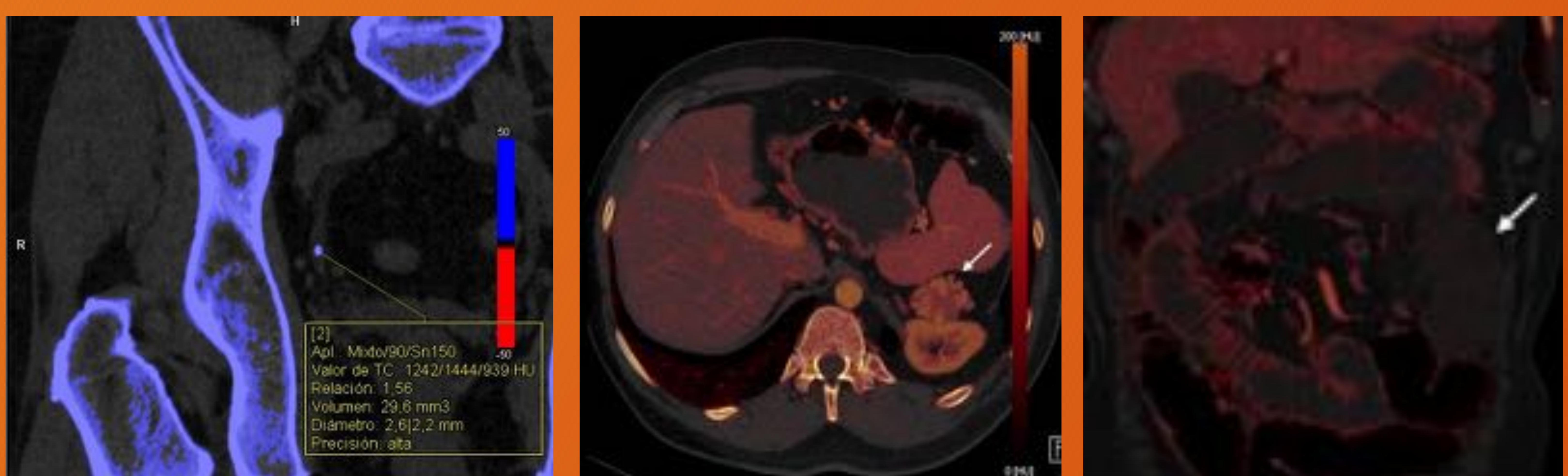


# APORTACIÓN DE LA TOMOGRAFÍA COMPUTARIZADA DE DOBLE ENERGÍA

**Nuevas herramientas en el diagnóstico por imagen de la patología abdominal.**



Alba Igual Rouilleault, Ignacio Soriano Aguadero,  
Francisco J. Mendoza Ferradas, Alberto Paternain  
Nuin, Ignacio González Crespo, Isabel Vivas Pérez

**Clínica Universidad de Navarra, Pamplona.**



**Clínica  
Universidad  
de Navarra**

## OBJETIVOS DOCENTES

- Explicar la técnica de la tomografía computarizada de doble energía (TCDE).
- Exponer sus **ventajas e inconvenientes**.
- Ilustrar y describir sus **principales aplicaciones en patología abdominal**.

# INTRODUCCIÓN

La especialidad de radiología está en constante evolución.

La última generación de equipos de TC incluye un hardware que permite la realización de estudios de doble energía (DE). Esta técnica emplea kilovoltajes que oscilan entre 70-150 kVp y se basa en la diferencia de absorción de bajas y altas energías de radiación por parte de ciertos materiales. La atenuación de los diferentes niveles energéticos del haz de rayos X variará en función de la composición química de cada uno de dichos elementos, obteniéndose información de la composición tisular, además de la anatómica.

# REVISIÓN DEL TEMA

## Principios generales de la TCDE

Cuando un haz de fotones atraviesa un material puede presentar fenómenos de interacción con sus átomos (reduciendo su número o cantidad de energía), lo que se denomina **atenuación**.

