

Inteligencia artificial: la oportunidad para el diagnóstico oportunista masivo de la osteoporosis

María Jesús Díaz Candamio

Hospital Universitario A Coruña

índice temático

El Problema clínico: la brecha diagnóstica.

Cambio de paradigma DXA vs. IA oportunista

El pipeline diagnóstico de la IA

Taxonomía por modalidad (RX, TC, RM).

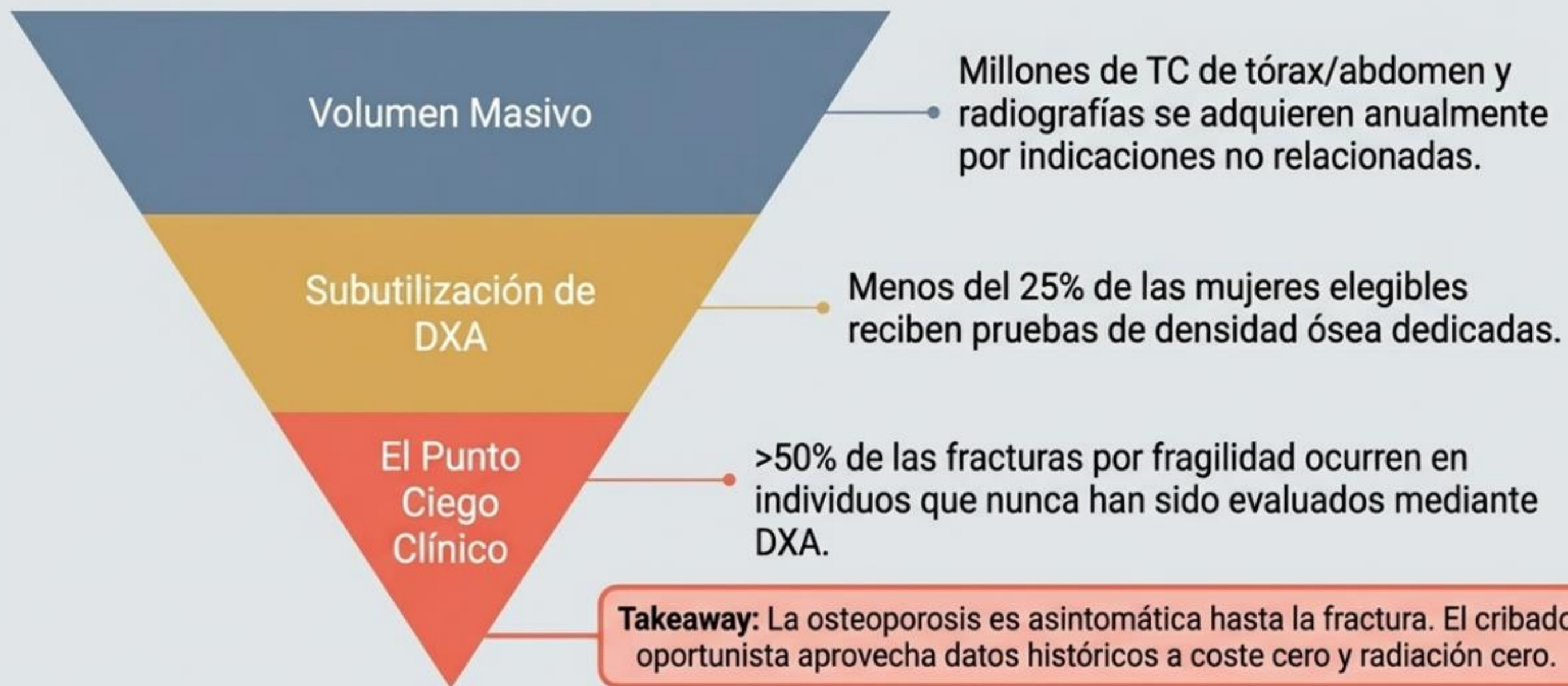
RX: extracción de T-score en 2D

TC: Volumetría y fracturas silentes

De caja negra a caja de cristal (XAI)

Conclusiones

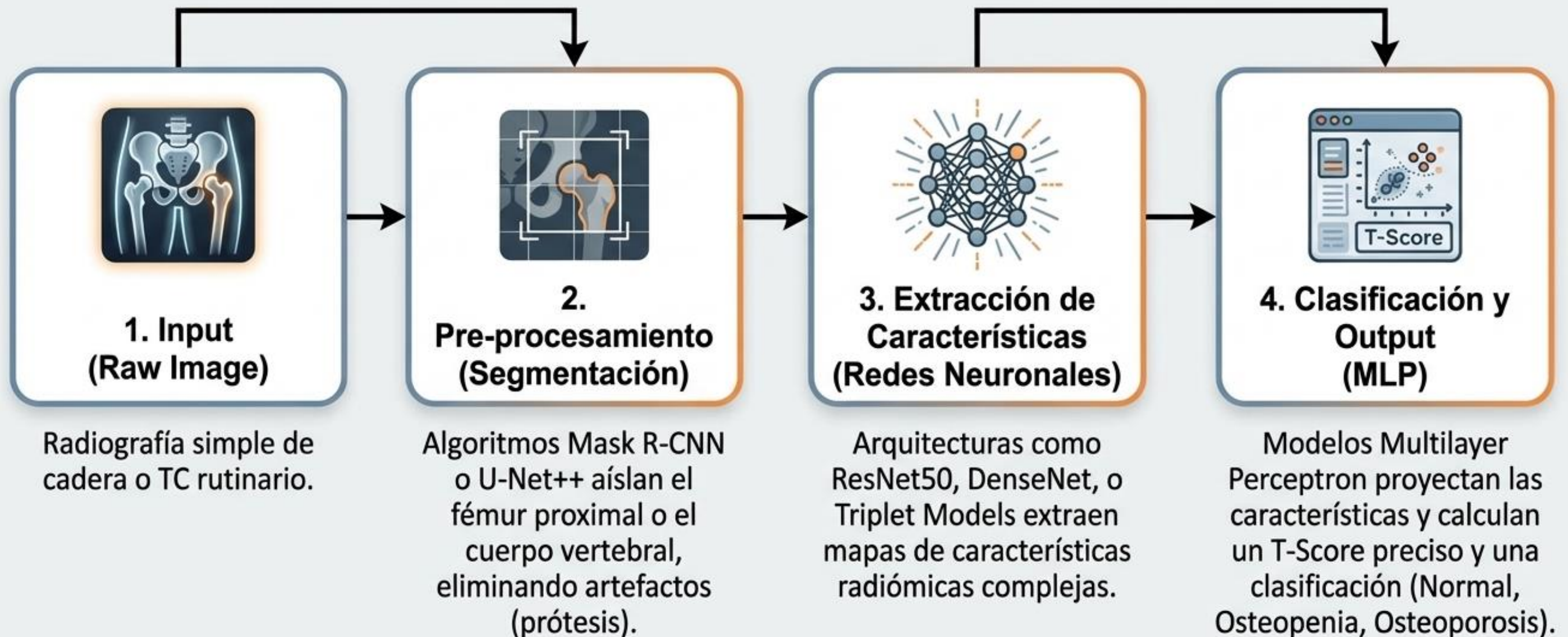
La Brecha Diagnóstica: El Fracaso del Modelo Reactivo



