

¿Cuánto sabes sobre TC DUAL / espectral?

Aplicaciones en patología musculoesquelética

Cenan Lung, Ioana Marcela¹; Fonollosa Para, Hector¹; Escalona Huerta, Christian¹; Domingo Senan, Albert¹;
Semeniuk, Liliana Tamara¹; Forcada Serrabasa, Gemma¹; Sánchez Dalmau , Jacob¹; García Perdomo, Damian¹

¹Hospital Universitari Germans Trias i Pujol, Badalona

Objetivo docente

Invitar al radiólogo a **redescubrir la tomografía computerizada espectral** desde sus fundamentos físicos hasta sus aplicaciones más útiles en la imagen musculoesquelética.

Evitar **errores frecuentes** (pitfalls) y saber cuándo la **RM** sigue siendo necesaria.

Revisión del tema

En la práctica clínica, **TC espectral** y **TC DUAL** suelen utilizarse como sinónimos, sin embargo, existe una **jerarquía conceptual**:



TC espectral es el término más **amplio**. Se define como el uso de la información energética contenida en los rayos X policromáticos para optimizar la caracterización tisular.

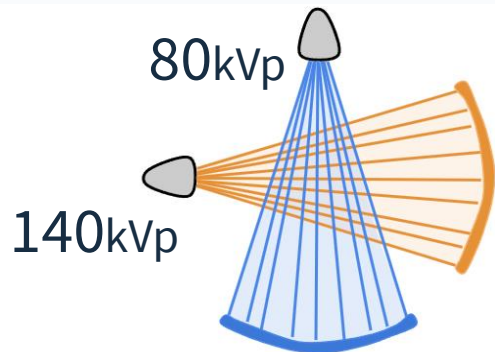
TC DUAL / Dual energy CT (DECT): es un **subconjunto** de la TC espectral que utiliza dos espectros de energía diferentes para obtener las mediciones.

La **TC DUAL** es la forma de TC espectral más utilizada en la clínica. Sus opciones técnicas son:



