

# TC de doble energía en las enfermedades por depósito de cristales.

Marco Ciuffreda<sup>1</sup>, Edgnardo Velasquez<sup>1</sup>, Daniel Selva Talón<sup>1</sup>,  
Alejandro Villalba Cortes<sup>1</sup>, Cesar Diaz Torne<sup>2</sup>, Oksana  
Lushchenkova<sup>1</sup>, Jaume Llauger Rosselló<sup>1</sup>, Sandra Valverde  
Lavirgen<sup>1</sup>, Jorge E. Otero Ruiz<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Servicio de Diagnóstico por la Imagen del Hospital Sant Pau,  
Barcelona;

<sup>2</sup>Servicio de Reumatología del Hospital Sant Pau, Barcelona;

# Objetivo docente

- Consideraciones básicas sobre DECT y las enfermedades por depósito de cristales.
- Explicar las bases físicas en las que se sustenta el DECT.
- Comentar el protocolo de adquisición y postprocesado de imágenes para el estudio de la gota con el DECT.
- Enseñar ejemplos prácticos de pacientes estudiados en nuestro hospital incluyendo los los *pitfalls* más frecuentemente encontrados.



## CONTEXTO - GOTA Y CPPD

La gota es una enfermedad inflamatoria crónica caracterizada por la acumulación de **crisales de urato monosódico (MSU)** en el líquido sinovial y otros tejidos, siendo la forma más común de artritis inflamatoria.

La enfermedad por depósito de pirofosfato cálcico dihidratado o “pseudogota” es una enfermedad caracterizada por la deposición de **crisales de pirofosfato de calcio (CPPD)** en el cartílago articular, siendo la rodilla la articulación más afectada.

El *gold standard* para el diagnóstico de ambas patologías es el análisis microscópico del líquido sinovial o del aspirado del nódulo que demuestra la presencia de crisales de **MSU** o **CPPD**.

La aspiración del líquido sinovial y la microscopía no se realizan habitualmente en la mayoría de los casos de gota.

Los nuevos criterios diagnósticos para la gota (ver a continuación), incluyen los criterios de imagen (ecografía, DECT y RM) para el diagnóstico definitivo sin el análisis microscópico.

La DECT destaca como una herramienta diagnóstica innovadora, rápida, no invasiva y eficaz para la confirmación diagnóstica de la gota, la evaluación de la respuesta al tratamiento y el estudio de las posibles complicaciones.

El papel de la DECT en el diagnóstico de la enfermedad por depósito de crisales de pirofosfato de calcio aún está por definirse. Permitiría confirmar la existencia de depósitos de CPPD y descartar la coexistencia de crisales de MSU.



## CONTEXTO - Diagnóstico de gota (EULAR/ACR)

En el 2015 el grupo del **American College of Rheumatology** y el **European League against Rheumatism** han definido los criterios diagnósticos de gota.

- Criterio necesario: al menos un episodio de inflamación, dolor o sensibilidad en una articulación periférica o bursa.
- Criterio suficiente: La presencia de cristales de **MSU** en el líquido sinovial o tejido tofáceo observados mediante microscopía de luz polarizada es un criterio suficiente para diagnosticar la gota, considerado el gold standard.
- Criterios clínicos, de laboratorio y de imagen: válidos si no se cumplen los criterios suficientes; se utiliza un score de hasta 23 puntos, aceptándose el diagnóstico de gota con score igual o mayor de 8 puntos. La presencia de tofos en DECT equivale a 4 puntos.

**En el contexto de las artropatías microcristalinas, el DECT estaría indicado para:**

- Confirmar la presencia de tofos gotosos en paciente con sospecha pero sin diagnóstico definitivo; la DECT adquiere particular importancia cuando los tofos gotosos son de muy pequeño tamaño o no valorables por ecografía;
- Confirmar la presencia de tofos gotosos en pacientes ya diagnosticados, obteniendo un valor volumétrico que puede ser útil para el seguimiento y evaluar la respuesta al tratamiento;
- Descartar la presencia de tofos gotosos en pacientes con sospecha de enfermedad por depósitos de cristales de **CPPD**.



## CONTEXTO - Precisión Diagnóstica

- La DECT tiene una sensibilidad del 100% en presencia de **tofós** y del 64% en su ausencia.
- Se estima una **sensibilidad y especificidad** global del 87-90% y 83-84% respectivamente.
- **Falsos Positivos:** por similitud del índice de doble energía de la queratina con el del **MSU**, por ejemplo el lechos ungueales y zonas de hiperqueratosis cutánea. También por artefacto de endurecimiento del haz en contexto de metal y áreas de hueso cortical muy denso.
- **Falsos Negativos:** cuando los microcristales de **MSU** tienen un diámetro <2 mm, cuando se visualizan tofos con una concentración de urato monosódico demasiado baja o están parcialmente calcificados y cuando los parámetros técnicos de postprocesado están incorrectamente configurados.
- La sensibilidad y la especificidad de la DECT para la detección de **CPPD** se estima del 55% y del 92%, respectivamente (utilizando técnicas de imagen establecidas para la gota) y con una sensibilidad del 90-100% adaptando la técnica de postprocesado).
- La DECT sería además capaz de diferenciar entre **CPPD** y de hidroxapatita de calcio pero actualmente no es una práctica establecida.

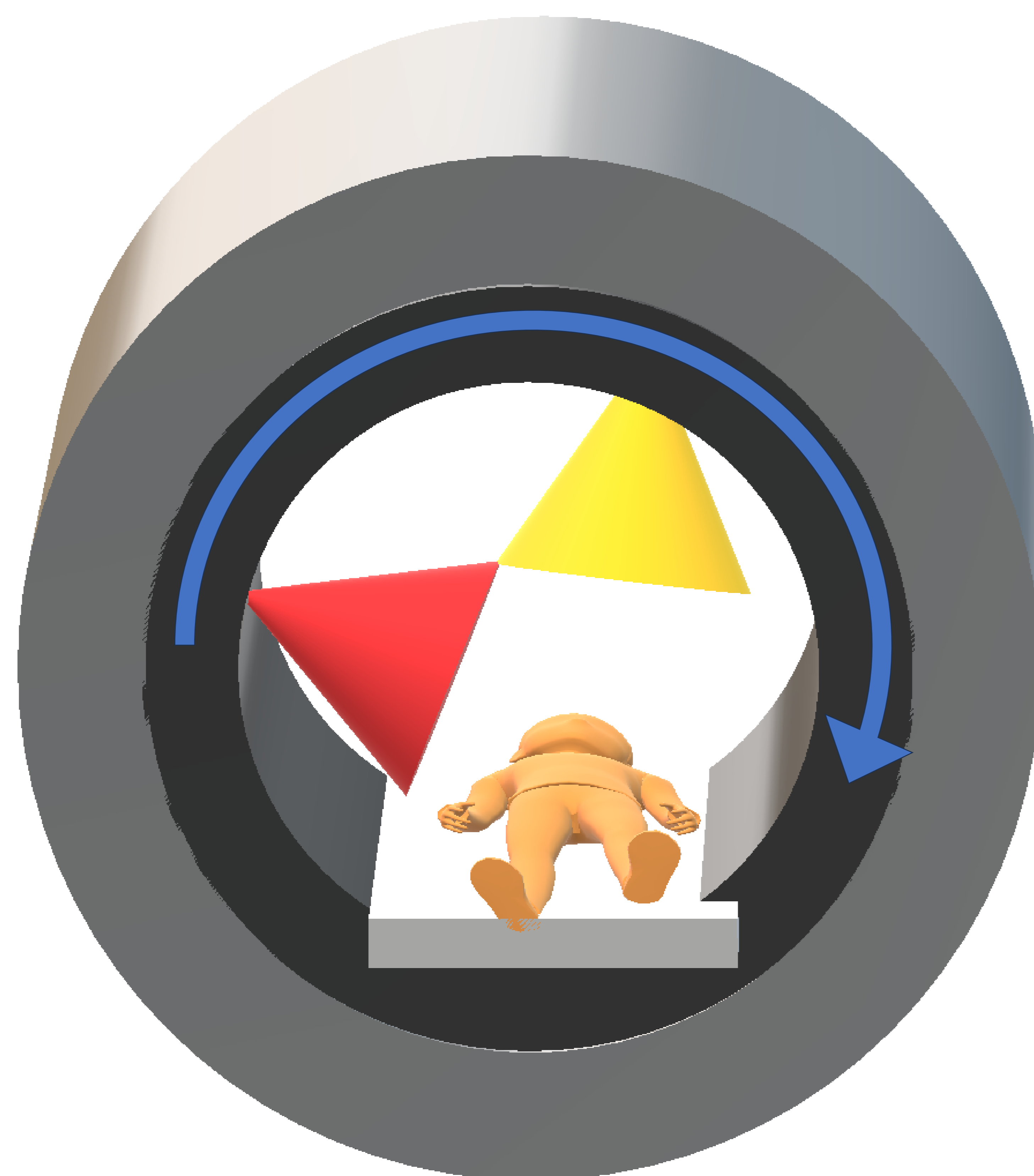


## FÍSICA DEL DECT – TC de Doble Fuente

La DECT es una técnica de adquisición de imágenes que utiliza dos niveles de energía generados por un tubo de Rayos X de forma alternada o por el uso simultáneo de dos tubos de rayos.

La TC de energía dual puede diferenciar materiales según su comportamiento al exponerlos a un kilovoltaje bajo y otro alto, permitiendo así no solo un análisis morfológico de las imágenes (como en la TC convencional), sino la detección y caracterización de distintos elementos químicos (yodo, **calcio**, **ácido úrico**, etc.)

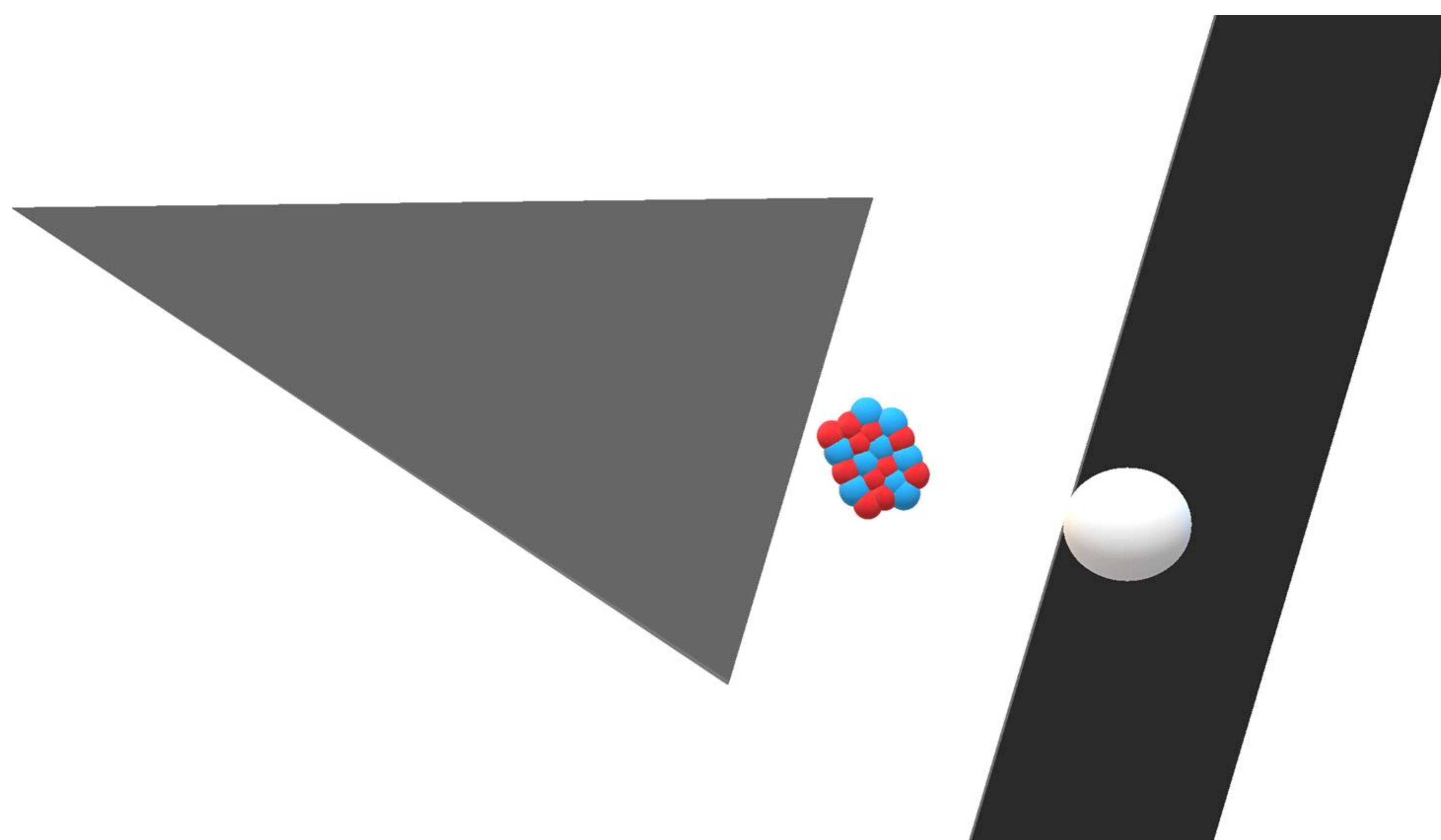
Esquema de DECT de doble fuente.



BAJA ENERGÍA  
ALTA ENERGÍA

## FÍSICA DEL DECT – Rayos X

Los diferentes materiales absorben más o menos rayos X de forma proporcional a su N.º atómico (Z) e inversamente proporcional a la densidad de electrones. La absorción de rayos X se mide en Unidades Hounsfield (UH).