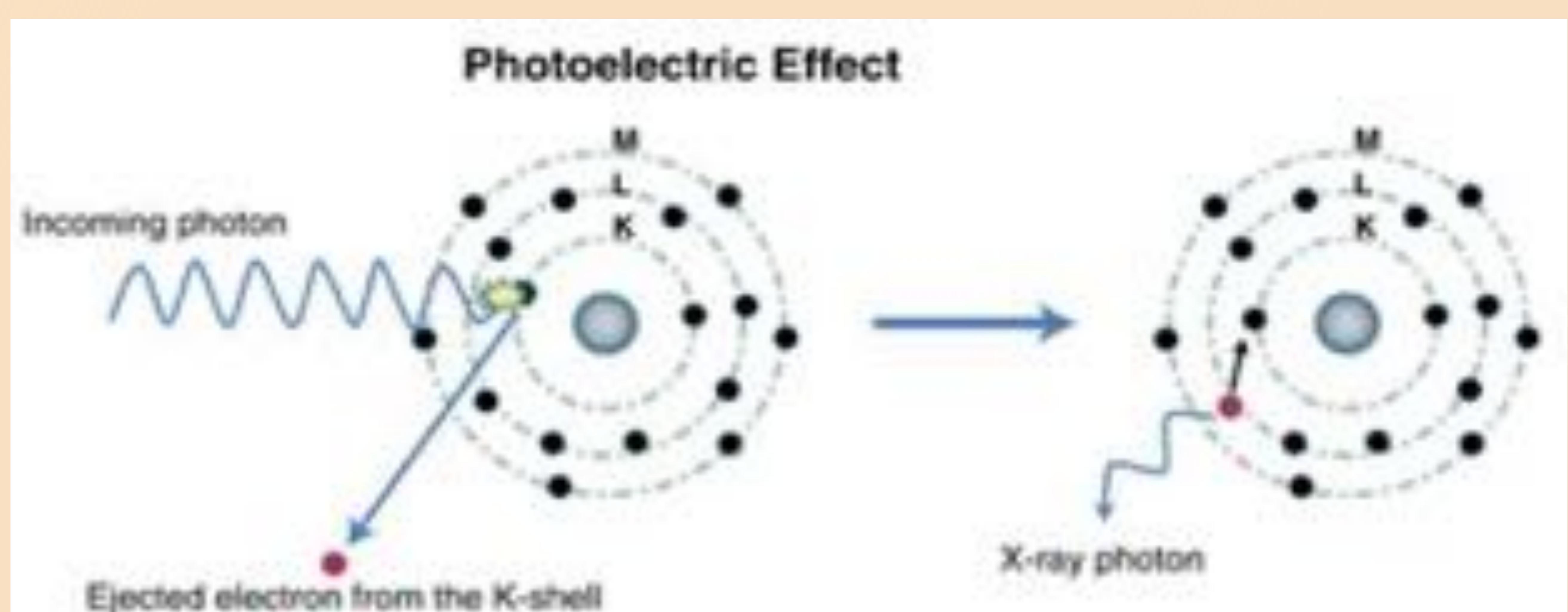
Las imágenes obtenidas por TC dependen del coeficiente de attenuación de cada tejido, medido en unidades Hounsfield (UH) y determinado por tres factores:

- el **número atómico efectivo del material (Z)**.
- la **densidad física**.
- la **energía del haz de rayos X (keV) que depende del potencial aplicado del tubo (kV)**.

