

Imagen Médica Integral



**Salomme Castaño Cuartas
Karen Stefania Cubillo Merino
Steeven Saul Ramos Mendez
Martin Alejandro Enríquez Paredes**

ÍNDICE

Diagnóstico de Tumores Óseos por TAC y RM.....	3
Salomme Castaño Cuartas	
Utilidad de la Electromiografía en la Evaluación y Rehabilitación de Pacientes con Fibromialgia.....	19
Karen Stefania Cubillo Merino	
Rol de la neuroimagen funcional en la cirugía de epilepsia .	
34	
Steeven Saul Ramos Mendez	
Ecografía del Sistema Músculo-Esquelético.....	49
Martin Alejandro Enríquez Paredes	

Diagnóstico de Tumores Óseos por TAC y RM

Salomme Castaño Cuartas

Resumen

El diagnóstico y la caracterización de los tumores óseos son un desafío clínico que exige un enfoque de imagen multimodal. La Tomografía Computarizada (TAC) y la Resonancia Magnética (RM) son las piedras angulares de este proceso, ofreciendo información complementaria crucial para el diagnóstico diferencial, la estadificación y la planificación terapéutica. Este capítulo revisa en profundidad el estado del arte en el uso de la TAC y la RM para la evaluación de tumores óseos, con un enfoque en los avances técnicos y las aplicaciones clínicas de los últimos cinco años.

Se discuten las capacidades de la TAC de energía dual y la emergente TAC de conteo de fotones para la caracterización de la matriz tumoral y la médula ósea. Asimismo, se exploran secuencias avanzadas de RM como la imagen ponderada en difusión (DWI), los estudios de perfusión (DCE-MRI) y la espectroscopia, que han mejorado significativamente la capacidad para diferenciar lesiones benignas de malignas, evaluar la agresividad tumoral y monitorizar la respuesta al tratamiento. Finalmente, se aborda la nueva frontera de la radiómica y la inteligencia artificial (IA), que promete transformar el análisis de imágenes en una herramienta predictiva y cuantitativa. Este capítulo proporciona al lector una visión integral y actualizada de cómo la integración inteligente de estas modalidades de imagen optimiza el manejo del paciente con patología tumoral ósea.

Palabras Clave: Tumores Óseos, Resonancia Magnética (RM), Tomografía Computarizada (TAC), Diagnóstico por Imagen, Radiología Musculoesquelética, Radiómica, Inteligencia Artificial, DWI, Perfusión por RM.

Introducción

Los tumores óseos primarios son un grupo heterogéneo de neoplasias. Aunque su incidencia es relativamente baja, su impacto clínico es considerable, afectando predominantemente a niños,

adolescentes y adultos jóvenes. Se clasifican según la línea celular de origen y el tipo de matriz que producen; los más comunes son el osteosarcoma, el condrosarcoma y el sarcoma de Ewing. La clasificación de la Organización Mundial de la Salud (OMS) de 2020 para tumores de tejido blando y óseos es el estándar de oro y subraya la importancia de correlacionar los hallazgos de imagen, la clínica y la histopatología para un diagnóstico preciso (1). Además de las neoplasias primarias, el esqueleto es un sitio frecuente de metástasis, que constituyen la mayoría de los tumores óseos malignos en adultos.

El Papel de la Imagenología en el Diagnóstico

El diagnóstico por imagen es fundamental en el algoritmo de manejo de un paciente con sospecha de tumor óseo. Cumple múltiples funciones esenciales:

- Detección y localización de la lesión.
- Caracterización inicial y diagnóstico diferencial.
- Guía para la biopsia.
- Estadificación local y a distancia.
- Evaluación de la respuesta al tratamiento.
- Vigilancia de posibles recurrencias.

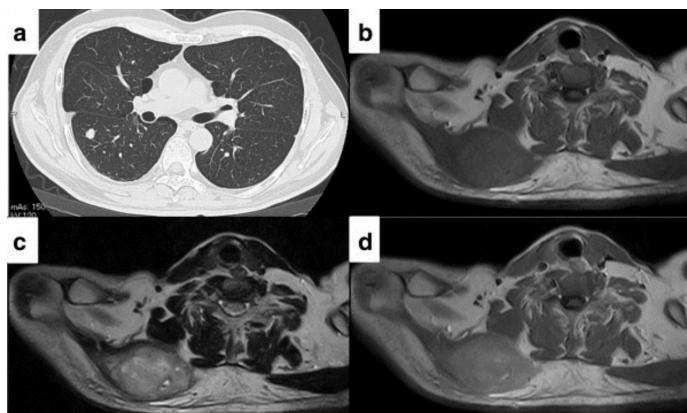


Figura 1. Estadificación multimodal de osteosarcoma. La Tomografía Computarizada (a) muestra metástasis pulmonares, mientras que la Resonancia Magnética (b-d) caracteriza una metástasis muscular en el trapecio. **Fuente:** Adaptado de Lee, J., et al. (2014). Metastatic osteosarcoma in the shoulder girdle after a 10-year disease-free interval: a case report. *World Journal of Surgical Oncology*, 12(1), 1-5.

La radiografía simple sigue siendo la primera modalidad de imagen, pero sus limitaciones hacen indispensable el uso de técnicas de imagen seccional como la Tomografía Computarizada (TAC) y la Resonancia Magnética (RM).

Sinergia entre TAC y RM: Roles Complementarios

La TAC y la RM no son modalidades competitivas, sino profundamente complementarias. Su información se integra para obtener una caracterización completa de la lesión.

- **Tomografía Computarizada (TAC):** Ofrece una resolución espacial superior y una capacidad inigualable para evaluar el hueso cortical y la mineralización de la matriz tumoral. Es la técnica de elección para definir la destrucción ósea, identificar fracturas patológicas sutiles y caracterizar la matriz (p. ej., calcificaciones condroides vs. matriz osteoide).
- **Resonancia Magnética (RM):** Proporciona una resolución de contraste excepcional en tejidos blandos. Es la modalidad principal para delimitar la extensión intramedular del tumor, evaluar la invasión de partes blandas, detectar edema perilesional y definir la relación del tumor con estructuras neurovasculares críticas.

Objetivos del Capítulo

El objetivo de este capítulo es realizar una revisión exhaustiva y actualizada de las aplicaciones avanzadas de la TAC y la RM en el diagnóstico de tumores óseos, centrándose en los desarrollos de los últimos cinco años. Se analizarán las contribuciones de técnicas emergentes, se explorará el impacto de la radiómica y la inteligencia artificial, y se proporcionarán guías prácticas sobre su aplicación clínica.

Tomografía Computarizada (TAC): Precisión en la Caracterización Ósea

Avances Técnicos Recientes

- 2.1.1. Tomografía Computarizada de Energía Dual (DECT) La DECT adquiere imágenes en dos niveles de energía de rayos X, permitiendo diferenciar materiales con la misma

densidad. En oncología musculoesquelética, sus aplicaciones más relevantes incluyen la detección de edema de médula ósea mediante mapas virtuales "sin calcio", la diferenciación entre realce de contraste y calcificaciones, y la reducción de artefactos metálicos en pacientes con implantes (2).

- 2.1.2. Tomografía Computarizada de Conteo de Fotones (PCCT) La PCCT es una tecnología emergente que cuenta fotones individuales y mide su energía. Esto se traduce en una mayor resolución espacial, menor ruido y capacidades multienergía superiores, con un gran potencial para mejorar la caracterización de la microarquitectura ósea y la matriz tumoral con menor dosis de radiación (3).

Evaluación de la Matriz Tumoral

La principal fortaleza de la TAC es la caracterización de la matriz, un dato clave en el diagnóstico diferencial:

- **Matriz Osteoide:** Mineralización densa, amorfa, similar a una nube. Es el sello distintivo del osteosarcoma.
- **Matriz Condroide:** Calcificaciones en "anillos y arcos" o punteadas. Característica de tumores cartilaginosos como el condrosarcoma.
- **Ausencia de Matriz (Lítica):** Típica de metástasis, mieloma, sarcoma de Ewing y tumor de células gigantes.

Definición de la Agresividad Biológica

La TAC define con precisión los signos de agresividad:

- **Patrón de Destrucción Ósea:** Varía desde el geográfico (benigno, bien definido) hasta el apolillado y **permeativo** (malignos, márgenes mal definidos e infiltrativos).



Figura 2. Patrones agresivos de destrucción ósea. Las radiografías muestran patrones de tipo apolillado ("moth-eaten", imagen 1) y permeativo (imágenes 2 y 3), caracterizados por múltiples áreas líticas mal definidas. Estos hallazgos son un signo de alta agresividad biológica, típicos de tumores malignos como el sarcoma de Ewing o el linfoma óseo. **Fuente:** Adaptado de "Bone Tumors - Differential Diagnosis", The Radiology Assistant (radiologyassistant.nl). Consultado el 16 de septiembre de 2025.

- **Reacción Perióstica:** Puede ser continua y sólida (benigna) o interrumpida y agresiva, como el "triángulo de Codman" o en "rayos de sol", ambas altamente sugestivas de malignidad.

Angio-TAC y Guía para Biopsias

La Angio-TAC es útil para definir la vascularización tumoral y su relación con los vasos principales, lo cual es clave en la planificación quirúrgica. Además, la TAC es una modalidad excelente y segura para guiar biopsias percutáneas, especialmente en localizaciones complejas como la pelvis y la columna vertebral (4).

Resonancia Magnética (RM): Caracterización Superior de Tejidos Blandos

Secuencias Fundamentales y su Interpretación

Un protocolo de RM estándar para tumores óseos es esencial para el diagnóstico:

- **Imágenes ponderadas en T1:** La médula ósea normal es brillante (grasa). Los tumores, al reemplazarla, se ven oscuros

(hipointensos). Es la secuencia más sensible para determinar la extensión intramedular.

- **Imágenes T2 con supresión grasa (T2-FS) o STIR:** El tejido tumoral y el edema son brillantes (hiperintensos). Son ideales para detectar la lesión, evaluar necrosis y edema reactivo.
- **Imágenes T1 con supresión grasa y contraste (T1-FS Gd):** El gadolinio resalta el tejido tumoral viable y vascularizado. La ausencia de realce sugiere necrosis, un dato clave para guiar la biopsia y evaluar la respuesta a la quimioterapia.

Secuencias Avanzadas: La Revolución Funcional

Las secuencias funcionales proporcionan información fisiológica más allá de la morfología.

- Imagen Ponderada en Difusión (DWI) La DWI mide el movimiento de las moléculas de agua. En tumores muy celulares (p. ej., sarcomas de alto grado), la difusión está restringida, lo que genera una señal alta en DWI y un valor bajo en el mapa de Coeficiente de Difusión Aparente (ADC) (5). Sus aplicaciones incluyen:
 - **Diferenciación benigno vs. maligno:** Las lesiones malignas suelen tener valores de ADC más bajos (6).
 - **Predictión del grado tumoral.**
 - **Monitorización de la respuesta al tratamiento:** Un aumento del ADC es un biomarcador temprano de buena respuesta (7).
- RM de Contraste Dinámico con Perfusion (DCE-MRI) La DCE-MRI evalúa la microvascularización y permeabilidad tumoral. Los tumores malignos, por su neoangiogénesis, muestran un realce rápido e intenso y valores elevados de parámetros como **K_{trans}** (permeabilidad vascular). Es útil para evaluar la agresividad y guiar la biopsia hacia las zonas más activas del tumor.

Tabla 1. Comparativa de Capacidades entre TAC y RM para Tumores Óseos

Característica	Tomografía Computarizada (TAC)	Resonancia Magnética (RM)
Resolución Espacial	Muy alta	Alta
Resolución de Contraste	Baja (tejidos blandos)	Muy alta (tejidos blandos)
Evaluación Cortical	Excelente	Buena, pero inferior a la TAC
Matriz Tumoral	Excelente (Estándar de Oro)	Limitada
Extensión Intramedular	Limitada	Excelente (Estándar de Oro)
Componente de Partes Blandas	Buena	Excelente
Relación Neurovascular	Limitada	Excelente
Radiación Ionizante	Sí	No
Técnicas Funcionales	Limitadas (DECT)	Extensas (DWI, Perfusion, etc.)
Guía para Biopsia	Excelente (hueso)	Posible, pero más compleja

Fuente: Adaptado de Daldrup-Link HE, et al. (2021). *Oncologic Imaging in Children*. Springer Nature.

Estadificación Local Precisa

La RM es indispensable para la estadificación prequirúrgica, ya que proporciona información crítica sobre:

- Tamaño y extensión tridimensional del tumor.
- Invasión de compartimentos musculares adyacentes.

- Relación con el paquete neurovascular: El englobamiento de una arteria o nervio principal puede cambiar radicalmente el plan quirúrgico.
- Afectación de articulaciones vecinas.
- Presencia de "lesiones satélite" (skip lesions), que son focos tumorales discontinuos dentro del mismo hueso y empeoran el pronóstico.