Mapa de densidad o absorción para cada vóxel expresado en UH

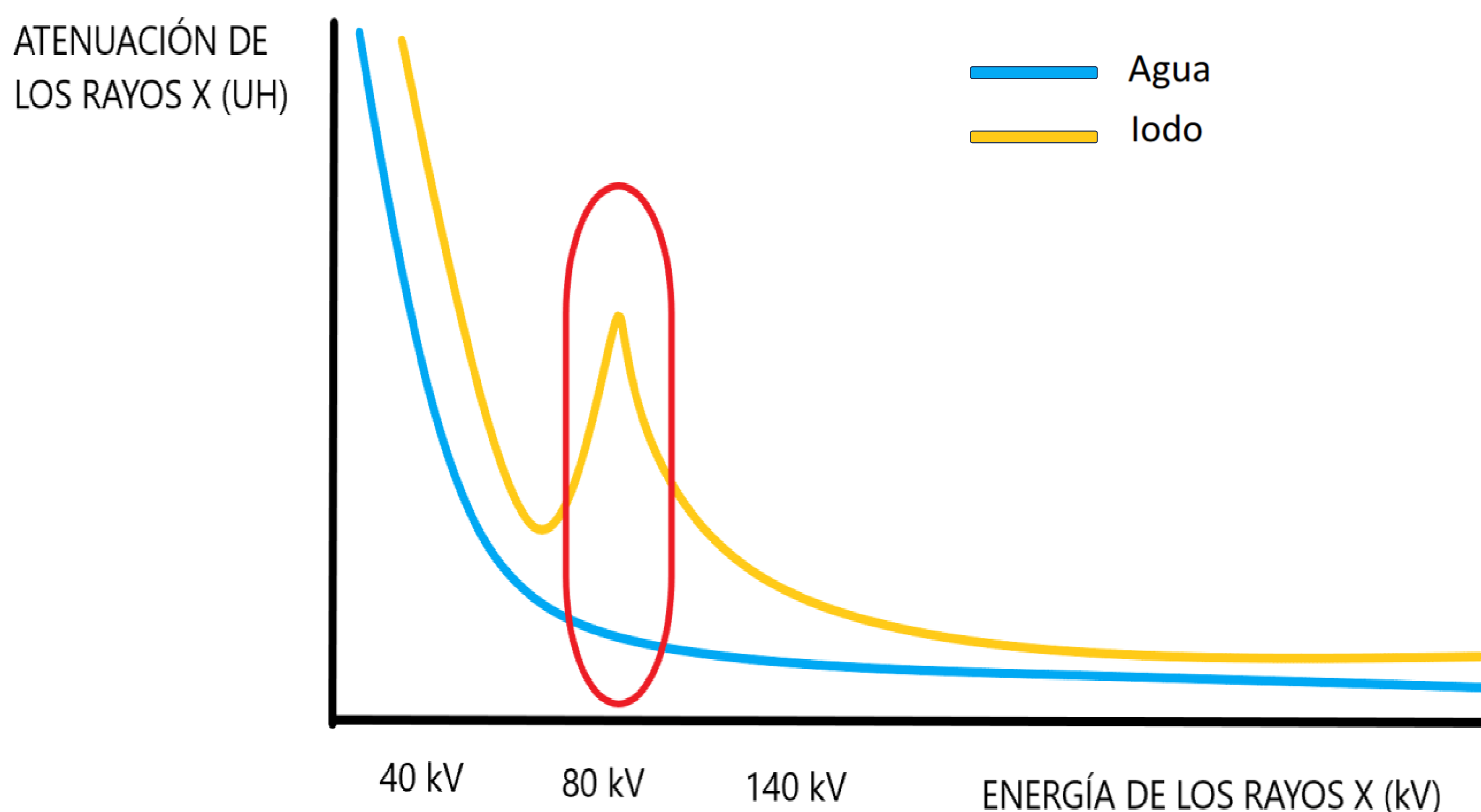
Los materiales con alto N.º atómico y menor densidad de electrones presentan mayor atenuación (altos valores de UH) y viceversa (bajos valores de UH).

## FÍSICA DEL DECT – Efecto fotoeléctrico vs Compton

En el **efecto Fotoeléctrico**, el fotón incidente choca con un electrón de la capa más interna del átomo. Si la energía del fotón es similar a la *energía de unión* del electrón en esa capa, el electrón absorbe completamente la energía del fotón y se expulsan localmente como un fotoelectrón, dejando un espacio vacío en la capa interna que posteriormente será ocupado por un electrón de una capa más externa.

A medida que la energía del fotón supera la energía de unión del electrón de la capa más interna, la probabilidad de interacción fotoeléctrica disminuye y comienza a predominar el efecto Compton.

En el **efecto Compton** el fotón choca con un electrón de la capa más externa del átomo, pierde solo parte de su energía y se dispersa/desvía de su trayectoria original.



El elipse rojo marca la absorción desproporcionada de rayos X que se produce cuando la energía del tubo de rayos X se acerca a la energía de unión de los electrones de la capa más interna del átomo de Yodo y entra en juego el efecto fotoeléctrico.



## FÍSICA DEL DECT – Efecto fotoeléctrico vs Compton

El papel de los efectos fotoeléctrico y de Compton para cada compuesto está determinado por la densidad electrónica y el número atómico de la sustancia: cuanto mayor sea el número atómico y menor sea la densidad electrónica (por ejemplo, yodo, calcio, bario y xenón), mayor será el efecto de absorción fotoeléctrica, mientras que los elementos con un número atómico bajo y mayor densidad electrónica (carbono, nitrógeno, hidrógeno y oxígeno) dependen más del efecto de Compton.

A bajas tensiones del tubo de rayos X (20–50 kV), la energía de los rayos X es totalmente absorbida por la sustancia y predomina el efecto fotoeléctrico, mientras que a altas tensiones (50–150 kV), predomina la dispersión de Compton, lo que resulta en una atenuación de la señal.



# PROTOCOLO DE ADQUISICIÓN

Las exploraciones DECT realizan en un escáner con tubo de rayos X de doble fuente de última generación (SOMATOM Force; Siemens Healthcare, Alemania).

Para el estudio de rodillas, tobillos y pies los pacientes se colocan en posición supina con los pies próximos entre sí formando un ángulo de 90º respecto de la mesa.

Para el estudio de las manos los pacientes se colocan en decúbito prono con las extremidades superiores extendidas por sobre la cabeza, situando ambas manos una al lado de la otra con las palmas sobre la mesa.

La exploración se adquiere en dirección craneocaudal. El tiempo de rotación del gantry es de 0.5 segundos y el Field of View (diámetro de reconstrucción) de 30 cm.

Todas las exploraciones utilizan el mismo protocolo de imagen: Grosor de corte de 1mm, adquisición a 128 mm × 0.6 mm y un pitch de 0.6.

Las imágenes se reconstruyen con un algoritmo óseo y de partes blandas, ambos con una matriz de 512x512, con cortes de 0.75 mm y un incremento de 0.5 mm.



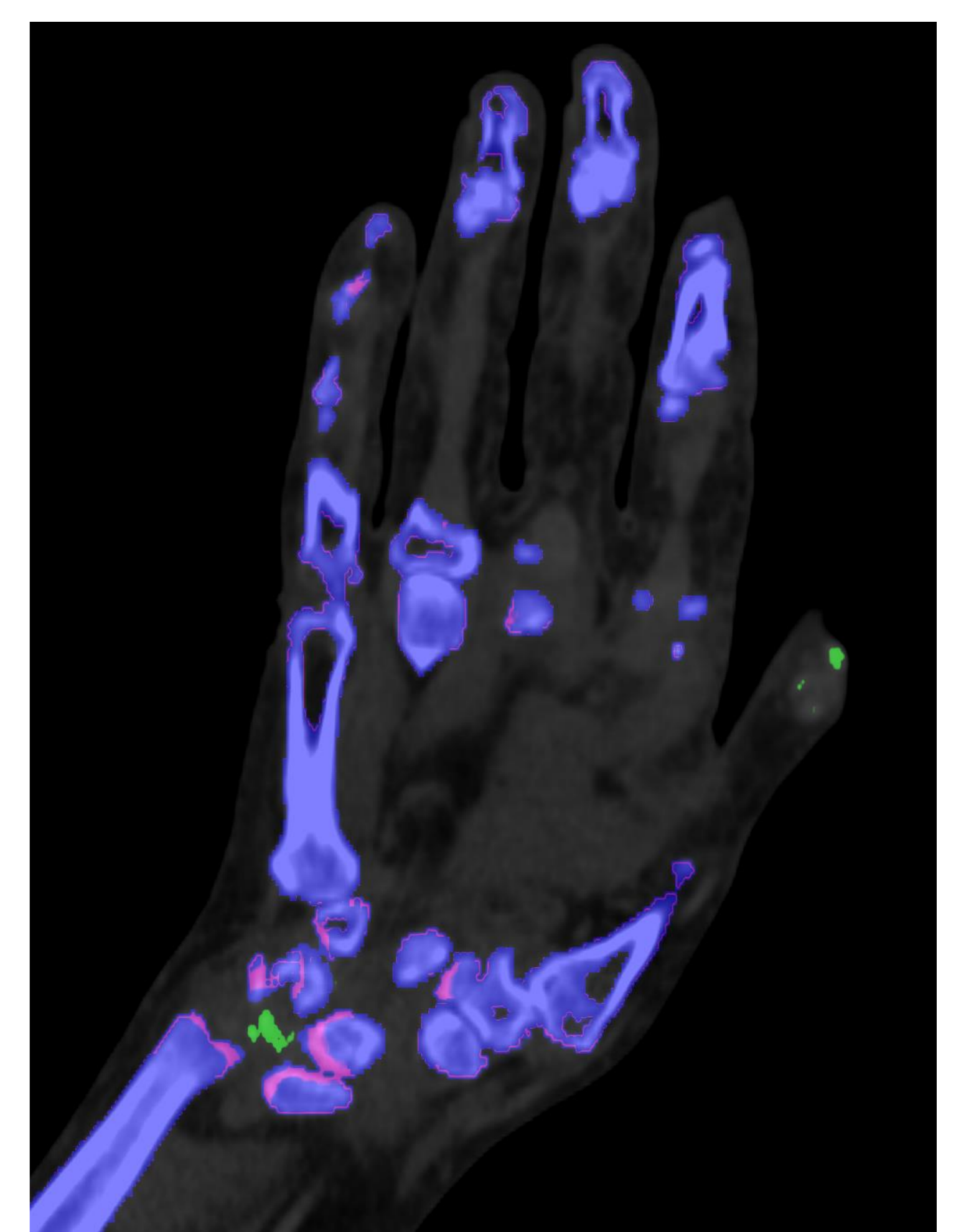
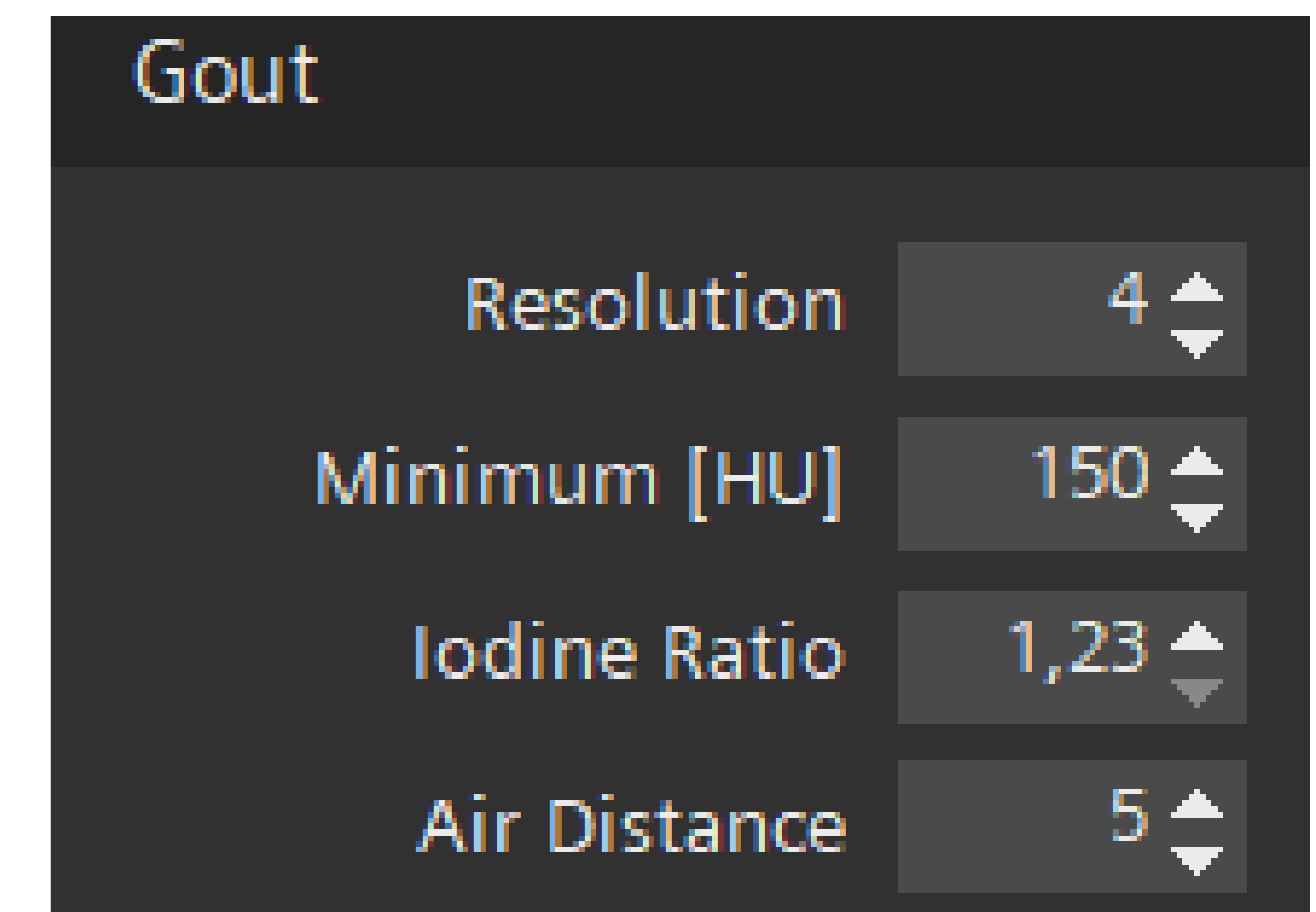
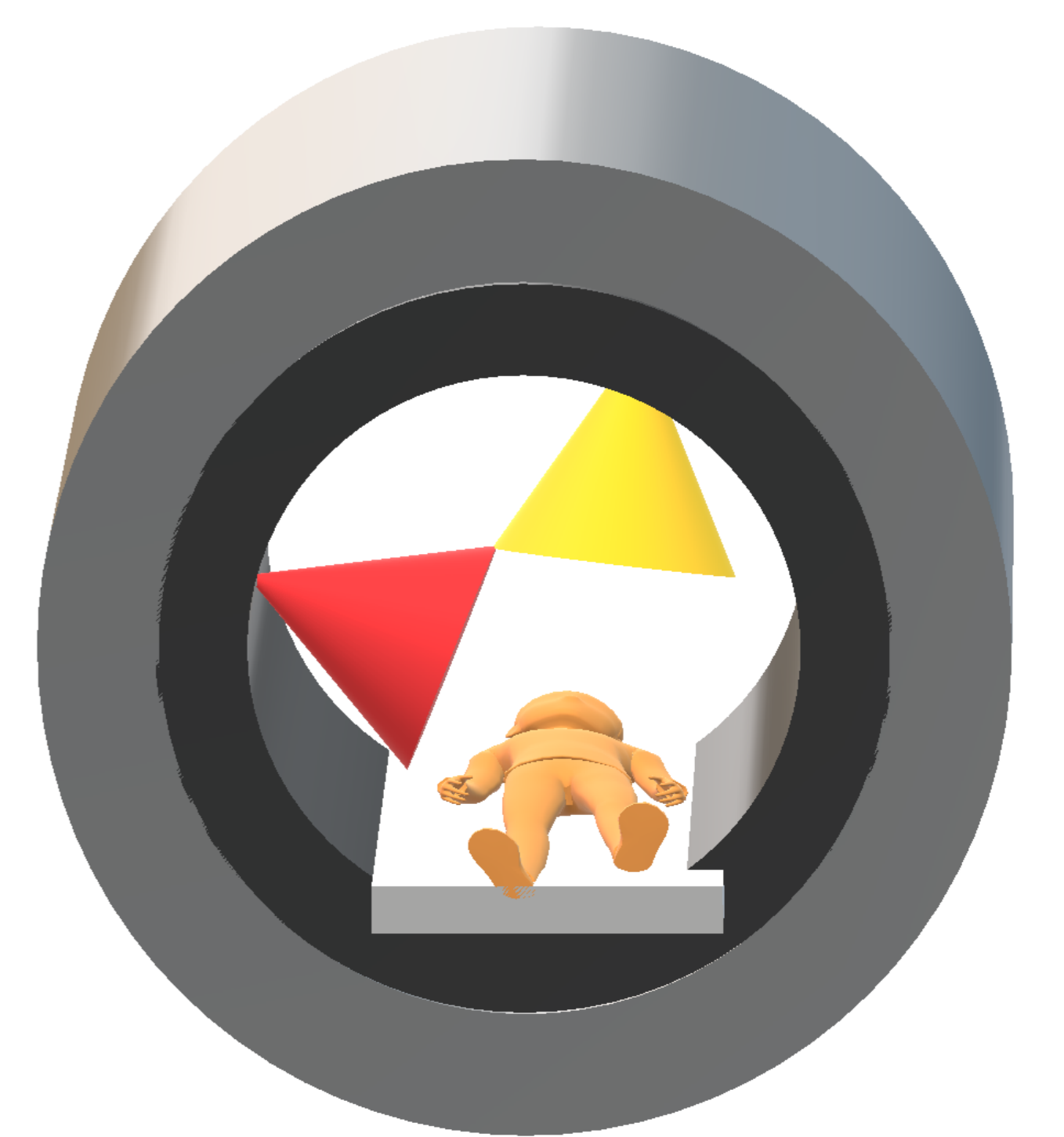
## POSTPROCESADO