Matriz de Paradigma: Densitometría (DXA) vs. IA Oportunista

Parámetro	DXA Tradicional (Estándar de Oro)	IA Oportunista (TC / Rx)
Adquisición	Cita dedicada, equipo específico ✗	Retrospectiva, escáneres rutinarios ✓
Coste / Radiación	Adicional (moderado) ✗	Coste cero / Cero milisieverts extra ✓
Target Diagnóstico	DMO Areal (2D)	DMO Volumétrica (3D), Textura, Radiómica ✓
Detección de Fracturas	VFA (limitada, baja resolución)	Detección automatizada incidental (alta precisión) ✓
Limitaciones	Subutilización, errores de posicionamiento	Requiere validación externa y estandarización

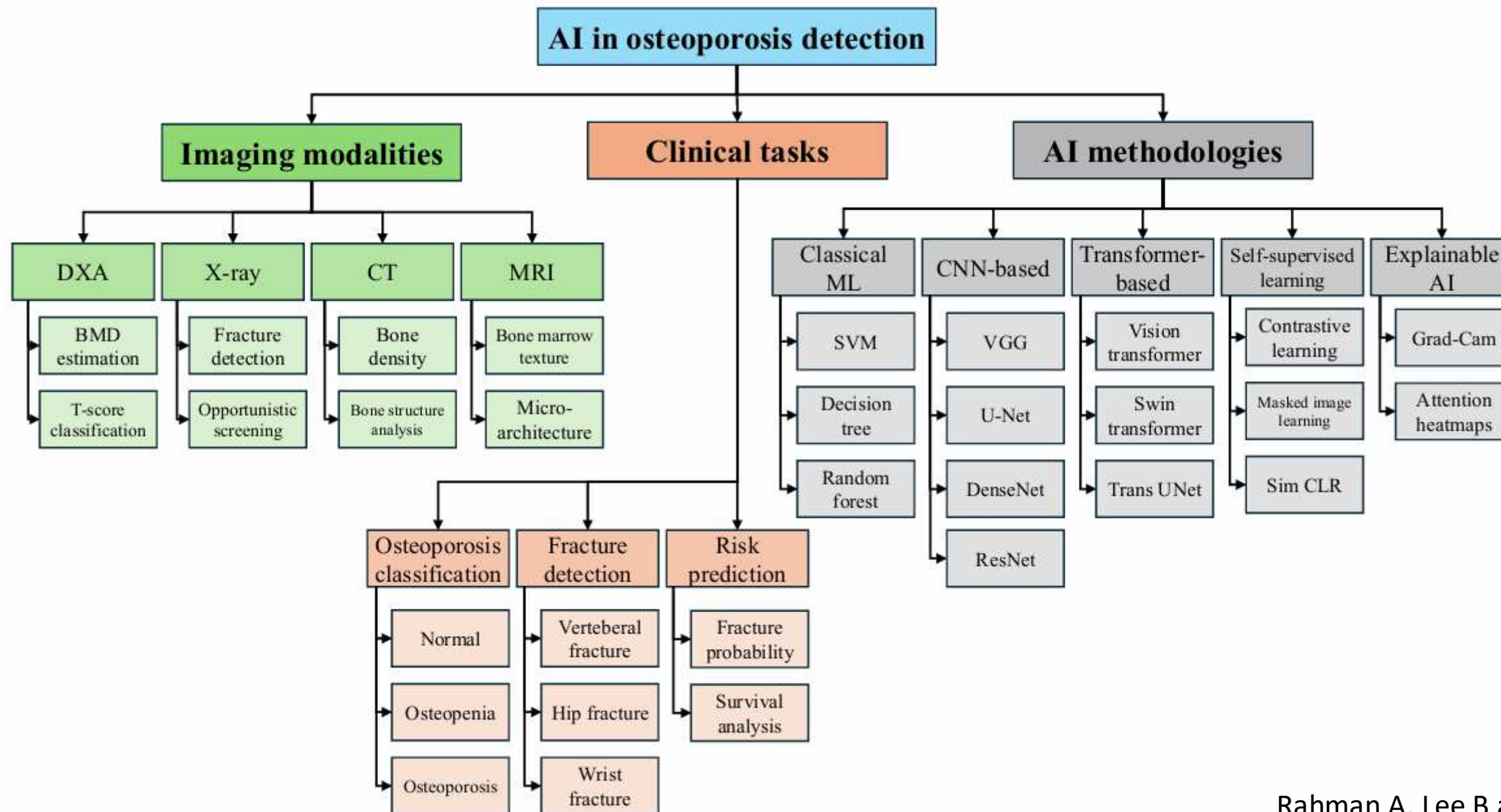
El Pipeline Diagnóstico de la IA: Del Píxel a la Predicción

