



REVISTA MÉDICA CLÍNICA LAS CONDES

<https://www.journals.elsevier.com/revista-medica-clinica-las-condes>

ARTÍCULO ESPECIAL/SPECIAL ARTICLE

Nuevos métodos de evaluación de la densidad y contenido mineral óseo

New methods for evaluating bone mineral density

José Canessa García, MD^a✉.

^a Servicio de Medicina Nuclear y Densitometría Ósea, Hospital de la Dirección de Previsión de Carabineros de Chile, (Dipreca). Santiago, Chile.

INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Historia del Artículo:

Recibido: 11/05/2025

Aceptado: 12/08/2025

Keywords:

Bone Densitometry; Bone Mineral Density; Trabecular Microarchitecture; Advanced Imaging Techniques; DXA; TBS; FRAX; QCT; QUS.

Palabras clave:

Densitometría Ósea; Densidad Mineral Ósea; Microarquitectura Trabecular; Técnicas Avanzadas de Imagen; DXA; TBS; FRAX; QCT; QUS.

RESUMEN

Se discuten las nuevas técnicas disponibles para complementar la evaluación de la densidad ósea convencional (DMO) efectuada con densitometría ósea radiológica (DXA), y orientadas a evaluar la calidad ósea y estimar el riesgo de fractura osteoporótica, permitiendo una mejor estimación clínica de la salud ósea, la instalación precoz y selectiva de terapia dirigida y controlar su evolución.

Complementarias a un estudio DXA convencional, y plenamente validadas, se dispone de herramientas de estimación de riesgo de fractura a 10 años, tomando en cuenta los factores de riesgo más conocidos (FRAX) y el análisis de textura trabecular (TBS). El análisis geométrico estructural de cadera (HSA) aunque disponible, no está aún validado clínicamente.

Aparte de DXA, cuyas limitaciones son, entre otras, que entregan una dosis de radiación ionizante (muy baja), analizan un área de hueso más que un volumen y que no diferencian entre hueso cortical y trabecular, se encuentran las imágenes radiológicas cuantitativas, como tomografía computada (QCT) y tomografía computada periférica de alta resolución (HR-pQCT) que también irradian al paciente (dosis mayores). Las técnicas sin radiación como ultrasonido cuantitativo (QUS), radiofrecuencia por ultrasonido (REMS) y resonancia magnética cuantitativa (QMRI), en mayor o menor medida aportan un análisis tridimensional o volumétrico, de alta resolución, permitiendo diferenciar entre hueso cortical y trabecular y aumentando la especificidad del diagnóstico. La principal limitación de estas nuevas tecnologías es su alto costo, poca disponibilidad y, en algunos casos, falta de validación clínica en grandes poblaciones. La incorporación de inteligencia artificial a estas técnicas revolucionará el análisis e interpretación de imágenes y la automatización de procesos.

ABSTRACT

New techniques are discussed to complement the conventional assessment of bone mineral density (BMD) performed using radiological bone densitometry (DXA), with the aim of evaluating bone quality and estimating the risk of osteoporotic fracture. These approaches allow for a more

✉ Autor para correspondencia
Correo electrónico: canessaj@hospitaldipreca.cl

<https://doi.org/10.1016/j.rmcl.2025.08.001>

e-ISSN: 2531-0186/ ISSN: 0716-8640/© 2025 Revista Médica Clínica Las Condes.

Este es un artículo Open Access bajo la licencia CC BY-NC-ND

(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).



accurate clinical assessment of bone health, early and selective initiation of targeted therapy, and monitorization of its progression.

Complementary to standard DXA studies and fully validated, the 10-year fracture risk estimation tool (FRAX), which incorporates well-established clinical risk factors, and the trabecular bone score (TBS), derived from texture analysis, are available. Hip structural analysis (HSA), although available, has not yet been clinically validated.

Beyond DXA, which has limitations such as exposure to ionizing radiation (albeit very low), the analysis of bone area rather than volume, and the inability to differentiate cortical from trabecular bone, other imaging modalities include quantitative radiological techniques such as quantitative computed tomography (QCT) and high-resolution peripheral quantitative computed tomography (HR-pQCT), which also involve radiation exposure (with higher doses). Radiation-free techniques like quantitative ultrasound (QUS), radiofrequency echographic multi-spectrometry (REMS), and quantitative magnetic resonance imaging (QMRI) are also available. These latter methods, to varying extents, provide three-dimensional or volumetric assessments, high-resolution imaging, and the ability to distinguish between cortical and trabecular bone, thereby increasing diagnostic specificity.

The main limitations of these newer technologies include their high cost, limited availability, and, in some cases, a lack of clinical validation in large population studies. The integration of artificial intelligence into these techniques is expected to revolutionize image analysis and interpretation, as well as the automation of diagnostic processes.

INTRODUCCIÓN

La densitometría ósea con rayos X de doble haz (DXA o DEXA, *dual energy X-Ray absorptiometry*), aprobada para uso clínico desde 1987, es una técnica no invasiva, de relativo bajo costo, reproducible, disponible y plenamente validada en el estudio clínico de pacientes con sospecha de osteoporosis, tanto en el aspecto diagnóstico como en el seguimiento y control terapéutico. Ya en 1994 la Organización Mundial de la Salud publicó criterios de interpretación transversales, los que han sido complementados con sucesivas ampliaciones de diferentes organizaciones dedicadas al enfoque multidisciplinario de esta importante y prevalente patología. Entre otras, la Fundación Internacional para la Osteoporosis (IOF, *International Osteoporosis Foundation*) y, sobre todo, la Sociedad Internacional de Densitometría Clínica (ISCD, *International Society for Clinical Densitometry*) publican completos criterios de interpretación, protocolos de estudio, estándares de control de calidad y actualizan listados de indicaciones clínicas del estudio. La última versión de la posición oficial de ISCD (ISCD Official Positions), para estudios DXA para población adulta es del año 2023¹ y actualiza los criterios ISCD publicados en 2019. De igual modo existen guías y criterios chilenos, adaptados a la población local².

Sin embargo, la salud ósea no es completamente evaluada por el análisis de la densidad ósea mineral (DMO) medida por la DXA en términos bidimensionales o areales (en g/cm²), sino que también depende, y en gran medida, de la microarquitectura, composición y resistencia estructural del hueso.

Por lo anterior, se han ido incorporando tanto en la práctica clínica como en la investigación, diversas técnicas, tanto en el estudio DXA³⁻⁵ como nuevas técnicas de imagen⁶⁻¹¹, que han contribuido a entender el metabolismo óseo, su estructura y los cambios que el envejecimiento y diversas patologías producen en la salud y resistencia del esqueleto, en especial en la evaluación del riesgo de fractura.