La lectura de los casos se realiza en una estación de trabajo con software propietario (syngo.via; Siemens Healthcare).

Este software codifica por colores los diferentes elementos: Los cristales de **ácido úrico** se colorean de verde, el **hueso trabecular** de rosa, y el **hueso cortical** de azul. El tejido blando no es coloreado.

Para ello deben definirse una serie de parámetros que el software tomará como referencia para hacer la distinción entre los diferentes materiales y ajustar su sensibilidad y especificidad:

- *Minimum (UH) y Maximum (UH)*: Los objetos con densidades inferiores o superiores al valor especificado no tendrán su índice de energía dual calculado.
- *Ratio*: relación de energía dual, que es la relación entre la densidad de un material en unidades Hounsfield (HU) en las imágenes de baja energía vs alta energía. Este valor es crítico para separar el calcio del urato. Aumentar el parámetro "ratio" aumenta la sensibilidad de DECT a los cristales de urato monosódico a expensas de una disminución en su especificidad.
- *Air Distance*: distancia en voxels entre los cristales de MSU y el aire y el hueso. Elimina todos los elementos verdes dentro de la distancia especificada desde la superficie de la piel, excepto aquellos que están simultáneamente cerca de las estructuras óseas a una distancia que no excede el valor especificado.
- *Resolution*: especifica la cantidad mínima de píxeles verdes que la aplicación identificará como depósito de urato monosódico. Si el número de dichos píxeles en el área dada es menor que el valor especificado, no se mostrarán.



## POSTPROCESADO

Los materiales densos ( $> 150$  UH) y que contengan **calcio** presentaran una densidad relativamente mayor cuando son expuestos a rayos X de baja energía (80 kV) respecto a cuando son expuestos a unos de alta energía (140 kV). La ratio entre la primera atenuación y la segunda tenderá a  $> 1.4$ .

Los materiales densos ( $> 150$  UH) y que contengan **MSU** presentaran una densidad similar cuando son expuestos tanto a rayos X de baja como de alta energía. Por lo tanto, la ratio entre las dos densidades tenderá a  $< 1.4$ .

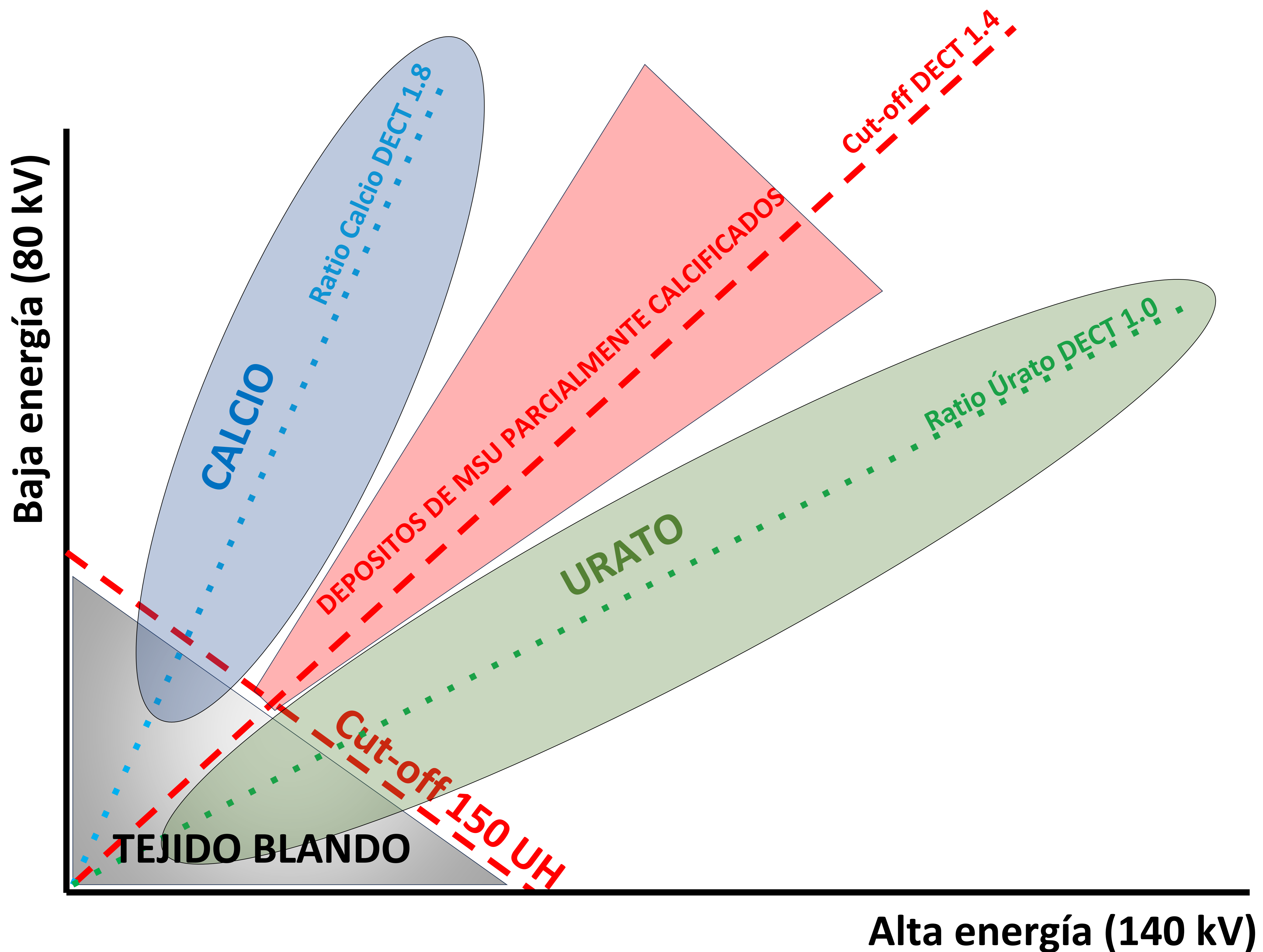
Los tejidos blandos ( $< 150$  UH) no serán codificados por color.

En nuestro caso, establecimos la Ratio para el urato en 1.23, el *mínimum* en 150 UH, el *máximum* en 500 UH y tanto la resolución como el air distance en 5 voxels.

Los artefactos detectados se removieron con la herramienta de recorte.

Las imágenes resultantes se muestran en reconstrucciones axiales, sagitales, coronales y volumétrica 3D que se almacenan en el PACS del hospital.





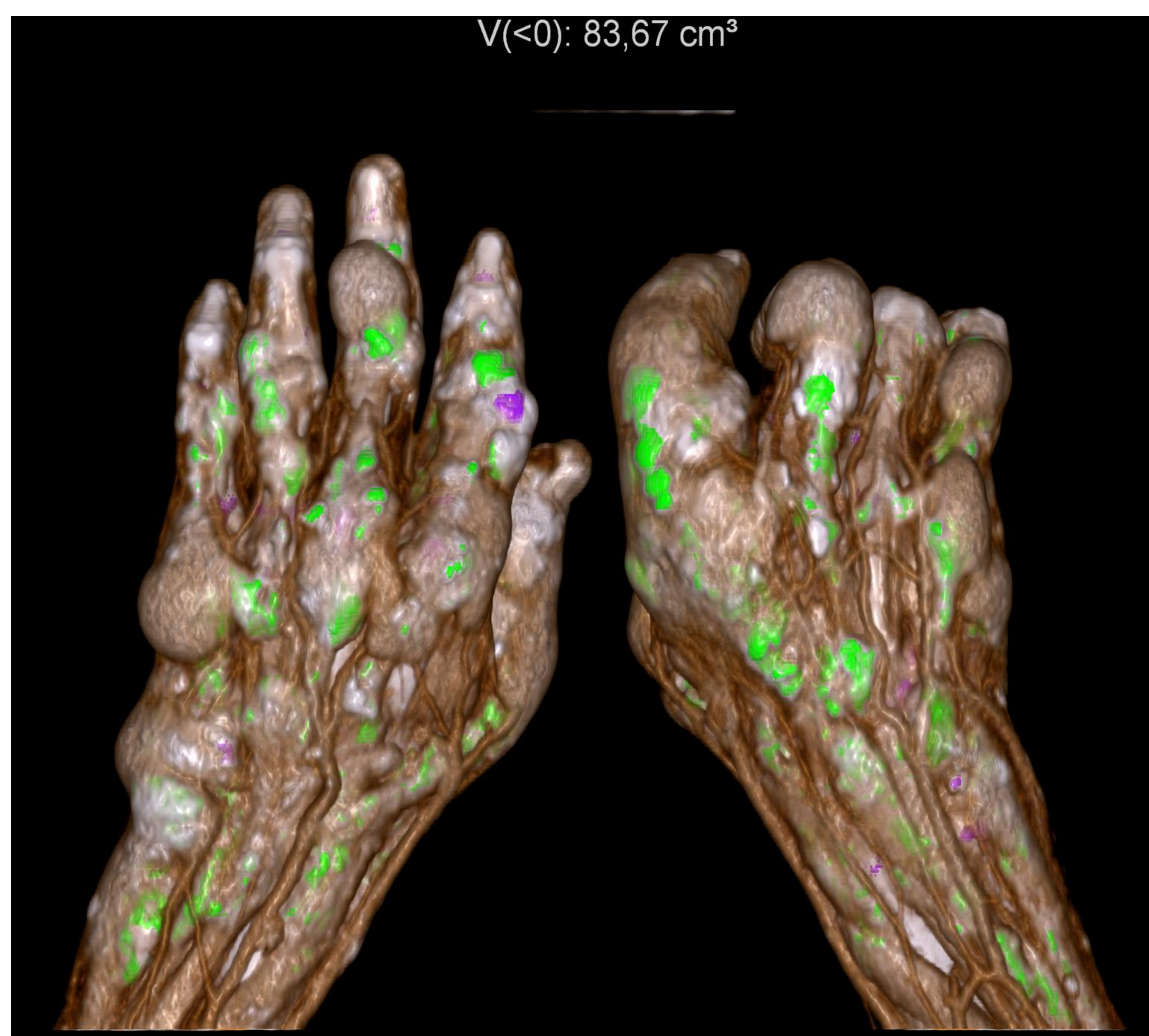
Esquema simplificado del algoritmo utilizado en las exploraciones DECT para la evaluación de la gota. El algoritmo separa la composición química de los compuestos basándose en sus diferentes atenuaciones a 80 kV y 140 kV. Tres materiales (**MSU**, **tejido blando** y **calcio**) pueden diferenciarse entre sí. Los materiales por encima de la relación DECT de corte se clasifican como calcio, y los materiales por debajo de la relación DECT de corte se clasifican como depósitos de MSU y se codifican en color verde. Un punto de corte de HU diferencia los tejidos blandos de los depósitos de MSU. Los tejidos mixtos (como los tejidos blandos o depósitos de MSU parcialmente calcificado) pueden dar lugar a interpretaciones erróneas de los exámenes DECT: como se ilustra en la **zona gris** y **zona roja**.