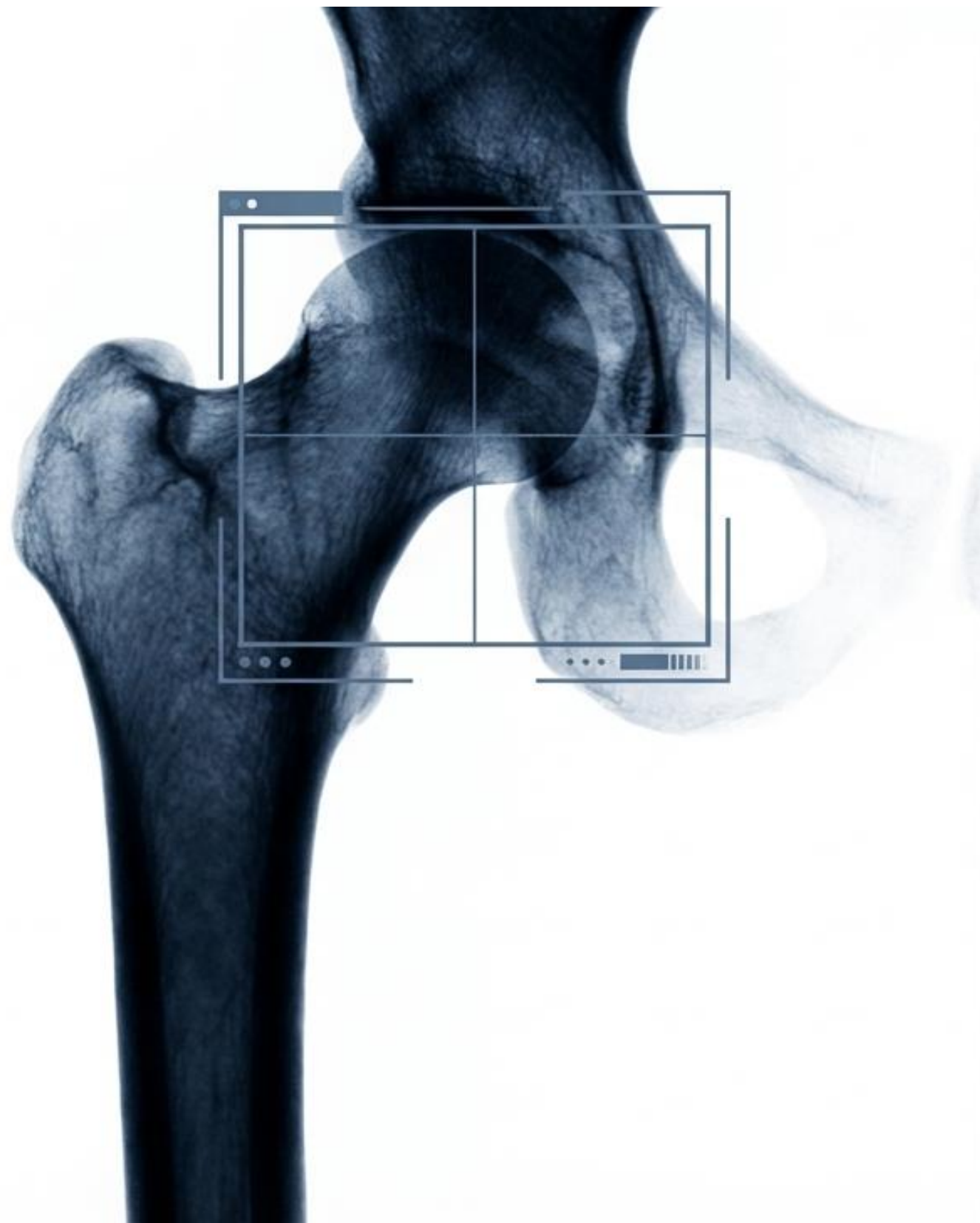


Matriz de Capacidad Diagnóstica por Modalidad

Modalidad	Clasificación de Osteoporosis	Detección de Fracturas	Predicción de Riesgo
TC (CT)	Alta (DMO volumétrica, L1 HU)	Muy Alta (Detección incidental, Morfometría)	Alta (Radiómica, Análisis estructural 3D)
Radiografía (XR)	Alta (Modelos CNN / ViT en cadera/columna)	Alta (CNNs de detección de puntos clave)	Moderada (Modelos de supervivencia, DeepSurv)
RM (MRI)	Emergente (Composición de médula, trabéculas)	Moderada (Edema óseo, fracturas por insuficiencia)	Emergente (Microarquitectura avanzada)
DXA	Estándar de oro clínico	Moderada (VFA automatizado)	Alta (Integración con FRAX)

Detección de osteoporosis basada en IA diferentes modalidades de imagen, metodologías IA y tareas clínicas.





Modalidad 1: Radiografía - Democratizando el Screening

01

Ubicuidad y Coste

Las radiografías simples representan la opción más accesible para el cribado oportunista a nivel global.

02

Más allá del Índice de Singh

La inspección visual humana de la fragilidad ósea es subjetiva y lenta. La IA captura la pérdida de trabéculas y adelgazamiento cortical de forma estandarizada.

03

Predicción de T-Score

Modelos recientes (ej. X1AI-Osteo) demuestran una alta correlación ($r = 0.996$) con los T-scores medidos por DXA, prediciendo la densidad directamente desde una radiografía 2D.

Arquitecturas Profundas en Radiografía: Modelos Triplet y PCA

El Problema de los Modelos Preentrenados

Las características por defecto de redes genéricas (ResNet) no son óptimas para la textura ósea sutil.