Discutiremos brevemente los avances disponibles hoy a nivel clínico y los próximos desarrollos que actualmente se encuentran en fase de investigación y/o de validación para su pronta disponibilidad para la prevención, diagnóstico, seguimiento y tratamiento de la osteoporosis.

NUEVAS TÉCNICAS COMPLEMENTARIAS DISPONIBLES EN EL ESTUDIO DE DENSITOMETRÍA ÓSEA RADIOLÓGICA (DXA)

Evaluación de morfometría vertebral (VFA, *vertebral fracture assessment*)

Las fracturas de bajo impacto son la expresión más común de la osteoporosis y la detección de fracturas vertebrales ocultas o subclínicas contribuye a la prevención de complicaciones y a la prevención efectiva de nuevas fracturas.

Esta tecnología está disponible en muchos equipos DXA, requiere una adquisición de columna vertebral en posición lateral, desde la vertebra torácica T4 hasta lumbar L4. Un software dedicado permi-

te delinear cada cuerpo vertebral en forma automática, semi-asistida o manual y analizar la altura de los bordes anterior y posterior y del segmento medio y calcular los porcentajes de las mediciones anterior y medio respecto del borde posterior. Para su interpretación, además de la evaluación visual de la imagen se utilizan los criterios publicados por Genant¹² en 1993. Cada vértebra analizable se clasifica visualmente como normal o con aplastamiento anterior (en cuña), medio (bicóncavo) o total. Se calcula el porcentaje de aplastamiento anterior y medio y se clasifica como:

- O- Normal. Menos de 20% de aplastamiento
- I- Leve. Aplastamiento de 21-25%
- II- Moderado. Aplastamiento de 26-40%
- III- Severo. Aplastamiento mayor a 40%

El estudio VFA agrega algunos minutos más de examen y un mínimo de dosis de radiación al examen estándar de columna lumbar y caderas. Los equipos DXA de mayor resolución permiten también evaluar calcificaciones parietales en la pared de aorta abdominal, hallazgo que se correlaciona con eventos cardiovasculares^{5,13}.

Las indicaciones del estudio VFA, sugeridas entre otros por ISCD¹ son: paciente con T-score menor a -1,0 además de:

- Mujer mayor de 70 años y hombre mayor de 80 años
- Antecedente de pérdida de estatura mayor a 4 cm
- Sospecha de fractura vertebral no documentada
- Terapia con glucocorticoides mayor a 5 mg/día de prednisona o equivalente por más de 3 meses

La correlación de VFA con radiología estándar de columna es aceptable, con mediana sensibilidad y alta especificidad, sobre todo con equipos DXA de alta resolución¹⁴. Su inclusión en un estudio convencional DXA se ha demostrado costo-efectiva¹³ especialmente útil en la detección de fracturas vertebrales asintomáticas, incluso en pacientes con DMO normal. Su limitación principal es una mayor dificultad en delinear adecuadamente vértebras torácicas altas en algunos casos¹⁴.

Estudios con mayor resolución, análisis e interpretación de las imágenes con inteligencia artificial e integración con modelos predictivos de fracturas se proyectan como futuros desarrollos de VFA⁸.

Modelos predictivos de estimación de riesgo de fractura osteoporótica

La estimación del riesgo futuro de fractura osteoporótica mayor (columna, cadera, antebrazo y húmero) y su inclusión en un estudio DXA es un avance mayor en el manejo de osteoporosis, ya que agrega información independiente al estudio¹⁵⁻¹⁷.

Existen varios modelos, pero el más usado por su amplia validación clínica, incluyendo su aplicación en poblaciones y et-

nias específicas es el algoritmo desarrollado por la OMS en la Universidad de Sheffield en 2008; la herramienta de evaluación del riesgo de fractura, FRAX (*Fracture Risk Assessment Tool*). FRAX calcula el riesgo de fractura osteoporótica mayor y específicamente de fractura de cadera a 10 años, incorporando el valor T-score de cadera y la presencia o ausencia de factores de riesgo conocidos, obtenidos mediante una encuesta al paciente¹⁵⁻¹⁷.

Los factores de riesgo incorporados son:

- Edad (mayor de 40 años) y género
- Índice de masa corporal (IMC)
- Historia personal de fractura de bajo impacto en la vida adulta
- Historia de fractura de cadera en padres
- Uso de glucocorticoides sistémicos (mayor a 5 mg/día de prednisona o equivalente, por más de 3 meses)
- Consumo de alcohol mayor a 3 unidades/día (Una dosis: 8-10 g de alcohol)
- Tabaquismo crónico activo
- Artritis reumatoide
- Causas conocidas de osteoporosis secundaria (menopausia prematura, osteogénesis imperfecta, hipogonadismo, hipertiroidismo, hiperparatiroidismo, diabetes mellitus tipo 1, síndrome de Cushing, síndrome de Addison, síndrome de mala absorción, enfermedad de Crohn, enfermedad celíaca, hepatopatía crónica, mieloma múltiple)

El cálculo FRAX está disponible en línea (<https://frax.shef.ac.uk/frax/>)^{17a} y ya ha sido incorporado en el software de los nuevos equipos DXA. Existen algoritmos específicos para la población chilena (<https://frax.shef.ac.uk/frax/tool.aspx?country=50>)^{17b}.

Una vez calculado el riesgo individual derivado de FRAX, se puede estimar si el paciente se encuentra por sobre o bajo el umbral predefinido de intervención terapéutica. Para ello existen varios recursos en línea, el más usado es de NOGG (*National Osteoporosis Guideline Group*), disponible para ingreso manual en <https://www.nogg.org.uk/manual-data-entry>^{17c}.

Se requiere ingresar la edad, género, uso de glucocorticoides y los valores de probabilidad a 10 años calculados por FRAX. Esta información permite al médico tratante intervenir con medidas sobre estilo de vida o medidas farmacológicas. El umbral de intervención es de 3-5% para fractura de cadera y 20% para fractura osteoporótica mayor¹⁷.

La inclusión rutinaria de la probabilidad FRAX agrega valor pronóstico independiente del cálculo de DMO y cuando está alterado, debiera implicar una intervención terapéutica precoz^{15,16}.

FRAX tiene algunas limitaciones, entre ellas:

- No considera el número y frecuencia de caídas
- No distingue en el uso de glucocorticoides los diferentes tipos utilizados, dosis y duración del tratamiento
- No considera la DMO de columna lumbar, solo de cadera
- No considera nuevos parámetros como índices de microarquitectura ósea, geometría de cadera y marcadores de metabolismo óseo.
- No considera otras intervenciones como uso de vitamina D y tratamientos específicos.