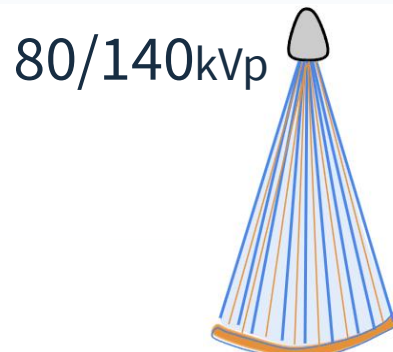
Dual-source CT

Utiliza dos tubos / detectores simultáneos



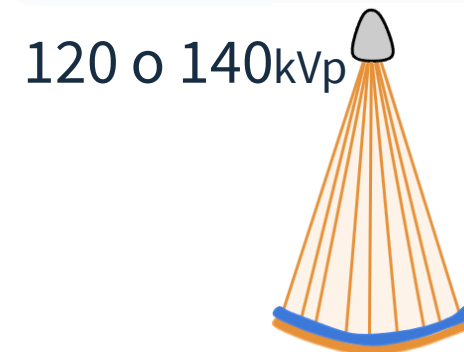
⚡ Rapid kV switching

Alternancia de energía en un mismo tubo



≡ Dual-layer CT

Separación espectral en el detector

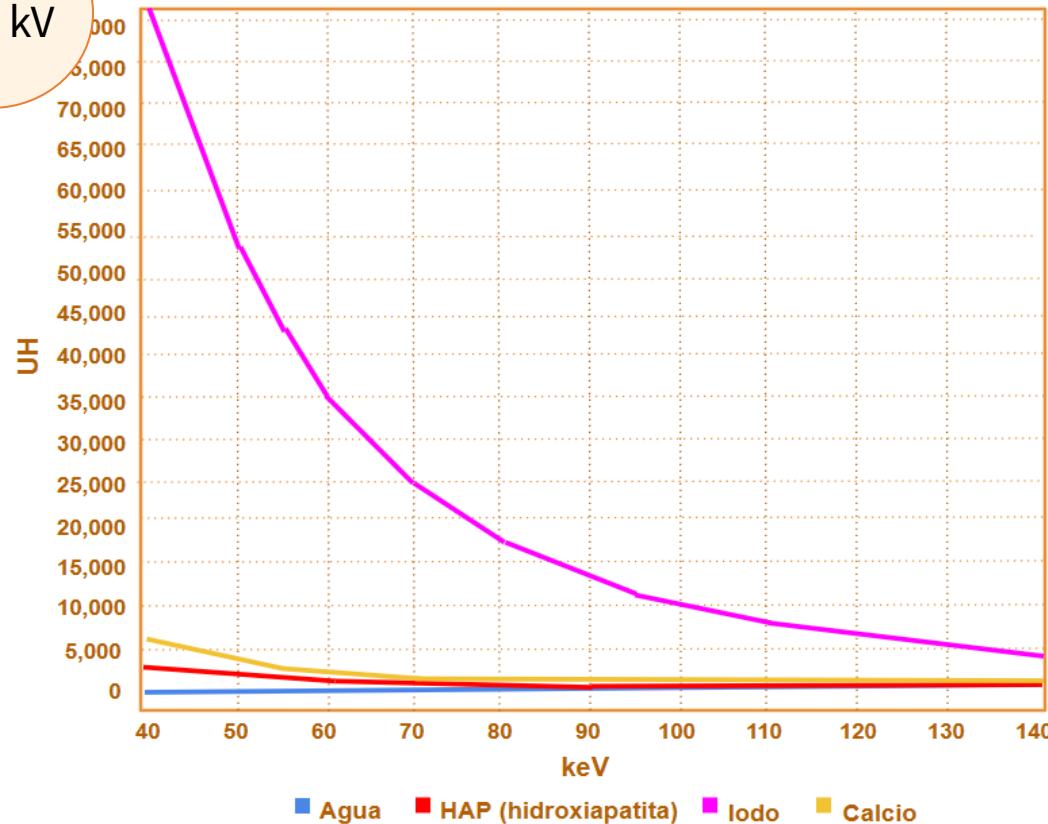


Fundamentos TC DUAL

Baja energía

80 kV

Predomina el **efecto fotoeléctrico**.
Depende del número atómico (Z).



Alta energía

140 kV

Predomina el **efecto Compton**.
Depende de la densidad electrónica.

A mayor Z, mayor atenuación a baja energía → I y Ca

Herramientas de postprocesado

Descomposición de materiales

Permite identificar y cuantificar sustancias específicas como el ácido úrico, el yodo o el calcio. Gracias a eso obtenemos:

Mapas de yodo

Imagen virtual sin contraste (VNC)

Imagen virtual no cálcica (VNCa)

Imágenes monoenergéticas virtuales (VMI/VMS)

Simulan la apariencia de imágenes adquiridas con un haz de energía única (40 a 200 keV).

- ✓ **Bajo keV:** resaltan el contraste.
- ✓ **Alto keV:** reducen los artefactos metálicos.

Aplicaciones clínicas

Detección de cristales

Detección de edema óseo

Análisis de colágeno

Reducción de artefactos
metálicos (MAR)

Aplicación en oncología MSQ

Artro-TC

Densitometría ósea

Evaluación de procesos
inflamatorios e infecciosos

Aplicaciones emergentes

Detección de cristales Gota

- ✓ Es la aplicación más validada.
- ✓ Permite identificar, mapear y cuantificar depósitos de **urato monosódico (MSU)** mediante códigos de color.
- ✓ Permite distinguir la gota de la pseudogota (CPPD) al **diferenciar el MSU del calcio.**

Fundamento



El bajo número atómico del urato vs. el alto Z del calcio.