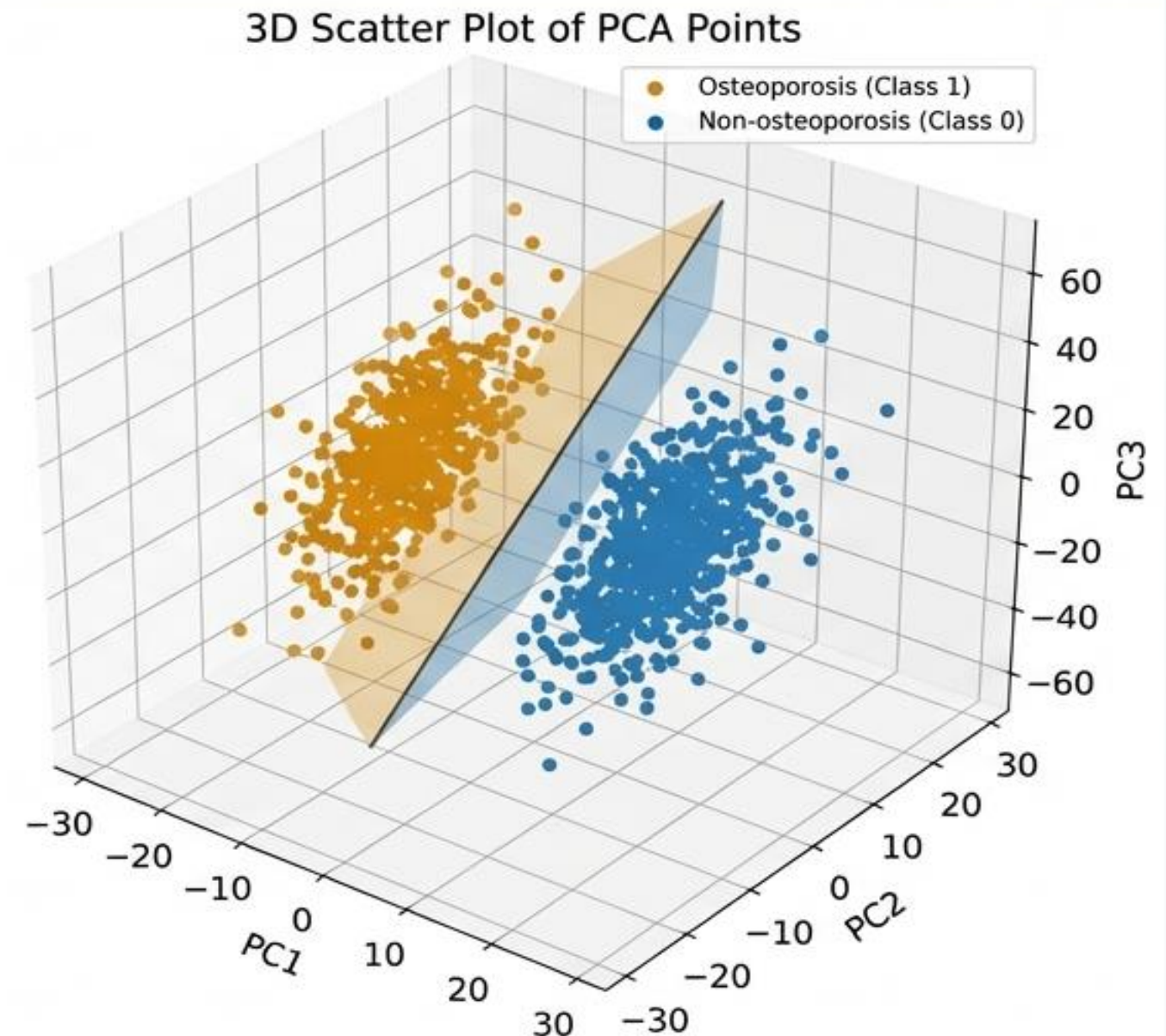
El Enfoque Triplet

Utilización de algoritmos de aprendizaje auto-supervisado (Self-Supervised Learning) y Triplet loss para forzar a la red a maximizar la distancia matemática entre fémures sanos y osteoporóticos.

Reducción de Dimensionalidad

Análisis de Componentes Principales (PCA) proyecta cientos de características radiómicas en clusters diferenciados, permitiendo a los perceptrones multicapa (MLP) inferir el T-Score exacto.

Proyección PCA de Características Radiómicas



Modalidad 2: Tomografía Computarizada (TC) - El Estándar Volumétrico

El Tesoro Oculto

Millones de TC toracoabdominales adquiridos por oncología, urología o urgencias contienen datos de densidad ósea volumétrica (vBMD) ignorados.

Calibración Asíncrona

Algoritmos de IA modernos permiten medir la DMO volumétrica sin necesidad de maniquíes (phantoms) de calibración simultánea, utilizando únicamente la atenuación del haz.

Ventaja Biomecánica

A diferencia de la DXA (2D), el TC permite el análisis volumétrico verdadero en 3D, aislando compartimentos anatómicos críticos.

TC + IA 1: Cuantificación Basada en Unidades Hounsfield (HU)

Enfoque Macroscópico (47.1% de los estudios)



Metodología

Algoritmos segmentan automáticamente la región de interés y extraen valores de atenuación HU.

+ Ventajas

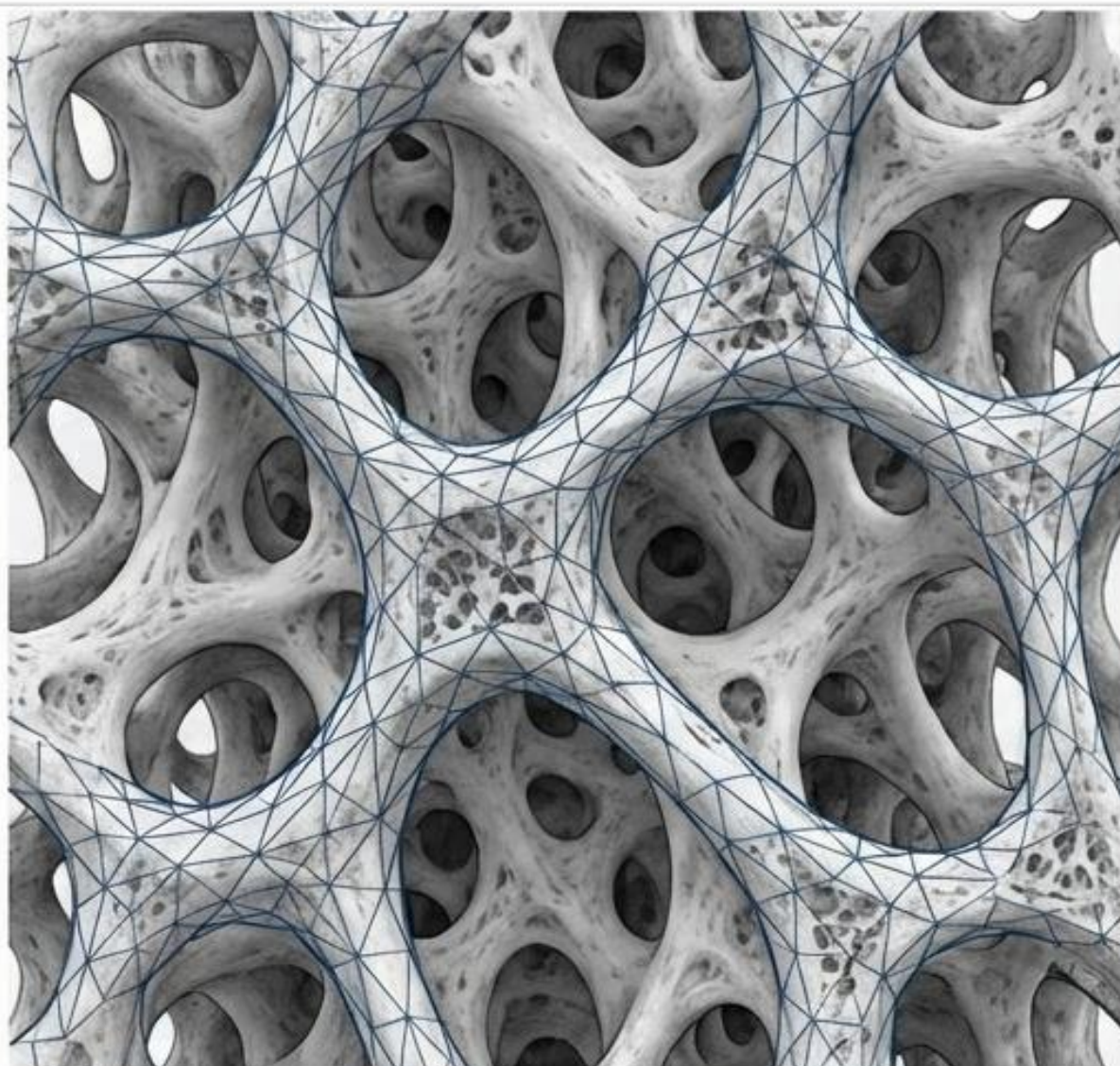
- Alto grado de automatización.
- Bajo coste computacional.
- Ideal para cribado oportunista a gran escala.
- Excelente concordancia con DXA y QCT.

