#) describen al EEG como un método de medición no invasivo de la actividad cerebral que refleja los potenciales postsinápticos generados cuando los neurotransmisores se unen a los receptores de la membrana postsináptica. El EEG convencional tiene la ventaja de ser no invasivo y aplicable en una gama más amplia de contextos, es altamente valorado por su seguridad, alta resolución temporal, bajo costo del equipamiento y elevada sensibilidad a los cambios dinámicos en las señales neuronales del cerebro. Su uso es amplio tanto en la neurociencia como en la neurología clínica, donde se emplea para estudiar la atención, la memoria, el lenguaje, las emociones y los trastornos de la función cerebral. Mientras que el EEG intracraneal (IEEG) presenta mayor precisión y una mejor relación señal/ruido que el EEG de superficie, debido a su menor distancia espacial respecto a los grupos neuronales.

De acuerdo con [Yen et al. \(2023\)](#) los avances tecnológicos han potenciado su utilidad mediante el desarrollo de electrodos de alta densidad, la localización de fuentes en tiempo real y la integración con otras modalidades, como la fMRI. Sin embargo, aún presenta limitaciones como la baja resolución espacial, la sensibilidad a artefactos y la dificultad para aislar fuentes neurales específicas.

Resonancia Magnética Funcional (fMRI)

[Fjarque Roca et al. \(2023\)](#) explicaron que esta técnica de neuroimagen permite estudiar la actividad cerebral en tiempo real mediante la detección de cambios en el flujo sanguíneo cerebral asociados con la activación neuronal. La fMRI se emplea para mapear las áreas del cerebro que se activan durante la ejecución de tareas cognitivas o en estado de reposo, su aplicación abarca tanto la investigación científica como el ámbito clínico y terapéutico. En la investigación clínica, se utiliza para estudiar diversos trastornos neurológicos y psiquiátricos, entre ellos la enfermedad de Alzheimer, la esquizofrenia, el trastorno del espectro autista (TEA), el trastorno por déficit de atención e hiperactividad (TDAH) y la epilepsia, contribuyendo a identificar patrones de actividad cerebral característicos de cada condición. Asimismo, la fMRI tiene un papel relevante en la planificación quirúrgica, la evaluación de tratamientos y en técnicas de biofeedback, donde los pacientes aprenden a modular la actividad de regiones cerebrales específicas mediante retroalimentación visual o auditiva.





Tabla 2
Tipos de resonancia magnética funcional

Tipo de fMRI	Descripción	Aplicación Principal
fMRI de Activación	Identifica las áreas cerebrales que se activan ante tareas o estímulos específicos	Estudios de función cognitiva, sensorial o motora
fMRI de Estado de Reposo	Analiza los patrones de actividad y conectividad funcional cuando el cerebro no realiza tareas concretas	Investigación de redes cerebrales intrínsecas y patologías neurológicas
fMRI de Conectividad Funcional	Examina las interacciones y la comunicación entre diferentes regiones del cerebro	Ánalysis de redes neuronales y su coordinación funcional
fMRI de Percepción Social	Estudia la actividad cerebral vinculada al procesamiento de señales e interacciones sociales	Investigación en neurociencia social y trastornos del espectro autista
fMRI de Etiquetado Arterial (ASL)	Mide el flujo sanguíneo cerebral mediante el etiquetado magnético de la sangre arterial	Estudios de perfusión cerebral y metabolismo
fMRI en Tiempo Real (rt-fMRI)	Permite la adquisición y retroalimentación inmediata de imágenes cerebrales	Aplicaciones en neurofeedback y entrenamiento cognitivo.
fMRI de Difusión	Analiza la difusión de moléculas de agua en el tejido cerebral para mapear la conectividad estructural	Investigación anatómica y de redes estructurales cerebrales

Nota: Tabla realizada a partir de los datos obtenidos en el estudio de [Ejarque Roca et al., \(2023\)](#).

En el caso de la migraña con aura, [Goadsby et al. \(2017\)](#) confirmaron que la depresión cortical propagada (CSD) es un evento neurovascular que puede ser captado mediante técnicas de neuroimagen como la fMRI. Al respecto, [Yuan et al. \(2025\)](#) destacaron que la fMRI ha permitido visualizar la ocurrencia de la CSD y los cambios asociados en el flujo sanguíneo cerebral regional, evidenciando un patrón hemodinámico trifásico caracterizado por una hipoperfusión inicial, una normalización transitoria y una fase posterior de oligemia. Esta caracterización continúa siendo fundamental para comprender los mecanismos fisiopatológicos del CSD y su papel clínico en la migraña con aura.

[De Tommaso et al. \(2021\)](#) señalaron que la fMRI se emplea para explorar los correlatos neurales de la migraña, con especial énfasis en la conectividad funcional (FC). Estos autores plantearon una clasificación los estudios de fMRI en dos categorías principales:

- Event-related (relacionados con eventos): analizan la actividad cerebral en respuesta a tareas o estímulos.
- Resting-state (en estado de reposo): examinan la conectividad de áreas o redes cerebrales específicas en reposo.