# REVISIÓN DEL TEMA

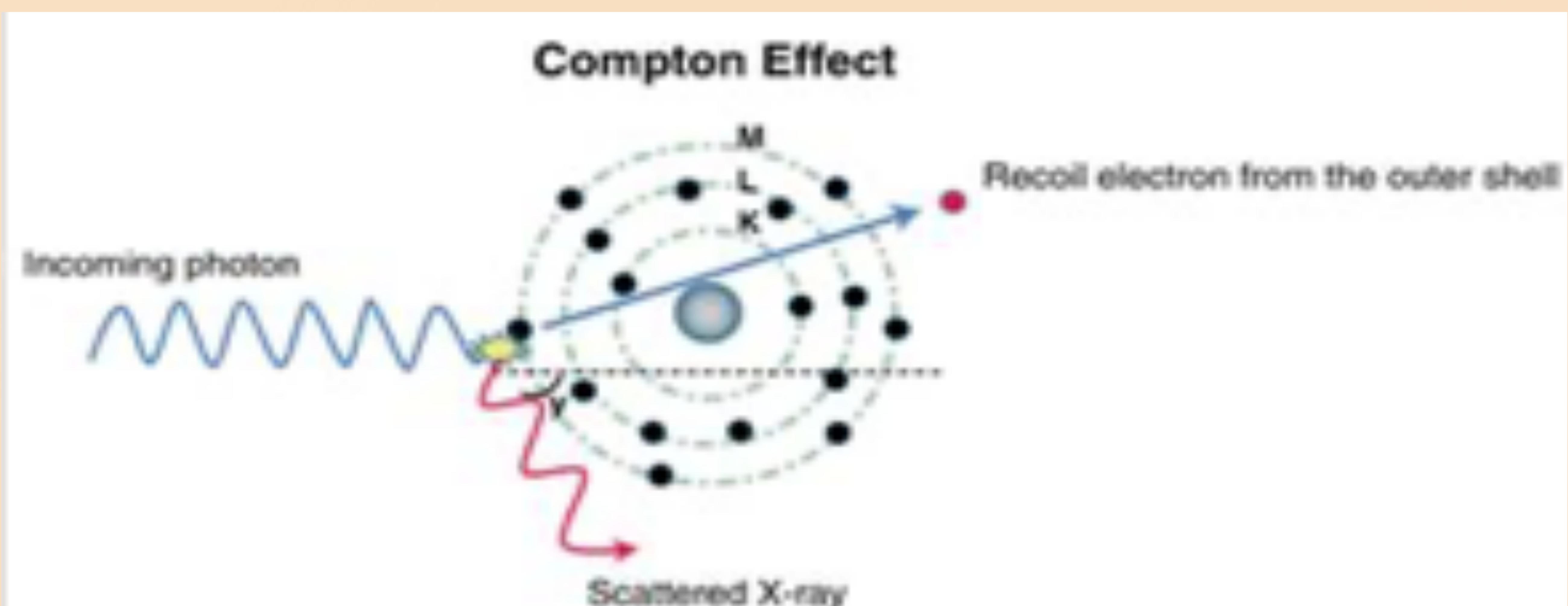
## Principios generales de la TCDE

Los fotones interactúan con la materia mediante dos efectos físicos fundamentales:



Ref: Illustration of imaging.onlinejacc.org

**1. Efecto fotoeléctrico:** predomina cuando sustancias con números atómicos altos (yodo, calcio) son expuestas a bajo kilovoltaje. Esto se manifiesta como una alta atenuación, mejorando la relación señal-ruido (realce de contraste), pero incrementando el ruido de la imagen.



Ref: Illustration of imaging.onlinejacc.org

**2. Efecto Compton:** prevalece en elementos con bajo número atómico (hidrógeno, oxígeno), no mostrando diferencias sustanciales en su coeficiente de atenuación cuando se exponen a diferentes energías. La atenuación es menor disminuyendo tanto el ruido de la imagen como la señal-ruido.

# REVISIÓN DEL TEMA

## Principios generales de la TCDE

La TC de energía única adquiere las imágenes con una energía entre 80 y 120 kVp, para optimizar el equilibrio entre contraste y ruido.