Detección de cristales Gota



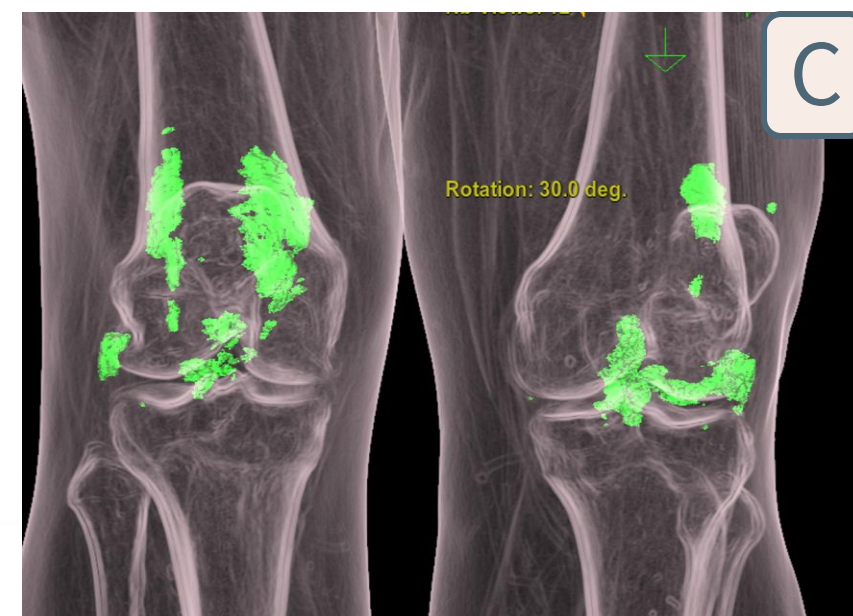
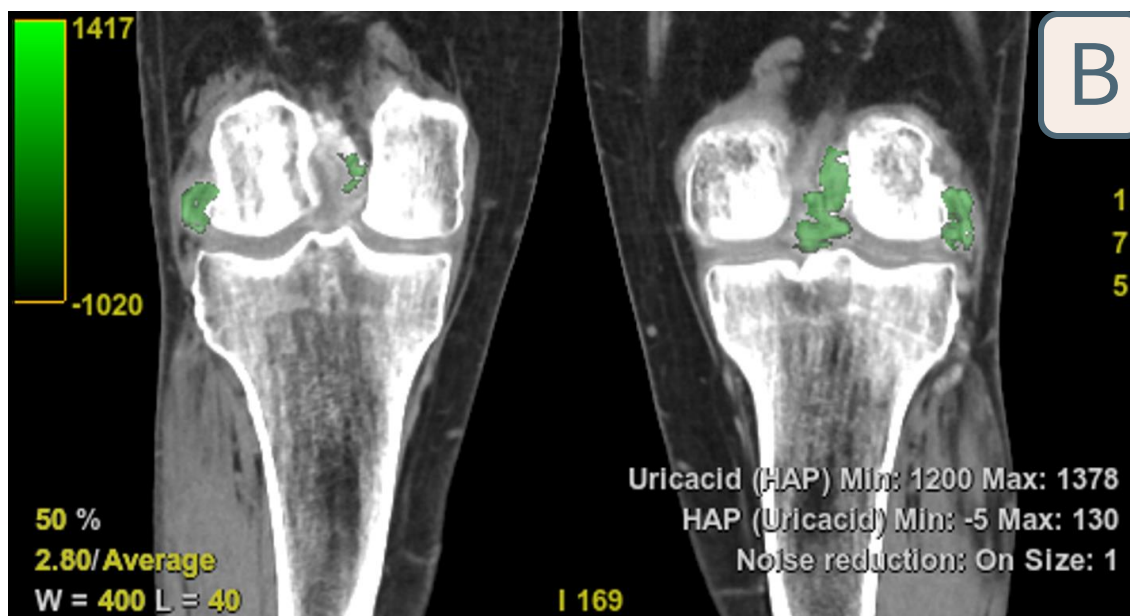
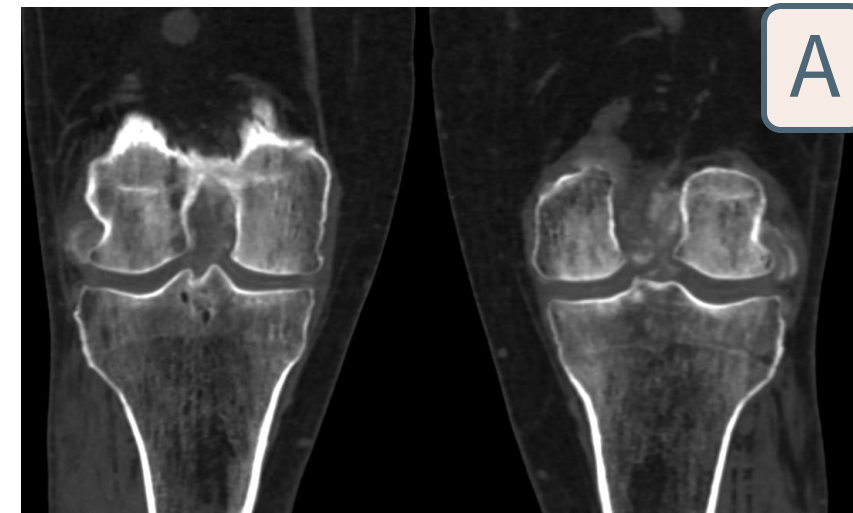
[1]

Detección de cristales Gota

A. TC convencional que muestra artrosis avanzada bilateral.

B. DECT en cortes coronales con mapa de **descomposición de materiales** que identifica **depósitos de urato monosódico** (verde) en las articulaciones de la rodilla.

C. Reconstrucción volumétrica que resalta los depósitos de urato, facilitando la valoración de la **carga tofácea**.



Detección de cristales Gota

Rendimiento

Sensibilidad: **78-100** %

Especificidad: **89-100** %

La DECT forma parte de los criterios de clasificación del ACR / EULAR 2015.

Utilidad

Diagnóstico en presentaciones atípicas y monitorización de carga de tofos.

Es útil cuando el aspirado de líquido sinovial es insuficiente o inconcluyente.

Falso positivo El mimetismo de la queratina

El error

Falsos positivos en el lecho ungueal, callosidades y piel engrosada.

La física

La queratina tiene un perfil espectral similar al urato.

Solución

Inspección visual y uso de "gap" de piel en post-procesado (filtro de exclusión superficial y limpieza de artefactos).

Falso positivo El mimetismo de la queratina



Reconstrucción volumétrica DECT en paciente sospecha de tofo gotoso en talón.

Ausencia de depósitos de urato monosódico en la región sintomática. Áreas codificadas en verde en localización periungueal y en hallux valgus corresponden a falsos positivos por queratina.



Reconocer las localizaciones típicas de artefacto evita sobrediagnóstico de gota en DECT.

Falsos negativos

Evolución temprana (< 6 semanas) → Los cristales no son suficientemente densos o voluminosos.

Baja concentración de urato monosódico.