Además, explicaron que para el análisis del estado de reposo se aplican distintos enfoques metodológicos:

- Análisis basado en semillas (Seed-Based Analysis). Busca la correlación lineal entre una región de interés ("semilla") y todos los demás vóxeles del cerebro.
- Análisis de componentes independientes (Independent Component Analysis – ICA). Descompone la señal cerebral en componentes espaciales y temporales independientes para extraer redes de resting-state.
- Análisis basado en teoría de grafos (Graph Theory Analysis). Considera el cerebro como una red de regiones (nodos) conectadas por caminos (edges), analizando dimensiones como la segregación y la integración para describir la organización del conectoma cerebral.

Asimismo, [Yen et al. \(2023\)](#) mencionaron que los recientes avances incluyen una mayor resolución espacial (vóxeles de hasta 1 mm), el uso de fMRI en tiempo real, la multimodalidad mediante la combinación con EEG/MEG, la fMRI en estado de reposo y la implementación de campos ultraaltos. Entre sus principales aplicaciones destacan el mapeo de redes cerebrales, el estudio de procesos cognitivos, la identificación de biomarcadores en trastornos neurológicos y la guía para terapias como la estimulación cerebral profunda. Sin embargo, presenta limitaciones como la resolución temporal restringida debido a la respuesta hemodinámica lenta, la susceptibilidad a ruidos y artefactos, y la complejidad en la interpretación de la señal BOLD.

La investigación de [De Tommaso et al. \(2021\)](#), también identificó los riesgos, desventajas o limitaciones más relevantes asociados con el uso de la fMRI en la investigación sobre migraña, señalando la incapacidad para establecer causalidad, dado que la técnica permite identificar correlaciones entre regiones cerebrales pero no relaciones causa–efecto; las limitaciones en la resolución temporal, ya que la señal BOLD constituye una medida indirecta y lenta de la actividad





neuronal en comparación con el EEG/MEG, que posee una resolución temporal óptima; la posibilidad de omitir señales transitorias o específicas de eventos, como se evidencia en el estudio del aura migrañosa, donde no se puede excluir que una señal hipotética inducida por la CSD durante el fenómeno del aura haya pasado desapercibida al escanear a los pacientes una vez concluida esta fase; las restricciones metodológicas y la dependencia de hipótesis *a priori*, pues el análisis basado en semillas resulta más útil cuando se cuenta con una hipótesis sólida y limita su aplicación en estudios exploratorios; los resultados contradictorios o inconsistentes entre investigaciones, especialmente en lo relacionado con la Red en Modo Predeterminado (DMN), que ha mostrado hallazgos aparentemente conflictivos; y la necesidad de interpretar con cautela ciertos hallazgos exploratorios, como los del estudio con metoprolol, donde el uso de un umbral estadístico más liberal llevó a concluir que el fármaco presenta efectos insignificantes, lo que refleja la debilidad estadística de algunos resultados en la literatura de fMRI.

Tomografía por Emisión de Positrones (PET)

Guamán Yanza et al., (2024) explicaron esta técnica de imagen como una no invasiva perteneciente a la medicina nuclear, que permite obtener imágenes tomográficas de procesos bioquímicos *in vivo* mediante el uso de radiofármacos. Estos radiofármacos están compuestos por un fármaco transportador, encargado de dirigirse a la molécula o sistema biológico de interés, y un isótopo radioactivo, cuya desintegración permite la adquisición de la imagen. En el ámbito clínico, la PET se utiliza principalmente para diagnosticar o monitorizar diversos tipos de cáncer (como el de mama, tiroides o pulmón), evaluar la función miocárdica y el flujo sanguíneo cardíaco, así como para detectar trastornos neurológicos tales como la enfermedad de Parkinson, Huntington, Alzheimer y otras formas de demencia. Frecuentemente, este procedimiento se realiza en combinación con la TC para mejorar la precisión anatómica de las imágenes obtenidas.

Tabla 4
Tipos de PET y sus aplicaciones clínicas

Tipo de PET	Descripción	Aplicación Clínica
PET con [18F]FDG	Mide el consumo regional de glucosa, permitiendo cuantificar el hipometabolismo relacionado con alteraciones neuronales	Diagnóstico diferencial y estadificación de enfermedades neurodegenerativas
PET de Amiloide	Permite visualizar <i>in vivo</i> la patología amiloide y cuantificar los depósitos de proteína A _β desde etapas tempranas.	Monitorización de la progresión de la Enfermedad de Alzheimer
PET de Tau	Visualiza la distribución espacial de los depósitos de proteína tau en el cerebro	Predicción de la progresión clínica y la neurodegeneración; diagnóstico preciso de Alzheimer

Nota: Tabla realizada a partir de los datos obtenidos en el estudio de Guamán Yanza et al. (2024).