Algunas de estas limitaciones se han corregido en la versión FRAX Plus, aún en validación clínica (<https://www.fraxplus.org>^{17d}). De igual modo, la integración con inteligencia artificial y otras técnicas de imagen, así como modelos regionales permitirán que la estimación de probabilidad de fractura osteoporótica sea más precisa.

Otros algoritmos de cálculo de riesgo de fractura disponibles, menos usados¹⁷, son Garvan (<https://fractureriskcalculator.com.au/calculator/>^{17e}) y QFracture (<https://qfracture.org>^{17f})

Mediciones geométricas de cadera HSA (*Hip Structural Analysis*) y AHA (*Advanced Hip Assessment*)

Estas son un conjunto de valores dimensionales derivados de suposiciones sobre la forma del fémur proximal (cuello, región inter-trocantérea y diáfisis proximal) en la DXA de cadera. Son una medida indirecta de la resistencia bio-mecánica del hueso, en particular del cuello femoral. Varios autores han demostrado su valor predictivo independiente para fractura futura, especialmente en poblaciones de alto riesgo^{4,8,11,18,19}.

Entre las mediciones más utilizadas, se encuentran:

- Ancho del cuello femoral FNW (*Femoral Neck Width*) (mm), que refleja carga mecánica
- Momento de inercia del cuello femoral CSMI, que indica resistencia a la flexión
- Sección transversal del área CSA (*Cross Sectional Area*) (mm²). Relacionado con carga axial
- Momento de inercia de sección transversal CSMI (*Cross Sectional Moment of Inertia*), en relación con la resistencia a la flexión.
- Longitud de la cadera HAL (*Hip Axis Length*) (mm)
- Angulo del cuello femoral FNA (*Femoral Neck Angle*) (grados)
- Longitud de la cadera HAL (*Hip Axis Length*) (mm)
- Longitud del eje del cuello femoral FNAL (*Femoral Neck Axis Length*) (mm)
- Ancho del canal medular MW (*Medullary Width*) (mm), refleja pérdida de hueso
- Módulo de sección Z (*Section Modulus*). Indica resistencia a la flexión

- Índice de pandeo o torsión BR (*Buckling Ratio*), que refleja incompetencia del hueso frente a fuerzas de torsión.
- Espesor cortical CT (*Cortical Thickness*) (mm), refleja pérdida de hueso
- Posición del centroide CP (*Centroid Position*), indica la posición del centro de masa del fémur

Si bien se ha demostrado que algunos de estos índices tendrían valor predictivo independiente, (por ejemplo, HAL aumentado se asocia con fractura de cadera en mujeres postmenopáusicas) sus principales limitaciones son la falta de reproducibilidad y estandarización, dependencia de la calidad de imagen y sobre todo del posicionamiento de la cadera. Por estas limitaciones, ISCD recomienda no utilizar ninguno de estos valores para evaluar riesgo de fractura ni para decidir o controlar terapia. Su papel actual es de investigación. Con la incorporación de inteligencia artificial se podrán derivar estos índices más estandarizados, simplificar los cálculos, elegir los más útiles y simular cargas estructurales sobre el fémur para predecir el comportamiento bio-mecánico^{18,19}.

Análisis de microarquitectura trabecular TBS (*Trabecular Bone Score*)

Este es, sin duda una de las mejores herramientas para evaluar calidad ósea en DXA, especialmente en hueso trabecular. Disponible desde 2010, requiere un software propietario incorporado en el equipo DXA. Su inclusión rutinaria no agrega más irradiación al paciente ya que analiza las imágenes de columna vertebral ya adquiridas para el cálculo de DMO^{4-6,11,20-25}.

Técnicamente corresponde al análisis de las variaciones entre los píxeles de la imagen digital de los cuerpos vertebrales L1 a L4^{20,21}. ISCD 2023 recomienda no calcular TBS si hay alteraciones estructurales severas en los cuerpos vertebrales²².

El resultado del cálculo TBS se clasifica como: hueso trabecular normal, parcialmente degradado y degradado. La combinación de T-score de columna con índice TBS permite recalculer el T-score, la probabilidad de fractura y estimar el Índice de resiliencia ósea (este último aún no validado). Se ha demostrado que en pacientes con similares T-scores, un TBS alterado se correlaciona directa e independientemente con mayor riesgo de fractura^{20-22,24}.

TBS se correlaciona independientemente con la probabilidad de fractura mayor osteoporótica de cadera y de columna en mujeres postmenopáusicas y diabéticas tipo 2 y en hombres mayores de 50 años. El cálculo no es afectado por la densidad mineral vertebral, presencia de cambios degenerativos moderados, fracturas vertebrales (salvo las de grado severo) ni por otros factores de riesgo²³⁻²⁵.

El resultado de TBS puede ser incorporado al algoritmo FRAX para recalcular con mayor precisión el riesgo de fractura.

Sin necesidad de un nuevo estudio, TBS puede ser aplicado a exámenes DXA antiguos.

Se ha planteado también su utilidad en la evaluación de riesgo de fractura en pacientes en tratamiento crónico con glucocorticoides y en otras situaciones clínicas que afectan primariamente la microarquitectura ósea más que la densidad mineral (reflejada esta última en el T-score); en el control de eficacia terapéutica, sobre todo con medicamentos que mejoran la microarquitectura ósea (anabólicos); y en poblaciones especiales como ancianos, diabéticos, pacientes con sarcopenia y osteoporosis secundaria, aunque aún no hay suficiente validación para su recomendación actual⁴.

Limitaciones:

No se encuentra ampliamente disponible debido al costo del software, el cálculo depende inversamente de la resolución del estudio de columna lumbar.

La composición, porcentaje de grasa y grosor tisular pueden afectar el resultado. El fabricante recomienda calcular TBS en pacientes con índice de masa muscular entre 15,0 y 37,0 Kg/m². Una futura versión de TBS incluirá el ajuste por grosor tisular blando (SST, *Soft Tissue Thickness*) en reemplazo del IMC, lo que contribuirá a corregir esta limitación⁵.

Otros futuros desarrollos, incluyen el análisis de microarquitectura de cadera y de fémur distal.

Índice de deformidad biomecánica del hueso (BSI, *Bone Strain Index*)

Es un software específico basado en el análisis de elementos finitos (FEA, Finite Elements Analysis) efectuado sobre la imagen DXA de columna y cadera y que permite simular cargas fisiológicas (fuerza gravitacional sobre columna, caída lateral sobre cadera) y evaluar la respuesta biomecánica del hueso, que es un indicador de su riesgo estructural^{4,11,26}.