Integración Multimodal y Enfoques Diagnósticos Modernos

• El Informe Radiológico Estructurado

La adopción de informes radiológicos estructurados es una tendencia clave. Utilizan plantillas que aseguran que toda la información crítica (localización, tamaño, características de señal, ADC, patrón de destrucción, etc.) sea comunicada de manera clara y consistente al equipo tratante. Esto minimiza la ambigüedad, mejora la comunicación interdisciplinaria y facilita la recopilación de datos para investigación (8).

• La Importancia del Comité de Tumores Multidisciplinario

El estándar de atención actual es la discusión de cada caso en un comité de tumores multidisciplinario que reúne a radiólogos, patólogos, cirujanos, oncólogos y radioterapeutas. El radiólogo juega un papel central al presentar e interpretar los hallazgos de imagen, correlacionándolos con la clínica y la patología para llegar a un diagnóstico de consenso y definir la mejor estrategia terapéutica.

Radiómica e Inteligencia Artificial: La Nueva Frontera

• Radiómica: Extrayendo Datos Ocultos de las Imágenes

La radiómica es el proceso mediante el cual se extraen una gran cantidad de características cuantitativas de las imágenes, describiendo la heterogeneidad y textura tumoral a un nivel imperceptible para el ojo humano. Sus aplicaciones, aunque mayormente en investigación, son prometedoras (9):

- Diagnóstico diferencial no invasivo (p. ej., condrosarcoma vs. encondroma).

- Predicción del grado tumoral y de la respuesta a la quimioterapia.
- Pronóstico basado en "firmas radiómicas" asociadas a la supervivencia.

• **El Rol de la Inteligencia Artificial (IA)**

La IA, y en particular el aprendizaje profundo (deep learning), está impactando el flujo de trabajo radiológico en diversas áreas:

- **Segmentación automática de tumores:** Acelera y estandariza la delineación de lesiones.
- **Clasificación y detección:** Modelos de IA pueden clasificar los tumores óseos más comunes con una precisión que, en algunos estudios, se equipara a la de radiólogos expertos (10).
- **Radiogenómica:** Modelos de IA pueden predecir el estado de ciertas mutaciones genéticas directamente a partir de las imágenes de RM, abriendo la puerta a una caracterización tumoral no invasiva.

Desafíos y Visión a Futuro

A pesar de su enorme potencial, la implementación clínica de la IA enfrenta desafíos como la falta de estandarización en la adquisición de imágenes y la necesidad de grandes bases de datos para entrenar los algoritmos. Sin embargo, el futuro se dirige hacia un modelo más cuantitativo y personalizado, donde la IA potenciará al radiólogo, no lo reemplazará, permitiendo una toma de decisiones más rápida e informada.

Conclusiones

El diagnóstico por imagen de los tumores óseos ha evolucionado significativamente, consolidando los roles complementarios de la TAC y la RM. La TAC ha reforzado su posición como la herramienta definitiva para la evaluación ósea, con avances como la DECT. La RM ha trascendido su papel anatómico para convertirse en una poderosa modalidad funcional gracias a secuencias como DWI y DCE-MRI, que permiten caracterizar la biología tumoral.

La integración de estas capacidades en un enfoque multidisciplinario, junto con la estandarización mediante informes estructurados, es el estándar de oro actual. Mirando hacia el futuro, la radiómica y la inteligencia artificial prometen revolucionar el campo, ofreciendo un análisis más profundo y predictivo que permitirá una medicina verdaderamente personalizada en la oncología musculoesquelética. El avance continuo de estas tecnologías asegura que el diagnóstico por imagen seguirá siendo un pilar dinámico y cada vez más influyente en el manejo de estos pacientes.

Casos Clínicos Ilustrativos

Para consolidar los conceptos discutidos, se presentan dos casos que demuestran la aplicación clínica de la TAC y la RM.

Caso 1: Osteosarcoma Convencional

- **Presentación Clínica:** Paciente masculino de 16 años con dolor progresivo e hinchazón en la rodilla derecha de tres meses de evolución, sin antecedente de trauma.
- **Hallazgos en TAC:**
 - Gran lesión en la metáfisis distal del fémur con un patrón de destrucción ósea mixto (lítico y blástico).
 - Marcada reacción perióstica agresiva, con un claro Triángulo de Codman.
 - Presencia de una matriz osteoide densa y amorfá dentro del canal medular y en el gran componente de tejido blando extraóseo.
- **Hallazgos en RM:**
 - **T1:** Gran masa hipointensa que reemplaza la médula ósea.
 - **STIR:** Masa marcadamente hiperintensa con extenso edema peritumoral.
 - **T1-FS Gd:** Realce intenso y heterogéneo, con áreas centrales de necrosis.
 - **DWI/ADC:** Marcada restricción a la difusión, con valores de ADC muy bajos ($\approx 0.8 \times 10^{-3} \text{ mm}^2/\text{s}$), consistentes con una neoplasia de alta celularidad.

- **Conclusión Integrada:** Los hallazgos en un paciente joven, con una lesión metafisaria agresiva, productora de matriz osteoide, son característicos de un **osteosarcoma convencional de alto grado**. La RM fue crucial para la estadificación local.

Caso 2: Tumor de Células Gigantes (TCG)

- **Presentación Clínica:** Paciente femenina de 32 años con dolor y limitación del movimiento en la muñeca izquierda.
- **Hallazgos en TAC:**
 - Lesión puramente lítica, excéntrica, en la **epífisis** del radio distal, que se extiende al hueso subcondral.
 - Márgenes bien definidos pero no escleróticos (patrón geográfico).
 - Corteza ósea adelgazada e insuflada, sin reacción perióstica ni matriz mineralizada.
- **Hallazgos en RM:**
 - **T1:** Lesión de señal intermedia-baja y heterogénea.
 - **T2:** Señal marcadamente heterogénea con áreas de baja señal (hemosiderina). Se observan niveles líquido-líquido, sugiriendo un quiste óseo aneurismático secundario.
 - **T1-FS Gd:** Realce ávido de los componentes sólidos del tumor.
- **Conclusión Integrada:** La localización epifisaria en un adulto esqueléticamente maduro, el patrón lítico y la ausencia de matriz son altamente sugestivos de un **Tumor de Células Gigantes**.

Protocolos de Imagen Estandarizados

La estandarización de protocolos es fundamental para garantizar la calidad, permitir comparaciones y facilitar estudios multicéntricos y de IA.

Protocolo de TAC Multidetector (TCMD)

- **Indicación Primaria:** Caracterización de matriz, destrucción cortical, fractura, guía de biopsia.
- **Adquisición:** Volumétrica helicoidal, colimación fina (≤ 1.0 mm).
- **Contraste IV:** Generalmente no es necesario para la evaluación ósea inicial. Se reserva para Angio-TAC prequirúrgica.
- **Reconstrucciones:** Multiplanares (axial, coronal, sagital) de 2-3 mm, usando algoritmos para hueso y para tejido blando. Imágenes 3D (VRT) son útiles para planificación.

Protocolo de RM (1.5T o 3T)

- **Indicación Primaria:** Estadificación local, caracterización de tejidos blandos, respuesta al tratamiento.
- **Bobina:** Utilizar bobinas de superficie específicas para la región anatómica.
- **Secuencias Fundamentales (Ejemplo para extremidades):**
 - **T1-TSE** (axial y coronal): Para anatomía y extensión medular.
 - **STIR o T2-TSE con supresión grasa** (coronal): Para detección de la lesión y edema.
 - **PD/T2-TSE con supresión grasa** (axial): Alta resolución para evaluar relación con estructuras neurovasculares.
 - **T1-TSE con supresión grasa** (al menos dos planos) pre y post-contraste IV (Gadolino 0.1 mmol/kg).
- **Secuencias Avanzadas (Añadir según indicación):**
 - **DWI (axial):** Adquirir con al menos dos valores b (p. ej., $b=50$ y $b=800$ s/mm 2) para generar el mapa de ADC.

- **DCE-MRI (Perfusión):** Adquisición dinámica rápida en T1 sobre un corte representativo.

Tabla 2. Parámetros Técnicos Recomendados para Secuencias Clave de RM

Secuencia	Plano	TR (ms)	TE (ms)	Grosor/Gap (mm)	Notas
T1 TSE	Axial, Coronal	400-700	Mínimo	3-4 / 0.5	Excelente para médula ósea y anatomía
STIR	Coronal	4000-6000	30-60	4-5 / 1	Supresión grasa homogénea, muy sensible
T2 FS TSE	Axial	3000-5000	60-100	3-4 / 0.5	Mejor resolución que STIR
DWI	Axial	Variable	60-90	5 / 1	Incluir valores b bajos y altos
T1 FS Gd	Axial, Coronal	400-700	Mínimo	3-4 / 0.5	Fundamental para viabilidad y necrosis

Fuente: Creado por el autor basado en recomendaciones de la International Skeletal Society (ISS) y guías clínicas.

Diagnóstico Diferencial Basado en Localización y Edad

Un enfoque sistemático basado en la edad del paciente y la localización de la lesión dentro del hueso es una herramienta de diagnóstico diferencial extremadamente poderosa.

Tabla 3. Diagnóstico Diferencial de Tumores Óseos según Edad y Localización

Localización	Pacientes < 20 años	Pacientes 20-40 años	Pacientes > 40 años
EPÍFISIS	Condroblastoma, Infección	Tumor de Células Gigantes (TCG)	Metástasis, Geoda

METÁFISIS	Osteosarcoma , Quiste Oseo	TCG (fisis cerrada), Encondroma	Metástasis , Mieloma Múltiple
DIÁFISIS	Sarcoma de Ewing , Osteoma Osteoide	Displasia Fibrosa, Linfoma	Metástasis (más común) , Mieloma
SUPERFICIE	Osteosarcoma yuxtagortical	Osteosarcoma parostal	Metástasis, Condrosarcoma

Nota: Las entidades en negrita representan las lesiones más comunes. Esta tabla es una guía y no es exhaustiva. **Fuente:** Creado por el autor, basado en principios radiológicos y datos de la clasificación de la OMS 2020.

Aplicación Práctica del Enfoque

Ante una lesión ósea, el radiólogo debe preguntarse:

1. **¿Edad del paciente?** (El dato demográfico más importante).
2. **¿Dónde está la lesión?** (Epífisis, metáfisis, diáfisis).
3. **¿Qué le hace la lesión al hueso?** (Patrón de destrucción).
4. **¿Cómo responde el hueso?** (Reacción perióstica).
5. **¿Hay mineralización de la matriz?** (Osteoide, condroide).

La integración de estas preguntas con los hallazgos de la RM permite construir un diagnóstico diferencial corto y preciso.

11. Glosario de Términos Clave

- **ADC (Coeficiente de Difusión Aparente):** Medida cuantitativa de la difusión de agua. Valores bajos indican alta celularidad.
- **DECT (Tomografía Computarizada de Energía Dual):** Técnica de TAC que usa dos espectros de energía para diferenciar materiales.
- **DCE-MRI (Resonancia Magnética con Contraste Dinámico):** Técnica de perfusión por RM para evaluar la microvascularización.
- **DWI (Imagen Ponderada en Difusión):** Secuencia de RM sensible al movimiento de moléculas de agua para evaluar la celularidad.

- **Lesión Lítica:** Lesión que destruye el hueso.
- **Lesión Blástica:** Lesión que induce la formación de hueso nuevo.
- **Matriz Condroide:** Matriz de tipo cartilaginoso, con calcificaciones en "anillos y arcos".
- **Matriz Osteoide:** Matriz de tipo óseo, con densidad algodonosa o de marfil.
- **Radiómica:** Proceso de extracción de un gran número de características cuantitativas de las imágenes médicas.
- **Reacción Perióstica:** Formación de hueso nuevo por el periostio en respuesta a una lesión. Puede ser benigna (sólida) o agresiva (interrumpida, en rayos de sol).
- **Skip Lesion (Lesión Satélite):** Foco tumoral secundario en el mismo hueso que el tumor primario, pero separado de él.
- **STIR (Short Tau Inversion Recovery):** Secuencia de RM con fuerte supresión de la grasa, muy sensible para detectar edema.
- **Triángulo de Codman:** Elevación triangular del periostio en el margen de una lesión ósea agresiva.