DECT: tomografía computarizada de energía dual; MSU: urato monosódico.

## CASO #1

Paciente con diagnóstico confirmado por análisis del líquido sinovial (criterio suficiente) de artritis gotosa tofácea crónica.

El DECT pone de manifiesto una importante y extensa afectación por depósito de ácido úrico tanto ósea como de las partes blandas de ambas manos y tercio distal de antebrazos.



El DECT ha sido útil para confirmar la presencia de depósitos de ácido úrico y medir un volumen aproximado.

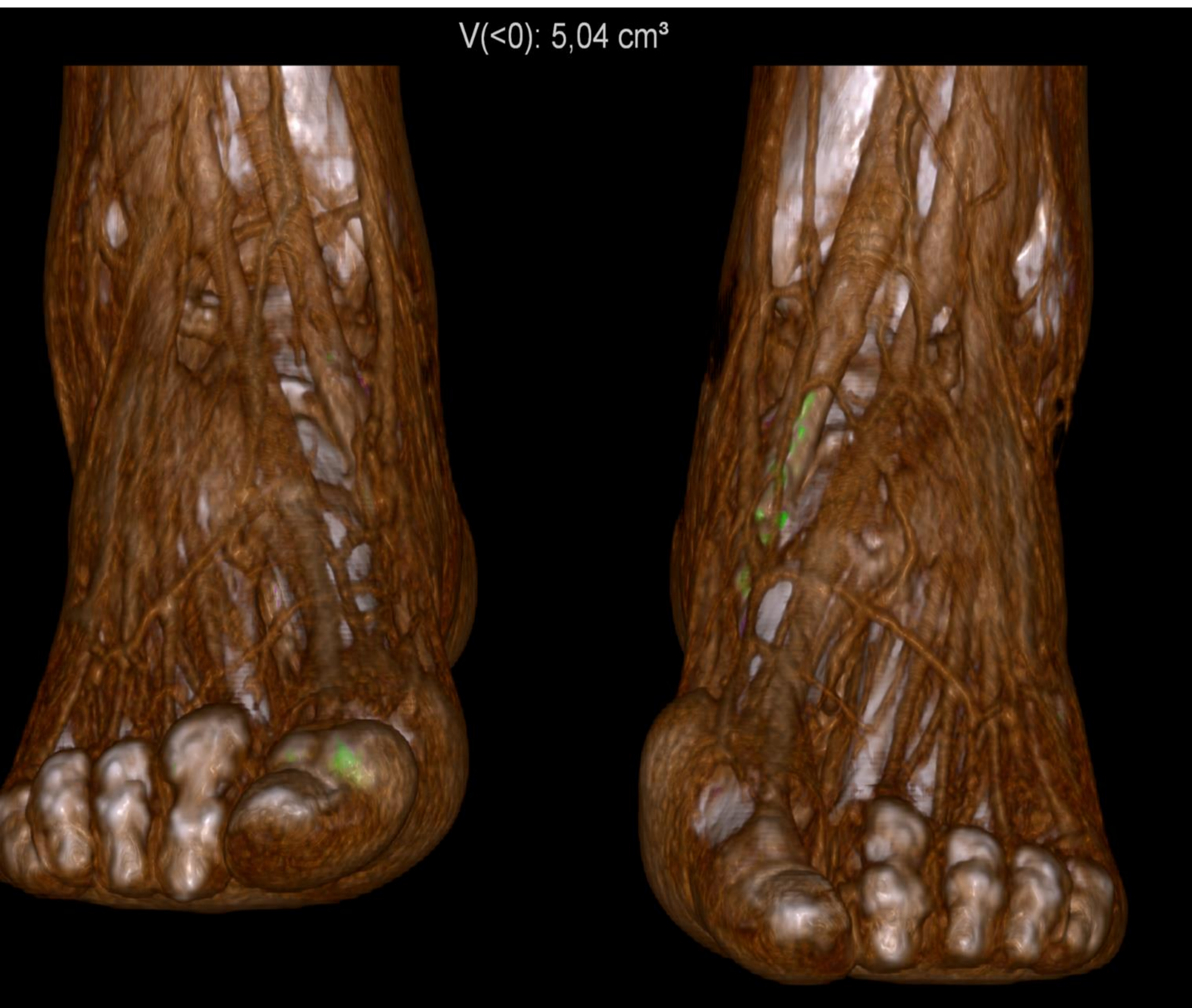
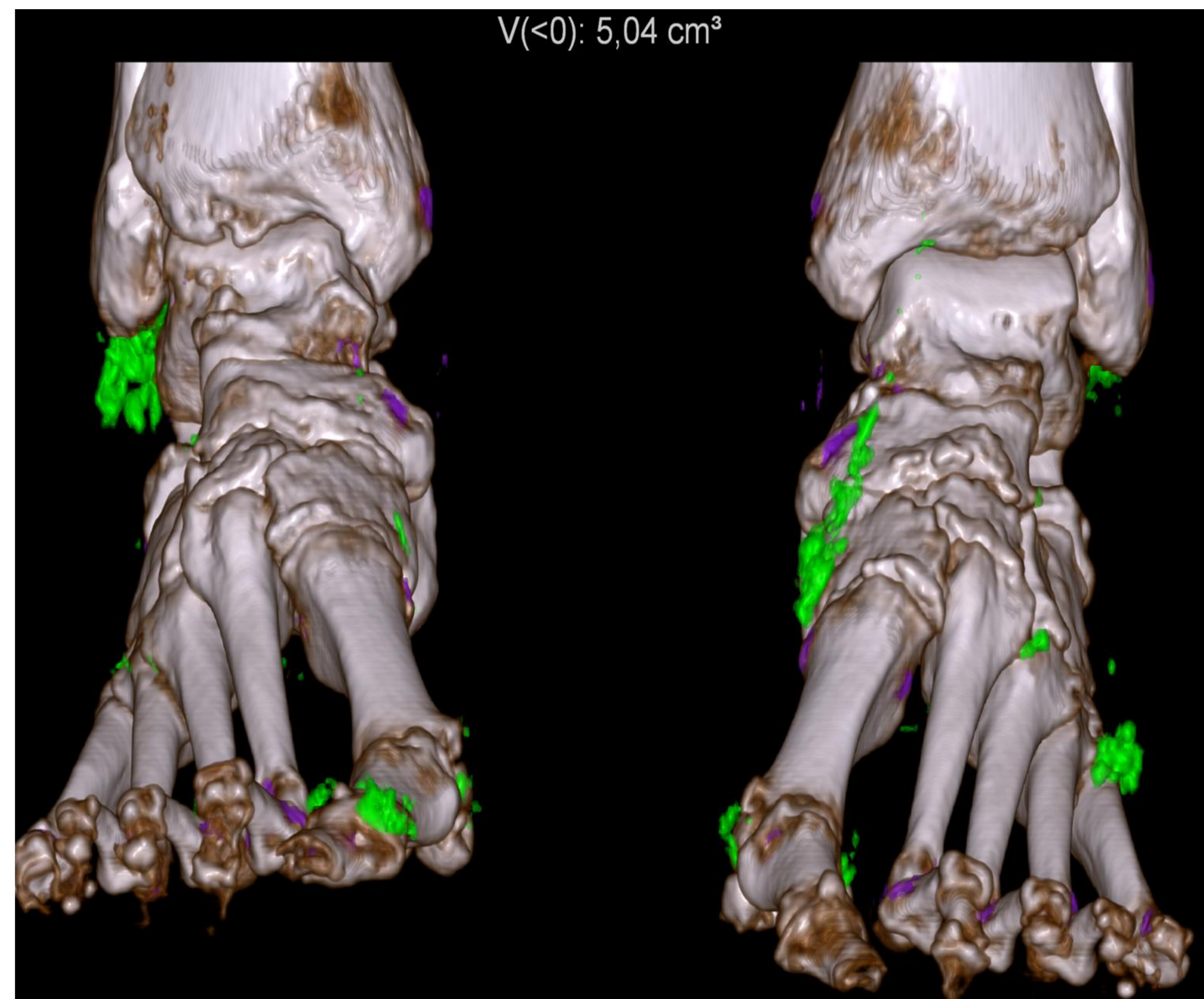
El volumen puede ser usado para valorar la respuesta al tratamiento sistémico.



## CASO #2

Paciente con diagnóstico confirmado por análisis del líquido sinovial (criterio suficiente) de artritis gotosa tofácea crónica.

El estudio DECT muestra depósitos de cristales de ácido úrico de predominio submaleolar lateral bilateral, seno del tarso bilateral, en tendón tibial anterior izquierdo, metatarso-falángico de ambos halux de predominio izquierdo e interfalángica distal del hallux del pie derecho.



El DECT ha sido útil para confirmar la presencia de depósitos de ácido úrico y medir un volumen aproximado.

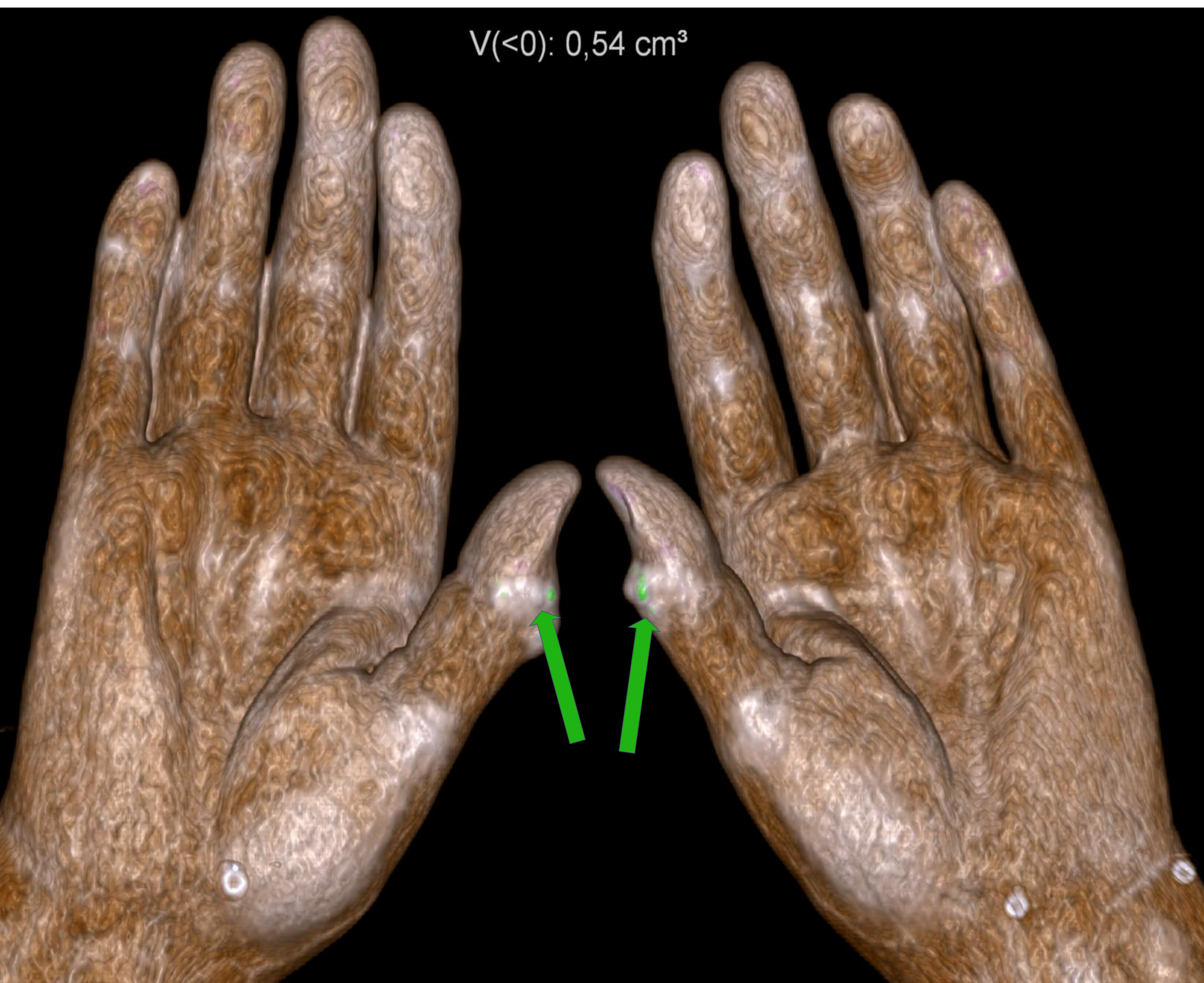
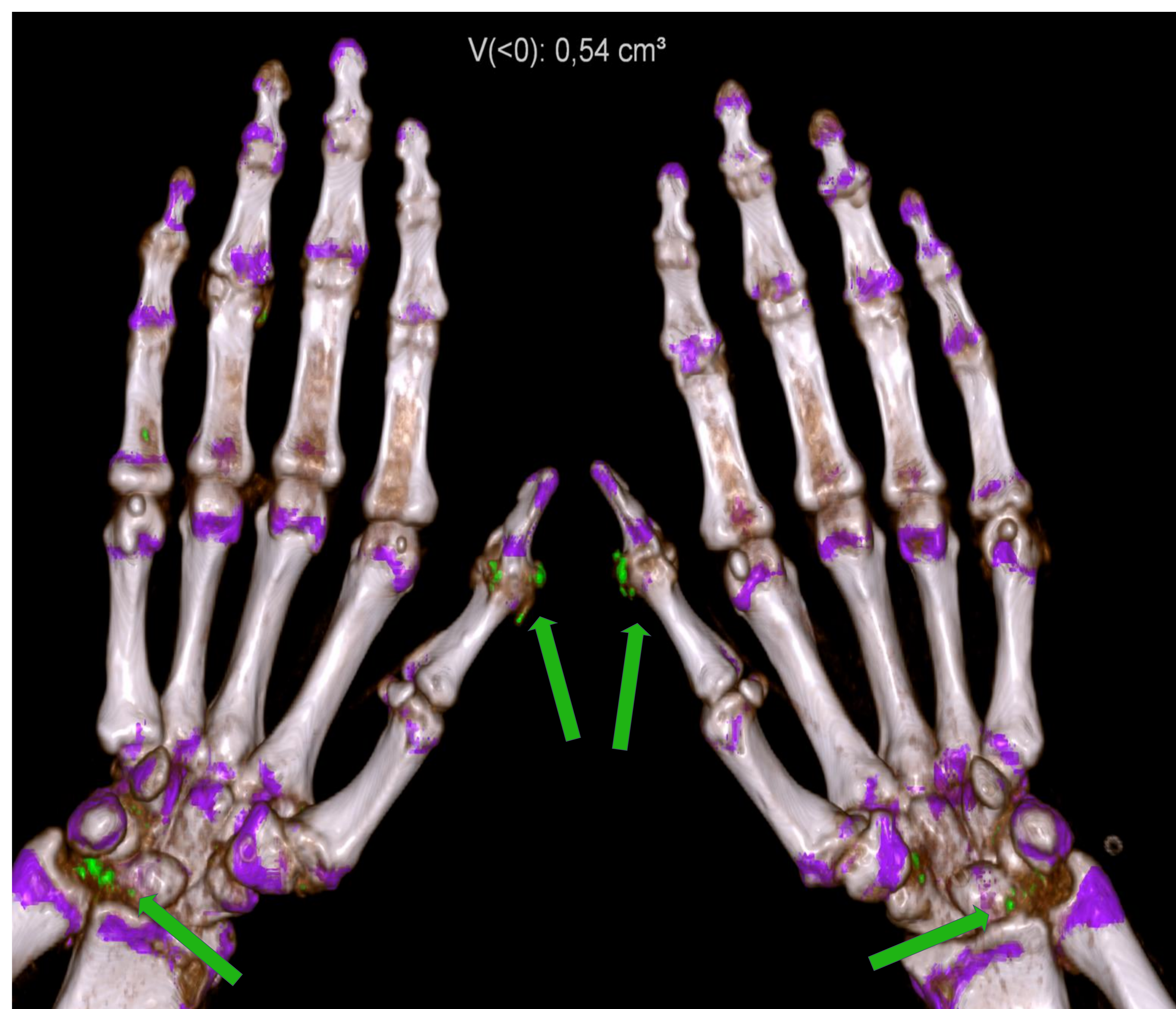
El volumen puede ser usado para valorar la respuesta al tratamiento sistémico.