En cuanto a los avances tecnológicos recientes, Guamán Yanza et al. (2024) indicaron que la PET ha experimentado mejoras significativas, entre las que destacan:

- Integración PET/MRI, que combina la información anatómica y funcional con menor exposición a radiación.
- Desarrollo de nuevos radiofármacos, dirigidos a estudiar procesos fisiológicos y patológicos como la angiogénesis, apoptosis y neuroinflamación.
- Optimización de la tecnología de detección, con sensores que incrementan la sensibilidad y la resolución espacial.
- Reducción de los tiempos de adquisición, favoreciendo la comodidad del paciente y la eficiencia del procedimiento.
- Sistemas de corrección de movimiento, que aumentan la precisión en sujetos con dificultades para mantener la inmovilidad.
- Aplicación de inteligencia artificial, mediante algoritmos que mejoran la calidad de imagen, reducen el ruido y aceleran los procesos de reconstrucción.

Trotter et al. (2023) señalaron que, si bien la PET puede mejorar la planificación del tratamiento radioterapéutico, presenta limitaciones, tales como: la resolución espacial aproximada de 4,5 mm en escáneres modernos porque puede producir distorsiones o errores en la imagen que no representan la anatomía o la fisiología real del paciente y conducir a sobre- o subcontorneación de lesiones pequeñas por derrame de señal o efectos de volumen parcial, es decir errores en la delimitación del contorno del tumor o de la lesión durante la planificación del tratamiento; mientras la medición del valor de captación estandarizado (SUV) es semicuantitativa y susceptible a variabilidad biológica, física y tecnológica, pudiendo no ser una medida fiable en todas las circunstancias. Asimismo, indicaron que el movimiento, especialmente el respiratorio, puede provocar desalineación entre PET y CT, afectar los volúmenes objetivo y reducir el SUV hasta en un 24 %, lo que exige el uso coherente de técnicas como compuerta respiratoria, adquisición PET en 4D o registro deformable para evitar





errores de cobertura u overtreatment. Además, los altos costos de los trazadores, los retrasos en el acceso a PET/CT y el tiempo transcurrido entre la PET/CT diagnóstica y el inicio de la radioterapia pueden perjudicar los resultados clínicos.

Tomografía SPECT

Bermeo et al. (2021) establecieron que la SPECT cerebral de perfusión es una técnica de imagen funcional que utiliza radiotrazadores disponibles comercialmente y se caracteriza por permitir congelar una imagen de la activación cerebral en el momento preciso de la inyección. Dicha circunstancia permite que la administración del radiotrazador se lleve a cabo por fuera del escáner y en cualquier entorno clínico, en la que la imagen pueda ser obtenida hasta una o dos horas después del acontecimiento. La SPECT permite observar la actividad cerebral en el contexto clínico cuando se generan episodios de dolor severo, por ejemplo, durante el tratamiento de las quemaduras y examinar la modulación de dicha actividad una vez finalizada la intervención analgésica además de constituir una importante herramienta para el estudio de condiciones de dolor crónico, como la fibromialgia y el dolor lumbar crónico, en los que se han establecido patrones de hipoperfusión en zonas como el tálamo y la corteza prefrontal. También se ha mostrado su utilidad en el estudio del dolor episódico, como la migraña, tanto en la fase ictal (ataque) como en la fase interictal (entre ataques).

Aunque la SPECT resulta útil para medir el flujo sanguíneo cerebral, según mencionó Choudhary (2024) esta presenta una resolución limitada al compararla con la tomografía por emisión de positrones (PET) y la resonancia magnética funcional (fMRI), cosa que pone de manifiesto la necesidad de técnicas de imagen más avanzadas que consigan un diagnóstico y seguimiento más preciso de la función cognitiva en pacientes con migraña.

Entre los riesgos, desventajas y limitaciones de la tomografía SPECT, Amen y Easton (2021) advirtieron que un solo estudio de este tipo conlleva una dosis estimada de 0,68 rem (unidad de medida de la dosis equivalente en radiación), inferior a la de un TC de cabeza pero semejante a la de un estudio óseo, lo cual es una preocupación en el contexto pediátrico. También, indicaron que la calidad de imagen puede ser limitada, especialmente en regiones cerebrales profundas, y que muchos servicios aún utilizan cortes pequeños en escala de grises difíciles de interpretar, recomendándose software avanzado 3D que no está disponible universalmente. Los autores destacaron la ausencia frecuente de estudios basales para comparación en casos de traumatismo craneoencefálico, dificultando determinar si las anomalías son recientes o de larga data. Los hallazgos de la SPECT no proporcionan un diagnóstico por sí solos, no son específicos para categorías del Manual Diagnóstico y Estadístico de los Trastornos Mentales (DSM por sus siglas en inglés) y pueden no diferenciar el momento de las lesiones sin contexto clínico adicional. La adopción clínica de la SPECT ha sido limitada por escepticismo y fallas iniciales de correlación diagnóstica, argumentando que la calidad de imagen depende del equipamiento disponible. Por último, esta técnica no identifica la etiología específica de las anomalías, sino que solo orienta a realizar investigaciones posteriores.