Con la TCDE, las imágenes se adquieren con dos espectros de energía diferentes: bajo (80-100 kVp) y alto (140-150 kVp). La diferente atenuación de los materiales con números atómicos altos expuestos a bajo kilovoltaje es aprovechada por la TCDE para obtener información adicional.

### Tipos de TCDE:

#### a) TC de doble fuente:

Cuenta con dos tubos de rayos X (doble fuente) y dos sistemas de detectores montados perpendicularmente en un gantry. Los tubos funcionan a diferentes voltajes (80 kVp y 150 kVp).



- Energía baja (80 kVp)
- Energía alta (150 kVp)

# REVISIÓN DEL TEMA

## Principios generales de la TCDE

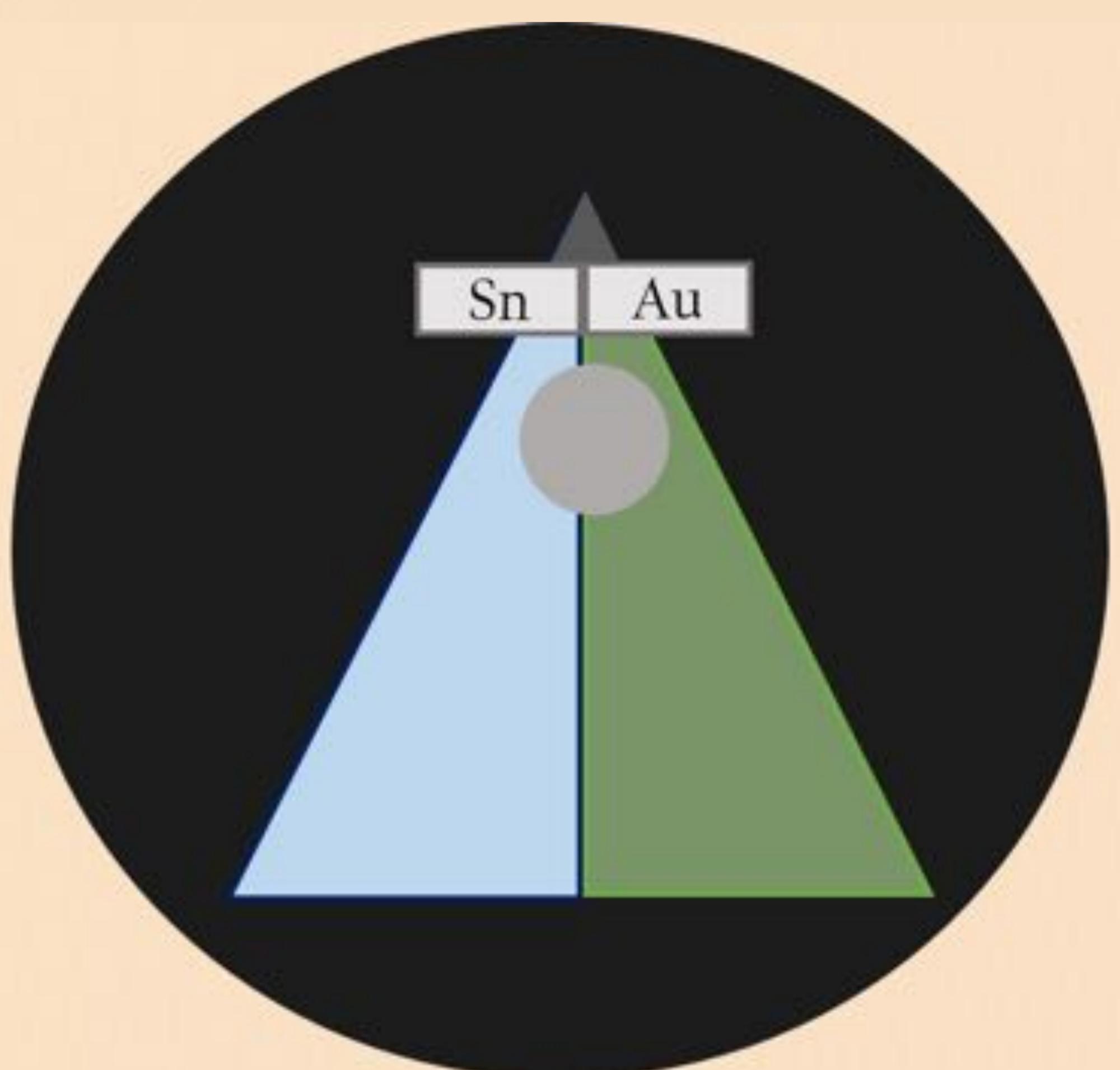
### b) TC de fuente única:

Existen tres sistemas diferentes de generación de los dos niveles energéticos:

- Energía baja (80 kVp)
- Energía alta (150 kVp)

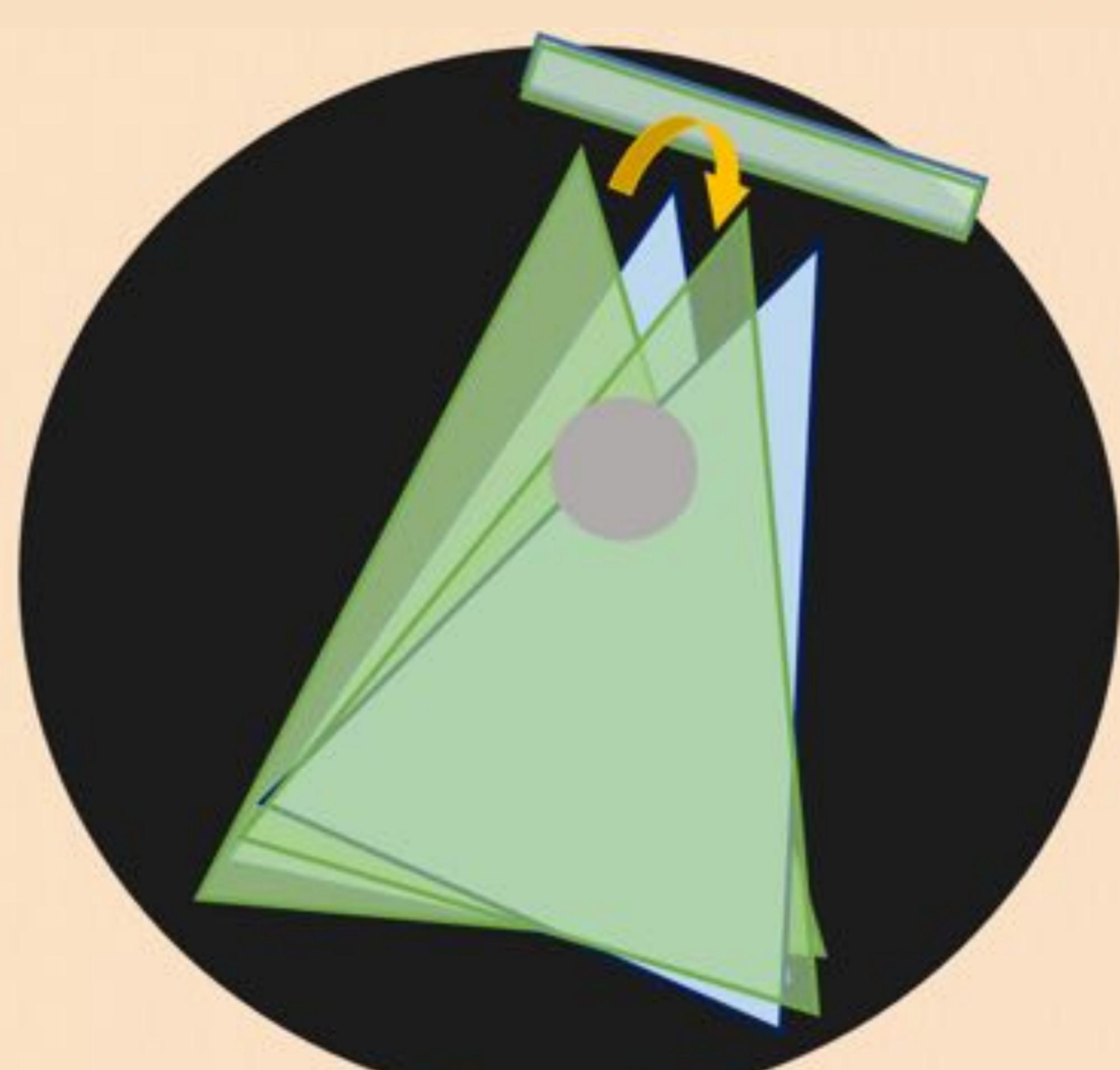
- doble haz

Tiene una única fuente de rayos X pero cuenta con un filtro (*split filter*) de oro y estaño con el que divide el haz de fotones adquiriendo de esta forma datos de alta y baja energía simultáneamente.



- comutación rápida del kilovoltaje

Consta de un tubo de rayos X y un sistema único de detectores. Durante el giro, el tubo produce de forma alternativa espectros de baja y alta energía (80/140 kVp).



- detector multicapa o sándwich

Cuenta con un tubo de rayos X que emite un voltaje constante de 120 kVp. La energía dual deriva de dos capas de detectores: la superior, que absorbe los fotones de baja energía, y la inferior que absorbe los de alta energía.



# REVISIÓN DEL TEMA

## Post-procesado

El post-procesado de los datos brutos adquiridos con la TCDE permite obtener tres tipos de imágenes:

1. **Imagen mezcla o ponderada (no material específica)**. Se combinan los datos brutos obtenidos con alta y baja energía para crear imágenes equivalentes a la TC convencional.
2. **Imagen virtual monoenergética (energía específica)**. Generadas mediante una simulación de los valores de UH esperados si el paciente se hubiera expuesto a un haz de rayos X de un determinado nivel energético (monocromático). El rango de espectro incluye valores entre 40-190 KeV.  
Las imágenes con bajo KeV mejoran el realce de contraste pero aumentan el ruido. Las imágenes con altos valores de KeV tiene menor ruido y menor realce de contraste, pudiendo ser empleados para suprimir la captación de yodo o eliminar artefactos de metal.

# REVISIÓN DEL TEMA

## Post-procesado



**1. Post-procesado de imagen mezcla o ponderada.** Dicho algoritmo emplea el 50% de los datos brutos de alta energía y el 50% de los de baja energía obteniendo como resultado final una imagen de energía intermedia (120 kVp), similar a la TC convencional.



**2a. Post-procesado de imagen virtual monoenergética de baja energía (80 kVp).** Se aprecia mayor realce de contraste pero un aumento de la señal-ruido.