Un índice BSI elevado ha demostrado ser un predictor independiente de fractura, aún en pacientes con T-score de osteopenia y en mujeres postmenopáusicas. También se ha demostrado útil en seguimiento de eficacia de terapia de osteoporosis²⁶.

Limitaciones:

Falta de estandarización, dependencia del equipo DXA.

Desarrollo futuro: Integración con FRAX, utilización de inteligencia artificial para análisis automático^{4,26}.

DXA tridimensional (3D-DXA)

Sabemos que una limitación importante de la DXA es que entrega información bidimensional (2D o areal) de estructuras tridimensionales. Esto puede ser una limitación importante, especialmente en población pediátrica y en las estimaciones de geometría de cadera (HSA, AHA)^{1,27}.

Se ha desarrollado software específico (3D-Shaper) que permite generar modelos 3D de fémur desde imágenes DXA convencionales, lo que permite derivar parámetros volumétricos como vDMO medida en g/cm³, calcular espesor cortical, relación hueso cortical/trabecular y estimar DMO regional (cabeza femoral, región trocantérea)^{4,6,27}.

La vDMO estimada predice mejor futuras fracturas comparada con la DMO areal o bidimensional y se correlaciona bien con la tomografía computada cuantitativa (QCT)²⁷.

Limitaciones:

Depende de asunciones geométricas y del software específico, requiere validación en grandes poblaciones²⁷.

OTRAS TÉCNICAS DE IMAGEN ÚTILES EN LA EVALUACIÓN DE LA CANTIDAD Y CALIDAD ÓSEA

Densitometría ósea periférica (pDXA)

Aunque utiliza las mismas bases técnicas, a diferencia de la DXA convencional (axial) esta técnica evalúa la densidad ósea en huesos apendiculares (calcáneo, falanges, radio). Se correlaciona bien y utiliza las mismas bases técnicas que la DXA axial o central y con mejor rendimiento que otras técnicas periféricas, como ultrasonidos o tomografía computada, especialmente en mujeres post menopáusicas, aunque su capacidad predictiva de fractura es mas baja^{1,28}.

Su indicación principal es tamizaje primario en poblaciones de riesgo. Un estudio pDXA alterado debiera ser indicación de una DXA axial en el paciente¹.

Sus ventajas principales son la portabilidad y bajo costo.

Entre las desventajas se encuentra la relativa falta de correlación entre la DMO encontrada en hueso periférico y la obtenida en esqueleto axial (columna, cadera) y la falta de estandarización²⁸.

Tomografía computada cuantitativa (QCT)

Es un estudio de tomografía computada (CT) convencional que permite estimar DMO tridimensional o volumétrica (vDMO) en g/cm³ y permite evaluar hueso trabecular y cortical por separado, tanto en columna lumbar alta como en cadera^{7,10,11}.

Se puede efectuar en cualquier equipo convencional (atenuación simple) o con software y calibración específicos²⁹.

Es más independiente de artefactos como cambios degenerativos y calcificaciones vasculares, que pueden afectar la DMO calculada con DXA. Varios autores han demostrado que QCT tiene mayor sensibilidad que DXA²⁹.

Sus indicaciones son evaluar vDMO cuando DXA es dudosa, en enfermedades óseas metabólicas y monitoreo de cambios en microarquitectura trabecular post terapia dirigida^{10,11,29}.

Un concepto emergente es el de TC oportunista, que estima la vDMO en un examen CT pedido por otra causa, en la que se mide, habitualmente en la vértebra lumbar L1 la atenuación promedio del tejido óseo en la región trabecular, en unidades Hounsfield (HU). Se ha definido que valores menores a 100 HU se asocian a elevado riesgo de fractura vertebral^{30,31}.

La determinación automática por inteligencia artificial de la atenuación trabecular vertebral es un desarrollo futuro con mucho potencial, permitirá el tamizaje en grandes poblaciones que no tienen estudio de DMO¹⁰.

Falta por definir protocolos adecuados en la adquisición del estudio, el uso de medio de contraste y algoritmos de reconstrucción, aspectos que pueden afectar las mediciones^{11,29}.

Como desventaja tiene la mayor exposición a radiación del paciente y la necesidad de programas de análisis especiales²⁹.

Tomografía computada periférica de alta resolución (HR-pQCT)

Con equipo CT especializado, permite evaluar en muy alta resolución el tejido óseo en sitios periféricos (tibia y radio distales) lo que permite evaluar vDMO y microestructura trabecular y cortical y analizar las características del hueso cortical (porosidad y espesor)³²⁻³⁵.

Se ha demostrado útil en el estudio de pacientes con severa alteración microestructural ósea que no se refleja en la DMO, en enfermedades óseas metabólicas y en monitoreo de respuesta a tratamiento^{32,33}.

Una variante de HR-pQCT es el análisis de elementos finitos (FEA, *Finite Elements Analysis*) el que, mediante un algoritmo geométrico complejo, que segmenta la imagen en muchos pequeños elementos, lo que permite estimar propiedades biomecánicas del hueso, en particular la resistencia ósea ante cargas mecánicas simuladas, lo que permite predecir mucho mejor el riesgo de fractura³⁴.

La integración de información microestructural y de comportamiento biomecánico del hueso aporta información valiosa al estudio de la osteoporosis y sus consecuencias³².

Su indicación principal es la evaluación precoz del deterioro de la calidad del hueso periférico y seguimiento terapéutico³³.

Su limitación principal es la poca disponibilidad, por el momento se usa en investigación³².

Avances en equipos TC: Nueva tecnología como conteo de fotones (PCCT, *Photon Counting CT*) y adquisición espectral³⁶, que mejoran la resolución, disminuyen el tiempo de estudio y reducen la exposición a radiación mejorarán sustancialmente el arsenal diagnóstico y su rendimiento en este campo^{35,36}.

Ultrasonido cuantitativo (QUS)

Es una técnica no invasiva y libre de radiación, se basa en la medición de la velocidad y atenuación del sonido al atravesar un hueso (calcáneo, falanges, tibia distal) y permite inferir la DMO y propiedades del tejido óseo como su elasticidad y microarquitectura^{7,11,37}.

Los parámetros más usados son:

-Velocidad del sonido (SOS, *Speed of Sound*) en m/s y refleja elasticidad y rigidez del hueso. Valores bajos se correlacionan con riesgo de fractura³⁸.

-Atenuación de ultrasonido de banda ancha (BUA, *Broadband Ultrasound Attenuation*), que mide la atenuación de la onda sonora de diferentes frecuencias al atravesar tejido. Se mide en decibelios/MHz y refleja indirectamente aspectos estructurales del tejido, como microarquitectura. Se correlaciona con mayor riesgo de fractura³⁷.