Magnetoencefalografía (MEG)

Esta técnica, según Ruiz-Reyes et al. (2025) registra los débiles campos magnéticos producidos por corrientes eléctricas intracelulares en la sustancia gris (durante los potenciales de acción). La activación sincrónica de millones de neuronas produce una actividad cerebral suave, diferenciada y localizada que puede registrarse mediante magnetómetros ubicados a lo largo de la curvatura del cráneo. Se trata de un tipo de neuroimagen funcional, por lo que permite establecer conexiones entre las estructuras cerebrales y sus funciones. Además, es la técnica menos invasiva y hasta el momento la única que permite estudiar el funcionamiento de la corteza cerebral incluso en el feto, por lo que su importancia en el estudio del desarrollo cerebral es enorme.

En relación a las técnicas funcionales de neuroimagen mencionadas, es evidente que han revolucionado la comprensión de los mecanismos cerebrales del dolor, permitiendo identificar correlatos neuronales, alteraciones en la perfusión y patrones de conectividad asociados a distintos tipos de cefalea. De este modo, su integración con las técnicas estructurales y con la inteligencia artificial abre nuevas posibilidades para el diagnóstico temprano, la personalización terapéutica y la predicción de la evolución clínica.

Sin embargo, Yang et al. (2024) identificaron diversas limitaciones de la MEG, destacando su baja relación señal-ruido, que disminuye al estudiar regiones cerebrales profundas debido a la extrema debilidad de los campos magnéticos generados por el cerebro, su insensibilidad a corrientes radiales y el carácter mal planteado del problema inverso, que dificulta la localización precisa de fuentes. También señalaron su susceptibilidad a variaciones en la estructura de la cabeza, además de limitaciones instrumentales: en el caso del SQUID-MEG, la necesidad de temperaturas criogénicas, blindaje contra interferencias y altos costos, y en el OPM-MEG, el elevado costo, la complejidad técnica y la sensibilidad ambiental. Asimismo, indicaron que la señal de MEG es fácilmente



contaminada por interferencias o ruidos que no provienen del cerebro, sino del propio equipo MEG o generados por el propio cuerpo del paciente. Su aplicación clínica aún es incipiente en algunas áreas, especialmente porque sigue enfrentando desafíos para constituirse como una herramienta diagnóstica o terapéutica de uso rutinario.

La Influencia de la IA en la Neuroimagen

En cuanto al impacto de la IA en el campo, [Kalani y Anjankar \(2024\)](#) enfatizaron el aporte de la IA en el campo de la neuroimagen aplicada al diagnóstico de trastornos neurológicos, optimizando los procesos de análisis, interpretación y detección de alteraciones cerebrales. Los sistemas reforzados con IA son capaces de reconocer regiones cerebrales específicas, calcular cambios en el volumen cerebral a lo largo del tiempo y detectar anomalías en las exploraciones mediante análisis automatizado e interpretación de imágenes. Esta automatización no solo mejora la precisión y eficiencia del diagnóstico, sino que también reduce la carga de trabajo de los radiólogos y neurólogos. Por otro lado, la inteligencia artificial permite el procesamiento de grandes volúmenes de datos procedentes de MRI y TC, así como la identificación de marcadores precoces o signos incipientes de enfermedades neurológicas que podrían evadirse en la evaluación humana, lo que favorece el diagnóstico precoz. Los algoritmos de IA pueden analizar imágenes cerebrales con gran velocidad para identificar regiones isquémicas, permitiendo intervenciones oportunas. Este principio de rapidez y precisión diagnóstica es extensible a la identificación de causas secundarias de las cefaleas agudas, ya que el tiempo de respuesta es un factor desencadenante.

[Li et al. \(2025\)](#) destacaron que la IA supera limitaciones de los métodos tradicionales como SVM y Random Forest, al detectar diferencias sutiles y distribuidas espacialmente, transformando así el análisis de neuroimagen, permitiendo un análisis cuantitativo, automatizado e interpretable de características cerebrales derivadas de fMRI, lo que se alinea con los principios de la radiología, un enfoque cuantitativo de la imagen médica, cuyo objetivo, según [Van Timmeren et al. \(2020\)](#) es aumentar la información disponible para los clínicos mediante análisis matemáticos avanzados. El estudio de [Li et al. \(2025\)](#) resaltó que esto no solo facilita la clasificación precisa de trastornos neurológicos como la migraña, sino también la identificación de biomarcadores visuales y explicables con potencial traslacional clínico.

Para [Yen et al. \(2023\)](#) la implementación de la IA en la neuroimagen plantea desafíos futuros, como mejorar la integración multimodal, la validación clínica de biomarcadores y la atención a las consideraciones éticas vinculadas con la privacidad y la interpretación de datos.