Gota no-tofácea y tamaño de los depósitos → El software tiene un límite de resolución física; los focos de MSU $< 1-2$ mm (comunes en la gota no-tofácea o incipiente) a menudo se filtran como si fueran ruido electrónico.

Detección de cristales Diagnóstico diferencial

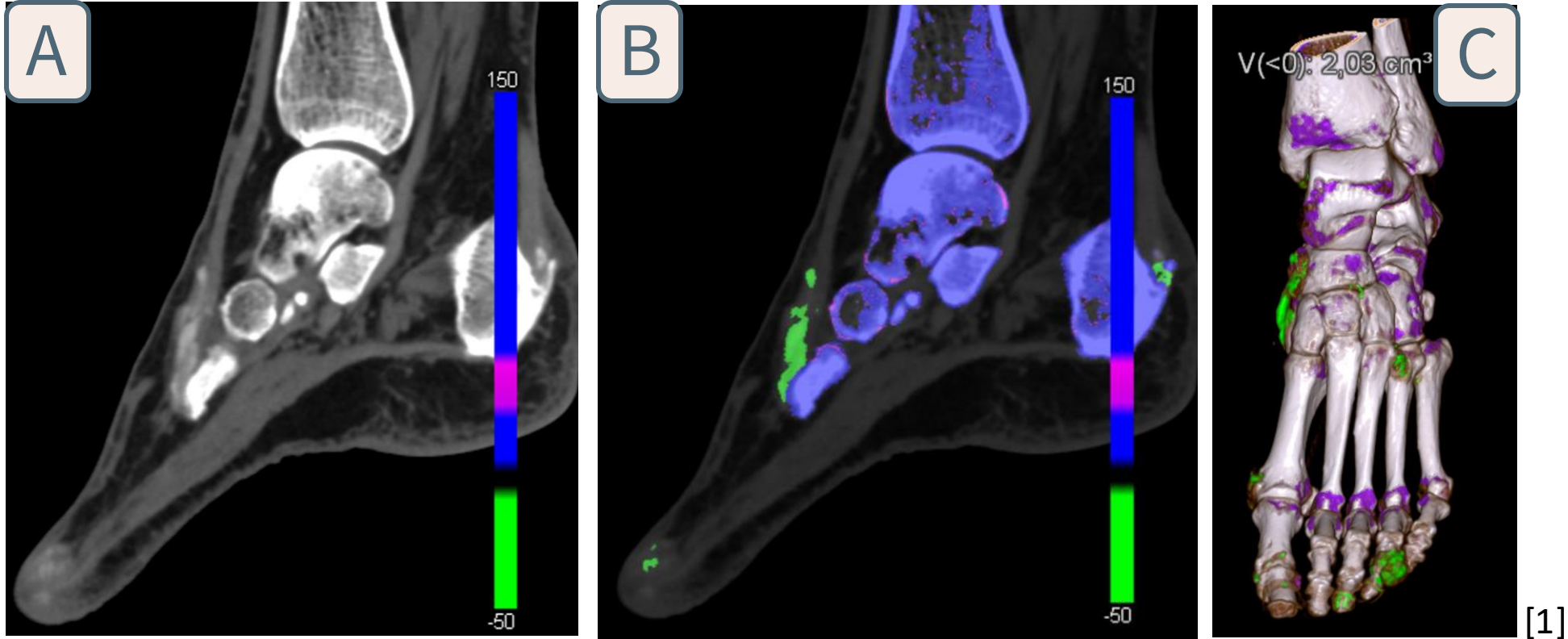
Gota (MSU)

- Cristales de urato monosódico
- Verde en DECT
- Rx: erosiones en "saca-bocados"
- 1ª MTF, manos, tendones

Pseudogota (CPPD)

- Pirofosfato cálcico dihidratado
- Púrpura / azul en DECT
- Rx: condrocalcinosis
- Rodilla (meniscos), muñeca (lig. triangular)

Detección de cristales Gota



A. TC convencional que muestra nódulos de tejido blando juxtaarticulares.

B. Mapa de **descomposición de materiales** que identifica **depósitos de urato monosódico** juxtaarticulares, superpuestos a la TC convencional para una correlación anatómica más precisa.

B. **Reconstrucción volumétrica** DECT con descomposición de materiales, donde los depósitos de MSU se codifican en verde.

Edema de médula ósea Virtual Non-Calcium

Técnica

Descomposición de 3 materiales (sustracción del calcio para revelar agua).