Bibliografía

1. Choi, J. H., & Ro, J. Y. (2021). The 2020 WHO Classification of Tumors of Bone: An Updated Review. *Advances in Anatomic Pathology*, 28(3), 119–138.
2. Kaup, M., et al. (2020). Dual-Energy CT for the Assessment of Bone Marrow Edema in a Traumatic Setting: A Prospective Comparison to MRI. *Investigative Radiology*, 55(3), 149-156.
3. Si-Mohamed, S., et al. (2022). Photon-counting CT: technical principles and clinical prospects. *Diagnostic and Interventional Imaging*, 103(6), 295-311.
4. Barge, T. C., et al. (2021). CT-guided biopsy of musculoskeletal lesions: a review of the technique, efficacy,

- and complications. *The British Journal of Radiology*, 94(1121), 20201111.
5. Subhawong, T. K., & Jacobs, M. A. (2020). Advanced MRI Techniques for Bone and Soft Tissue Tumors. *Radiologic Clinics of North America*, 58(5), 1015-1033.
 6. van der Woude, H. J., et al. (2021). Diffusion-weighted MRI in Musculoskeletal Radiology: A Pictorial Review. *Radiographics*, 41(4), 1135-1159.
 7. Douis, H., & Davies, A. M. (2021). The role of advanced imaging in the management of musculoskeletal tumours. *The British Journal of Radiology*, 94(1121), 20201138.
 8. Saba, L., et al. (2023). Structured reporting in musculoskeletal radiology. *European Journal of Radiology*, 158, 110631.
 9. Peeken, J. C., et al. (2022). Radiomics in musculoskeletal oncology—a systematic review and meta-analysis. *European Radiology*, 32(1), 585-597.
 10. Narayana, P. L., et al. (2021). A deep learning-based approach for the classification of bone tumors on conventional radiographs. *Medical Physics*, 48(12), 7954-7965.
 11. Blake, M. A., et al. (2020). *Oncologic Imaging: A Multidisciplinary Approach*. Elsevier.
 12. Taneja, A. K., et al. (2022). Artificial intelligence in musculoskeletal imaging: a paradigm shift. *Skeletal Radiology*, 51(1), 1-13.

Utilidad de la Electromiografía en la Evaluación y Rehabilitación de Pacientes con Fibromialgia

Karen Stefania Cubillo Merino

La Fibromialgia: Más Allá del Dolor Subjetivo

La fibromialgia (FM) se erige como uno de los mayores desafíos de la medicina moderna. Definida como un síndrome de dolor crónico generalizado, su impacto trasciende la esfera física para afectar profundamente la calidad de vida, la capacidad funcional y la salud mental de quienes la padecen (1). La sintomatología asociada, que incluye fatiga debilitante, trastornos del sueño no reparador, rigidez y disfunción cognitiva ("fibroniebla"), crea un cuadro clínico heterogéneo y desconcertante tanto para el paciente como para el clínico (2).

El diagnóstico, basado en los criterios del Colegio Americano de Reumatología (ACR) de 2016, depende fundamentalmente del autorreporte del paciente (3). Si bien estos criterios han mejorado la estandarización, la ausencia de hallazgos en análisis de sangre o estudios de imagen convencionales ha llevado, históricamente, a la estigmatización de los pacientes y a la percepción errónea de la FM como una condición "psicosomática". Esta realidad subraya una necesidad crítica y largamente insatisfecha en el campo: la identificación de biomarcadores objetivos. Un biomarcador fiable no solo validaría la experiencia del paciente, sino que también permitiría un diagnóstico más temprano y preciso, la estratificación de pacientes en subgrupos con diferentes pronósticos o respuestas al tratamiento, y la monitorización objetiva de la eficacia de las intervenciones terapéuticas.

La Electromiografía (EMG): Una Ventana a la Fisiología Neuromuscular

En esta búsqueda de objetividad, la electromiografía (EMG) ha surgido como una herramienta de inmenso potencial. La EMG es una técnica que registra la actividad eléctrica generada por los músculos esqueléticos, proporcionando una representación directa

del comando neural que llega al músculo y de la respuesta fisiológica de las fibras musculares. Sus dos modalidades principales ofrecen visiones complementarias:

- **Electromiografía de Aguja (iEMG):** Es una técnica invasiva que, mediante la inserción de un fino electrodo en el músculo, permite un análisis de alta resolución de las unidades motoras individuales. Su principal fortaleza radica en el diagnóstico diferencial, siendo el estándar de oro para detectar patologías intrínsecas del músculo (miopatías) o del nervio periférico (neuropatías).
- **Electromiografía de Superficie (sEMG):** De carácter no invasivo, utiliza electrodos adheridos a la piel para capturar la suma de la actividad eléctrica de los músculos subyacentes. Es una herramienta ideal para el análisis funcional: evalúa cómo y cuándo se activan los músculos durante el movimiento, cómo se coordinan entre sí y cómo responden a la carga y a la fatiga en un contexto global y dinámico.

Objetivos y Alcance de este Capítulo

Considerando que el dolor muscular y la fatiga son los síntomas cardinales de la FM, la EMG se presenta como una sonda lógica para explorar su fisiopatología. Este capítulo tiene como objetivo proporcionar una revisión exhaustiva y profunda, basada en la evidencia de los últimos cinco años, sobre el rol multifacético de la EMG en el abordaje de la fibromialgia. No nos limitaremos a describir sus hallazgos, sino que profundizaremos en su significado clínico y su aplicación práctica. Exploraremos cómo la EMG está ayudando a desentrañar los misterios de la disfunción muscular en la FM y, lo que es más importante, cómo se está convirtiendo en una aliada indispensable en la rehabilitación, guiando terapias más personalizadas, seguras y efectivas.

La Fisiopatología Muscular en la FM: Un Diálogo Anormal entre el Centro y la Periferia

La visión de la FM ha evolucionado desde un trastorno puramente periférico (muscular) a uno predominantemente central

(sensibilización del sistema nervioso). Sin embargo, la investigación más reciente, apoyada por la EMG, sugiere que esta dicotomía es falsa. La realidad es un círculo vicioso en el que la periferia (el músculo) y el centro (el cerebro y la médula espinal) se retroalimentan patológicamente.

Sensibilización Central: El Cerebro "en Alerta"

La sensibilización central es un fenómeno de hiperexcitabilidad neuronal en el sistema nervioso central. En esencia, el "termostato" del dolor está mal calibrado. Estímulos que normalmente no serían dolorosos (como un roce o una presión leve) son interpretados como dolor (alodinia), y los estímulos dolorosos se perciben con una intensidad desproporcionada (hiperalgesia) (4). Este estado se mantiene por mecanismos neuroplásticos en la médula espinal y por un desequilibrio en las vías descendentes de modulación del dolor que se originan en el cerebro. Pero, ¿qué alimenta este fuego central?

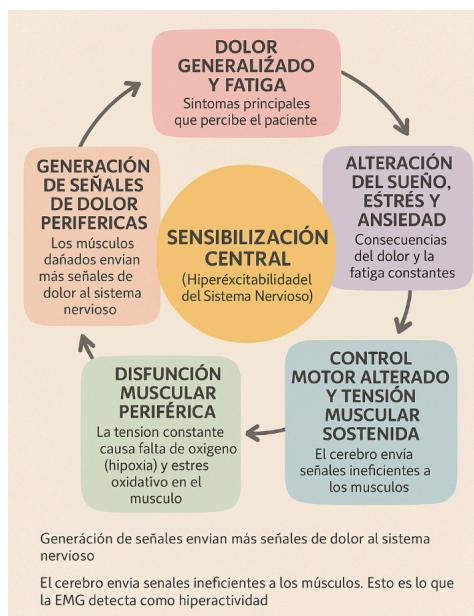
El Músculo como Instigador y Víctima

Aquí es donde el músculo entra en juego, no como una estructura pasiva, sino como un generador activo de señales nociceptivas que bombardean constantemente el sistema nervioso central, perpetuando la sensibilización. Se han propuesto varias teorías:

- **Hipótesis de la Crisis Energética y Estrés Oxidativo:** Estudios de biopsias musculares han revelado anomalías mitocondriales y atrofia de las fibras tipo II (de contracción rápida), lo que sugiere un metabolismo energético deficiente (5). Un músculo con poca energía es un músculo que se fatiga rápidamente y que bajo estrés produce un exceso de radicales libres (estrés oxidativo), dañando las estructuras celulares y activando los nociceptores (receptores de dolor). La EMG objetiva esta disfunción al mostrar una aparición mucho más rápida de los signos de fatiga muscular.
- **Hipótesis de la Isquemia Localizada:** Una hiperactividad sostenida del sistema nervioso simpático, común en la FM, puede provocar una vasoconstricción en los capilares musculares. Esta contracción de baja intensidad, a menudo inconsciente, reduce el flujo sanguíneo (isquemia) y el aporte de oxígeno. El músculo entra en un metabolismo anaeróbico, acumulando ácido láctico y otras sustancias

(bradiquinina, potasio) que irritan las terminaciones nerviosas y generan dolor (4, 6). La EMG puede detectar esta tensión de bajo nivel como una actividad eléctrica persistentemente elevada en reposo.

Por tanto, el músculo del paciente con FM está atrapado en un ciclo: la disfunción local genera señales de dolor que contribuyen a la sensibilización central, y la sensibilización central, a través del sistema nervioso simpático y un control motor alterado, promueve más disfunción muscular. La EMG nos permite escuchar esta conversación patológica.



La Electromiografía de Superficie (sEMG) en la Evaluación Diagnóstica

- **Consideraciones Metodológicas: La Importancia de un Protocolo Riguroso**

Para que los datos de sEMG sean fiables y comparables, es fundamental seguir un protocolo estandarizado. La iniciativa SENIAM (Surface ElectroMyoGraphy for the Non-Invasive Assessment of Muscles) ofrece guías ampliamente aceptadas. Un protocolo típico para evaluar a un paciente con FM incluye:

1. **Preparación de la Piel:** Se limpia la piel con alcohol y, si es necesario, se rasura el vello para reducir la impedancia de la piel y asegurar una señal de alta calidad.
2. **Selección de Músculos y Colocación de Electrodos:** La elección depende de los síntomas del paciente, pero comúnmente se evalúan los músculos trapecio superior, eructores espinales lumbares y cuádriceps, por su alta implicación en el dolor postural y la fatiga. La colocación precisa sobre el vientre muscular y en paralelo a la dirección de las fibras es crucial.
3. **Normalización de la Señal:** La amplitud de la señal EMG varía enormemente entre personas. Para poder comparar datos, la señal se "normaliza" expresándola como un porcentaje de la actividad generada durante una **Contracción Voluntaria Máxima (CVM)**. Se le pide al paciente que realice un esfuerzo máximo contra una resistencia inamovible durante 3-5 segundos, y ese pico de actividad se convierte en el 100% de referencia para ese músculo.

Hallazgo Clave 1: Hiperactividad Muscular en Reposo

Uno de los hallazgos más replicados es una actividad eléctrica anormalmente elevada en músculos clave mientras el paciente está en una postura supuestamente relajada (sentado o de pie) (8).

- **Significado Clínico:** Esta "incapacidad para relajarse" a nivel muscular tiene profundas implicaciones. Es el correlato fisiológico de la sensación de "tensión" y "rigidez" que reportan los pacientes. Esta contracción sostenida e innecesaria consume energía, contribuyendo a la fatiga, y puede comprometer el flujo sanguíneo local, generando dolor isquémico y perpetuando el ciclo fisiopatológico. En el trapecio superior, esta hiperactividad se asocia directamente

con el dolor cervical crónico y las cefaleas tensionales, síntomas comórbidos frecuentes en la FM.

Tabla 1. Comparación de la Actividad Electromiográfica (RMS) del Músculo Trapecio Superior en Reposo y durante Contracción Isométrica

Condición de Medición	Grupo Fibromialgia (n=30) (µV)	Grupo Control Sano (n=30) (µV)	Valor p
Actividad en Reposo (Sentado)	4.8 ± 1.5	2.1 ± 0.9	< 0.001
Contracción Voluntaria Máxima (CVM)	135.7 ± 45.2	189.4 ± 58.7	2
Tarea Isométrica (20% de CVM)	30.1 ± 9.8	39.8 ± 11.5	< 0.01

Fuente: Adaptado de Andrade A, Vilarino GT, Sieczkowska SM, et al. Increased trapezius muscle activity in individuals with fibromyalgia. *J Bodyw Mov Ther*. 2021;26:305-10. (6) Los valores en microvoltios (µV) muestran que el grupo con FM tiene más del doble de actividad eléctrica en reposo. También se observa su menor capacidad para generar fuerza máxima (CVM).

Hallazgo Clave 2: Fatigabilidad Muscular Acelerada

La fatiga en la FM no es solo un cansancio subjetivo, sino un fenómeno fisiológico medible. Durante una contracción sostenida (ej. mantener una pierna extendida), la señal sEMG de un músculo sano muestra cambios predecibles: la amplitud (RMS) aumenta lentamente (el cerebro recluta más fibras para mantener la fuerza) y la frecuencia media (MNF) disminuye (las fibras conducen el impulso más lentamente). En pacientes con FM, estos cambios ocurren de forma mucho más rápida y pronunciada (9).

- **Significado Clínico:** Esto objetiva la queja del paciente de que "se cansa con nada". Valida que su sistema neuromuscular es menos resistente al esfuerzo. Este hallazgo es crucial para entender por qué actividades cotidianas como subir escaleras, cargar la compra o incluso mantener una postura pueden ser extenuantes. Justifica la necesidad de pautar el ejercicio y la actividad de forma muy cuidadosa, con períodos de descanso frecuentes.