En perspectiva, la sinergia entre la IA y la neuroimagen avanzada marca la pauta para una nueva etapa en el diagnóstico de las cefaleas y otros trastornos neurológicos. Esta convergencia optimiza los procesos diagnósticos y promueve la transición hacia una neurociencia más precisa, automatizada y personalizada, donde la toma de decisiones clínicas se sustente en evidencias cuantificables y reproducibles.

Impacto y Futuro de la Neuroimagen

[Yen et al. \(2023\)](#) señalaron que la neuroimagen es una disciplina médica que ha transformado la neurociencia, porque mapea redes cerebrales, identifica biomarcadores y la guía de intervenciones terapéuticas.

Un avance crucial es la capacidad predictiva de la neuroimagen mediante fMRI. Al respecto, [Basedau et al. \(2022\)](#) demostraron que la actividad basal del núcleo trigémino espinal y su acoplamiento con el hipotálamo, medidas mediante fMRI, tienen valor predictivo para identificar a los pacientes con migraña que responderán favorablemente al tratamiento con el anticuerpo monoclonal anti-CGRP galcanezumab, un anticuerpo monoclonal que se une al CGRP e inhibe su acción, sin afectar al receptor de CGRP ([Abu-Zaid et al., 2020](#)).

La neuroimagen brinda nuevas perspectivas para explorar las dinámicas cerebrales y las redes neurales. Por ejemplo, en el estudio de [Huang et al. \(2023\)](#), se destacan investigaciones de neuroimagen cerebral avanzada que ofrecen una vía prometedora para distinguir y correlacionar los mecanismos microestructurales de la migraña y la esclerosis múltiple, así como identificar características compartidas y distintivas entre ambas enfermedades, permitiendo comprender con mayor profundidad los procesos fisiopatológicos subyacentes. Sin embargo, pese a que estas tecnologías de imagen generan mapas cerebrales de alta resolución que ofrecen información sobre la arquitectura estructural y funcional del cerebro, [Markello et al. \(2022\)](#) señalaron que los datos suelen compartirse en sistemas de coordenadas dispares, lo que impide comparaciones sistemáticas y precisas.





Conclusión

La neuroimagen ha colaborado en optimizar la precisión de las alteraciones estructurales y funcionales relacionadas con cefaleas primarias y secundarias. Su rol es relevante en la confirmación y diferencial, especialmente ante sospechas de cefalea secundaria. Sin embargo, no se recomienda su uso rutinario sin criterios clínicos de alarma, debido a sus riesgos, costos y posibles hallazgos incidentales.

Asimismo, se ha registrado una mejor comprensión de los mecanismos fisiopatológicos del dolor utilizando técnicas como fMRI, PET, MRS, DTI, MEG, y una mejor multimodalidad a partir de la combinación de técnicas estructurales, funcionales y metabólicas. Estas herramientas permiten identificar redes neuronales implicadas, detectar biomarcadores, diferenciar procesos benignos de patológicos, y mejorar el diagnóstico diferencial de migraña, cefaleas trigémino-autonómicas. Los aportes clínicos de estas tecnologías están orientados a proporcionar tratamientos personalizados mediante la asociación de patrones observados en neuroimágenes con manifestaciones clínicas; facilitar el diagnóstico temprano en casos complejos o atípicos; prevenir intervenciones innecesarias por la obtención de datos precisos no invasivos.

Respecto a la integración de la IA, se ha determinado su capacidad para analizar grandes volúmenes de imágenes con alta precisión; automatizar la detección de anomalías; mejorar la calidad de imagen y acelerar la reconstrucción; reducir la carga de trabajo clínico y aumentar la objetividad diagnóstica, demostrando un impulso positivo en la transición hacia una medicina personalizada y predictiva.

Por último, entre las limitaciones del estudio se encuentra la falta de estandarización en protocolos de adquisición y análisis; la heterogeneidad en las muestras y en los diseños metodológicos; la resolución insuficiente de algunas técnicas, como en el caso de la SPECT; el riesgo de obtener hallazgos inespecíficos que pueden conducir a estudios complementarios innecesarios; los desafíos éticos vinculados al uso de inteligencia artificial, especialmente en lo referente a privacidad, consentimiento y manejo de datos sensibles; y el acceso limitado a tecnologías avanzadas en ciertos contextos clínicos.

Las proyecciones futuras y principales necesidades en el campo incluyen integración los datos de neuroimagen con biomarcadores clínicos, genéticos y neuropsicológicos; estudios multicéntricos con poblaciones

diversas que permitan mejorar la validez externa de los hallazgos; desarrollo de modelos automatizados basados en inteligencia artificial que optimicen la interpretación diagnóstica; avances en enfoques multimodales que combinen imagen estructural, funcional y metabólica para obtener perfiles diagnósticos más completos; incrementar la disponibilidad de bases de datos abiertas y estandarizadas; y fortalecer la articulación entre investigación y práctica clínica, favoreciendo decisiones médicas más precisas y fundamentadas.