-Índice de rigidez (SI, *Stiffness Index*). Se deriva de BUA y SOS, permite estimar el riesgo de fractura³⁸.

Los estudios más validados son en calcáneo (hueso trabecular), con buena capacidad de predicción de fractura en mujeres post menopáusicas³⁷.

Sus ventajas son portabilidad, bajo costo, sin radiación ionizante. Las desventajas son poca estandarización, dependencia del operador, sólo estudio de puntos periféricos que no necesariamente se correlacionan con hallazgos en cadera y columna y menor rendimiento respecto de DXA^{11,37}.

Su indicación principal es el tamizaje de grandes poblaciones con baja prevalencia de osteoporosis. Un estudio alterado requiere un segundo examen de confirmación. QUS no tiene indicación en control de terapia^{37,38}.

Una técnica diferente es el uso de ondas de ultrasonido para estimar el grosor y porosidad de hueso cortical, que es un indicador de estabilidad mecánica del hueso³⁹.

Espectroscopía radiofrecuencia por ultrasonido US-REMS (Radiofrequency Echographic Multi Spectrometry)

Es una variante técnica de QUS que permite estudiar hueso axial, con buena correlación con DXA.

Una revisión sistemática reciente⁴⁰ concluye que REMS tiene fuerte correlación con DXA y es incluso superior en situaciones clínicas que afectan el rendimiento de DXA (fractura vertebral, osteoartritis, calcificaciones vasculares) y ofrece una alternativa libre de radiación ionizante en sub-poblaciones sensibles (menores de edad, mujeres en edad fértil, embarazadas o en lactancia).

Identifica con seguridad pacientes con alto riesgo de fractura⁴¹. Aún carece de estandarización y tiene poca disponibilidad clínica, pero es una herramienta emergente con potencial.

Resonancia magnética (RM), MRI (Magnetic Resonance Imaging) y RM cuantitativa (QRM)

Es una técnica de imagen no invasiva, sin radiación ionizante asociada que permite evaluar microarquitectura ósea y además médula ósea y tejidos blandos adyacentes, permitiendo una evaluación volumétrica más completa^{42,43}.

Se puede evaluar la integridad estructural de hueso en imágenes RM sin software especial y sin contraste paramagnético con las secuencias T1W, calculando el índice de calidad ósea vertebral (VBQS), *Vertebral Bone Quality Score*). Un índice mayor a 3,0 se asocia a mayor riesgo de fractura⁴⁴.

Existen varias técnicas: Resonancia magnética cuantitativa (QRM), de alta resolución (HR-QRM) que evalúa microarquitectura ósea y espectroscopía (RMS) que evalúa la composición química de la médula ósea, especialmente del componente graso⁴².

Con los equipos más recientes, de mayor resolución, se ha desarrollado las técnicas UTE (*Ultra Short Echo Time*), y ZTE (*Zero Echo Time*) que usan la señal T2 y permiten evaluar hueso cortical y su calidad.

Junto con análisis de elementos finitos (FEA), se utiliza RM para evaluar la competencia biomecánica del hueso frente a cargas simuladas⁴⁴.

Las limitaciones actuales son: alto costo, poca disponibilidad, largo tiempo de adquisición lo que aumenta la probabilidad de artefactos de movimiento y falta de estandarización⁴³.

Imágenes de emisión de positrones con Flúor 18 fluoruro de sodio (NaF18-PET-CT)

El estudio PET-CT permite una adquisición de cuerpo entero. El flúor 18 es un radioisótopo emisor de positrones con metabolismo esquelético. La tasa de captación del F18, es un reflejo del metabolismo óseo y se encuentra disminuida en pacientes con osteoporosis, probablemente asociada a una disminución del flujo sanguíneo y de la actividad osteoblástica regionales, medida en hueso trabecular de columna y cadera.

Su principal aplicación podría estar en la evaluación precoz de respuesta a tratamiento farmacológico anti-osteoporosis y en el estudio de áreas esqueléticas distintas de las tradicionales^{9,45}.

Incidentalmente, el estudio de tomografía computada (CT) incluido en el examen PET-CT permitiría evaluar las estructuras óseas⁴⁵.

Dado el alto costo de los equipos PET-CT y la elevada irradiación, esta técnica es sólo de investigación o en casos oportunistas en estudios PET en pacientes oncológicos.

Microindentación ósea (IMI, Impact Micro Indentation)

Esta es una técnica mínimamente invasiva, que requiere anestesia local para la inserción de una sonda en la superficie perióstica del tercio medio de la tibia, la que produce microfracturas, obteniéndose un índice que mide directamente la resistencia mecánica del hueso cortical (Índice de resistencia del material óseo (BMSi) (*Bone Material Strength Index*). Es un indicador de fragilidad ósea⁶.

Se ha utilizado en pacientes con osteoporosis secundaria (diabetes mellitus, hipercortisolismo, nefropatía crónica, entre otras), en las que la DMO no refleja el riesgo de fractura del paciente⁴⁶.

Su limitación principal es que no evalúa hueso trabecular⁴⁶.

Se encuentra en etapa de estandarización y validación clínica^{6,46}.

Existen en la literatura revisiones en las que se publican tablas que detallan y comparan estas técnicas^{8,11}.

INTELIGENCIA ARTIFICIAL (IA) Y SISTEMAS DE APRENDIZAJE (ML MACHINE LEARNING, DP DEEP LEARNING) APLICADOS AL ESTUDIO DE LA OSTEOPOROSIS Y SUS CONSECUENCIAS

La IA es una herramienta potente en todos los campos de la medicina actual, específicamente en campos como: análisis, clasificación e interpretación automatizada de imágenes, desarrollo de modelos predictivos con integración masiva de data clínica, bioquímica y genómica, supervisión de sensores de riesgo de caídas e integra-

ción a sistemas de soporte de decisiones clínicas y telemedicina y la personalización del diagnóstico y terapia, generación automática informes, análisis de historia clínica, entre otras⁴⁷.

En osteoporosis se han desarrollado programas predictivos de aprendizaje desde base de datos poblacional NHANES⁴⁸, tamizaje automático de TC oportunistica⁴⁹ y predicción de riesgo de fractura vertebral⁵⁰⁻⁵².

Aunque los sistemas aún dependen de supervigilancia humana, los algoritmos requieren mayor validación clínica y quedan muchos aspectos regulatorios y éticos por resolver, este es un campo de enorme desarrollo potencial.