⚠ Limitaciones

- Capta solo la pérdida evidente de DMO.
- Relativamente insensible a las alteraciones microestructurales tempranas.

TC + IA 2: Análisis Radiómico

Enfoque Microestructural (70.6% de los estudios)



Metodología

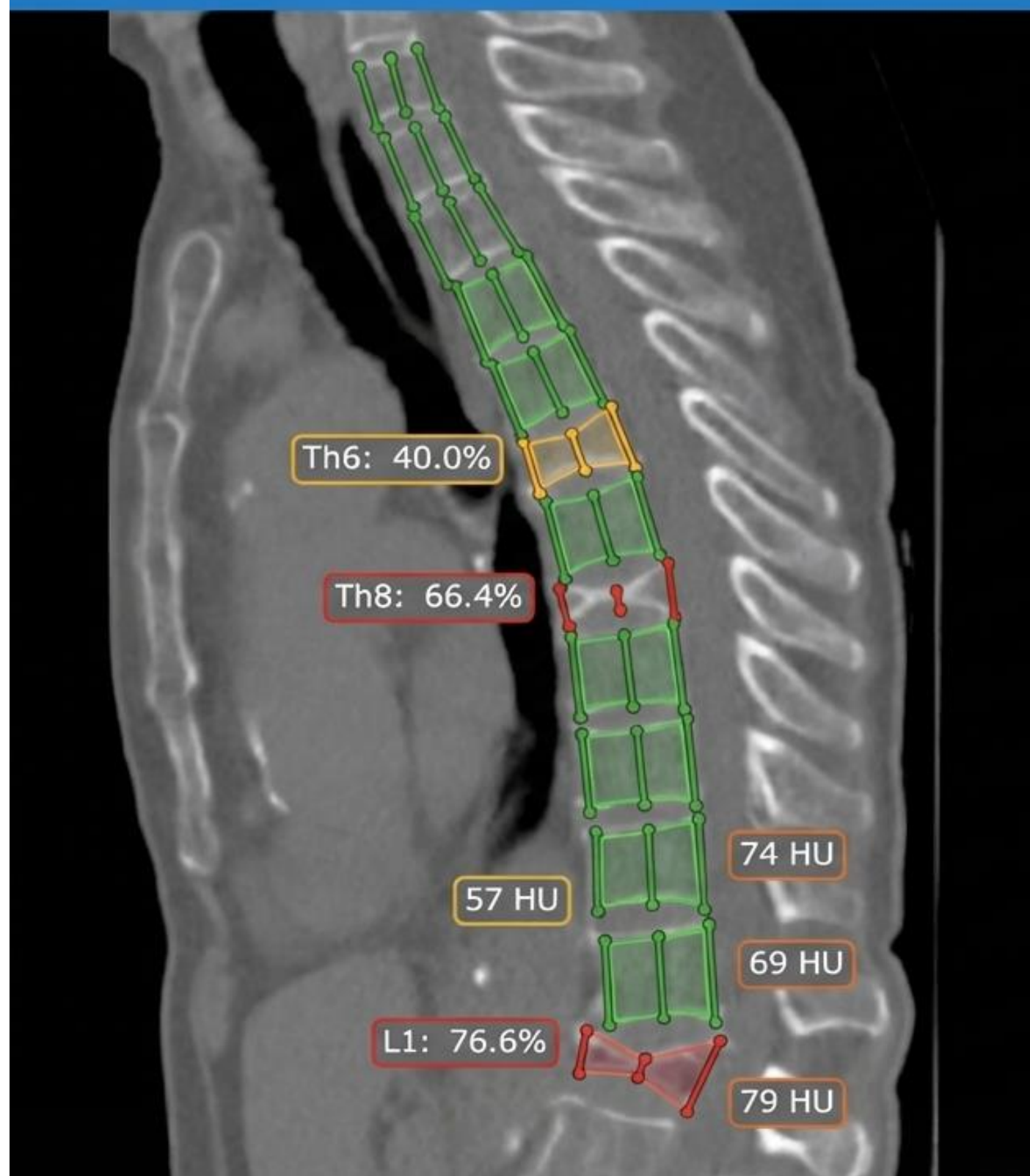
Extracción de características multidimensionales (textura, forma, intensidad) analizadas mediante Machine Learning tradicional.

+ Ventajas

- Capta alteraciones microestructurales tempranas.
- Detecta la heterogeneidad de la red trabecular.
- Identifica osteopenia antes de caídas globales en densidad.

⚠ Limitaciones

- Mayor complejidad de procesamiento.
- Menos adecuado para aplicaciones de cribado masivo.



Mapeo de Atenuación Trabecular: Calibración L1 (HU)

[> 150 HU]

Normal (Verde): Baja probabilidad de osteoporosis.

[100 - 150 HU]

Osteopenia (Ámbar): Riesgo intermedio, requiere correlación clínica.

[< 100 HU]