## CASO #3

Paciente con clínica y ecografía compatible con artritis gotosa con tofos en manos y pies, sin confirmación por análisis del líquido sinovial.

Se realiza DECT que muestra depósitos de cristales de ácido úrico (flechas verdes) de predominio interfalángica distal de 1º dedo de ambas manos y en la muñeca.



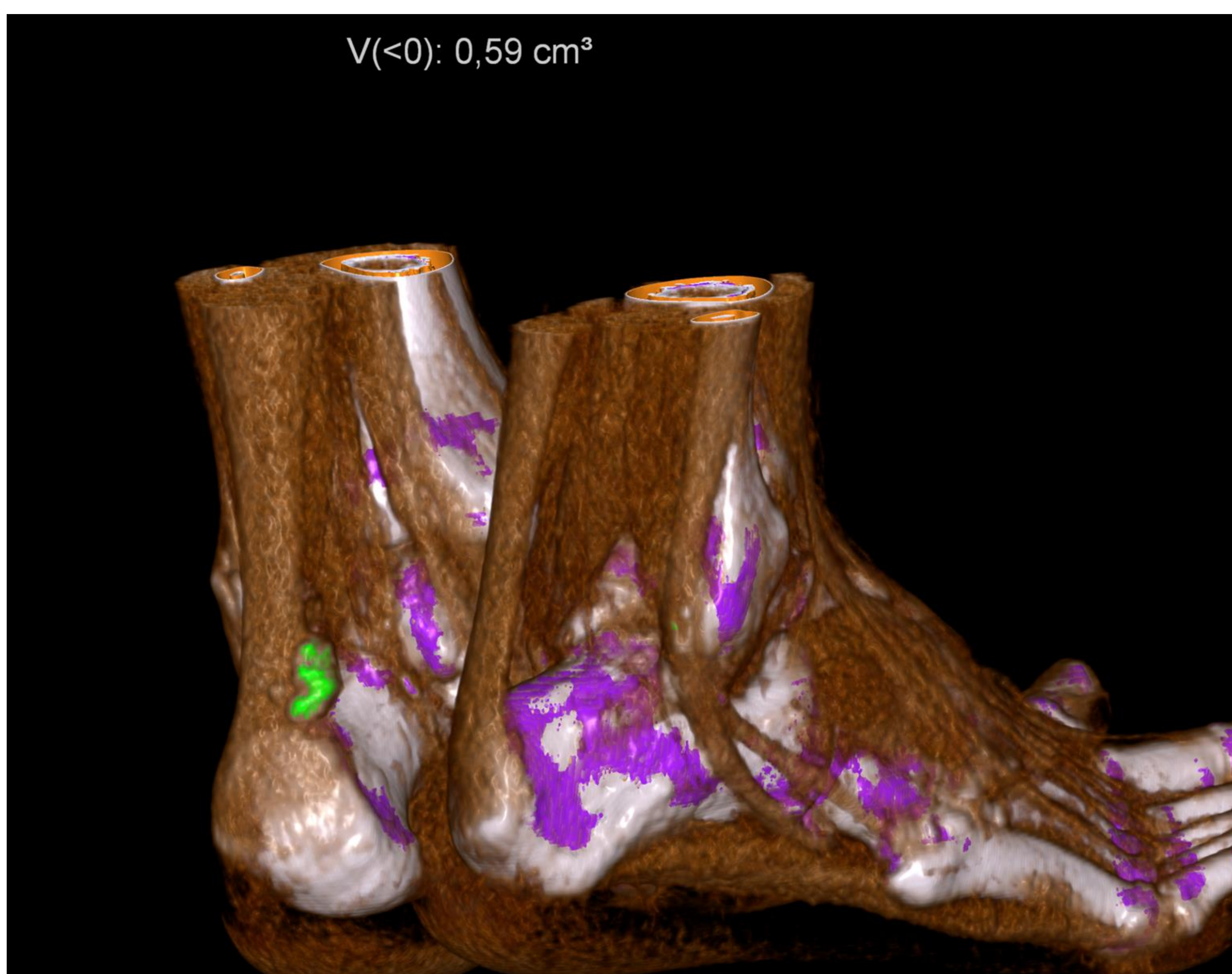
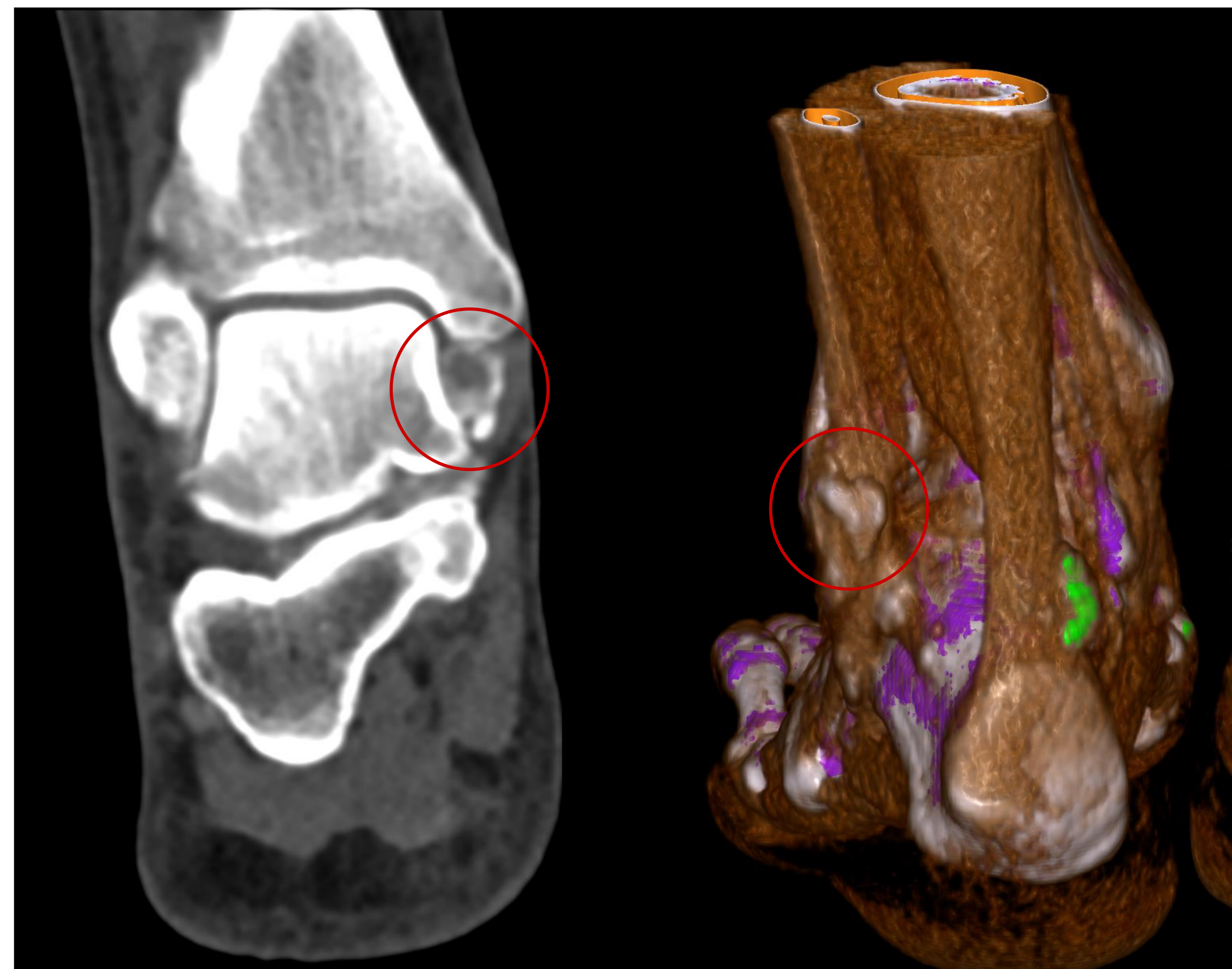
El DECT ha sido útil para identificar la presencia de depósitos de ácido úrico y así confirmar el diagnóstico definitivo de gota dado que cumple con los criterios EULAR/ACR.



## CASO #4

Paciente con antecedente de enfermedad por depósito de pirofosfato cálcico dihidratado, con nueva clínica aguda compatible de gota pero con urato plasmático por debajo del nivel de saturación.

La DECT de tobillos muestra depósitos de **CPPD** en ambos ligamentos colaterales del tobillo (círculos rojos) y depósitos de **MSU** en el tendón de Aquiles.