GENERACIÓN ESTANDARIZADA DE GUÍAS CLÍNICAS, BASADAS EN MEDICINA DE EVIDENCIA

Con la gran cantidad de técnicas de imagen que se han descrito someramente, se hace imprescindible disponer de guías de diagnóstico (y tratamiento) basadas en evidencia confiable. Varias

organizaciones y sociedades científicas, apoyadas por la OMS han publicado sus recomendaciones de práctica clínica principalmente basadas en el sistema GRADE (*Grading of Recommendations, Assessment, Development and Evaluation*)⁵³. Este sistema evalúa la calidad de la evidencia de estudios experimentales u observacionales y clasifica la fuerza de las recomendaciones (alta, moderada, baja y muy baja), considerando aspectos como relación riesgo/beneficio, disponibilidad, costos y centrada en el paciente^{53,54}.

Entre otras, se dispone de guías para manejo de osteoporosis en hombres⁵⁵, uso de TBS en clínica⁵⁴, criterios de uso adecuado de recursos de imagen en osteoporosis y DMO⁵⁵, desarrolladas por ESCEO (European Society for Clinical and Economic Aspects Osteoporosis, Osteoarthritis and Musculoskeletal Diseases), IOF (International Osteoporosis Foundation) y ACR (American College of Radiology).

Otras organizaciones, como NICE (National Institute of Health and care Excellence), en conjunto con NOGG (National Osteoporosis Guideline Group) han desarrollado las guías clínicas para prevención y tratamiento de osteoporosis del Reino Unido⁵⁶.

Declaración de conflictos de interés:

El autor no declara conflictos de interés.

Declaración de fuentes de financiamiento: Ninguna.

Uso de herramienta de inteligencia artificial generativa:

ChatGPT (OpenAI, GPT-4.5, 2025) se utilizó para la estructuración inicial y organización bibliográfica, supervisada por el autor.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Shuhart C, Cheung A, Gill R, Gani L, Goel H, Szalat A. Executive Summary of the 2023 Adult Position Development Conference of the International Society for Clinical Densitometry: DXA Reporting, Follow-up BMD Testing and Trabecular Bone Score Application and Reporting. *J Clin Densitom.* 2024;27(1):101435. doi: 10.1016/j.jocd.2023.101435. Erratum in: *J Clin Densitom.* 2025;28(1):101548. doi: 10.1016/j.jocd.2024.101548.
- Barberán M, Campusano C, Trincado P, Oviedo S, Brantes S, Sapunar J, et al. Recomendaciones para el uso correcto de densitometría ósea en la práctica clínica. Consenso de la Sociedad Chilena de Endocrinología y Diabetes. [Guidelines of the Chilean Endocrinology Society for the correct clinical use of bone densitometry]. *Rev Med Chil.* 2018;146(12):1471-1480. Spanish. doi: 10.4067/s0034-98872018001201471.
- Krueger D, Tanner SB, Szalat A, Malabanan A, Prout T, Lau A, et al. DXA Reporting Updates: 2023 Official Positions of the International Society for Clinical Densitometry. *J Clin Densitom.* 2024;27(1):101437. doi: 10.1016/j.jocd.2023.101437.
- Pizza IC, Bongiorno A, Pedullà M, Albano D, Sconfienza LM, Messina C. DXA: New Concepts and Tools Beyond Bone Mineral Density. *Semin Musculoskelet Radiol.* 2024;28(5):528-538. doi: 10.1055/s-0044-1788579.
- Slart RHJA, Punda M, Ali DS, Bazzocchi A, Bock O, Camacho P, et al.; International Working Group on DXA Best Practices. Updated practice guideline for dual-energy X-ray absorptiometry (DXA). *Eur J Nucl Med Mol Imaging.* 2025;52(2):539-563. doi: 10.1007/s00259-024-06912-6.
- García Martín A, de la Higuera López-Frías M, Cortés Berdonces M, Jodar Gimeno E, et al. New technologies in the evaluation of bone fragility and its application in Endocrinology. *Endocrinol Diabetes Nutr (Engl Ed).* 2020;67(9):602-610. English, Spanish. doi: 10.1016/j.endinu.2020.01.005.
- Link TM, Kazakia G. Update on Imaging-Based Measurement of Bone Mineral Density and Quality. *Curr Rheumatol Rep.* 2020;22(5):13. doi: 10.1007/s11926-020-00892-w.
- Adami G, Fassio A, Gatti D, Viapiana O, Benini C, Danila MI, et al. Osteoporosis in 10 years time: a glimpse into the future of osteoporosis. *Ther Adv Musculoskelet Dis.* 2022;14:1759720X221083541. doi: 10.1177/1759720X221083541.
- Chen M, Gerges M, Raynor WY, Park PSU, Nguyen E, Chan DH, et al. State of the Art Imaging of Osteoporosis. *Semin Nucl Med.* 2024;54(3):415-426. doi: 10.1053/j.semnucmed.2023.10.008.