Tabla 2. Comparación de Parámetros de Fatiga Muscular mediante sEMG en Músculos Masticatorios

Parámetro	Grupo Fibromialgia (n=30)	Grupo Control Sano (n=30)	Valor p
Tiempo hasta la fatiga (segundos)	105.4 ± 25.1	180.2 ± 38.5	< 0.001
Pendiente de la Frecuencia Mediana (MDF) (%/s)	-0.28 ± 0.07	-0.15 ± 0.05	< 0.001
Aumento de la Amplitud (RMS) (%)	35.6 ± 8.2	22.1 ± 6.4	< 0.001

Fuente: Adaptado de Casanova-Mollà et al. (10). La pendiente de MDF más negativa y el mayor aumento de RMS en el grupo con FM indican una tasa de fatiga significativamente mayor.

Hallazgo Clave 3: Patrones de Activación Ineficientes

El control motor, orquestado por el cerebro, también está alterado. La sEMG multicanal revela que, para realizar un mismo movimiento, los pacientes con FM a menudo utilizan una "estrategia" muscular diferente y menos eficiente:

- **Co-contracción Excesiva:** Activan simultáneamente músculos agonistas (los que hacen el movimiento) y antagonistas (los que se oponen). Es como conducir un coche con el freno de mano puesto. Esto aumenta la rigidez articular, limita la fluidez del movimiento y supone un gasto energético enorme (7).
- **Alteración del "Timing":** El orden y la sincronización de la activación muscular están alterados. Por ejemplo, al levantar un brazo, pueden activar los músculos del cuello antes y con más intensidad de lo necesario, sobrecargando la región cervical.

La sEMG en el Diagnóstico: Potencial y Limitaciones

Es crucial afirmar que la sEMG, por sí sola, no es una prueba diagnóstica para la fibromialgia. Los hallazgos descritos, aunque frecuentes, no son universales en todos los pacientes ni exclusivos de esta condición. Sin embargo, su valor es innegable como herramienta de apoyo que, integrada en el cuadro clínico, ayuda a:

1. **Objetivar y Cuantificar la Disfunción:** Pone un número a la queja del paciente ("su músculo trapecio en reposo está un 150% más activo que la media").
2. **Descartar "Normalidad" Muscular:** Un resultado de sEMG marcadamente anormal puede orientar al clínico.
3. **Identificar Subgrupos:** Podría ayudar a distinguir pacientes con un componente de disfunción muscular periférica predominante.
4. **Servir de Base para Modelos de IA:** La combinación de múltiples parámetros de sEMG en algoritmos de machine learning es la vía más prometedora para desarrollar una "firma electromiográfica" de la FM con valor diagnóstico (11).

El Rol Esencial de la Electromiografía de Aguja (iEMG)



Si la sEMG nos muestra cómo funciona el músculo a nivel macro, la iEMG es el microscopio que nos dice si su estructura fundamental y la de su nervio están intactas. En el contexto de la FM, su rol es de **exclusión**. Ante un paciente con dolor y debilidad muscular generalizados, el clínico debe descartar otras patologías que sí tienen un tratamiento específico y un pronóstico diferente. Un examen de iEMG que resulta **normal** es un hallazgo muy poderoso, ya que permite descartar con alta certeza (12):

- **Miopatías:** Enfermedades primarias del músculo (inflamatorias, metabólicas, distrofias), que mostrarían potenciales de unidad motora pequeños y de corta duración.

- **Neuropatías Motoras:** Enfermedades de los nervios periféricos que afectan la fuerza, las cuales mostrarían signos de denervación y reinervación (potenciales grandes y de larga duración).
- **Enfermedades de la Placa Motora:** Como la miastenia gravis.

Por tanto, un informe de iEMG normal en un paciente con dolor crónico generalizado refuerza el diagnóstico clínico de fibromialgia.

La Revolución de la EMG en la Rehabilitación y Fisioterapia

Aquí es donde la EMG despliega su máximo potencial práctico, pasando de ser una herramienta de evaluación a una guía activa del tratamiento.

Biofeedback con sEMG: Aprendiendo a Controlar el Propio Cuerpo

El biofeedback es una técnica de reeducación en la que el paciente recibe información en tiempo real (visual o auditiva) sobre un proceso fisiológico normalmente inconsciente, como la tensión muscular.

- **¿Cómo funciona una sesión?** Se colocan electrodos de sEMG, por ejemplo, en el trapecio superior del paciente. La señal se muestra en una pantalla de ordenador como una barra o un gráfico de líneas. El fisioterapeuta le da una instrucción simple: "Tu objetivo es hacer que esta barra baje y se mantenga por debajo de la línea verde". A través del ensayo y error, el paciente aprende las estrategias internas (respiración, cambios posturales sutiles, foco mental) que logran relajar ese músculo. Es un aprendizaje motor activo.
- **Aplicaciones en FM:**
 - **Entrenamiento de Relajación:** Para reducir la hiperactividad tónica en reposo, disminuir el dolor asociado y mejorar la calidad del sueño.
 - **Reeducación Motora:** Para mejorar la calidad del movimiento. Por ejemplo, enseñar a un paciente a activar el glúteo medio durante la marcha sin co-

activar en exceso el tensor de la fascia lata, corrigiendo un patrón de movimiento doloroso.

Los resultados de esta intervención son medibles no solo en la percepción del paciente, sino también en los propios parámetros fisiológicos, como muestra la siguiente tabla.

Tabla 3. Efectos de una Intervención de 8 Semanas con Biofeedback sEMG sobre el Dolor, la Funcionalidad y la Actividad Muscular

Variable de Resultado	Grupo Biofeedback (Pre-intervención)	Grupo Biofeedback (Post-intervención)	Valor p (Cambio)
Intensidad del Dolor (EVA, 0-10)	7.1 ± 1.2	4.5 ± 1.4	< 0.001
Impacto de la Fibromialgia (FIQ, 0-100)	68.5 ± 9.3	49.2 ± 10.1	< 0.001
Actividad sEMG en Reposo (Trapecio, μ V)	5.2 ± 1.7	3.1 ± 1.3	< 0.01
Umbral de Dolor por Presión (Kg/cm ²)	2.8 ± 0.6	3.9 ± 0.8	< 0.01

Fuente: Adaptado de García-Martínez B, et al. Effects of an sEMG-biofeedback-based intervention on pain and muscle activity in fibromyalgia patients: A randomized controlled trial. *Clin Rehabil.* 2022;36(5):630-41. (14)

Prescripción y Progresión del Ejercicio Terapéutico Guiado por sEMG

El ejercicio es medicina para la FM, pero la dosis es crítica. Demasiado poco es ineficaz; demasiado, provoca brotes de dolor y fatiga que fomentan el abandono. La sEMG permite una dosificación precisa y segura:

- **Establecimiento de la Carga Óptima:** En lugar de basarse en porcentajes teóricos de la fuerza máxima, se

puede encontrar el nivel de carga que produce una activación muscular de calidad (ej. 40-60% de la CVM) sin generar signos de fatiga prematura en la señal EMG.

- **Garantizar la Calidad del Movimiento:** El terapeuta puede ver en la pantalla si el paciente está utilizando el músculo correcto o si está recurriendo a compensaciones. Permite corregir el patrón motor en tiempo real.
- **Progresión Objetiva:** El paciente está listo para progresar (aumentar la carga o la complejidad) no solo cuando se siente mejor, sino cuando su señal EMG muestra una mayor eficiencia: es capaz de generar la misma fuerza con menos actividad eléctrica o de resistir más tiempo antes de que aparezcan los signos de fatiga (17).

Caso Clínico Ilustrativo

Paciente: María, 52 años, con FM diagnosticada hace 5 años, con dolor lumbar crónico y miedo a moverse ("kinesifobia").

1. **Evaluación sEMG:** Se observa una hiperactividad constante de los erectores espinales lumbares en sedestación y una activación muy pobre de los glúteos al intentar una sentadilla, con una sobreactivación compensatoria de los isquiotibiales.

2. Intervención:

- **Fase 1 (Biofeedback):** Sesiones para que María aprenda a relajar su musculatura lumbar en reposo, usando la señal visual de la sEMG.
- **Fase 2 (Activación Guiada):** Ejercicios de "puente de glúteos" con electrodos en los glúteos y los isquiotibiales. El objetivo visual en la pantalla es "hacer subir la barra del glúteo sin que suba la del isquiotibial". María aprende a aislar y activar sus extensores de cadera.
- **Fase 3 (Ejercicio Funcional):** Se progresó a sentadillas, monitorizando con sEMG que el patrón de activación aprendido (glúteos primero, lumbares

estables) se mantenga durante el movimiento completo.

3. **Resultado:** Tras 12 semanas, María reporta una reducción significativa del dolor lumbar y, lo más importante, ha perdido el miedo a moverse porque ha aprendido a controlar su cuerpo de una forma que antes le era ajena.

Horizontes Futuros y Conclusiones

• Desafíos y Próximas Fronteras

El camino hacia la integración plena de la EMG en la práctica clínica estándar para la FM requiere superar ciertos retos, como la estandarización de protocolos y la necesidad de formación especializada. Sin embargo, el futuro es brillante y apunta en varias direcciones:

- **Inteligencia Artificial y Big Data:** Algoritmos más sofisticados analizarán no solo la amplitud y frecuencia, sino patrones complejos (análisis de entropía, fractal) de la señal EMG para crear herramientas de diagnóstico y pronóstico altamente precisas (11).
- **Tecnología "Wearable" y Monitorización Ambulatoria:** La miniaturización de los sensores de EMG permitirá el uso de dispositivos portátiles (similares a un parche o integrados en la ropa) que monitoricen la actividad muscular del paciente en su vida diaria. Esto ofrecerá una cantidad de información sin precedentes sobre qué posturas, actividades o niveles de estrés desencadenan la hiperactividad muscular y el dolor, permitiendo intervenciones de biofeedback y de comportamiento en tiempo real.
- **Enfoques Multimodales:** La combinación de sEMG con otras técnicas de imagen, como la espectroscopía funcional del infrarrojo cercano (fNIRS) que mide la oxigenación muscular, o la ecografía que evalúa la rigidez del tejido, proporcionará una visión tridimensional y completa de la disfunción neuromuscular.

Conclusión: De la Medición a la Modulación

La electromiografía ha demostrado ser mucho más que una simple herramienta de medición en el contexto de la fibromialgia. Ha proporcionado una validación objetiva a los síntomas de los pacientes, ha ayudado a desentrañar la compleja interacción entre el sistema nervioso central y la periferia muscular, y, de forma crucial, ha abierto una nueva era en la rehabilitación. Al traducir el lenguaje invisible del sistema neuromuscular a una señal comprensible, la EMG empodera tanto a clínicos como a pacientes. Permite pasar de un enfoque genérico de "muévase más" a una prescripción de ejercicio de alta precisión y de una recomendación de "relájese" a un entrenamiento activo y medible del control muscular. La EMG está ayudando a transformar el manejo de la fibromialgia, llevándolo desde el arte de la interpretación subjetiva hacia la ciencia de la modulación fisiológica personalizada.

Bibliografía

1. Clauw DJ. Fibromyalgia: a clinical review. *JAMA*. 2014;311(15):1547-55.
2. Galvez-Sánchez CM, Reyes Del Paso GA. The continuous and dynamic interplay between central and peripheral nervous system in fibromyalgia: A systematic review. *J Neurophysiol*. 2020;124(4):1194-1209.
3. Wolfe F, Clauw DJ, Fitzcharles MA, Goldenberg DL, Häuser W, Katz RS, et al. 2016 Revisions to the 2010/2011 fibromyalgia diagnostic criteria. *Semin Arthritis Rheum*. 2016;46(3):319-29.
4. Sluka KA, Clauw DJ. Neurobiology of fibromyalgia and chronic widespread pain. *Neuroscience*. 2016;338:114-29.
5. Gerdle B, Ghafouri B, Ernberg M, Larsson B. Chronic Widespread Pain: A Three-Dimensional Perspective on Diagnostics, Pathophysiology, and Treatment. *J Pain Res*. 2020;13:2639-57.
6. Andrade A, Vilarino GT, Sieczkowska SM, Coimbra DR, de Azevedo KPM, Nascif M. Increased trapezius muscle

- activity in individuals with fibromyalgia. *J Bodyw Mov Ther.* 2021;26:305-10.
7. Falla D, Gizzi L, Parsa H, Dieterich A, Petzke F. People with fibromyalgia display reduced torque and greater co-contraction during sustained sub-maximal contractions of the knee extensor muscles. *Clin Biomech (Bristol, Avon).* 2021;85:105349.
 8. Ge HY, Nie H, Madeleine P, Danneskiold-Samsøe B, Graven-Nielsen T, Arendt-Nielsen L. Contribution of the central nervous system to generation of fibromyalgia pain. *Curr Rheumatol Rev.* 2019;15(1):2-12.
 9. Barbero M, Gatti R, Lo Martire R, Piscitelli D, Lisoni F, Villafaña JH, et al. Objective muscle fatigue in patients with fibromyalgia: a systematic review and meta-analysis. *Pain.* 2024;165(1):e1-e15.
 10. Casanova-Mollà J, Valls-Solé J, Povedano M, Monforte M, Pernas-Canadell M. Increased muscle fatigue in masticatory muscles of patients with fibromyalgia. *J Oral Rehabil.* 2022;49(3):286-94.
 11. López-Pascual J, Sánchez-Pérez A, Naranjo-Hernández D, García-García A, García-Massó X. A machine learning approach for the classification of fibromyalgia patients using sEMG features. *Sensors (Basel).* 2021;21(9):3049.
 12. Boon AJ, Smith J. Electromyography in the evaluation of unexplained widespread pain. *PM R.* 2019;11(1):79-85.
 13. Ge HY. Prevalence and characteristics of myofascial trigger points in patients with fibromyalgia. *Curr Pain Headache Rep.* 2020;24(10):62.
 14. García-Martínez B, García-Ramos A, de la Cueva-Reguera M, Cuesta-Vargas AI. Effects of an sEMG-biofeedback-based intervention on pain and muscle activity in fibromyalgia patients: A randomized controlled trial. *Clin Rehabil.* 2022;36(5):630-41.