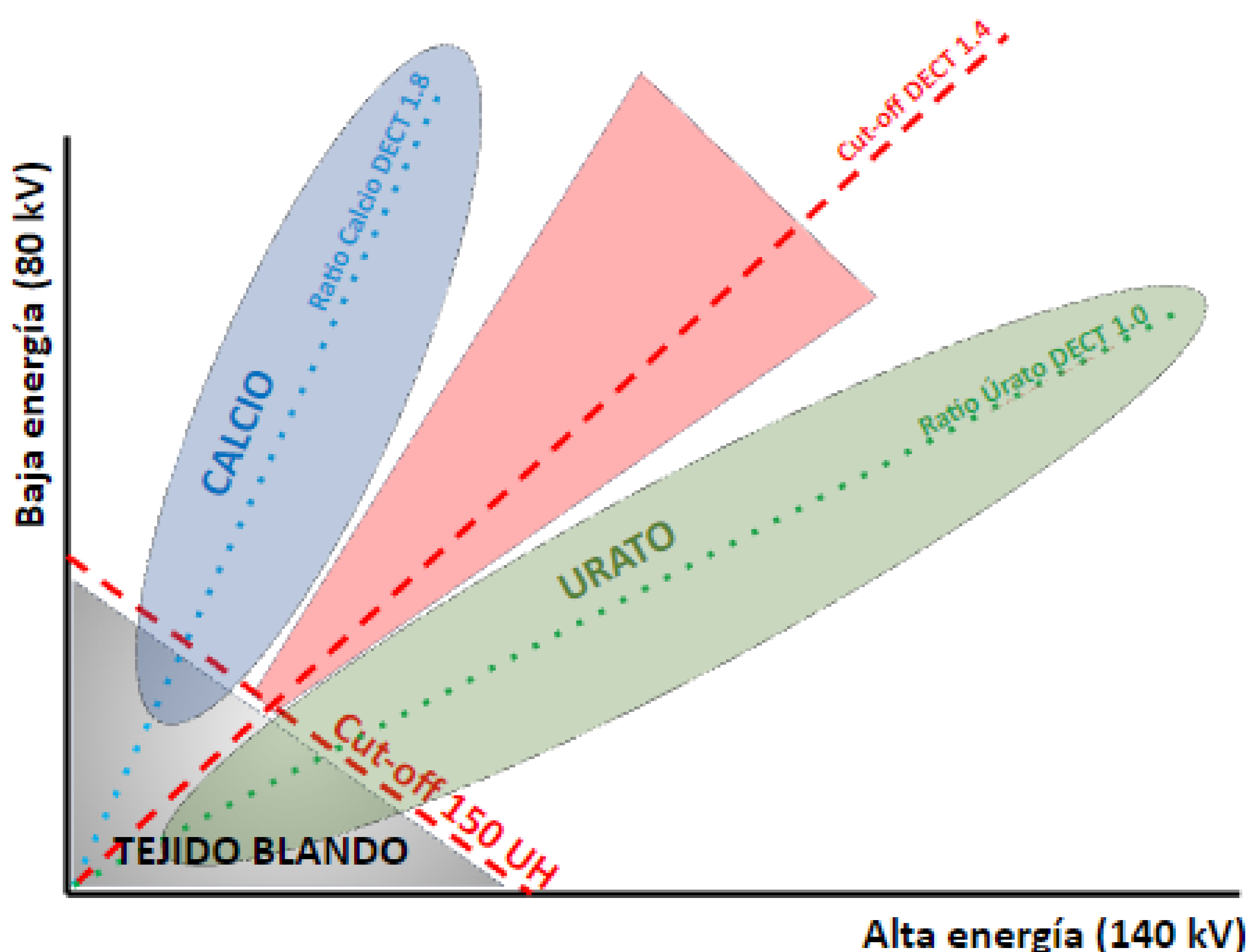
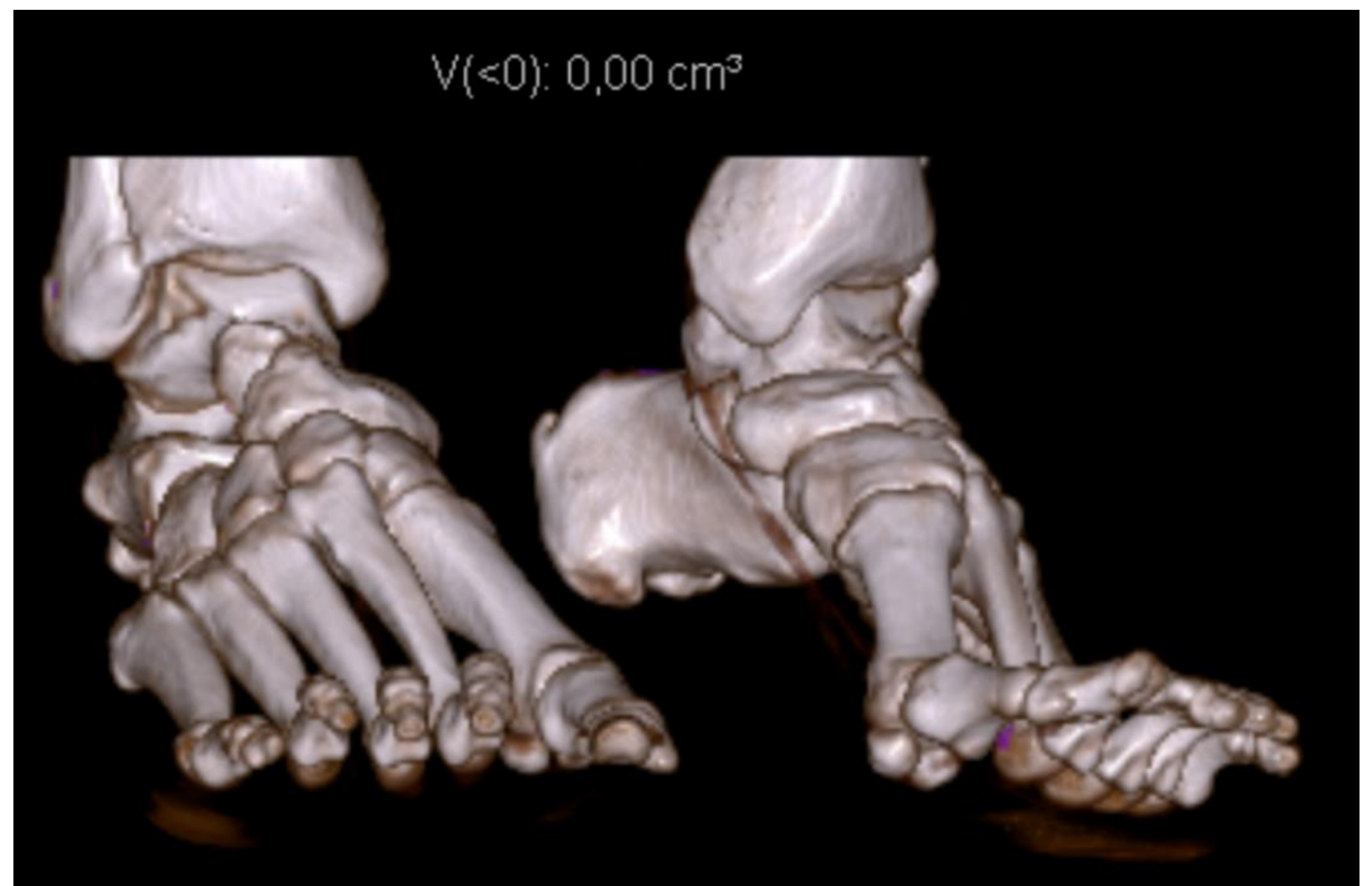


El DECT ha sido útil para confirmar la presencia de depósitos de **CPPD** y, de forma incidental, identificar los depósitos de **MSU** en un paciente sin sospecha clínica de gota.

## CASO #5 ¿FALSO NEGATIVO? - Non-dense deposits

Paciente con criterios clínicos (monoartritis de pies y rodillas) muy sugestivos de artritis gotosa sin depósitos visualizado por ecografía.

El DECT no identifica depósitos de ácido úrico.

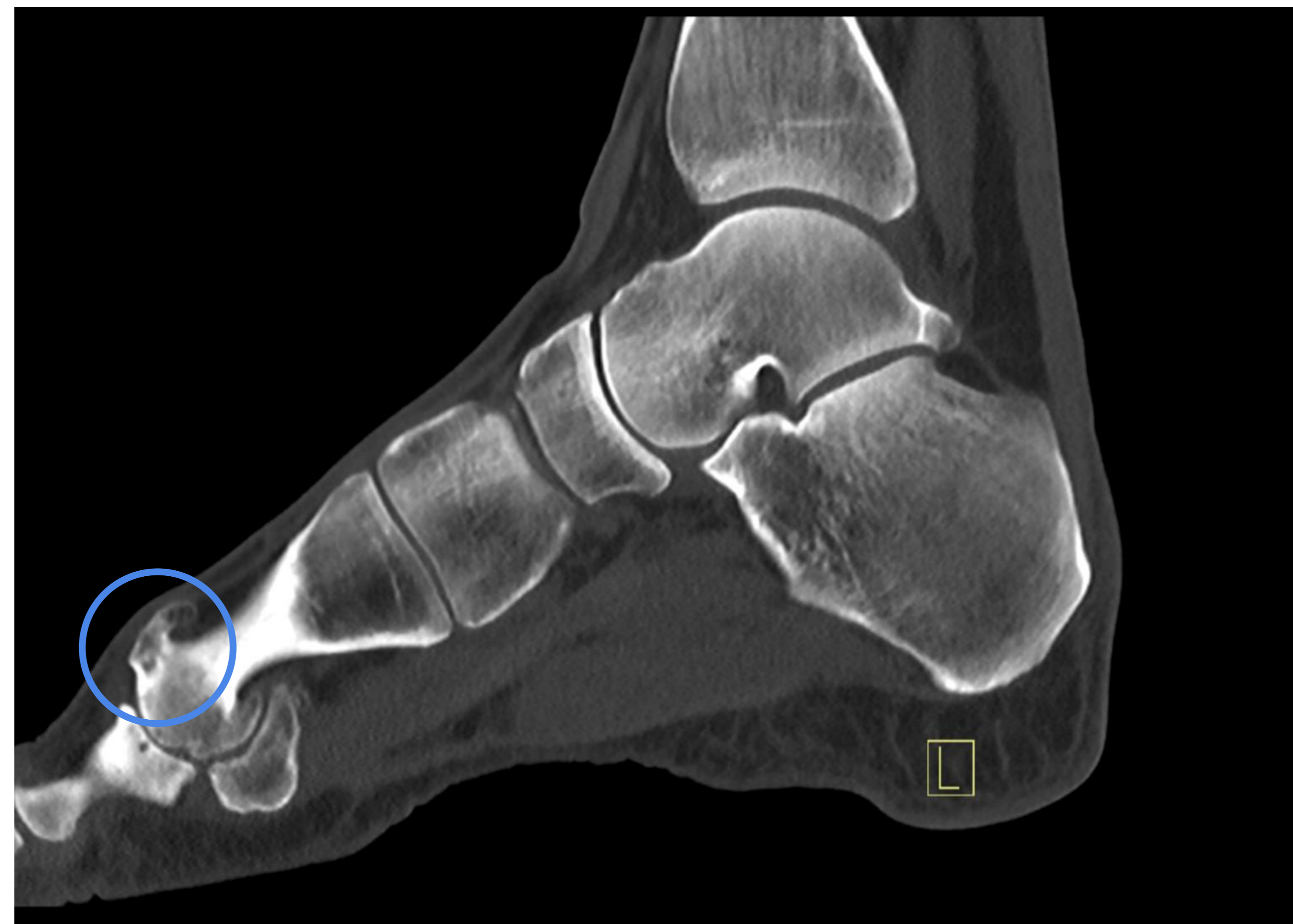


No puede descartarse que el paciente tenga depósitos de MSU no densos (intersección ZONA GRIS + VERDE en el gráfico) o que escapen a la resolución TC. La sensibilidad del DECT es menor en fases iniciales de la enfermedad. Podría intentarse ajustar la resolución y la ratio para aumentar la sensibilidad)

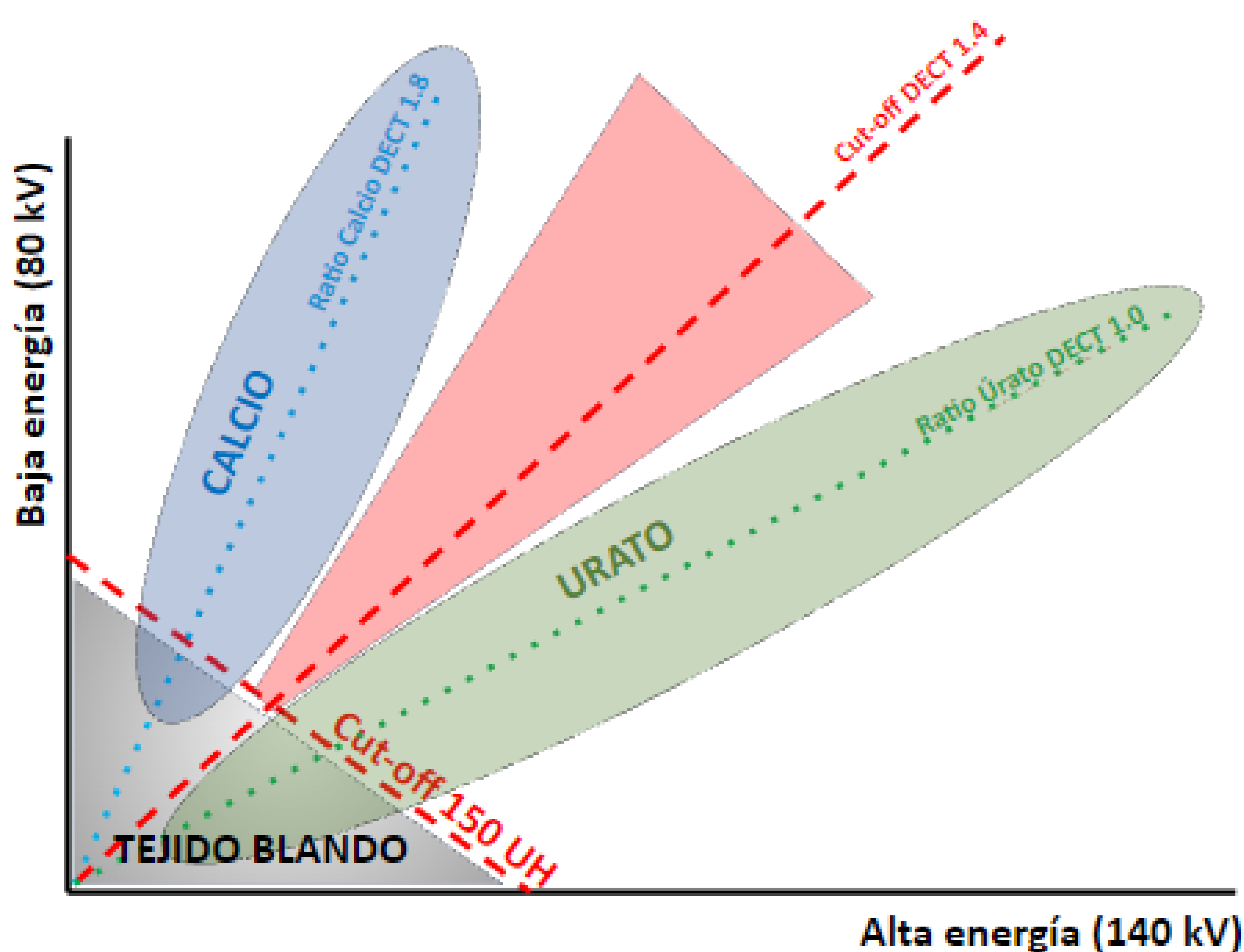
## CASO #6 FALSO NEGATIVO - Calcium containing material

Paciente con criterios clínicos y ecográficos de artritis gotosa con presencia de tofos a nivel de la primera articulación metatarso-falángica derecha.

El DECT no identifica depósitos de ácido úrico. A nivel de la primera articulación metatarso-falángica derecha se observa una depósito calcificado (círculo azul, imagen en la derecha).



El paciente cumple los criterios de artritis gotosa pero el DECT resulta negativo. Una posible explicación sería la calcificación parcial de los tofos con lo que no cumplirían los parámetros físico-matemáticos para que ser codificados como verdes (ZONA ROJA en el gráfico).