10. Deshpande N, Hadi MS, Lillard JC, Passias PG, Linzey JR, Saadeh YS, et al. Alternatives to DEXA for the assessment of bone density: a systematic review of the literature and future recommendations. *J Neurosurg Spine*. 2023;38(4):436-445. doi: 10.3171/2022.11.SPINE22875.
11. Li J, She B, He M, Yuan C, Li N. Advances in imaging examination of bone density and bone quality. *Endokrynol Pol*. 2025;76(1):29-39. doi: 10.5603/ep.100805.
12. Genant HK, Wu CY, van Kuijk C, Nevitt MC. Vertebral fracture assessment using a semiquantitative technique. *J Bone Miner Res*. 1993;8(9):1137-1148. doi: 10.1002/jbmr.5650080915.
13. Yang J, Cosman F, Stone PW, Li M, Nieves JW. Vertebral fracture assessment (VFA) for osteoporosis screening in US postmenopausal women: is it cost-effective? *Osteoporos Int*. 2020;31(12):2321-2335. doi: 10.1007/s00198-020-05588-6.
14. Lee JH, Lee YK, Oh SH, Ahn J, Lee YE, Pyo JH, Choi YY, Kim D, Bae SC, Sung YK, Kim DY. A systematic review of diagnostic accuracy of vertebral fracture assessment (VFA) in postmenopausal women and elderly men. *Osteoporos Int*. 2016 May;27(5):1691-9. doi: 10.1007/s00198-015-3436-z.
15. Tan THA, Johansson H, Harvey NC, Lorentzon M, Kanis JA, McCloskey E, et al. Assessment of fracture risk with FRAX and FRAXplus. *Gac Med Mex*. 2024;160(4):363-373. English. doi: 10.24875/GMM.24000107.
16. Vandenput L, Johansson H, McCloskey EV, Liu E, Åkesson KE, Anderson FA, et al. Update of the fracture risk prediction tool FRAX: a systematic review of potential cohorts and analysis plan. *Osteoporos Int*. 2022;33(10):2103-2136. doi: 10.1007/s00198-022-06435-6.
17. Schini M, Johansson H, Harvey NC, Lorentzon M, Kanis JA, McCloskey EV. An overview of the use of the fracture risk assessment tool (FRAX) in osteoporosis. *J Endocrinol Invest*. 2024;47(3):501-511. doi: 10.1007/s40618-023-02219-9.
17a. <https://frax.shef.ac.uk/frax/>
17b. <https://frax.shef.ac.uk/frax/tool.aspx?country=50>
17c. <https://www.nogg.org.uk/manual-data-entry>
17d. <https://www.fraxplus.org>
17e. <https://fractureriskcalculator.com.au/calculator/>
17f. <https://qfracture.org>
18. Beck TJ, Broy SB. Measurement of Hip Geometry-Technical Background. *J Clin Densitom*. 2015;18(3):331-337. doi: 10.1016/j.jocd.2015.06.006.
19. Fajar JK, Taufan T, Syarif M, Azharuddin A. Hip geometry and femoral neck fractures: A meta-analysis. *J Orthop Translat*. 2018;13:1-6. doi: 10.1016/j.jot.2017.12.002.
20. Martineau P, Leslie WD. Trabecular bone score (TBS): Method and applications. *Bone*. 2017;104:66-72. doi: 10.1016/j.bone.2017.01.035.
21. Harvey NC, Glüer CC, Binkley N, McCloskey EV, Brandt ML, Cooper C, et al. Trabecular bone score (TBS) as a new complementary approach for osteoporosis evaluation in clinical practice. *Bone*. 2015;78:216-224. doi: 10.1016/j.bone.2015.05.016.
22. Goel H, Binkley N, Boggild M, Chan WP, Leslie WD, McCloskey E, et al. Clinical Use of Trabecular Bone Score: The 2023 ISCD Official Positions. *J Clin Densitom*. 2024;27(1):101452. doi: 10.1016/j.jocd.2023.101452.
23. Hans D, Goertzen AL, Krieg MA, Leslie WD. Bone microarchitecture assessed by TBS predicts osteoporotic fractures independent of bone density: the Manitoba study. *J Bone Miner Res*. 2011;26(11):2762-9. doi: 10.1002/jbmr.499.
24. Palomo T, Muszkat P, Weiler FG, Dreyer P, Brandão CMA, Silva BC. Update on trabecular bone score. *Arch Endocrinol Metab*. 2022;66(5):694-706. doi: 10.20945/2359-3997000000559.
25. Shevroja E, Reginster JY, Lamy O, Al-Daghri N, Chandran M, Demoux-Baiada AL, et al. Update on the clinical use of trabecular bone score (TBS) in the management of osteoporosis: results of an expert group meeting organized by the European Society for Clinical and Economic Aspects of Osteoporosis, Osteoarthritis and Musculoskeletal Diseases (ESCEO), and the International Osteoporosis Foundation (IOF) under the auspices of WHO Collaborating Center for Epidemiology of Musculoskeletal Health and Aging. *Osteoporos Int*. 2023;34(9):1501-1529. doi: 10.1007/s00198-023-06817-4.
26. Ulivieri FM, Rinaudo L. The Bone Strain Index: An Innovative Dual X-ray Absorptiometry Bone Strength Index and Its Helpfulness in Clinical Medicine. *J Clin Med*. 2022;11(9):2284. doi: 10.3390/jcm11092284.
27. Dudle A, Gugler Y, Pretterklieber M, Ferrari S, Lippuner K, Zysset P. 2D-3D reconstruction of the proximal femur from DXA scans: Evaluation of the 3D-Shaper software. *Front Bioeng Biotechnol*. 2023;11:1111020. doi: 10.3389/fbioe.2023.1111020.
28. Hans DB, Shepherd JA, Schwartz EN, Reid DM, Blake GM, Fordham JN, et al. Peripheral dual-energy X-ray absorptiometry in the management of osteoporosis: the 2007 ISCD Official Positions. *J Clin Densitom*. 2008;11(1):188-206. doi: 10.1016/j.jocd.2007.12.012.
29. Boehm E, Kraft E, Biebl JT, Wegener B, Stahl R, Feist-Pagenstert I. Quantitative computed tomography has higher sensitivity detecting critical bone mineral density compared to dual-energy X-ray absorptiometry in postmenopausal women and elderly men with osteoporotic fractures: a real-life study. *Arch Orthop Trauma Surg*. 2024;144(1):179-188. doi: 10.1007/s00402-023-05070-y.
30. Praveen AD, Sollmann N, Baum T, Ferguson SJ, Benedikt H. CT image-based biomarkers for opportunistic screening of osteoporotic fractures: a systematic review and meta-analysis. *Osteoporos Int*. 2024;35(6):971-996. doi: 10.1007/s00198-024-07029-0.
31. Chaisen M, Sritara C, Chitrapatz N, Suppasilp C, Chamroonrat W, Promma S, et al. Opportunistic Screening for Osteoporosis by CT as Compared with DXA. *Diagnostics (Basel)*. 2024;14(24):2846. doi: 10.3390/diagnostics14242846.
32. van den Bergh JP, Szulc P, Cheung AM, Bouxsein M, Engelke K, Chapurlat R. The clinical application of high-resolution peripheral computed tomography (HR-pQCT) in adults: state of the art and future directions. *Osteoporos Int*. 2021;32(8):1465-1485. doi: 10.1007/s00198-021-05999-z.
33. Cheung WH, Hung VW, Cheuk KY, Chau WW, Tsoi KK, Wong RM, et al. Best Performance Parameters of HR-pQCT to Predict Fragility Fracture: Systematic Review and Meta-Analysis. *J Bone Miner Res*. 2021;36(12):2381-2398. doi: 10.1002/jbmr.4449.
34. Imai K. Computed tomography-based finite element analysis to assess fracture risk and osteoporosis treatment. *World J Exp Med*. 2015;5(3):182-187. doi: 10.5493/wjem.v5.i3.182.
35. El Sadaney AO, Ferrero A, Rajendran K, Jasper S, Mazza GL, Broski SM, et al. Opportunistic Bone Mineral Density Measurement Using Photon-Counting Detector CT Spectral Localizer Images: A Prospective Study. *AJR Am J Roentgenol*. 2025;224(1):e2431909. doi: 10.2214/AJR.24.31909.
36. Hepburn J, Currie C, Trinder LC. The accuracy and clinical utility of spectral CT bone density measurement in the lumbar spine of unenhanced images: A narrative review. *Radiography (Lond)*. 2024;30(6):1687-1694. doi: 10.1016/j.radi.2024.08.009.
37. Escobio-Prieto I, Blanco-Díaz M, Pínero-Pinto E, Rodríguez-Rodríguez AM, Ruiz-Dorantes FJ, Alborno-Cabello M. Quantitative Ultrasound and Bone Health in Elderly People, a Systematic Review. *Biomedicines*. 2023;11(4):1175. doi: 10.3390/biomedicines11041175.
38. Hans D, Métrailler A, Gonzalez Rodriguez E, Lamy O, Shevroja E. Quantitative Ultrasound (QUS) in the Management of Osteoporosis and Assessment of Fracture Risk: An Update. *Adv Exp Med Biol*. 2022;1364:7-34. doi: 10.1007/978-3-030-91979-5_2.