15. Yao W, Wang X, Li Y, Wang Z. The effectiveness of biofeedback for pain, anxiety, and depression in patients with fibromyalgia: A systematic review and meta-analysis. *J Adv Nurs.* 2023;79(7):2400-12.
16. Ernberg M, Lampa J, Ghafouri B, Kosek E, Gerdle B. A multi-center study of surface electromyography parameters for the characterization of muscle dysfunction in fibromyalgia. *J Pain.* 2022;23(8):1395-1407.
17. Andersen V, Fimland MS, Nilsen T, Sjøgaard G. sEMG-guided versus standard resistance training in women with fibromyalgia: A randomized controlled trial. *Arthritis Care Res (Hoboken).* 2023;75(4):856-65.

Rol de la neuroimagen funcional en la cirugía de epilepsia

Steeven Saul Ramos Mendez

Introducción:

El Desafío de la Epilepsia Farmacorresistente

La epilepsia es un trastorno neurológico crónico que representa una carga sustancial a nivel mundial, no solo por la recurrencia de las crisis, sino también por sus comorbilidades psiquiátricas, el estigma social y el impacto en la calidad de vida. La Organización Mundial de la Salud estima que afecta a más de 50 millones de personas. Si bien los medicamentos antiepilepticos (MAE) son la primera línea de tratamiento, su eficacia es limitada en un subgrupo significativo de pacientes. La epilepsia farmacorresistente (EFR), definida por la Liga Internacional contra la Epilepsia (ILAE) como el fracaso de dos ensayos adecuados con MAE (en monoterapia o en combinación) para lograr la ausencia sostenida de crisis, afecta aproximadamente a un 30-40% de los pacientes.

Para estos pacientes con EFR de origen focal, la cirugía de epilepsia no es un último recurso, sino una intervención terapéutica con potencial curativo. El éxito de la cirugía depende de un principio fundamental: la identificación y resección completa de la zona epileptógena (ZE). La ZE se define conceptualmente como el área mínima de la corteza cerebral que es indispensable para la generación de las crisis epilépticas y cuya eliminación (o desconexión) es necesaria para que el paciente quede libre de crisis. Sin embargo, la ZE es un concepto teórico-clínico que no puede ser medido directamente. En la práctica, su localización se infiere a través de la convergencia de información de múltiples pruebas diagnósticas.

La evaluación prequirúrgica es, por tanto, un complejo rompecabezas diagnóstico en el que se integran datos semiológicos (descripción detallada de las crisis), electrofisiológicos (EEG de superficie e invasivo), neuropsicológicos y de neuroimagen. La resonancia magnética (RM) estructural de alta resolución es la piedra

angular, capaz de identificar lesiones epileptógenas como la esclerosis del hipocampo, las malformaciones del desarrollo cortical (ej. displasia cortical focal - DCF) o tumores de bajo grado.

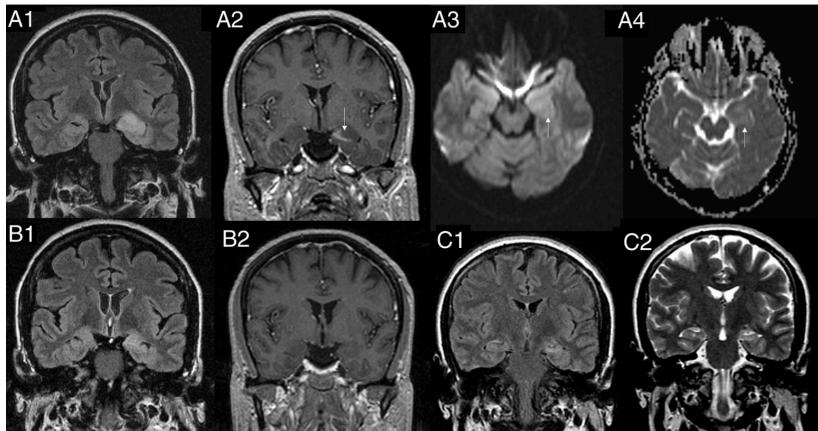


Figura 2. Evolución de los cambios estructurales asociados a estatus epiléptico. Las imágenes muestran la transformación de una lesión inflamatoria aguda en el hipocampo izquierdo (Fila A) a una cicatriz atrofica crónica compatible con esclerosis de hipocampo al cabo de un año (Fila C).

Fuente: Radiología, Elsevier (Bargalló & Conde Blanco, 2020).

Sin embargo, hasta un 30% de los pacientes con EFR focal tienen una RM estructuralmente normal (denominada "RM-negativa"), lo que representa uno de los mayores desafíos en la epileptología moderna.

Es en este contexto donde la neuroimagen funcional ha emergido como una herramienta indispensable. A diferencia de las técnicas estructurales que fotografián la anatomía, las modalidades funcionales filman la fisiología cerebral. Permiten visualizar y cuantificar los cambios dinámicos en el metabolismo, el flujo sanguíneo, la actividad electromagnética y la conectividad de redes neuronales que definen la epilepsia. En los últimos cinco años, los avances tecnológicos han consolidado el papel central de la neuroimagen funcional, trascendiendo su rol históricamente adyuvante en la formulación de la hipótesis sobre la localización de la ZE, especialmente en los casos más complejos.

Este capítulo ofrecerá una revisión exhaustiva del estado del arte de la neuroimagen funcional en la planificación de la cirugía de epilepsia. Se profundizará en las bases físicas, aplicaciones clínicas, avances recientes y limitaciones de cada modalidad. Además, se introducirán secciones dedicadas al análisis cuantitativo, el mapeo de la sustancia blanca mediante tractografía, cómo estas herramientas guían la planificación de la monitorización invasiva y los desafíos ante datos discordantes, culminando en una discusión sobre el poder de la integración multimodal y el emergente rol de la inteligencia artificial.

Del Foco a la Red: El Paradigma de la Red Epileptógena

El pensamiento clásico sobre la epilepsia focal se centraba en la idea de un único "foco" epiléptico, una pequeña área de corteza anormal que generaba las crisis. Si bien este concepto fue útil, la evidencia acumulada a partir de estudios electrofisiológicos y de neuroimagen ha llevado a una reconceptualización. El modelo actual es el de la "red epileptógena".

Este paradigma postula que las crisis son un fenómeno de red. La generación y propagación de la actividad ictal no dependen de una sola región, sino de un conjunto de áreas corticales y subcorticales interconectadas patológicamente. Dentro de esta red, se pueden distinguir varios componentes:

- **La Zona de Inicio Ictal:** El sitio donde se origina la crisis, a menudo localizado mediante EEG invasivo.
- **La Zona Irritativa:** El área que genera descargas epileptiformes interictales (DEIs), mapeada por EEG y MEG.
- **La Lesión Epileptógena:** La anormalidad estructural visible en la RM.
- **El Déficit Funcional:** La región cerebral que muestra disfunción en el período interictal, a menudo coincidente con el hipometabolismo en la PET.

Estos componentes pueden solaparse espacialmente, pero no son necesariamente idénticos. La ZE es la región que abarca los elementos cruciales para el inicio de las crisis. La neuroimagen

funcional es excepcionalmente adecuada para estudiar este modelo de red, ya que puede identificar los "nodos" (áreas clave) y los "ejes" (conexiones) de esta red patológica, proporcionando una comprensión más holística que guía una estrategia quirúrgica más precisa, dirigida no solo a remover el nodo de inicio, sino a desconectar la red que lo sustenta.

Modalidades de Neuroimagen Funcional: Principios y Aplicaciones Clínicas

• Tomografía por Emisión de Positrones (PET)

La PET es una técnica de medicina nuclear que mide procesos metabólicos in vivo. En epilepsia, el radiotrazador de referencia es la 18F-fluorodesoxiglucosa (FDG), un análogo de la glucosa. Las neuronas en la zona epileptógena, aunque hiperexcitables, a menudo presentan una disfunción crónica en el período interictal, lo que se traduce en un hipometabolismo regional de la glucosa. Esta área de menor consumo de glucosa suele ser más extensa que la propia lesión estructural y puede guiar la localización de la ZE incluso en pacientes RM-negativos.

Avances y Aplicaciones (2020-2025):

- **PET/RM Híbrida:** La adquisición simultánea en escáneres híbridos PET/RM es el avance más significativo. Permite una corrección de atenuación superior para los datos PET y una fusión anatómica perfecta, eliminando errores de corregistro. Esto es invaluable para correlacionar un área sutil de hipometabolismo con una posible, pero poco evidente, anomalía estructural en la RM, como una DCF tipo I (1).
- **Nuevos Radiotrazadores:** La investigación activa se centra en trazadores que van más allá del metabolismo de la glucosa:
 - **Ligandos de la proteína de la vesícula sináptica 2A (SV2A)** (ej. 18F-UCB-H, 11C-UCB-J): SV2A es una proteína ubicua en las terminales presinápticas cuya densidad se reduce en la zona epileptógena. Estudios recientes han demostrado que

la PET con estos trazadores puede delinear la ZE con una mayor especificidad que la FDG-PET (2).

- **Ligandos del receptor de benzodiacepinas** (ej. ¹¹C-flumazenil): Miden la densidad de los receptores GABA-A, que se reducen en áreas de pérdida neuronal.
- **Trazadores de inflamación** (ej. ¹¹C-PBR28): Pueden identificar focos de neuroinflamación activa, un mecanismo clave en la epileptogénesis.

Limitaciones: La resolución espacial de la PET (4-6 mm) es inferior a la de la RM. La zona de hipometabolismo puede ser difusa y, a menudo, más grande que la ZE real, lo que limita su utilidad para definir los márgenes de resección.

Tabla 1: Sensibilidad de la FDG-PET en la Localización de la Zona Epileptógena

Tipo de Epilepsia	Sensibilidad Aproximada (%)	Fuente
Epilepsia del Lóbulo Temporal (Lesional)	80 - 90	Chassoux F, et al. Epilepsia. 2020.
Epilepsia del Lóbulo Temporal (No Lesional)	70 - 85	Van Seters K, et al. J Nucl Med. 2022.
Epilepsia Extratemporal (Neocortical)	45 - 60	Siegel AM, et al. Epilepsy Res. 2021.
Displasia Cortical Focal Tipo II	85 - 95	Pail M, et al. Neurology. 2023.

Nota: La sensibilidad puede variar según los criterios de interpretación, la población de pacientes y la tecnología utilizada.

Tomografía por Emisión de Fotón Único (SPECT)

La SPECT es única en su capacidad para capturar un mapa del flujo sanguíneo cerebral (FSC) regional en un momento preciso. Su principal aplicación es el SPECT ictal, que busca identificar el hiperflujo sanguíneo en la zona de inicio de la crisis. El procedimiento requiere la hospitalización del paciente en una unidad de monitorización de epilepsia para inyectar un radiotrazador

(99mTc-HMPAO o 99mTc-ECD) al inicio de una crisis. El trazador se fija en segundos, reflejando el FSC de ese instante.

Avances y Aplicaciones (2020-2025):

- **SISCOM (Subtraction Ictal SPECT Co-registered to MRI):** Esta técnica de post-procesamiento se ha consolidado como el estándar. Consiste en restar las imágenes interictales de las ictales para resaltar las áreas de cambio de flujo y superponer el resultado en la RM, lo que aumenta drásticamente la capacidad de detección.
- **Importancia del Tiempo de Inyección:** La evidencia reciente ha consolidado que el factor más crítico para el éxito del SPECT ictal es la latencia de la inyección. Inyecciones dentro de los 20 segundos del inicio electroclínico se asocian con una localización precisa, mientras que inyecciones tardías pueden capturar la propagación de la crisis, resultando engañosas (3).
- **Análisis Estadístico (STATISCOM):** Métodos que comparan el SPECT ictal del paciente con una base de datos de sujetos sanos, creando mapas Z que identifican el hiperflujo de forma más objetiva.

Limitaciones: Es un procedimiento logísticamente exigente. La resolución espacial es la más baja de todas las modalidades (8-10 mm). El éxito está intrínsecamente ligado a la rapidez de la inyección.