Aplicación

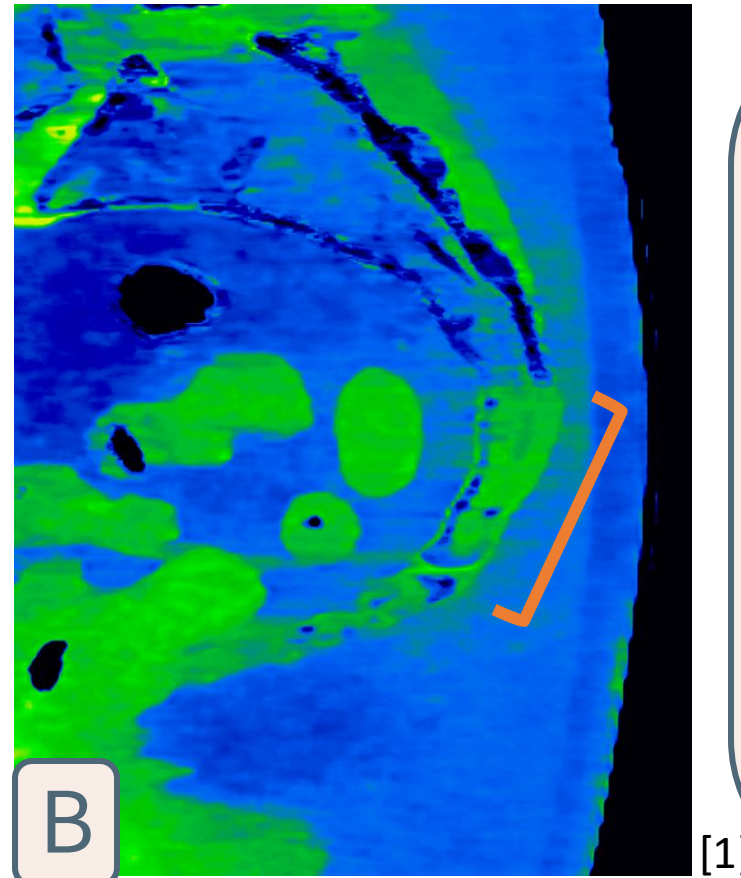
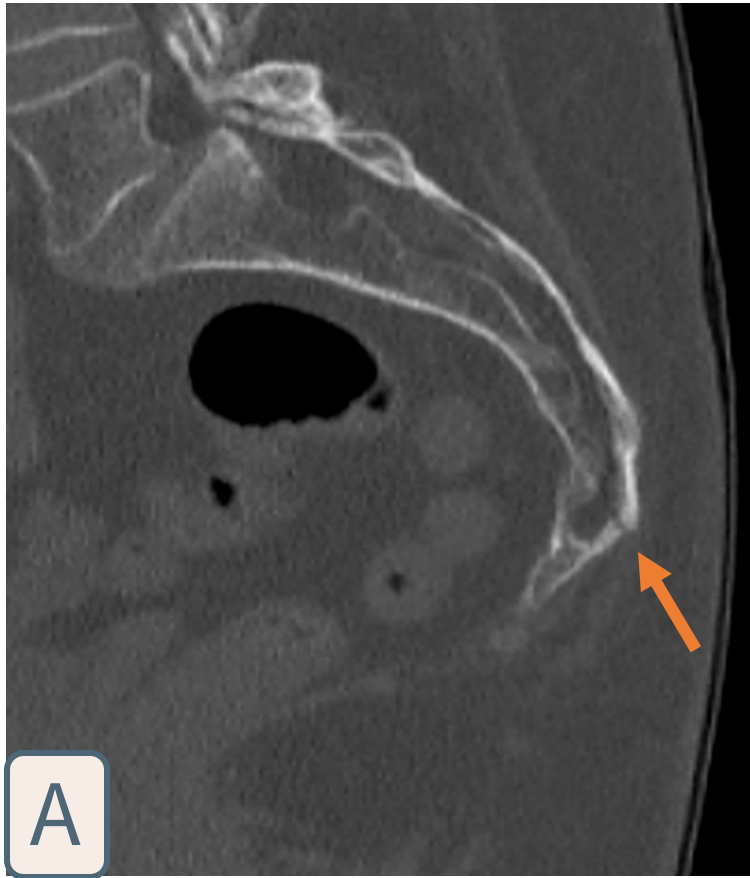
Identificar áreas de edema óseo, permitiendo la detección de **contusiones óseas** y **fracturas ocultas** (muñeca, fémur proximal y pelvis).

Ventaja

Disponibile en urgencias, más **rápido** que RM.



Edema de médula ósea Virtual Non-Calcium



A. **TC convencional** que evidencia un trazo de fractura sacra.

B. Imagen con técnica **VNCA**, que suprime la atenuación del hueso trabecular y genera un **mapa de atenuación** de la médula ósea, permitiendo identificar el edema óseo subyacente a la fractura.