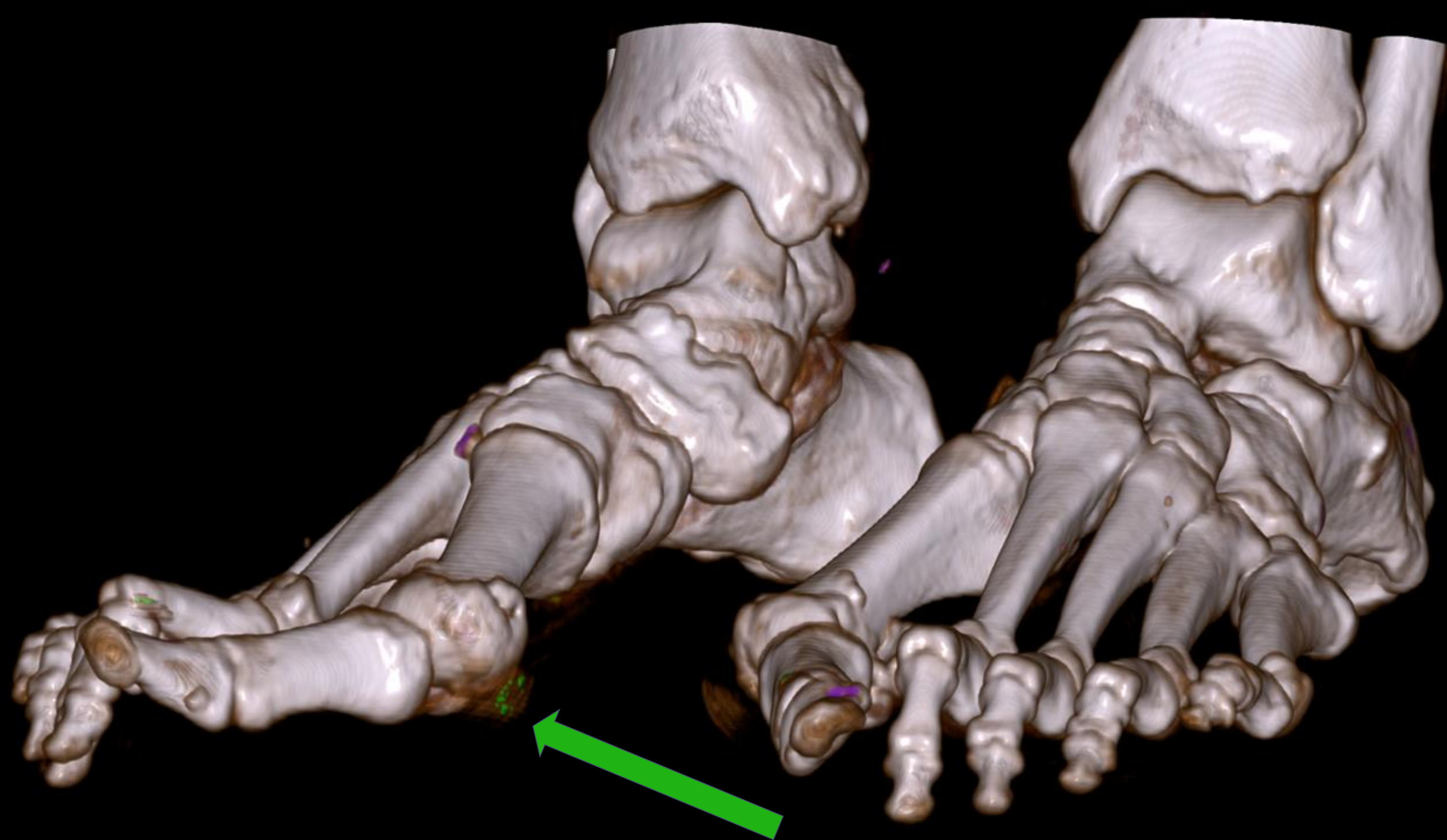
## CASO #7 FALSO POSITIVO - Queratina



DECT de tobillos y pies que muestra la presencia de un artefacto en lecho ungueal del primer dedo, de aproximadamente 0,02 cc. Con la reconstrucción 3D con tejidos blandas se aprecia la distribución en un sitio no compatible con los depósitos de ácido úrico.

## CASO #8 FALSO POSITIVO - Queratina

V(<0): 0,02 cm<sup>3</sup>



V(<0): 0,02 cm<sup>3</sup>



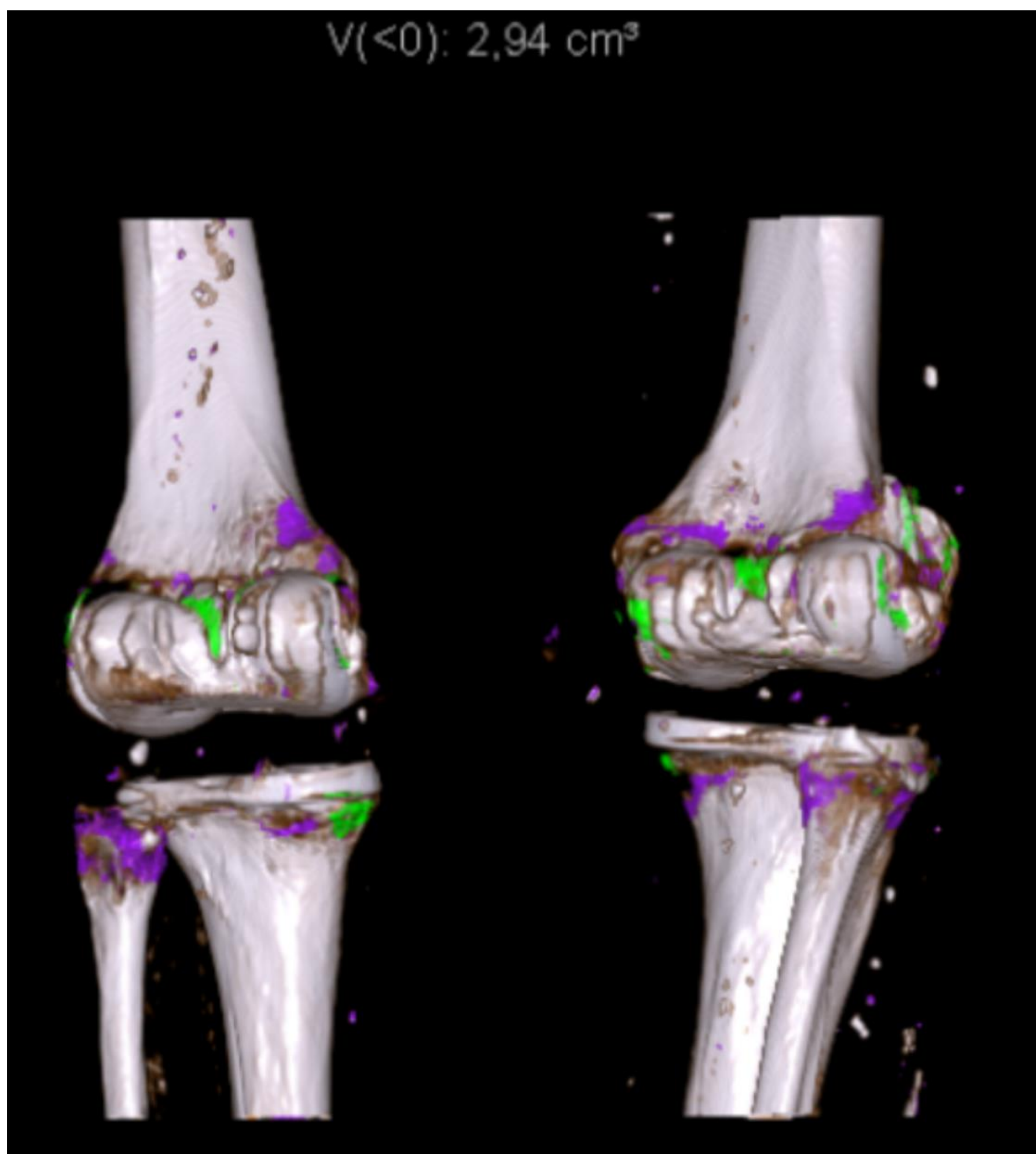
DECT de tobillos y pies que muestra la presencia de un artefacto cutáneo por hiperqueratosis en la planta del pie en la región del primer dedo, de aproximadamente 0,02 cc. Con la reconstrucción 3D con tejidos blandos se aprecia la distribución en un sitio no compatible con los depósitos de ácido úrico.

## CASO #9 FALSO POSITIVO - Image noise artefacts



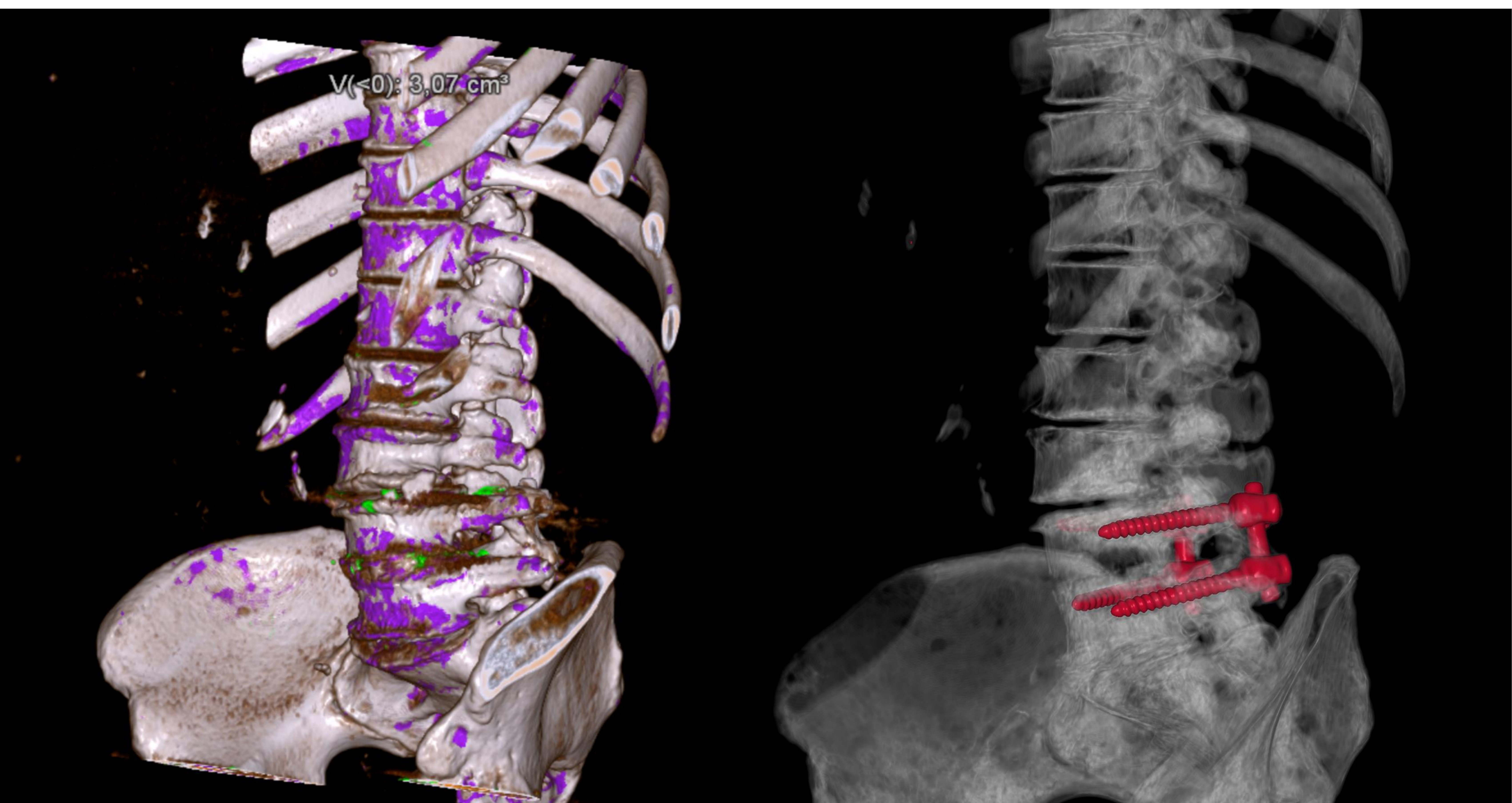
DECT de tobillo con sospecha de fractura trimaleolar que muestra la presencia de un artefacto de aproximadamente 0,01 cc. Con la reconstrucción 3D se aprecia la localización a nivel de yeso.

## CASO #10 - FALSO POSITIVO - Artefacto de endurecimiento del haz de RX



DECT de rodillas con sospecha de fractura periprotésica que muestra la presencia de artefactos con un volumen total aproximado de 3 cc. Comparando la reconstrucción 3D con la placa simple de rodillas se aprecia la localización a nivel periprotésico. Son atribuibles a artefacto de refuerzo del haz de rayos.