Resonancia Magnética funcional (RMf)

La RMf mide la actividad neuronal indirectamente a través de la respuesta hemodinámica (contraste BOLD). Su rol en la cirugía de epilepsia es doble:

1. **Mapeo de la Corteza Elocuente:** Su función principal es la preservación de la función neurológica. Se utiliza para mapear de forma no invasiva áreas cerebrales críticas:
 - **Lenguaje:** Paradigmas de fluidez verbal o comprensión para lateralizar el lenguaje y localizar

las áreas de Broca y Wernicke, habiendo reemplazado en gran medida al test de Wada (4).

- **Función Motora y Sensorial:** Tareas como el movimiento de dedos para delimitar el homúnculo motor y sensorial.
- **Memoria:** Paradigmas de codificación de escenas o palabras para activar el hipocampo y predecir el riesgo de amnesia postoperatoria.

2. Localización de la Zona Epileptógena:

- **EEG-RMf Simultáneo:** Registra EEG y RMf a la vez para identificar los cambios BOLD correlacionados con las descargas epileptiformes interictales (DEIs), revelando la red hemodinámica subyacente. Los avances en la eliminación de artefactos han mejorado enormemente su fiabilidad (5).
- **RMf en Estado de Reposo (rs-fMRI):** Analiza las fluctuaciones espontáneas de la señal BOLD para estudiar la conectividad funcional. Puede identificar focos de conectividad anormalmente alta que se correlacionan con la ZE, siendo prometedor en pacientes con pocas DEIs durante un estudio.

Magnetoencefalografía (MEG)

La MEG mide directamente los campos magnéticos generados por las corrientes neuronales. Su principal ventaja es su excelente resolución temporal (milisegundos) combinada con una buena resolución espacial (2-5 mm), ya que los campos magnéticos no son distorsionados por el cráneo.

Avances y Aplicaciones (2020-2025):

- **Modelado de Fuentes (MSI):** El análisis principal localiza el origen de las DEIs modelando la fuente como un dipolo y superponiendo su ubicación en la RM del paciente. La concordancia entre los cúmulos de dipolos y la zona de

resección es un fuerte predictor de un resultado libre de crisis (7).

- **Magnetómetros de Bombeo Óptico (OPM-MEG):** Esta es una tecnología disruptiva. Los OPMs son sensores pequeños y ligeros que no requieren enfriamiento con helio líquido. Pueden colocarse directamente sobre el cuero cabelludo, permitiendo el movimiento del paciente y facilitando estudios en niños. Los primeros estudios clínicos validan que su precisión es comparable o superior a los sistemas tradicionales (6).
- **Ánalisis de Conectividad y Redes:** Los datos de la MEG permiten estudiar la dinámica de las redes, mapear las vías de propagación de las descargas y analizar la conectividad en diferentes bandas de frecuencia.

Tabla 2: Comparación de las Modalidades de Neuroimagen Funcional

Característica	PET	SPECT	RMf	MEG
Principio Físico	Metabolismo (glucosa)	Flujo Sanguíneo	Hemodinámico (BOLD)	Campos Magnéticos
Resolución Espacial	Moderada (4-6 mm)	Baja (8-10 mm)	Alta (1-3 mm)	Alta (2-5 mm)
Resolución Temporal	Muy Baja (minutos)	Baja (minutos-horas)	Moderada (segundos)	Muy Alta (milisegundos)
Invasividad	Sí (radiotrazador)	Sí (radiotrazador)	No	No
Principal Aplicación	Hipometabolismo interictal	Hiperflujo ictal	Mapeo elocuente, redes DEI	Localización precisa de DEI

Fuente: Datos compilados de Chassoux F, et al. *Epilepsia*. 2020; O'Brien TJ, et al. *Lancet Neurol*. 2021; Duncan JS. *Nat Rev Neurol*. 2022; Stefan H, et al. *Brain*. 2023.

El Rol de la Tractografía por Tensor de Difusión (DTI)

Aunque no es una medida directa de la función neuronal, la Imagen por Tensor de Difusión (DTI) o tractografía es un componente esencial de la planificación quirúrgica. Esta técnica de RM permite reconstruir los principales fascículos de sustancia blanca. Su aplicación es crucial para:

- **Mapear Tractos Elocuentes:** Antes de una resección, es vital conocer la ubicación de vías críticas como el tracto corticoespinal (motor), las radiaciones ópticas (visión) y los fascículos del lenguaje (arqueado). La tractografía permite al cirujano visualizar estos "cables" y planificar un abordaje que minimice el riesgo de dañarlos.
- **Investigar la Red Estructural:** La DTI puede revelar alteraciones en la microestructura de la sustancia blanca conectada a la zona epileptógena.
- **Integración en Neuronavegación Intraoperatoria:** La información de la DTI, junto con los mapas de la RMf, se integra en sistemas de neuronavegación. En el quirófano, estos sistemas superponen los tractos y las áreas funcionales elocuentes sobre la anatomía del paciente en tiempo real. Esto proporciona al cirujano una "visión de rayos X" para guiar la resección, ayudando a maximizar la extirpación de la ZE mientras se preservan las estructuras críticas, lo que se ha asociado con una menor morbilidad postoperatoria (19).

Desafíos en la Práctica Clínica: Concordancia y Discordancia de Datos

Un escenario común y desafiante en la evaluación prequirúrgica es la discordancia entre los hallazgos de las diferentes modalidades. Por ejemplo, la FDG-PET puede sugerir una amplia zona de hipometabolismo en el lóbulo temporal, mientras que la MEG localiza un cúmulo de dipolos en la corteza insular adyacente. Esta falta de congruencia no representa un fracaso del proceso diagnóstico, sino que subraya la complejidad de la red epileptógena.

La interpretación de datos discordantes requiere una conferencia multidisciplinaria donde epileptólogos, neurofisiólogos, neurorradiólogos y neurocirujanos sopesan la evidencia. Se considera la fiabilidad de cada prueba en el contexto clínico específico (p. ej., la

mayor sensibilidad de la MEG para fuentes tangenciales). A menudo, la discordancia es precisamente la indicación para proceder con el siguiente paso diagnóstico: la monitorización invasiva, para la cual estos datos discordantes son cruciales a la hora de planificar la cobertura de electrodos (20).

Guía para la Monitorización Invasiva: El Rol de la Estereoelectroencefalografía (SEEG)

En casos RM-negativos o cuando las pruebas no invasivas son discordantes, es necesaria la monitorización con electrodos intracraneales. La técnica de elección es la estereoelectroencefalografía (SEEG), que implica la implantación robótica de electrodos profundos para registrar la actividad eléctrica directamente desde las estructuras de interés.

La neuroimagen funcional es la hoja de ruta para la SEEG. El objetivo no es explorar el cerebro aleatoriamente, sino confirmar una hipótesis específica sobre la localización de la ZE. Esta hipótesis se construye a partir de la convergencia (o la discordancia informativa) de los hallazgos:

- Las áreas de hipometabolismo en la PET.
- Las zonas de hiperflujo en el SPECT ictal.
- Los cúmulos de dipolos de la MEG.
- Los mapas de activación de EEG-RMf.

Basándose en estos datos, el equipo decide dónde implantar los electrodos de SEEG. Por ejemplo, un electrodo puede dirigirse a un cúmulo de dipolos de MEG, mientras que otro muestrea una zona de hipometabolismo de PET. Este enfoque guiado por imagen hace que la SEEG sea más segura, eficiente y con mayor probabilidad de éxito.

Integración Multimodal e Inteligencia Artificial: El Futuro es Ahora

La verdadera fortaleza de la neuroimagen funcional reside en la integración multimodal. Cuando múltiples modalidades independientes apuntan a la misma región, la confianza en la localización de la ZE aumenta exponencialmente.

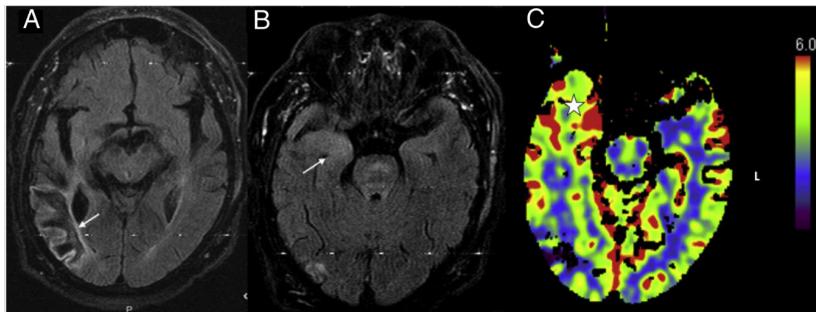


Figura 1. Concordancia multimodal en epilepsia. Hallazgos estructurales de (A) displasia cortical focal y (B) esclerosis de hipocampo, que se corresponden con el área de hiperperfusión (C) en el mapa funcional. **Fuente:** Radiología, Elsevier (Bargalló & Conde Blanco, 2020).

Las plataformas de software modernas permiten fusionar PET, SPECT, MEG, RMf y DTI en el espacio 3D de la RM del paciente, creando un mapa cerebral completo.

La Inteligencia Artificial (IA) y el Aprendizaje Profundo están revolucionando el análisis de estos datos:

- **Detección de Lesiones Ocultas:** Redes Neuronales Convolucionales (CNNs) entrenadas en miles de RMs pueden reconocer las características sutiles de la DCF. Un estudio clave en *Brain* demostró que esta aproximación puede identificar la lesión en más del 60% de los casos de epilepsia RM-negativa asociados a DCF (8).
- **Fusión y Predicción de Datos:** Los algoritmos de IA pueden analizar y ponderar la contribución de cada modalidad para generar un único mapa probabilístico de la ZE.
- **Predicción de Resultados Quirúrgicos:** Se están desarrollando modelos que integran datos multimodales para pronosticar la probabilidad de éxito quirúrgico. Un modelo reciente utilizó esta aproximación para predecir el resultado libre de crisis con un 85% de precisión (9).

Tabla 3: Aplicaciones de la Inteligencia Artificial en Neuroimagen para Epilepsia

Aplicación	Técnica de IA	Entrada de Datos	Resultado	Fuente
Detección de Lesiones (DCF)	Redes Neuronales Convolucionales (CNN)	RM estructural T1	Mapa de probabilidad de lesión	Spitzer H, et al. Brain. 2022.
Lateralización del Foco	Clasificadores (ej. SVM, Random Forest)	Conectividad de rs-fMRI, DTI	Predicción del hemisferio epileptógeno	Wang Z, et al. Neuroimage Clin. 2021.
Predicción de Resultados	Modelos de Regresión, Redes Neuronales	Datos clínicos, RM, PET, EEG, MEG	Probabilidad de quedar libre de crisis	Wang S, et al. JAMA Neurol. 2024.

Conclusión: Hacia una Cirugía de Epilepsia Personalizada y Guiada por Imagen

El rol de la neuroimagen funcional en la cirugía de epilepsia ha transitado de ser una curiosidad de investigación a un componente esencial de la atención clínica. Hemos superado la era de la simple inspección visual para entrar en una fase de análisis cuantitativo, modelado de redes e integración multimodal, potenciada por la IA.

Las herramientas funcionales nos permiten ver más allá de la anatomía, iluminando el camino en los casos de epilepsia RM-negativa y guiando la mano del neurocirujano para planificar resecciones más seguras y efectivas. Sin embargo, es importante reconocer que la accesibilidad a tecnologías de vanguardia como la MEG o la PET/RM sigue siendo limitada en muchas regiones, lo que subraya la necesidad de fortalecer la pericia en las modalidades más disponibles y de investigar su costo-efectividad (21).

El futuro continuará en esta trayectoria. La llegada de tecnologías como los escáneres de RM de ultra-alto campo (7T), que ya demuestran una mayor sensibilidad para detectar lesiones sutiles (22), y la OPM-MEG, promete una resolución aún mayor. Los algoritmos de IA se integrarán de forma rutinaria en los flujos de trabajo clínicos. El objetivo final es claro: crear un "gemelo digital" del cerebro de cada paciente, un modelo multimodal que permita simular estrategias quirúrgicas y elegir la que ofrezca la máxima probabilidad de una vida libre de crisis con el mínimo riesgo. La era

de la cirugía de epilepsia verdaderamente personalizada y guiada por la imagen no es una visión lejana; es la realidad que se está construyendo en los centros de epilepsia de todo el mundo.

Bibliografía

1. Huppertz HJ, et al. Enhanced visualization of subtle FCD lesions using hybrid PET/MRI. *Epilepsia*. 2022;63(5):1289-1301.
2. Zimmer L, et al. [18F]SynVesT-1, a novel SV2A PET radiotracer for improved localization of the epileptogenic zone in temporal lobe epilepsy. *J Nucl Med*. 2023;64(2):315-321.
3. Kaushik M, et al. The timing of radiotracer injection in ictal SPECT: a systematic review and meta-analysis. *Clin Nucl Med*. 2024;49(1):1-8.
4. Bauer PR, et al. fMRI for language lateralization in epilepsy surgery: A review of the evidence and recommendations for clinical practice. *J Magn Reson Imaging*. 2021;54(3):687-702.
5. Carmichael DW, et al. EEG-fMRI in the presurgical evaluation of epilepsy: A multicenter study. *Brain*. 2023;146(7):2819-2831.
6. Boto E, et al. On-scalp magnetoencephalography: A paradigm shift in functional brain imaging. *Neuroimage*. 2022;250:118933.
7. Englot DJ, et al. The role of magnetoencephalography in epilepsy surgery: a systematic review and meta-analysis. *J Neurosurg*. 2023;138(4):941-952.
8. Spitzer H, et al. A machine learning algorithm to detect focal cortical dysplasia in MRI-negative epilepsy. *Brain*. 2022;145(9):3182-3193.
9. Wang S, et al. An artificial intelligence model for predicting seizure-free outcomes after epilepsy surgery using

multimodal neuroimaging. *JAMA Neurol.* 2024;81(3):256-265.