[1]

Edema de médula ósea Infección e inflamación

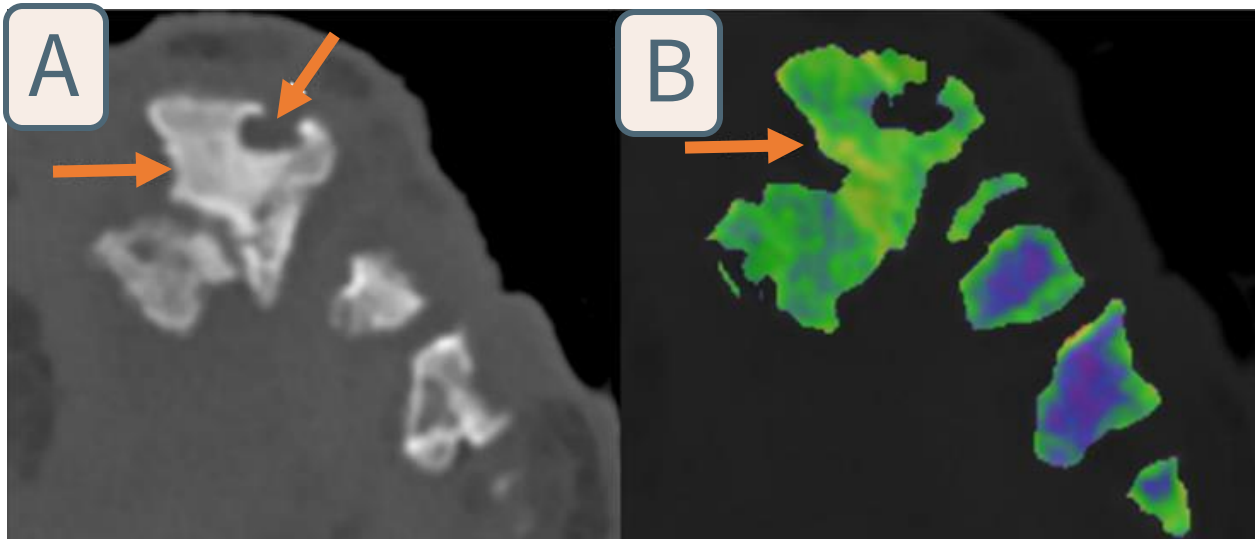


Imagen adaptada de Cheong SCW, et al. (2024)

Paciente diabético con úlceras en un sitio de amputación (A). El análisis de TC dual (**VNCa**) identifica edema óseo en la base del primer metatarsiano residual (codificado en verde), lo cual permitió sospechar **osteomielitis** (B).

Ostoemielitis y sacroileítis

El VNCa mejora la sensibilidad diagnóstica al detectar edema en estructuras óseas afectadas.

Útil en pie diabético o material de osteosíntesis.

Artritis reumatoide → detección precoz de osteítis y erosiones activas (previo al daño estructural permanente).

Edema de médula ósea Pitfalls

Confusión con **médula roja**

- El algoritmo busca agua. La médula roja es rica en agua.
- Diagnóstico diferencial: la médula roja es difusa, bilateral, en esqueleto axial.

Enmascaramiento **cortical**

- El algoritmo sustrae incorrectamente píxeles de alta atenuación.
- Falsos negativos entre lesiones subcorticales inmediatas.

Análisis de colágeno

Técnica

Basado en la densidad de cadenas de hidroxiprolina e hidroxilisina en el colágeno.

Aplicación

Potencial para visualizar tendones, ligamentos y discos intervertebrales. Da información sobre la integridad ligamentaria en **pseudogota**.

Estado

Aplicación emergente, aún requiere validación.