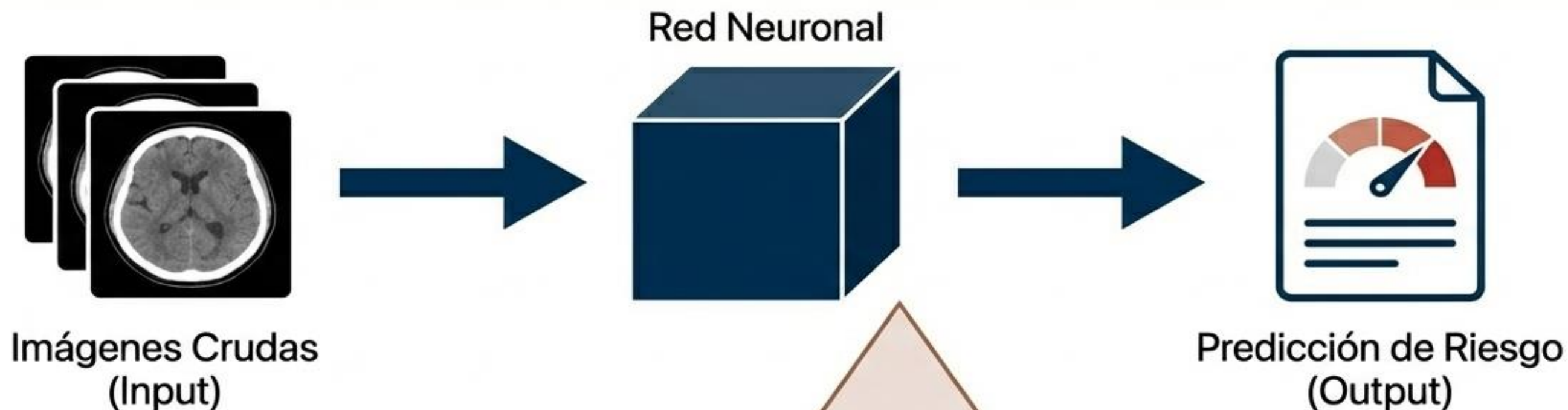
Osteoporosis (Rojo): Alta especificidad para baja DMO. Identificación inmediata de alto riesgo.

Workflow Integration

La IA coloca automáticamente ROIs trapezoidales en el hueso trabecular (evitando la cortical y venas basivertebrales) para extraer valores medios de HU de forma instantánea.

TC + IA 3: Aprendizaje Profundo de Extremo a Extremo

Redes Neuronales (CNN, 3D U-Net, Transformers)



Ventajas

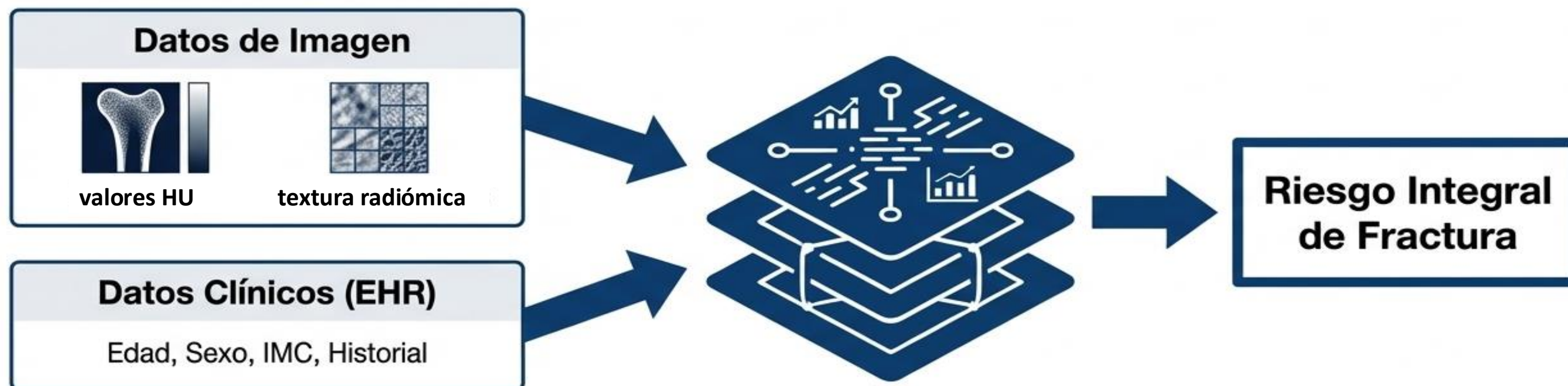
- Automatización superior sin predefinir características.
- Mejora la generalización entre distintos equipos TC.
- Método predominante para cribado rápido.

ALERTA CLÍNICA: FALTA DE INTERPRETABILIDAD

La naturaleza de 'Caja Negra' dificulta explicar qué características anatómicas impulsan la predicción, limitando su aceptación clínica.