## CASO #11 - FALSO POSITIVO - Artefacto de endurecimiento del haz de RX



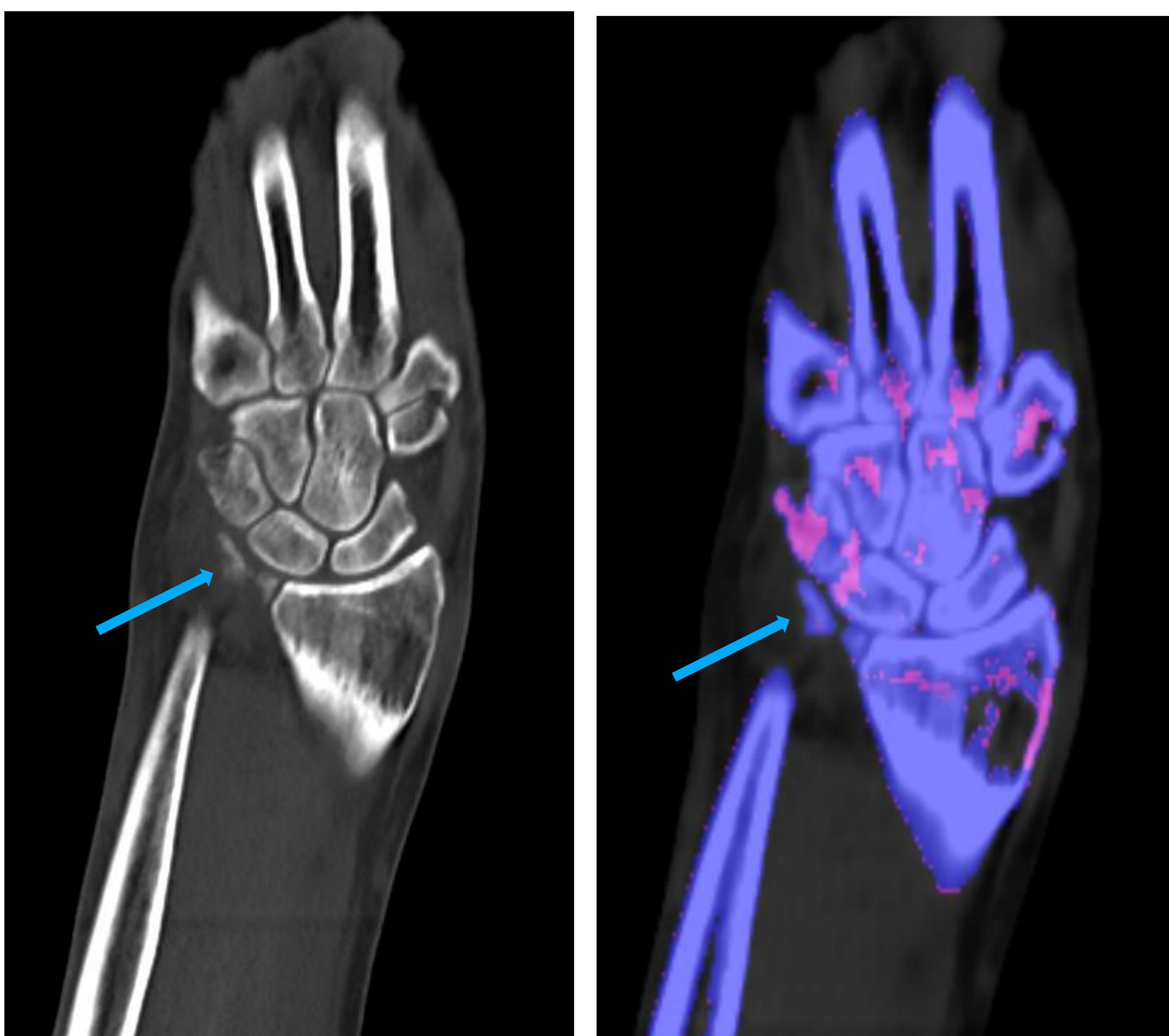
DECT de columna con sospecha de fractura aplastamiento de cuerpos vertebrales que muestra la presencia de un artefacto de aproximadamente 3 cc. Con la reconstrucción 3D y ventana metal (en rojo) se aprecia la localización a nivel de la artrodesis vertebral. Son atribuibles a artefacto de refuerzo del haz de rayos.



## CASO #12 - ¿Y LA CPPD?

Sospecha de artritis gotosa de extremidades superiores con ecografía que demuestra la presencia de depósitos de cristales.

El estudio dual muestra depósitos de **CPPD** en fibrocartílago triangular del carpo derecho (flecha azul) sin depósitos de cristales de urato monosódico (volumen 0).



La DECT ha sido útil para descartar la presencia de depósitos de ácido úrico y confirmar la presencia de depósitos de **CPPD** (flecha azul).

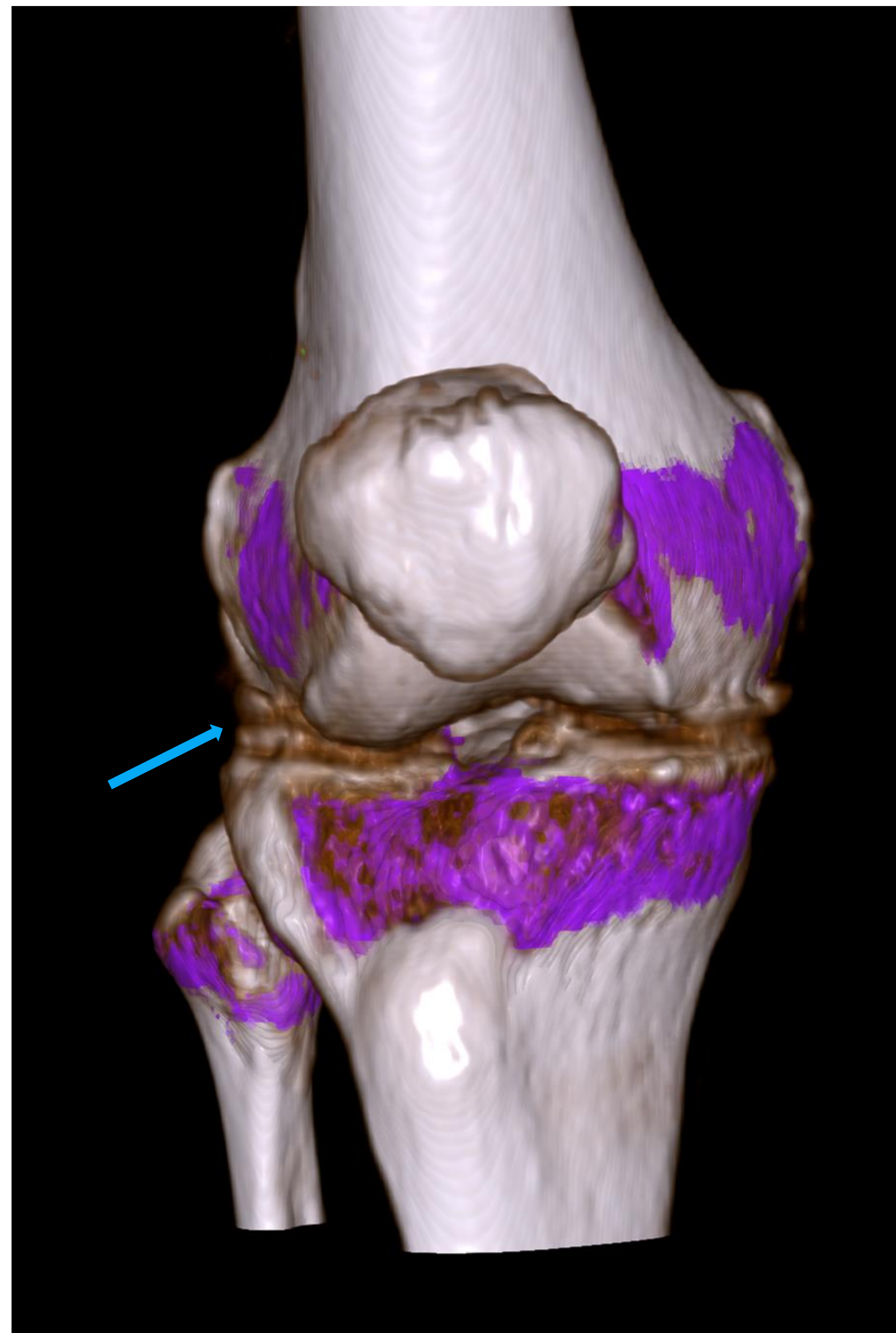
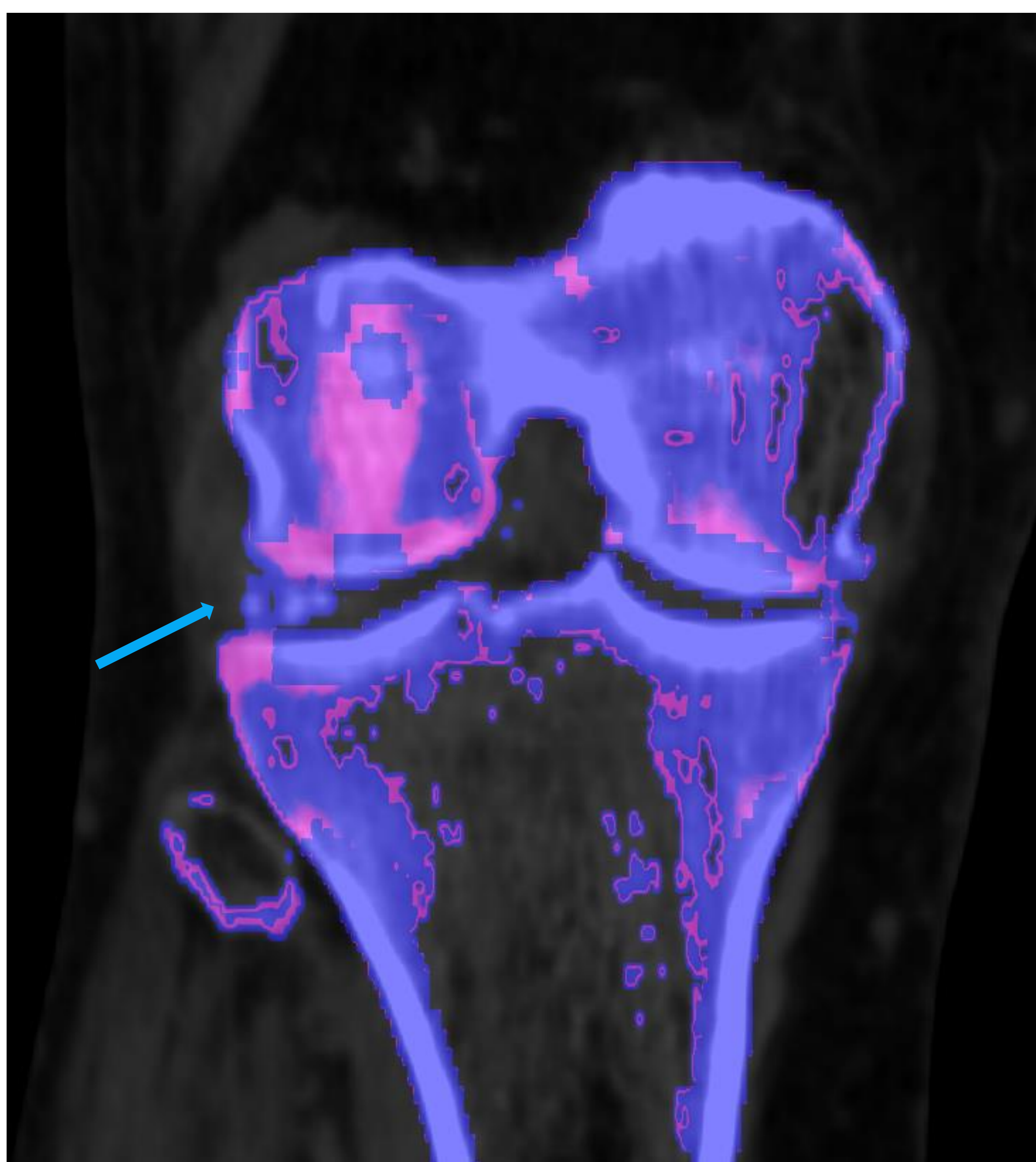
La presencia de calcio se codifica como color azul y permite descartar que sean cristales de ácido úrico.



## CASO #13 - ¿Y LA CPPD?

Sospecha clínica y ecográfica de condrocalcinosis de ambas rodillas.

El DECT muestra depósitos de **CPPD** predominantemente en meniscos laterales y margen posterior de cóndilos femorales internos de ambas rodillas.



La DECT ha sido útil para descartar la presencia de depósitos de ácido úrico y confirmar la presencia de depósitos de **CPPD** (flecha azul).

La presencia de calcio se codifica como color azul y permite descartar que sean cristales de **MSU**.



# Conclusiones

- La DECT es una herramienta rápida, segura y con alta precisión para el diagnóstico diferencial y seguimiento de las enfermedades por depósito de cristales, si bien no está exenta de falsos positivos y negativos.
- Aún es necesario profundizar en el diagnóstico de la gota en fases tempranas, en la de diferenciación precisa de los cristales de pirofosfato de calcio de los de hidroxapatita de calcio y en la determinación de su volumen.



# Bibliografía

- Neogi, Tuhina et al. "2015 Gout Classification Criteria: an American College of Rheumatology/European League Against Rheumatism collaborative initiative." *Arthritis & rheumatology* (Hoboken, N.J.) vol. 67,10 (2015): 2557-68. doi:10.1002/art.39254
- Tedeschi, Sara K et al. "Imaging Features of Calcium Pyrophosphate Deposition Disease: Consensus Definitions From an International Multidisciplinary Working Group." *Arthritis care & research* vol. 75,4 (2023): 825-834. doi:10.1002/acr.24898
- Rajiah, Prabhakar et al. "Dual-Energy CT in Musculoskeletal Imaging: What Is the Role Beyond Gout?." *AJR. American journal of roentgenology* vol. 213,3 (2019): 493-505. doi:10.2214/AJR.19.21095
- Chou, Hong et al. "Dual-energy CT in gout - A review of current concepts and applications." *Journal of medical radiation sciences* vol. 64,1 (2017): 41-51. doi:10.1002/jmrs.223
- Schlesinger N. Diagnosis of Gout: Clinical, laboratory, and radiologic findings. *Am J Manag Care.* (2005); 11:S443-S450.
- Dalbeth N, Collis J, Gregory K, Clark B, Robinson E, McQueen FM. Tophaceous joint disease strongly predicts hand function in patients with gout. *Rheumatology online* 11/ 3/2007 doi:10.1093/rheumatology/kem246
- Christiansen, Sara Nysom et al. "Dual-energy CT in gout patients: Do all colour-coded lesions actually represent monosodium urate crystals?." *Arthritis research & therapy* vol. 22,1 212. 11 Sep. (2020), doi:10.1186/s13075-020-02283-z
- Maria Sotniczuk et al. "The Clinical Utility of Dual-Energy Computed Tomography in the Diagnosis of Gout—A Cross-Sectional Study", *J. Clin. Med.* (2022), 11, 5249. <http://doi.org/10.3390/jcm11175249>
- Maria V. Onoyko et al. The role of dual-energy computed tomography in the diagnosis of gout and other crystalline arthropathies: A review. *Digital Diagnostics* Vol. 4 (2) 2023. doi.org/10.17816/DD322758