Análisis de colágeno

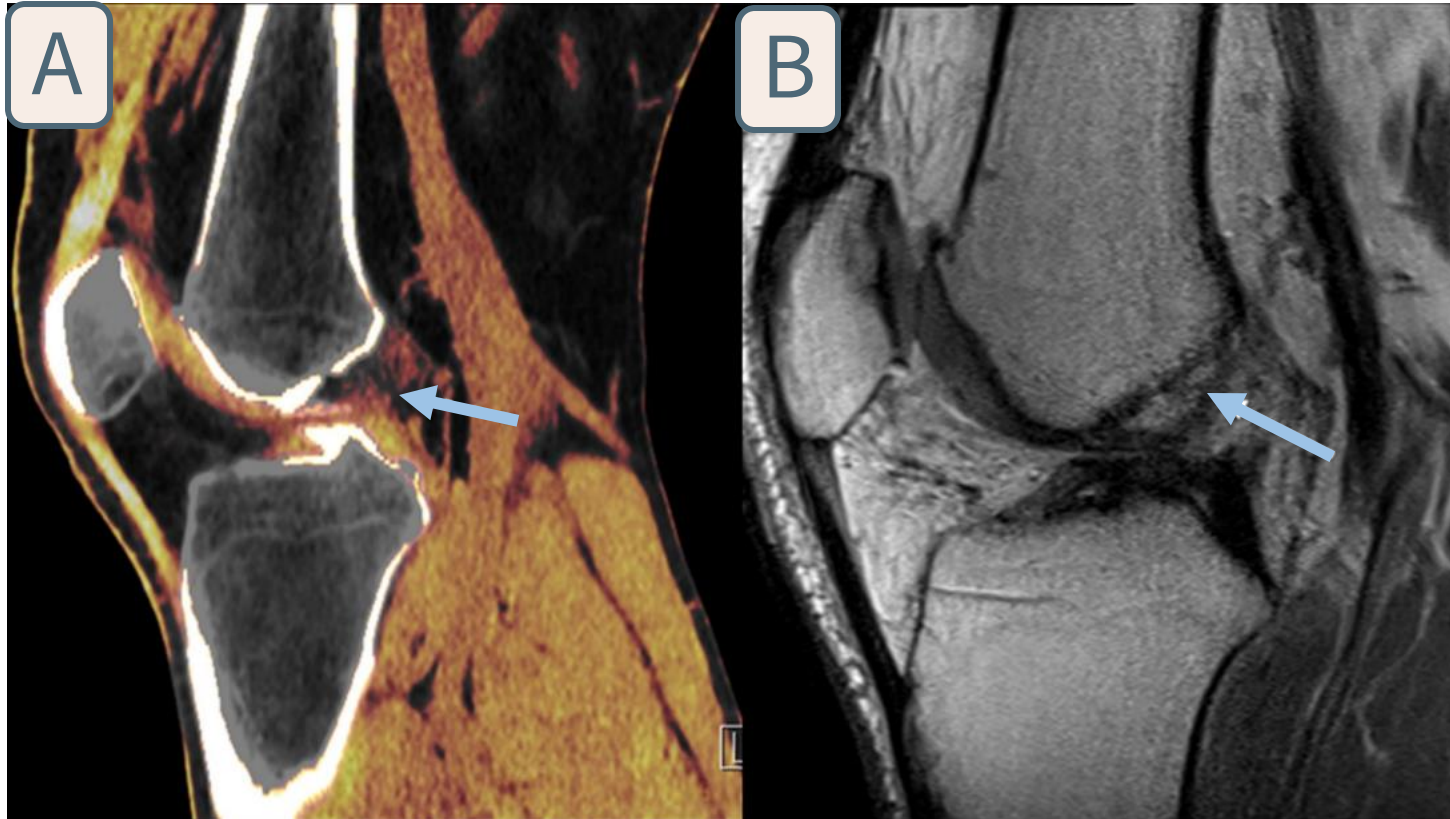


Imagen adaptada de Cheong SCW, et al. (2024)

A. Paciente joven que presenta dolor de rodilla tras un mecanismo de torsión. El análisis de colágeno mediante DECT en plano sagital mostró una posible rotura del LCA (→).

B. Hallazgo posteriormente confirmado mediante RM.

Reducción de artefactos metálicos MAR

Problema

- Endurecimiento del haz policromático.
- Escasez de fotones (*photon starvation*).
- Dispersión.
- Efectos de borde.

Solución

- Imágenes monoenergéticas virtuales (MonoE/VMI).
- Aplicación de altos keV (105 a 140 keV) para recuperar la interfaz hueso – metal/cemento.

Reducción de artefactos metálicos MAR



TC convencional



MonoE 130keV

A. TC convencional muestra secuelas de fractura subcapital desplazada del fémur izquierdo, con colapso epifisario de la cabeza femoral tratada con osteosíntesis con tornillos canulados.

B. Monoenergía a 130 keV, que permite una mejor delineación de los márgenes óseos y de los tornillos metálicos, resaltando la deformidad de la cabeza femoral.

Oncología musculoesquelética Aplicaciones

Mieloma múltiple

Detección de **infiltración difusa** o lesiones focales **no osteolíticas** mediante mapas VN^{Ca} o mapas de yodo.

Sensibilidad superior a la TC convencional para lesiones intramedulares.

Evidencia →

Distingue medula ósea normal de patológica con:

Sensibilidad: 89%

Especificidad: 85%

Oncología musculoesquelética Aplicaciones

Metástasis líticas vs. Nódulos de Schmorl

Las metástasis líticas presentan mayor contenido de agua y vascularidad.

Metástasis blásticas vs. Islotes óseos

Se utiliza la imagen virtual monoenergética (VMI) en base a la atenuación espectral.

Artro-TC Aplicaciones

Sustracción yodo

Utiliza VNC / VMI que separa el yodo del hueso cortical, generando modelos óseos 3D limpios.

Mapas de yodo

Junto con VMI de baja energía facilitan la identificación de fugas de líquido articular en roturas sutiles.

Dx Diferencial

Permite diferenciar el contraste intraarticular de calcificaciones o cuerpos libres.