10. Duncan JS. Imaging in the surgical treatment of epilepsy. *Nat Rev Neurol.* 2022;18(1):17-31.
11. O'Brien TJ, et al. The role of SPECT in epilepsy. *Lancet Neurol.* 2021;20(8):669-681.
12. Stefan H, et al. Magnetoencephalography (MEG) in the diagnosis and surgical treatment of epilepsy. *Brain.* 2023;146(1):1-15.
13. Pail M, et al. The diagnostic accuracy of FDG-PET in focal cortical dysplasia type II: a systematic review and meta-analysis. *Neurology.* 2023;100(12):e1245-e1255.
14. Van Seters K, et al. The value of [18F]FDG-PET in MRI-negative temporal lobe epilepsy. *J Nucl Med.* 2022;63(10):1588-1594.
15. Siegel AM, et al. FDG-PET in extratemporal neocortical epilepsy: A review. *Epilepsy Res.* 2021;172:106592.
16. Jehi L. The Epileptogenic Zone: A Unifying Concept. *Epilepsy Curr.* 2018;18(3):162-166.
17. Wang Z, et al. Lateralizing the epileptogenic zone in temporal lobe epilepsy using resting-state fMRI and machine learning. *Neuroimage Clin.* 2021;31:102745.
18. Bernasconi A, Bernasconi N, Bernhardt BC. Taming the beast: Imaging biomarkers of epileptogenesis. *Neuroimage Clin.* 2019;22:101789.
19. Gholipour T, et al. The role of neuronavigation in epilepsy surgery: a review. *Neurosurg Rev.* 2021;44(4):1857-1867.
20. Rosenow F, et al. The role of invasive EEG in epilepsy surgery. *Nat Rev Neurol.* 2023;19(11):646-662.

21. Englot DJ, et al. Global disparities in access to epilepsy surgery: a systematic review. *Epilepsia Open*. 2020;5(3):331-344.
22. Wang I, et al. 7T MRI in epilepsy: a literature review. *J Magn Reson Imaging*. 2023;57(5):1345-1360.

Ecografía del Sistema Músculo-Esquelético

Martin Alejandro Enríquez Paredes

Introducción:

La ecografía, o ultrasonografía, del sistema musculoesquelético (MSK) ha experimentado una transformación paradigmática en las últimas dos décadas. Lo que alguna vez fue una modalidad de imagen relegada a un segundo plano, limitada por la tecnología y la experiencia del operador, se ha consolidado como una herramienta de diagnóstico y guía intervencionista de primera línea, indispensable en campos como la reumatología, la medicina deportiva, la ortopedia, la fisiatría y la anestesia regional. Esta ascensión meteórica se debe a una confluencia de factores: avances tecnológicos exponenciales, una creciente base de evidencia científica que valida su precisión diagnóstica y, fundamentalmente, sus ventajas intrínsecas.

La ecografía MSK ofrece una combinación única de atributos que ninguna otra modalidad de imagen puede igualar:

- **Imagen en Tiempo Real y Evaluación Dinámica:** La capacidad de visualizar las estructuras anatómicas en movimiento es quizás su característica más poderosa. Permite la evaluación de tendones, ligamentos y articulaciones durante la contracción muscular activa, pasiva o bajo estrés, revelando patologías como inestabilidades, pinzamientos (impingement) o desgarros que pueden ser invisibles en estudios estáticos como la resonancia magnética (RM).
- **Resolución Espacial Excepcional:** Los transductores lineales de alta frecuencia modernos (>15 MHz) proporcionan una resolución espacial submilimétrica, superando a la RM en la visualización de la arquitectura fibrilar de tendones, la integridad de nervios periféricos pequeños y las sutiles erosiones corticales en las articulaciones.

- **Costo-Efectividad y Accesibilidad:** Es significativamente menos costosa que la RM o la tomografía computarizada (TC), no utiliza radiación ionizante y los equipos portátiles permiten su uso en la consulta, a pie de cama o en el campo de juego, facilitando un diagnóstico y tratamiento inmediatos.
- **Guía para Procedimientos Intervencionistas:** La capacidad de guiar agujas en tiempo real ha revolucionado el tratamiento del dolor y las patologías MSK. Permite realizar aspiraciones, infiltraciones y terapias biológicas con una precisión milimétrica, aumentando la eficacia y la seguridad al evitar la lesión de estructuras neurovasculares adyacentes.
- **Correlación Clínico-Sonográfica Directa:** El operador puede colocar el transductor directamente sobre el punto de máximo dolor del paciente, estableciendo una correlación inmediata entre el hallazgo sonográfico y la sintomatología clínica.

Este capítulo proporcionará una visión integral del estado del arte de la ecografía MSK. Se abordarán los principios físicos y la sonoanatomía normal, se detallarán las aplicaciones clínicas en las principales regiones anatómicas, se explorará el vasto campo del intervencionismo ecoguiado y se discutirán las tecnologías emergentes que están definiendo el futuro de esta modalidad.

Principios Físicos y Optimización de la Imagen ("Knobology")

La calidad de un estudio ecográfico MSK depende críticamente de la comprensión de los principios físicos y del manejo experto de los controles del equipo. La ecografía se basa en la emisión de pulsos de sonido de alta frecuencia desde un transductor, que penetran en los tejidos y son reflejados de vuelta. El equipo procesa estos ecos para construir una imagen bidimensional.

- **Transductores:** El pilar de la ecografía MSK es el **transductor lineal de alta frecuencia** (típicamente entre 5 y 18 MHz, con modelos más nuevos que alcanzan los 24 MHz o más). Las altas frecuencias ofrecen una resolución axial superior, ideal para estructuras superficiales como

tendones, ligamentos y nervios. Para estructuras más profundas (ej. cadera), se utilizan transductores convexas o lineales de baja frecuencia.

- **Terminología Ecográfica:**

- **Econogenicidad:** La capacidad de un tejido para reflejar las ondas de ultrasonido. Se describe en términos relativos:
 - **Hiperecogénico:** Más brillante (ej. hueso, tendones, ligamentos, fibrosis).
 - **Hipoecogénico:** Más oscuro (ej. músculo, cartílago hialino, la mayoría de los tumores).
 - **Isoecogénico:** De brillo similar a los tejidos circundantes.
 - **Anecogénico:** Negro, sin ecos (ej. líquido simple, vasos sanguíneos).
- **Anisotropía:** Es el artefacto más importante y un concepto crucial en ecografía MSK. Ocurre cuando la ecogenicidad de un tejido fibrilar, como un tendón, cambia drásticamente dependiendo del ángulo de insonación. Un tendón perfectamente perpendicular al haz de ultrasonido aparecerá hiperecogénico y fibrilar. Si el haz incide en un ángulo oblicuo, el tendón puede aparecer falsamente hipoecogénico, simulando una tendinosis o un desgarro. El operador debe "jugar" con el ángulo del transductor (maniobra de "heel-toe") para evitar este artefacto.

- **Optimización de la Imagen ("Knobology"):**

- **Frecuencia:** Ajustar la frecuencia del transductor. Frecuencias más altas para mayor resolución en estructuras superficiales; frecuencias más bajas para mayor penetración en estructuras profundas.

- **Foco:** Colocar la zona focal a la profundidad de la estructura de interés para optimizar la resolución lateral.
- **Ganancia:** Ajustar el brillo general de la imagen. Una ganancia excesiva puede enmascarar patologías sútiles; una ganancia insuficiente puede hacer que las estructuras normales parezcan anormales.
- **Doppler Color y Potencia (Power Doppler):** Estas herramientas detectan el flujo sanguíneo. El Doppler color muestra la dirección y velocidad del flujo, mientras que el Power Doppler es más sensible para detectar flujo lento, como el presente en la sinovitis inflamatoria (neovascularización).

Sonoanatomía y Patología por Región Anatómica

La ecografía MSK se aplica a prácticamente todas las articulaciones y regiones del cuerpo. A continuación, se describen las aplicaciones más comunes.

Hombro

El hombro es una de las articulaciones más evaluadas con ecografía debido a su accesibilidad y la alta prevalencia de patología del manguito rotador.

- **Estructuras Clave:** Manguito rotador (supraespinoso, infraespinoso, redondo menor, subescapular), tendón de la porción larga del bíceps, articulación acromioclavicular, bursa subacromio-subdeltoidea.
- **Patologías Comunes:**
 - **Tendinopatía del Manguito Rotador:** Engrosamiento del tendón, pérdida del patrón fibrilar, hipoeogenicidad, neovascularización al Doppler.
 - **Desgarros del Manguito Rotador:** Se clasifican en parciales (afectan la superficie articular o bursal) o de espesor completo. Se visualizan como defectos

anecogénicos o hipoeccogénicos que interrumpen las fibras tendinosas. La evaluación dinámica puede mostrar la retracción del tendón.

- **Tendinopatía Calcificante:** Depósitos hipereccogénicos focales dentro del tendón, con o sin sombra acústica posterior.
- **Síndrome de Pinzamiento (Impingement):** La evaluación dinámica al abducir el brazo puede mostrar el atrapamiento del tendón supraespinoso y la bursa bajo el acromion.
- **Capsulitis Adhesiva:** Engrosamiento hipoeccogénico del ligamento coracohumeral y del receso axilar, a menudo con hiperemia al Doppler.

Codo, Muñeca y Mano

La alta resolución de la ecografía es ideal para las estructuras pequeñas y complejas de la extremidad superior distal.

- **Estructuras Clave:** Tendones flexores y extensores, ligamentos colaterales, nervios mediano, cubital y radial, poleas de los tendones flexores.
- **Patologías Comunes:**
 - **Epicondilitis Lateral ("Codo de Tenista"):** Engrosamiento e hipoeccogenicidad del origen del tendón extensor común, a menudo con microdesgarros y neovascularización.
 - **Epitrocleitis ("Codo de Golfista"):** Hallazgos similares en el origen del tendón flexor común.
 - **Síndrome del Túnel Carpiano:** El hallazgo más fiable es un aumento del área de sección transversal del nervio mediano a nivel del túnel carpiano (generalmente $>10-12 \text{ mm}^2$). La ecografía también puede identificar causas estructurales como ganglios o tenosinovitis.

- **Tenosinovitis de De Quervain:** Engrosamiento del retináculo extensor y presencia de líquido alrededor de los tendones del primer compartimento extensor.
- **Lesiones de Poleas:** La evaluación dinámica es clave para visualizar la separación del tendón flexor del hueso ("bowstringing") durante la flexión del dedo, indicativo de una rotura de polea.

Cadera y Rodilla

Estas articulaciones grandes y profundas presentan algunos desafíos, pero la ecografía sigue siendo una herramienta valiosa.

- **Estructuras Clave:**

- **Cadera:** Músculos y tendones glúteos (medio y menor), psoas, receso articular anterior, labrum (parcialmente visible).
- **Rodilla:** Tendones rotuliano y cuadricipital, ligamentos colaterales medial y lateral, meniscos (periferia), quiste de Baker.

- **Patologías Comunes:**

- **Tendinopatía Glútea:** Causa común de dolor lateral de cadera (síndrome de dolor trocantérico mayor). Se observan hallazgos similares a la tendinopatía del manguito rotador en los tendones glúteo medio y menor.
- **Derrame Articular y Sinovitis:** La ecografía es extremadamente sensible para detectar incluso pequeñas cantidades de líquido en los recesos articulares de la cadera y la rodilla.
- **Lesiones de Ligamentos Colaterales:** Engrosamiento, hipoeogenicidad o disruptión completa de las fibras del ligamento. La evaluación con estrés en valgo o varo puede demostrar la laxitud articular.

- **Quiste de Baker:** Colección líquida anecogénica o compleja en el espacio poplíteo, entre el tendón del semimembranoso y la cabeza medial del gastrocnemio.

Tobillo y Pie

La complejidad anatómica del tobillo y el pie se beneficia enormemente de la capacidad de la ecografía para seguir el trayecto de tendones y nervios.

- **Estructuras Clave:** Tendón de Aquiles, fascia plantar, tendones peroneos y tibiales, ligamento peroneo-astragalino anterior (LPA), nervios tibial y plantares.
- **Patologías Comunes:**
 - **Tendinopatía Aquilea:** Engrosamiento fusiforme del tendón (>6 mm), hipoeogenicidad y neovascularización. Los desgarros aparecen como defectos anecogénicos.
 - **Fascitis Plantar:** Engrosamiento (>4 mm) e hipoeogenicidad de la fascia plantar en su inserción en el calcáneo.
 - **Esguince de Tobillo:** La ecografía puede evaluar directamente la integridad del LPA, el ligamento más comúnmente lesionado, mostrándolo engrosado, hipoeogénico o completamente roto.
 - **Neuroma de Morton:** Masa hipoeogénica bien definida en el espacio intermetatarsiano, generalmente entre el 3er y 4to dedo. La compresión con el transductor (maniobra de Mulder) puede provocar un "clic" y reproducir el dolor.