Referencias

- Abu-Zaid, A., AlBatati, S. K., AlHossan, A. M., AlMatrody, R. A., AlGzi, A., Al-Sharief, R. A., Alsobayani, F. M., Almubarak, A. F., & Alatiyah, N. S. (2020). Galcanezumab for the management of migraine: A systematic review and meta-analysis of randomized placebo-controlled trials. *Cureus*, 12(11), e11621. <https://doi.org/10.7759/cureus.11621>
- Amen, D. G., & Easton, M. (2021). A new way forward: How brain SPECT imaging can improve outcomes and transform mental health care into brain health care. *Frontiers in Psychiatry*, 12. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2021.715315>
- Almeida, G. G., Alkan, S., Hoepner, R., Euler, A., Diem, L., & Wagner, F. (2024). Chronic fatigue and headache in post-COVID-19 syndrome: A radiological and clinical evaluation. *Frontiers in Neurology*, 15. <https://doi.org/10.3389/fneur.2024.1526130>
- Basedau, H., Sturm, L.-M., Mehnert, J., Peng, K.-P., Schellong, M., & May, A. (2022). Migraine monoclonal antibodies against CGRP change brain activity depending on ligand or receptor target: An fMRI study. *eLife*, 11, e77146. <https://doi.org/10.7554/eLife.77146>
- Bermo, M., Saqr, M., Hoffman, H., Patterson, D., Sharar, S., Minoshima, S., & Lewis, D. H. (2021). Utility of SPECT functional neuroimaging of pain. *Frontiers in Psychiatry*, 12, 705242. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2021.705242>
- Bopp, M. H. A., & Nimsky, C. (2025). Neuroimaging—Shaping the future of brain research and clinical applications. *Neuroimaging*, 1(1), 1. <https://doi.org/10.3390/neuroimaging1010001>
- Chen, T., Bai, X., Wang, W., Zhang, X., Pei, X., Zhang, X., Yuan, Z., Zhao, Y., Yang, Q., Wang, Y., & Sui, B. (2024). Gamma-aminobutyric acid and