TC + IA 4: Flujos de Trabajo Multimodales

Integración Holística para Riesgo de Fracturas

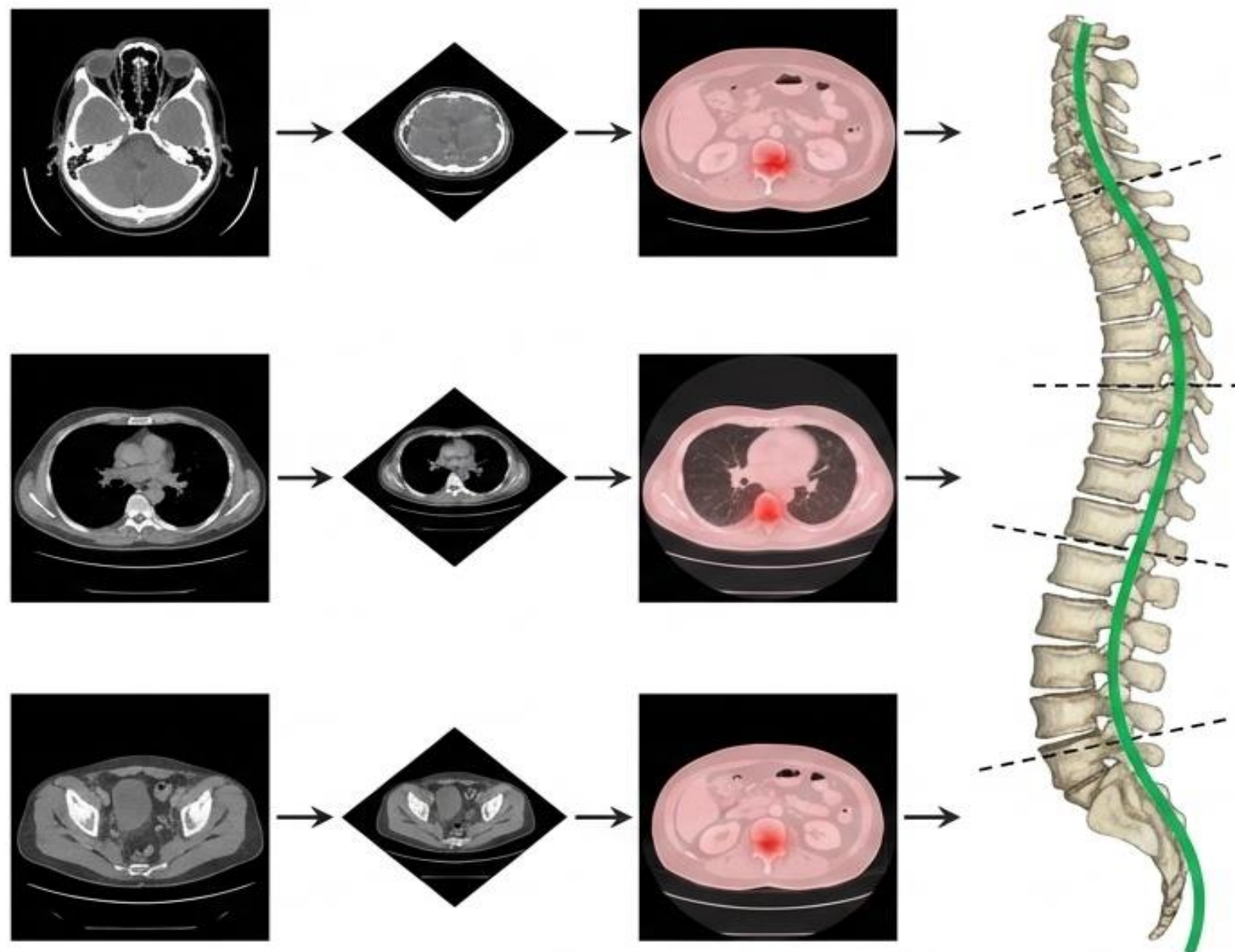


+ Ventajas

- Captura el riesgo de forma integral.
- Evalúa no solo la densidad ósea, sino la salud global y el riesgo de caídas.

! Limitaciones

- Método complejo con alta heterogeneidad metodológica.
- Rendimiento más modesto en tareas combinadas frente a exclusivas de imagen (AUC: 0.70 - 0.92).



[Ref: Petraikin, A. V., et al. Asian Spine J. 2025; ECR 2024 Poster]

TC: Detección Automatizada de Fracturas Silentes

El Peligro Asintomático

Hasta dos tercios de las fracturas vertebrales son asintomáticas o no se reportan en informes radiológicos por priorizar el hallazgo principal (ej. estadiaje tumoral).

Análisis Morfométrico CNN

Algoritmos localizan puntos clave (keypoints) y calculan el índice de compresión vertebral de forma autónoma.

Umbral Clínico

Detección automática de Deformidad por Compresión Vertebral (VCD) $> 25\%$, reclasificando instantáneamente al paciente como riesgo severo, independientemente de su DMO.

Síntesis: Más Allá de la Densitometría (El Perfil de Riesgo Unificado)



Insight de Síntesis

La IA no es simplemente un reemplazo económico para la DXA; es una herramienta diagnóstica superior.

De Caja Negra a Caja de Cristal: Inteligencia Artificial Explicable (XAI)



Osteoporosis
(Foco en Cuello Femoral y
Trocánter)



Normal
(Patrón Difuso)

Transparencia Clínica

Herramientas como Grad-CAM, SHAP y LIME mapean visualmente los píxeles anatómicos que la red neuronal utiliza para clasificar la osteoporosis.

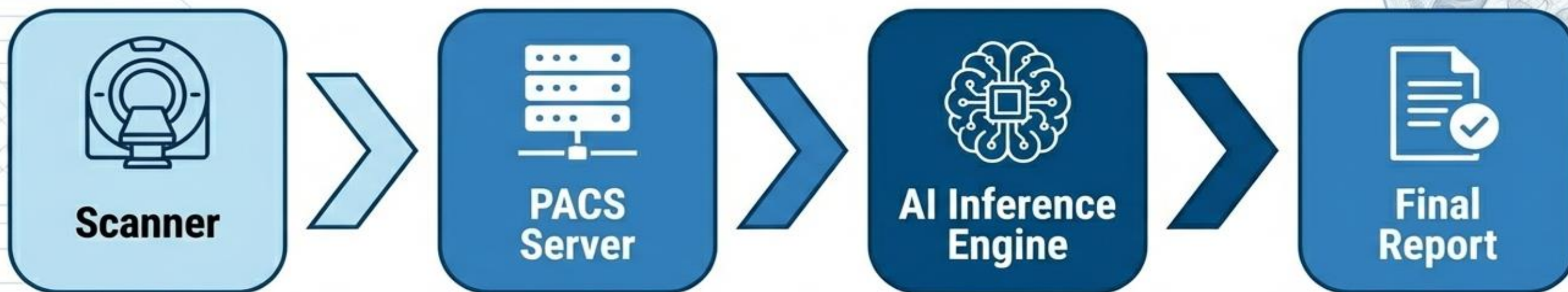
Validación Anatómica

Los mapas de calor demuestran consistentemente que la IA mira los patrones trabeculares correctos (cuello femoral, región trocantérea) y no artefactos de fondo.

Confianza Médica

La explicabilidad permite al radiólogo auditar la decisión algorítmica, integrando la IA como un segundo lector fiable en lugar de un oráculo inescrutable.

Integración en el Flujo de Trabajo Clínico (Cero Clics)



Lectura en Segundo Plano

Los algoritmos operan de forma invisible en el servidor PACS, analizando automáticamente todo TC de tórax/abdomen o Rx de cadera entrante.

Alertas Automatizadas

Si se detecta un HU < 100 o una VCD > 25%, el sistema genera un widget superpuesto en el negatoscopio digital del radiólogo.

Derivación Directa

La identificación incidental genera una alerta procesable (HL7/FHIR) en la Historia Clínica Electrónica, desencadenando la derivación a Reumatología o prescribiendo una DXA confirmatoria.

Retos y Limitaciones de la Implementación



Estandarización Multicéntrica



Variabilidad en protocolos de adquisición de TC, dosis de radiación y el impacto de los agentes de contraste intravenoso en las mediciones de HU.



Sobrecarga del Radiólogo



Riesgo de fatiga de alertas si los sistemas de IA producen altas tasas de falsos positivos en la detección de fracturas leves.



Marcos Regulatorios e Integración



Necesidad de guías clínicas estandarizadas sobre cómo actuar ante hallazgos oportunistas e integración de datos entre sistemas (PACS y EHR).

Conclusiones:

La mejor oportunidad para prevenir la próxima fractura osteoporótica ya está en nuestro PACS



1. Detección Proactiva

El cribado oportunista mediante IA en TC y Rx resuelve la crisis de subdiagnóstico sin irradiación ni costes de adquisición adicionales.