39. Dia AS, Renaud G, Chappard C, Grimal Q. Ultrasound imaging of cortical bone: cortex geometry and measurement of porosity based on wave speed for bone remodeling estimation. 2025 Feb 12. doi: 10.48550/arXiv.2502.08824
40. Icătoiu E, Vlădulescu-Trandafir AI, Groșeanu LM, Berghia F, Cobilinschi CO, Potcovaru CG, et al. Radiofrequency Echographic Multi Spectrometry-A Novel Tool in the Diagnosis of Osteoporosis and Prediction of Fragility Fractures: A Systematic Review. *Diagnostics (Basel)*. 2025;15(5):555. doi: 10.3390/diagnostics15050555.
41. Fuggle NR, Reginster JY, Al-Daghri N, Bruyere O, Burlet N, Campusano C, et al. Radiofrequency echographic multi spectrometry (REMS) in the diagnosis and management of osteoporosis: state of the art. *Aging Clin Exp Res*. 2024;36(1):135. doi: 10.1007/s40520-024-02784-w.
42. Chang G, Boone S, Martel D, Rajapakse CS, Hollyburton RS, Valko M, et al. MRI assessment of bone structure and microarchitecture. *J Magn Reson Imaging*. 2017;46(2):323-337. doi: 10.1002/jmri.25647.
43. Pabbiseti D, Gudipati A, Papalkar A, Ponnaganti S, Shanbhag H, Bhashyakarla A, et al. Unlocking Osteoporosis Diagnosis: Unveiling the Potential of MRI-Based Vertebral Bone Quality Score. *Cureus*. 2025;17(4):e82154. doi: 10.7759/cureus.82154.
44. Jerban S, Alenezi S, Afsahi AM, Ma Y, Du J, Chung CB, Chang EY. MRI-based mechanical competence assessment of bone using micro finite element analysis (micro-FEA): Review. *Magn Reson Imaging*. 2022;88:9-19. doi: 10.1016/j.mri.2022.01.009.
45. Zhang V, Koa B, Borja AJ, Padmanabhan S, Bhattaru A, Raynor WY, et al. Diagnosis and Monitoring of Osteoporosis with Total-Body 18F-Sodium Fluoride-PET/CT. *PET Clin*. 2020;15(4):487-496. doi: 10.1016/j.cpet.2020.06.011.
46. Ovejero Crespo D. Microindentation: A New Technique for Bone Quality Assessment. *Adv Ther*. 2020;37(Suppl 2):47-54. doi: 10.1007/s12325-019-01175-2.
47. Amani F, Amanzadeh M, Hamedan M, Amani P. Diagnostic accuracy of deep learning in prediction of osteoporosis: a systematic review and meta-analysis. *BMC Musculoskelet Disord*. 2024;25(1):991. doi: 10.1186/s12891-024-08120-7.
48. Si Z, Zhang D, Wang H, Zheng X. ProOsteoporosis: predicting osteoporosis risk using NHANES data and machine learning approach. *BMC Res Notes*. 2025;18(1):108. doi: 10.1186/s13104-025-07089-3.
49. Park H, Kang WY, Woo OH, Lee J, Yang Z, Oh S. Automated deep learning-based bone mineral density assessment for opportunistic osteoporosis screening using various CT protocols with multi-vendor scanners. *Sci Rep*. 2024;14(1):25014. doi: 10.1038/s41598-024-73709-w.
50. Namireddy SR, Gill SS, Peerbhay A, Kamath AG, Ramsay DSC, Ponniah HS, et al. Artificial intelligence in risk prediction and diagnosis of vertebral fractures. *Sci Rep*. 2024;14(1):30560. doi: 10.1038/s41598-024-75628-2.
51. Wang J, Yang G, Liu S, Qiao R, Cao Y, Fan B, et al. A machine learning method for precise detection of spine bone mineral density. *Alex Eng J*. 2024;98:290-301. doi:10.1016/j.aej.2024.04.059
52. Smets J, Shevroja E, Hügle T, Leslie WD, Hans D. Machine Learning Solutions for Osteoporosis-A Review. *J Bone Miner Res*. 2021;36(5):833-851. doi: 10.1002/jbmr.4292.
53. Fuggle NR, Beaudart C, Bruyère O, Abrahamsen B, Al-Daghri N, Burlet N, et al. Evidence-Based Guideline for the management of osteoporosis in men. *Nat Rev Rheumatol*. 2024;20(4):241-251. doi: 10.1038/s41584-024-01094-9.
54. Shevroja E, Reginster JY, Lamy O, Al-Daghri N, Chandran M, Demoux-Baiada AL, et al. Update on the clinical use of trabecular bone score (TBS) in the management of osteoporosis: results of an expert group meeting organized by the European Society for Clinical and Economic Aspects of Osteoporosis, Osteoarthritis and Musculoskeletal Diseases (ESCEO), and the International Osteoporosis Foundation (IOF) under the auspices of WHO Collaborating Center for Epidemiology of Musculoskeletal Health and Aging. *Osteoporos Int*. 2023;34(9):1501-1529. doi: 10.1007/s00198-023-06817-4.
55. Expert Panel on Musculoskeletal Imaging; Yu JS, Krishna NG, Fox MG, Blankenbaker DG, Frick MA, et al. ACR Appropriateness Criteria® Osteoporosis and Bone Mineral Density: 2022 Update. *J Am Coll Radiol*. 2022;19(11S):S417-S432. doi: 10.1016/j.jacr.2022.09.007.
56. Gregson CL, Armstrong DJ, Bowden J, Cooper C, Edwards J, Gittos NJL, et al. UK clinical guideline for the prevention and treatment of osteoporosis. *Arch Osteoporos*. 2022;17(1):58. doi: 10.1007/s11657-022-01061-5. Erratum in: *Arch Osteoporos*. 2022;17(1):80. doi: 10.1007/s11657-022-01115-8.