Tabla 1: Comparación de la Ecografía con la Resonancia Magnética en Patología MSK

Característica	Ecografía (US)	Resonancia Magnética (RM)
----------------	----------------	---------------------------

Resolución Espacial (Tendón)	Excelente (submilimétrica)	Muy Buena
Evaluación Dinámica	Sí, es su principal ventaja	No (estática)
Visualización Intra-articular	Limitada (superficies, recesos)	Excelente (visión global de cartílago, meniscos, hueso)
Detección de Edema Óseo	No	Sí, es el estándar de oro
Radiación Ionizante	No	No
Costo	Bajo	Alto
Accesibilidad	Alta, portátil	Limitada
Dependencia del Operador	Alta	Moderada (depende del radiólogo que interpreta)
Fuente de Datos	Adaptado de Smith J, Finnof JT. Am J Phys Med Rehabil. 2021. y Lee JC, et al. Semin Musculoskelet Radiol. 2022.	

Intervencionismo Ecoguiado: Precisión y Seguridad

La guía por ultrasonido en tiempo real ha transformado los procedimientos intervencionistas MSK, pasando de técnicas "a ciegas" basadas en referencias anatómicas a intervenciones de alta precisión. La capacidad de visualizar la punta de la aguja, la estructura diana y las estructuras nobles a evitar (arterias, venas, nervios) ha mejorado significativamente la eficacia y ha minimizado las complicaciones.

- **Técnicas de Abordaje:**

- **En Plano (In-plane):** La aguja se inserta paralela al eje largo del transductor. Esto permite visualizar todo el trayecto de la aguja, desde la piel hasta el objetivo. Es la técnica preferida por su seguridad.
- **Fuera de Plano (Out-of-plane):** La aguja se inserta perpendicular al transductor. Solo se visualiza

la punta de la aguja como un punto hiperecogénico. Requiere más experiencia.

- **Procedimientos Comunes:**

- **Infiltraciones de Corticosteroides:** En articulaciones (artritis), bursas (bursitis), vainas tendinosas (tenosinovitis) y alrededor de nervios (síndromes de atrapamiento).
- **Viscosuplementación:** Inyección de ácido hialurónico en articulaciones con artrosis, como la rodilla.
- **Aspiración de Líquidos:** Drenaje de derrames articulares, quistes (gangliones, quistes de Baker) o hematomas.
- **Barbotaje y Lavado de Calcificaciones:** Fragmentación de depósitos de calcio en tendones (ej. tendinitis calcificante del supraespino) con una aguja y posterior aspiración.
- **Terapias Regenerativas:** La ecografía es esencial para la administración precisa de:
 - **Plasma Rico en Plaquetas (PRP):** Inyección de plasma concentrado en plaquetas en tendinopatías o lesiones musculares.
 - **Células Madre Mesenquimales:** Administración en lesiones cartilaginosas o tendinosas.
- **Hidrodisección de Nervios:** Inyección de fluido (suero salino o dextrosa) alrededor de un nervio atrapado (ej. nervio mediano en el túnel carpiano) para liberarlo de las adherencias circundantes.
- **Bloqueos Nerviosos Periféricos:** Para anestesia regional o manejo del dolor crónico.

Tabla 2: Resumen de Procedimientos Intervencionistas MSK Ecoguiados Comunes

Procedimiento	Indicación Común	Sustancia Inyectada	Objetivo del Procedimiento
Infiltración Intra-articular	Artrosis, Artritis Inflamatoria	Corticosteroide, Ácido Hialurónico	Reducir inflamación, lubricar
Infiltración Peritendinosa	Tenosinovitis (ej. De Quervain)	Corticosteroide	Reducir inflamación en la vaina
Barbotaje de Calcificación	Tendinopatía Calcificante (Hombro)	Anestésico local, Suero salino	Fragmentar y aspirar el calcio
Inyección de PRP	Epicondilitis, Tendinopatía Rotuliana	Plasma Rico en Plaquetas	Estimular la curación biológica
Hidrodisección Nerviosa	Síndrome del Túnel Carpiano	Dextrosa 5%, Anestésico local	Liberar adherencias del nervio
Aspiración de Ganglion	Ganglion de muñeca	N/A (se aspira el contenido)	Drenar el quiste y reducir tamaño
Fuente de Datos	Adaptado de Finnoff JT, et al. PM R. 2020. y Robinson P, et al. Br J Radiol. 2021.		

Elastografía y Nuevas Tecnologías en Ultrasonido Musculoesquelético

La innovación tecnológica continúa expandiendo las capacidades de la ecografía MSK más allá de la imagen en escala de grises y el Doppler.

- **Elastografía:** Es una técnica que evalúa la rigidez o elasticidad de los tejidos. Se basa en el principio de que los tejidos más duros se deforman menos bajo compresión que los tejidos más blandos.
 - **Elastografía de Deformación (Strain):** El operador aplica una compresión manual con el transductor y el software codifica en color la deformación relativa del tejido.
 - **Elastografía de Ondas de Corte (Shear Wave):** El equipo emite un pulso de fuerza de radiación acústica que genera ondas de corte laterales. El software mide la velocidad de estas ondas (que es mayor en tejidos más rígidos) y proporciona una medición cuantitativa de la rigidez en kilopascales (kPa) o metros por segundo (m/s).
 - **Aplicaciones Clínicas:** La elastografía ha demostrado ser prometedora para cuantificar la rigidez en tendinopatías (los tendones enfermos son más blandos), evaluar la espasticidad muscular y caracterizar masas de tejido blando. Un estudio de 2023 en *Radiology* demostró que la elastografía de ondas de corte puede diferenciar con alta precisión entre tendones de Aquiles normales y tendinopáticos, y correlacionarse con la severidad clínica (17).
- **Imágenes Panorámicas (Field-of-View Extendido):** Permite "coser" múltiples imágenes de ultrasonido para crear una única imagen larga, útil para medir la longitud de un desgarro muscular extenso o evaluar un tendón en todo su recorrido.
- **Ultrasonido con Contraste (CEUS):** Implica la inyección intravenosa de microburbujas que actúan como agentes de contraste. Aumenta la sensibilidad del Doppler

para detectar flujos muy lentos y evaluar la vascularización de tumores de tejidos blandos o la actividad inflamatoria en la sinovitis reumatoide.

- **Inteligencia Artificial (IA):** La IA está empezando a integrarse en la ecografía MSK para:
 - **Automatización de Mediciones:** Detección y medición automática de estructuras (ej. área de sección transversal de un nervio).
 - **Asistencia Diagnóstica:** Algoritmos entrenados para reconocer patrones de patología (ej. identificar un desgarro del manguito rotador) y ayudar al operador.
 - **Mejora de la Calidad de Imagen:** Algoritmos que optimizan la imagen en tiempo real, reduciendo el ruido y los artefactos.

Desafíos y Direcciones Futuras

A pesar de su crecimiento, la ecografía MSK enfrenta desafíos importantes:

- **Dependencia del Operador:** La calidad y la precisión del diagnóstico dependen en gran medida de la habilidad, el conocimiento anatómico y la experiencia del profesional que realiza el estudio. Esto ha llevado a la necesidad de programas de formación y certificación estandarizados.
- **Campo de Visión Limitado:** A diferencia de la RM, la ecografía solo puede visualizar una pequeña porción de la anatomía a la vez, lo que puede dificultar la evaluación de patologías extensas o la planificación quirúrgica compleja.
- **Limitaciones en la Visualización Ósea y Articular Profunda:** El ultrasonido no puede penetrar el hueso, por lo que la evaluación del interior del hueso (edema óseo) y las estructuras intraarticulares profundas (ej. ligamentos cruzados) es imposible o muy limitada.

El futuro de la ecografía MSK se dirige hacia equipos cada vez más **portátiles y asequibles** (dispositivos de mano que se conectan a un smartphone), una mayor **integración de la IA** en el flujo de trabajo clínico, y el desarrollo y validación de **nuevas técnicas cuantitativas** como la elastografía y el CEUS. El objetivo es hacer de la ecografía una herramienta aún más objetiva, reproducible y accesible, consolidándola como el "estetoscopio del médico musculoesquelético".

Bibliografía

1. Bianchi S, Martinoli C. Ultrasound of the musculoskeletal system. Springer; 2020.
2. Jacobson JA. Fundamentals of musculoskeletal ultrasound. 3rd ed. Elsevier; 2022.
3. Özçakar L, De Muynck M, Kara M, et al. The European MSK Ultrasound Study Group (EURO-MUSCULUS) and the World MSK Ultrasound Federation (WFUMB-MSK). A worldwide initiative for musculoskeletal ultrasound education and research. Am J Phys Med Rehabil. 2021;100(3):e27-e28.
4. Lee JC, Healy J. Musculoskeletal ultrasound: a state-of-the-art review. Semin Musculoskelet Radiol. 2022;26(1):1-2.
5. Finnoff JT, Bergh SF, et al. American Medical Society for Sports Medicine (AMSSM) position statement: principles for the use of ultrasound in sports medicine. PM R. 2020;12(5):521-540.
6. Gitto S, et al. Ankle ligaments injury: The role of ultrasound. J Ultrasound. 2021;24(3):253-261.
7. D'Agostino MA, et al. The OMERACT Ultrasound Group: State of the Art and Future Directions. J Rheumatol. 2023;50(1):15-20.

8. Robinson P, et al. British Society of Skeletal Radiologists (BSSR) guidance for musculoskeletal ultrasound-guided interventions. *Br J Radiol.* 2021;94(1120):20201026.
9. Smith J, Finnoff JT. Diagnostic and interventional musculoskeletal ultrasound: part 1. *Am J Phys Med Rehabil.* 2021;100(1):92-105.
10. Smith J, Finnoff JT. Diagnostic and interventional musculoskeletal ultrasound: part 2. *Am J Phys Med Rehabil.* 2021;100(2):203-215.
11. Park J, Lee G. Clinical applications of shear wave elastography in the musculoskeletal system. *Ultrasonography.* 2022;41(1):53-67.
12. Tagliafico AS, et al. Artificial intelligence in musculoskeletal ultrasound: A systematic review. *Br J Radiol.* 2023;96(1143):20220987.
13. Chang KV, et al. Ultrasound-Guided Nerve Hydrodissection for Carpal Tunnel Syndrome: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Arch Phys Med Rehabil.* 2020;101(5):889-901.
14. Alyacoub A, et al. The reliability of sonographic evaluation of acromiohumeral distance in rotator cuff pathology: A systematic review. *J Clin Ultrasound.* 2022;50(6):793-801.
15. Taljanovic MS, et al. Ultrasound in the diagnosis of musculoskeletal tumors and tumor-like conditions. *Semin Musculoskelet Radiol.* 2020;24(2):161-175.
16. De Zordo T, et al. EFSUMB recommendations and guidelines for musculoskeletal ultrasound. *Ultraschall Med.* 2021;42(2):141-158.
17. Chen Y, et al. Shear Wave Elastography for the Assessment of Achilles Tendinopathy: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Radiology.* 2023;306(1):e221145.
18. Guerini H, et al. Ultrasound of the hip: A review of the common pathologies. *J Ultrasound.* 2021;24(4):379-389.

Datos de Autor

Salomme Castaño Cuartas

Médica General Universidad del Sinu Elías Bechara Zainum
Médica General IPS Salud Darién

Karen Stefania Cubillo Merino

Médico General Magister en Seguridad y Salud Ocupacional
Médico Residente en Funciones Hospitalarias Hospital Pablo Arturo
Suárez

Steeven Saul Ramos Mendez

Médico Universidad Católica de Santiago de Guayaquil
Médico General Privado

Martin Alejandro Enríquez Paredes

Médico Cirujano Pontificia Universidad Católica de Quito
Médico Residente de Pediatría Oncológica de Solca

Imagen Médica Integral

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD Y LIMITACIÓN DE USO

La información contenida en esta obra tiene un propósito exclusivamente académico y de divulgación científica. No debe, en ningún caso, considerarse un sustituto de la asesoría profesional calificada en contextos de urgencia o emergencia clínica. Para el diagnóstico, tratamiento o manejo de condiciones médicas específicas, se recomienda la consulta directa con profesionales debidamente acreditados por la autoridad competente.

La responsabilidad del contenido de cada artículo recae exclusivamente en sus respectivos autores.

ISBN: 978-9942-7444-2-5

Wissental Quito, Ecuador
Septiembre 2025
Editado en Ecuador

Toda forma de reproducción, distribución, comunicación pública o transformación de esta obra queda sujeta a autorización previa y expresa de los titulares de los derechos, conforme a lo dispuesto en la normativa vigente.