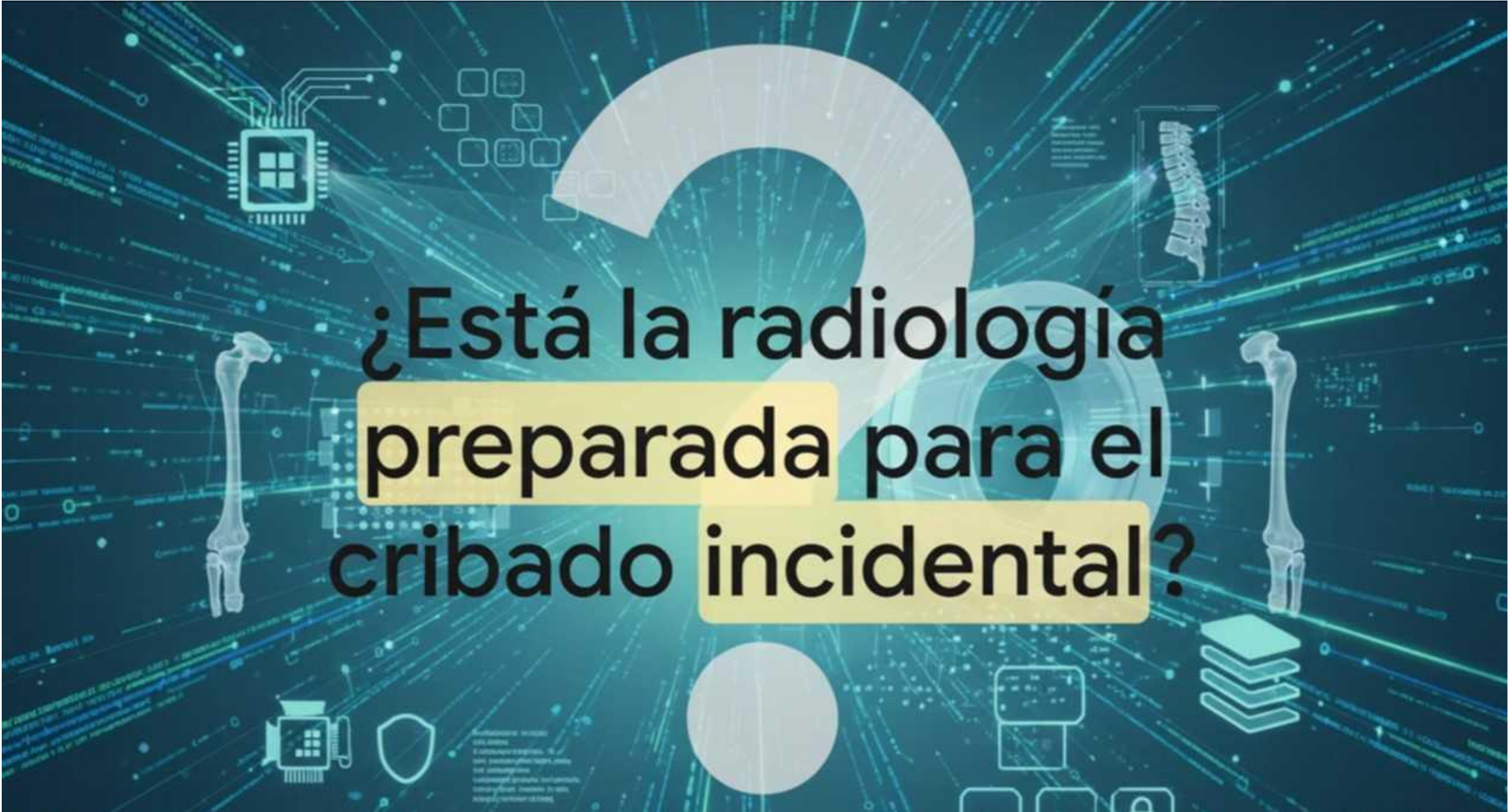
2. Precisión Superior

La extracción de DMO volumétrica y la detección de fracturas asintomáticas superan las limitaciones anatómicas de la DXA tradicional 2D.



3. El Nuevo Rol del Radiólogo

El radiólogo deja de ser un documentador reactivo para convertirse en el pilar central de la salud poblacional preventiva.



¿Está la radiología preparada para el cribado incidental?

Bibliografía Seleccionada

Acosta-Batlle, J., et al. (2026). An AI-based pipeline for osteoporosis/osteopenia prediction using hip radiographs. Skeletal Radiol.

Westerhoff, M., et al. (2025). Deep Learning-based Opportunistic CT Osteoporosis Screening. Radiology.

Kong, S. H. (2025). Incorporating AI into Fracture Risk Assessment. Endocrinol Metab.

Petraikin, A. V., et al. (2025). Screening of osteoporosis using AI-services for detecting VF and low BMD in routine chest CT. Asian Spine J.

Chen, Y.-P., et al. (2024). Automated osteoporosis classification and T-score prediction using hip radiographs. Ther Adv Musculoskelet Dis.

Herrera Acevedo, J. B., et al. (2024). Opportunistic Screening of Bone Fragility Using CT. Semin Musculoskelet Radiol.

Li Y, Jin D, Zhang Y, Li W, Jiang C, Ni M, et al. **Utilizing artificial intelligence to determine bone mineral density using spectral CT.** Bone. 2025;192:117321

Loffler MT, Jacob A, Scharr A, et al. **Automatic opportunistic osteoporosis screening in routine CT: improved prediction of patients with prevalent vertebral fractures compared to DXA.** Eur Radiol. 2021;31:6069-77

Guo M, Zhang Y, Gu X, Liu X, Peng F, Zhang Z, Jing M and Fu Y (2025) A comparative study of bone density in elderly people measured with AI and QCT. Front. Artif. Intell. 8:1582960. doi: 10.3389/frai.2025.1582960

Pinto EM, Neves JR, Teixeira A, Frada R, Atilano P, Oliveira F, et al. **Efficacy of Hounsfield Units Measured by Lumbar Computer Tomography on Bone Density Assessment: A Systematic Review.** Spine (Phila Pa 1976). 2022;47(9):702-710

Tong X, Fang X, Wang S, Fan Y, Wei W, Xiao Q, et al. **Opportunistic screening for osteoporosis using enhanced images based on dual-energy computed tomography material decomposition: A comparison with quantitative computed tomography.** Quant Imaging Med Surg. 2024;14:352-364

Wu Y, Yang X, Wang M, Lian Y, Hou P, Chai X, et al. **Artificial intelligence assisted automatic screening of opportunistic osteoporosis in computed tomography images from different scanners.** Eur Radiol. 2025;35(4):2287-2295

Yuan J, Li B, Zhang C, Wang J, Huang B, Ma L. **Machine Learning-Based CT Radiomics Model to Predict the Risk of Hip Fragility Fracture.** Acad Radiol. 2025;32(5):2854-2862