Artro-TC Aplicaciones

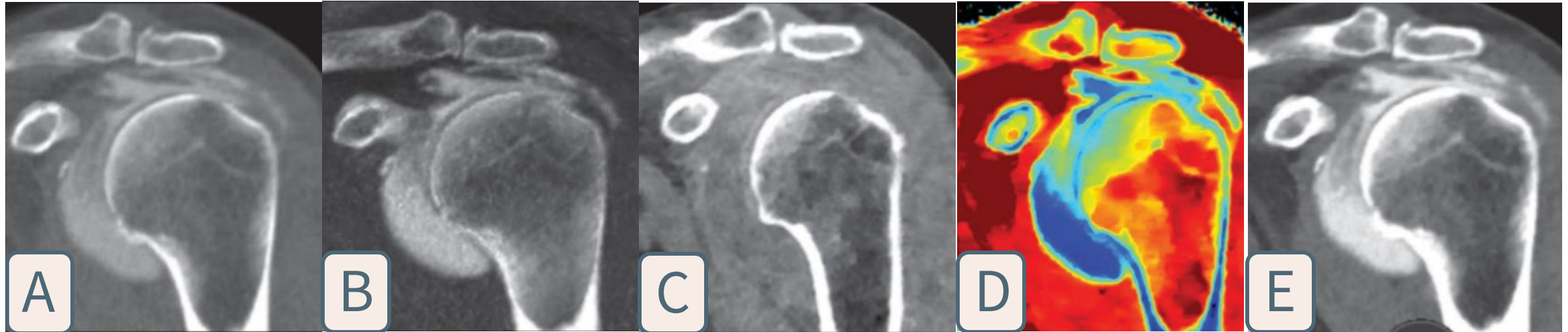


Imagen adaptada de Rajiah P, et al. (2019)

Artro-TC de doble energía con tecnología de doble capa en paciente de 61 años con dolor de hombro. (A) Imagen convencional para evaluación diagnóstica rutinaria. (B) Mapa de yodo que resalta las áreas con contenido yodado. (C) Imagen virtual sin contraste que sustrae el yodo, simulando una adquisición sin contraste. (D) Imagen basada en número atómico efectivo, codificada por colores, útil para la caracterización tisular. (E) Imagen monoenergética virtual a 70 keV que simula la atenuación con haz monoenergético.

- ✓ Se recomienda una dilución del contraste del 25% (aprox. 60-75 mg/ml).
- ✓ En estudios de hombro la adquisición a 72 keV ofrecen el mejor equilibrio.

Densitometría ósea BMD

DEXA (2D)

Mide la densidad en un solo plano → no puede aislar el hueso trabecular.

Sujeta a interferencias por estructuras superpuestas (p.ej. cambios degenerativos o esclerosis aórtica).

DECT (volumétrico 3D)

Mide densidad volumétrica 3D exclusivamente del hueso trabecular (metabólicamente activo), evitando la sobreestimación.

Concepto

Cribado "oportunisto" durante escáneres de rutina.



Evaluación de sarcopenia BMD

- Basada en la cuantificación precisa de la fracción grasa en la musculatura esquelética mediante algoritmos de decomposición de materiales y análisis de UH en imágenes VNC.
 - La sarcopenia es un biomarcador de fragilidad y pronóstico en paciente oncológicos o ancianos.
-

Conclusión

- ✓ La DECT no solo supone "mejores imágenes", es **información nueva** (composición, perfusión, sustracción).
- ✓ Resuelve dilemas clínicos específicos: gota, trauma oculto y artefactos metálicos.
- ✓ Optimiza el flujo de trabajo en urgencias al reducir la necesidad de RM complementarias.
- ✓ La adopción de la DECT convierte la TC en una **herramienta funcional**, aumentando la confianza diagnóstica sin dosis adicional.

Recursos bibliográficos

1. Rajiah P, Sundaram M, Subhas N. Dual-Energy CT in Musculoskeletal Imaging: What Is the Role Beyond Gout? AJR Am J Roentgenol. 2019 Sep;213(3):493-505.
2. Singla N, Joshi M, Amerasekera S, Choudhary S. Applications of dual-energy CT in acute musculoskeletal and trauma imaging-a review. Skeletal Radiol. 2024 Nov;53(11):2333-2345.
3. Cheong SCW, Yan YY, Sheikh A, Ouellette HA, Munk PL, Murray N, et al. Dual-energy CT applications in musculoskeletal disorders. Br J Radiol. 2024. doi: 10.1093/bjr/tqae023.
4. Wong AJN, Wong M, Kutschera P, Lau KK. Dual-energy CT in musculoskeletal trauma. Clin Radiol. 2021 Jan;76(1):38-49.

5. Meer E, Patel M, Chan D, Sheikh AM, Nicolaou S. Dual-Energy Computed Tomography and Beyond: Musculoskeletal System. Radiol Clin North Am. 2023 Nov;61(6):1097-1110.
6. Simonetti I, Verde F, Palumbo L, Di Pietto F, Puglia M, Scaglione M, et al. Dual energy computed tomography evaluation of skeletal traumas. Eur J Radiol. 2021 Jan;134:109456.
7. So A, Nicolaou S. Spectral Computed Tomography: Fundamental Principles and Recent Developments. Korean J Radiol. 2021 Jan;22(1):86-96.
8. Mallinson PI, Coupal TM, McLaughlin PD, Nicolaou S, Munk PL, Ouellette HA. Dual-energy CT for the musculoskeletal system. Radiology. 2016 Oct;281(3):690-707.