- glutamate/glutamine levels in the dentate nucleus and periaqueductal gray in new daily persistent headache: A magnetic resonance spectroscopy study. *The Journal of Headache and Pain*, 25(142).
<https://doi.org/10.1186/s10194-024-01845-9>
- Choudhary, A. K. (2024). Migraine and cognitive impairment: The interconnected processes. *Brain-Apparatus Communication: A Journal of Bacomics*, 3(1).
<https://doi.org/10.1080/27706710.2024.2439437>
- Cid, M. L. (2019). Migrña, un desafío para el médico no especialista. *Revista Médica Clínica Las Condes*, 30(6), 407–413.
<https://doi.org/10.1016/j.rmclc.2019.10.003>
- Cobeñas, R., Aguilar, M., Aranguren, J., Gallo, J. C., Espil, G., & Kozima, S. (2016). Cefalea... ¿Y algo más? Neuroimágenes en el estudio de la cefalea. *Revista Argentina de Radiología*, 80(3), 192–203.
<https://doi.org/10.1016/j.rard.2015.09.006>
- De Tommaso, M., Vecchio, E., Quitadamo, S. G., Coppola, G., Di Renzo, A., Parisi, V., Silvestro, M., Russo, A., & Tedeschi, G. (2021). Pain-related brain connectivity changes in migraine: A narrative review and proof of concept about possible novel treatments interference. *Brain Sciences*, 11(2), 234.
<https://doi.org/10.3390/brainsci11020234>
- Ejarque Roca, D., Arruej Gracia, R., Bosque Ferrer, S., Alriols Andrés, L., Ledesma López, M., & Villa Pobo, R. (2023, octubre 27). Introducción a la resonancia magnética funcional (fMRI). *Revista Sanitaria de Investigación*.
<https://revistasanitariaideinvestigacion.com/introduccion-a-la-resonancia-magnetica-funcional-fmri/>
- Eigenbrodt, A. K., Ashina, H., Khan, S., Diener, H.-C., Mitsikostas, D. D., Sinclair, A. J., Pozo-Rosich, P., Martelletti, P., Ducros, A., Lantéri-Minet, M., Braschinsky, M., Sanchez del Rio, M., Daniel, O., Özge, A., Mammadbayli, A., Arons, M., Skorobogatykh, K., Romanenko, V., Terwindt, G. M., Paemeleire, K., Sacco, S., Reuter, U., Lampl, C., Schytz, H. W., Katsarava, Z., Steiner, T. J., & Ashina, M. (2021). Diagnosis and management of migraine in ten steps. *Nature Reviews Neurology*, 17, 501–514.
<https://doi.org/10.1038/s41582-021-00509-5>
- Erus, G., Habes, M., & Davatzikos, C. (2020). Machine learning based imaging biomarkers in large scale population studies: A neuroimaging perspective. In *Handbook of Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention*. Elsevier, 379–399.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816176-0.00021-1>
- Goadsby, P. J., Holland, P. R., Martins-Oliveira, M., Hoffmann, J., Schankin, C., & Akerman, S. (2017). Pathophysiology of migraine: A disorder of sensory processing. *Physiological Reviews*, 97(2), 553–622.
<https://doi.org/10.1152/physrev.00034.2015>
- Gómez-Otalvaro, M. A., & Serna-Vélez, L. (2015). Cefalea: Más que un simple dolor. *Revista Mexicana de Neurociencia*, 16(6), 41–53.
<https://previous.revmexneurociencia.com/wp-content/uploads/2016/03/RevMexNeuroci-No-6-Nov-Dic-2015-41-53-R.pdf>
- Guamán Yanza, E. G., Mejía Mora, M. C., Rey Mora, M. R., & Iturralde Avilés, M. E. (2024). Avances en tomografía por emisión de positrones (PET) y tomografía computarizada (CT): Aplicaciones clínicas y futuras perspectivas en imagenología médica. *RECIAMUC*, 8(1), 826–835.
[https://doi.org/10.26820/reciamuc/8.\(1\).ene.2024.826-835](https://doi.org/10.26820/reciamuc/8.(1).ene.2024.826-835)
- Huang, S. Y., Salomon, M., & Eikermann-Haerter, K. (2023). Advanced brain MRI may help understand the link between migraine and multiple sclerosis. *The Journal of Headache and Pain*, 24(113).
<https://doi.org/10.1186/s10194-023-01645-7>
- Jang, Y. E., Cho, E. Y., Choi, H. Y., Kim, S. M., & Park, H. Y. (2019). Diagnostic neuroimaging in headache patients: A systematic review and meta-analysis. *Psychiatry Investigation*, 16(6), 407–417. <https://doi.org/10.30773/pi.2019.04.11>
- Kalani, M., & Anjankar, A. (2024). Revolutionizing neurology: The role of artificial intelligence in advancing diagnosis and treatment. *Cureus*, 16(6), e61706.
<https://doi.org/10.7759/cureus.61706>
- Li, G., Yang, H., He, L., & Zeng, G. (2025). Interpretable artificial intelligence analysis of functional magnetic resonance imaging for migraine classification: Quantitative study. *JMIR Medical Informatics*, 13, e72155.
<https://doi.org/10.2196/72155>
- Lv, X. (2024). Introductory chapter: Advances in neuroimaging. En *Advances in neuroimaging*. IntechOpen.
<https://doi.org/10.5772/intechopen.114076>
- Markello, R. D., Hansen, J. Y., Liu, Z.-Q., Bazinet, V., Shafiee, G., Suárez, L. E., Blostein, N., Seidlitz, J., Baillet, S., Satterthwaite, T. D., Chakravarty, M. M., Raznahan, A., & Misic, B. (2022). neuromaps: Structural and functional interpretation of brain maps. *Nature Methods*, 19, 1472–1479.
<https://doi.org/10.1038/s41592-022-01625-w>



- Messina, R., Pagani, E., Genovese, F., Cetta, I., Zanandrea, L., Colombo, B., Rocca, M., & Filippi, M. (2025). *Investigating glymphatic dysfunction in migraine: A role in headache pain and migraine chronification?* (P4-12.002). *Neurology*, 104(7, Suppl. 1), 1949. <https://doi.org/10.1212/WNL.00000000000208840>
- Obermann, M., Holle, D., & Nagel, S. (2018). Functional neuroimaging in trigeminal autonomic cephalgias. *Annals of Indian Academy of Neurology*, 21(Suppl 1), S51-S56. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC5909135/>
- Organización Mundial de la Salud. (2025). *Migraña y otras cefaleas*. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/headache-disorders>
- Orozco Cubero, C., & Alfaro Guerra, L. F. (2022). Cefaleas que amenazan la vida. *Revista Ciencia y Salud Integrando Conocimientos*, 6(3), 119–128. <https://doi.org/10.34192/cienciaysalud.v6i3.437>
- Pascual, J. (2019). Cefalea y migraña [Headache and migraine]. *Medicine - Programa de Formación Médica Continuada Acreditado*, 12(71), 4145–4153. <https://doi.org/10.1016/j.med.2019.01.010>
- Ruiz-Reyes, D., Carvajal-Otaño, N. M., & García-Arencibia, R. (2025). Técnicas de neuroimagen en pacientes pediátricos. *Revista Medest*, 3(3), e196. <https://revmedest.sld.cu/index.php/medest/article/view/196>
- Savatierra Baldeón, J. A. (2021). Nociones básicas en técnicas de neuroimagen y electroencefalograma. *Neurama: Revista Electrónica de Psicogerontología*, 8(1). <https://www.neurama.es/articulos/15/articulo3.pdf>
- San-Juan, D., Vélez-Jiménez, K., Hoffmann, J., Martínez-Mayorga, A. P., Melo-Carrillo, A., Rodríguez-Leyva, I., García, S., Collado-Ortiz, M. Á., Chiquete, E., Gudiño-Castelazo, M., Juárez-Jiménez, H., Martínez-Gurrola, M., Marfil, A., Nader-Kawachi, J. A., Uribe-Jaimes, P. D., Dario-Vargas, R., & Villarreal-Careaga, J. (2024). Cluster headache: An update on clinical features, epidemiology, pathophysiology, diagnosis, and treatment. *Revista Frontiers in Pain Research*, 5. <https://doi.org/10.3389/fpain.2024.1373528>
- Shen, X., Zhu, Z., Li, X., Zhang, W., Zhang, X., & Zhang, B. (2024). Contribution of advanced neuroimaging in diagnosis of cerebral syphilitic gumma: A case report. *Frontiers in Neuroscience*, 18, 1442176. <https://doi.org/10.3389/fnins.2024.1442176>
- Sun, W.-x., Chen, T.-y., Song, M.-m., Gao, Y.-j., & Xu, S.-y. (2025). Energy metabolism disorders in migraine: Triggers, pathways, and therapeutic repurposing. *Frontiers in Neurology*, 16, 1561000. <https://doi.org/10.3389/fneur.2025.1561000>
- Tae, W.-S., Ham, B.-J., Pyun, S.-B., Kang, S.-H., & Kim, B.-J. (2018). Current clinical applications of diffusion-tensor imaging in neurological disorders. *Journal of Clinical Neurology*, 14(2), 129–140. <https://doi.org/10.3988/jcn.2018.14.2.129>
- Trotter, J., Pantel, A. R., Teo, B.-K. K., Escoria, F. E., Li, T., Pryma, D. A., & Taunk, N. K. (2023). Positron emission tomography (PET)/computed tomography (CT) imaging in radiation therapy treatment planning: A review of PET imaging tracers and methods to incorporate PET/CT. *Advances in Radiation Oncology*, 8(5), 101212. [https://www.advancesradonc.org/article/S2452-1094\(23\)00041-6/fulltext](https://www.advancesradonc.org/article/S2452-1094(23)00041-6/fulltext)
- Tushita, T., Srivastava, V., & Singh, R. K. (2025). Transforming brain research: Neuroimaging breakthroughs driven by AI. *AIP Conference Proceedings*, 3254, 020021. <https://doi.org/10.1063/5.0248504>
- Van Timmeren, J. E., Cester, D., Tanadini-Lang, S., Alkadhi, H., & Baessler, B. (2020). Radiomics in medical imaging—"how-to" guide and critical reflection. *Insights into Imaging*, 11(91). <https://doi.org/10.1186/s13244-020-00887-2>
- Wang, R., Liu, R., Dong, Z., Su, H., Ao, R., Liu, Y., Wang, Y., Ma, L., & Yu, S. (2018). Unnecessary neuroimaging for patients with primary headaches. *Headache: The Journal of Head and Face Pain*, 59(1), 63–68. <https://doi.org/10.1111/head.13397>
- Yang, Y., Luo, S., Wang, W., Gao, X., Yao, X., & Wu, T. (2024). From bench to bedside: Overview of magnetoencephalography in basic principle, signal processing, source localization and clinical applications. *NeuroImage: Clinical*, 42, 103608. <https://doi.org/10.1016/j.nicl.2024.103608>
- Yen, C., Lin, C.-L., & Chiang, M.-C. (2023). Exploring the frontiers of neuroimaging: A review of recent advances in understanding brain functioning and disorders. *Life*, 13(7), 1472. <https://doi.org/10.3390/life13071472>
- Yuan, H., Na, W., Li, B., Miao, S., Tang, W., Kang, L., Pi, C., Yang, C., Xie, W., Wang, T., Zhai, D., Zhao, D., Liu, R., & Yu, S. (2025). Optogenetic cortical spreading depression originating from the primary visual cortex induces migraine-like pain and anxiety behaviors in freely moving C57BL/6 J mice. *The Journal of Headache and Pain*, 26(44). <https://doi.org/10.1186/s10194-025-01983-8>



sciencevolution

ISSN: 2810-8728 (En línea)

4.4

OCTUBRE - DICIEMBRE
2025

Revisión Bibliográfica
116 - 131

Zhang, H., Zhou, Q.-Q., Chen, H., Hu, X.-Q., Li, W.-G., Bai, Y., Han, J.-X., Wang, Y., Liang, Z.-H., Chen, D., Cong, F.-Y., Yan, J.-Q., & Li, X.-L. (2023). The applied principles of EEG analysis methods in neuroscience and clinical neurology. *Military Medical Research*, 10(67). <https://doi.org/10.1186/s40779-023-00502-7>

Avances en Técnicas de Neuroimagen para el Diagnóstico de Cefaleas

Karla Rocío Castro López
ORCID: 0009-0009-5867-1601
<https://revista.sciencevolution.com>