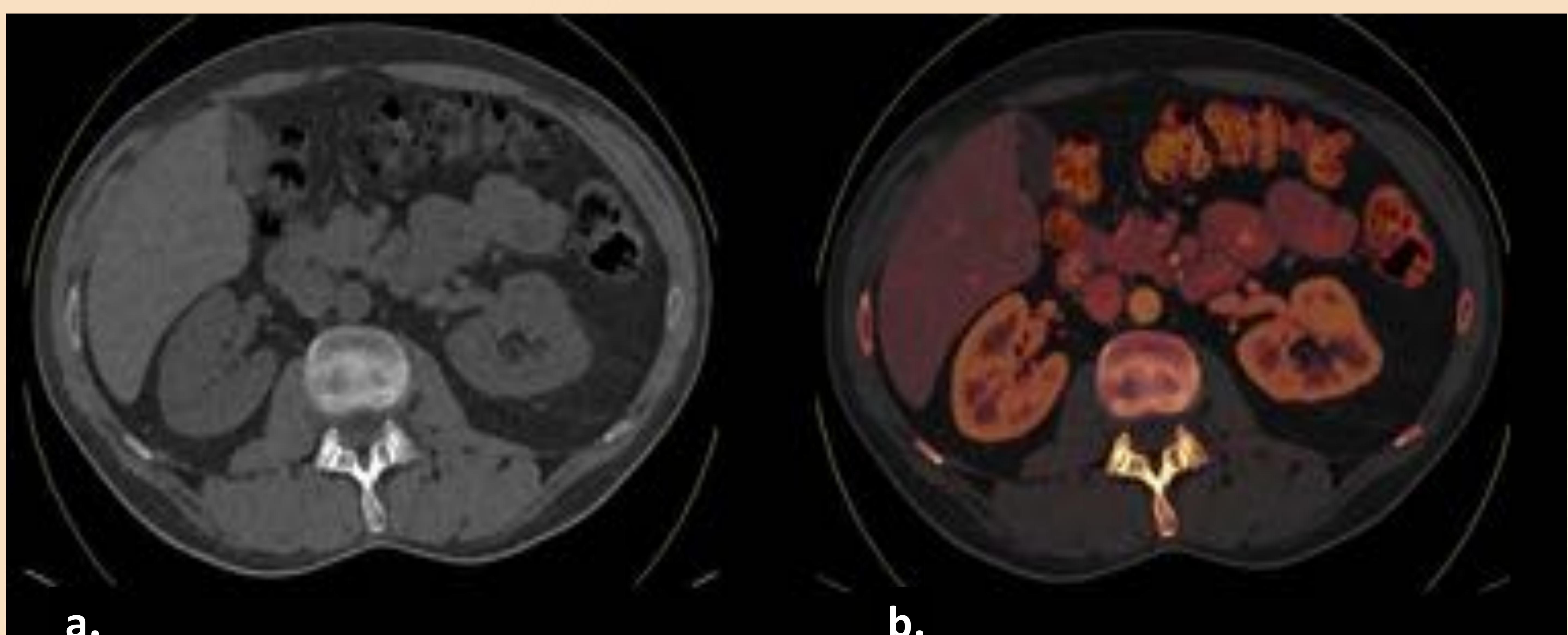
**2b. Post-procesado de imagen virtual monoenergética de alta energía (150 kVp).** Presenta menor señal- ruido pero también menor realce de contraste.

## REVISIÓN DEL TEMA

### Post-procesado

3. Imagen material específica (reconstrucción en pares). Diferencia según materiales para la creación de diferentes tipos de imágenes:

- **Mapa de agua o imagen virtual no contrastada (VNC).** Permite obtener una adquisición virtual simple sin contraste permitiendo eliminar la adquisición sin contraste de los estudios convencionales (a).
- **Mapas de yodo.** Superpone la distribución de la captación de yodo en el mapa de imagen VNC (b).



a.

b.

Descomposición específica de materiales mostrando cortes axiales de imágenes VNC (a) y de un mapa de yodo (b).

- **Sustracción ósea** o imágenes virtuales con sustracción del calcio (VNNCa).
- **Ánalysis de litiasis renales.**

# REVISIÓN DEL TEMA

La TCDE permite adquirir imágenes de gran calidad con una dosis de radiación igual o incluso menor a la TC convencional gracias a los siguientes factores:

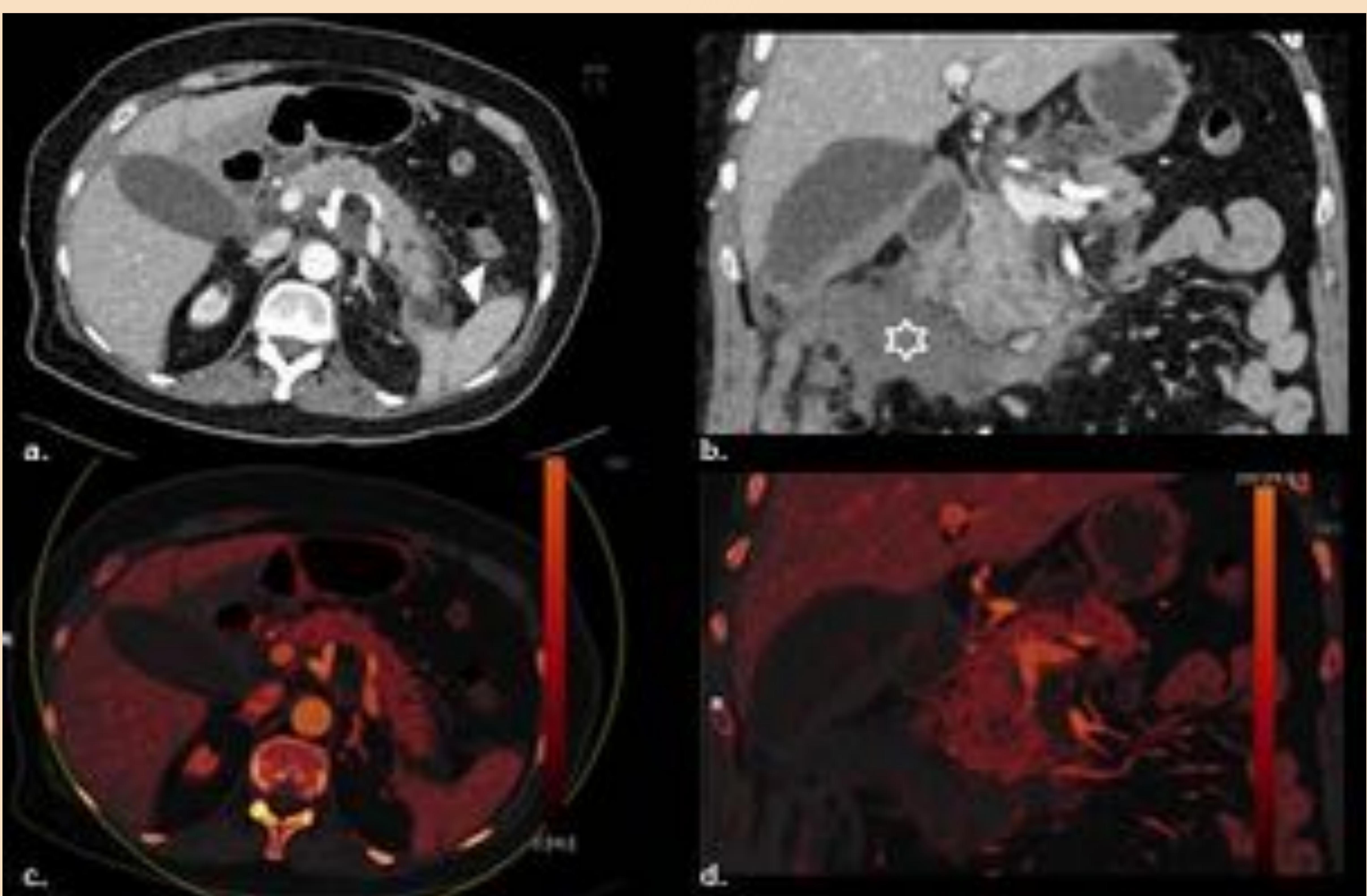
- mayor **rapidez de adquisición** con reducción del tiempo de exposición.
  - generadores más potentes que permiten adquirir proyecciones empleando niveles de energía cada vez más bajos kV (**técnica de bajo kV**).
  - evolución del **software de reconstrucción iterativa** para reducir el ruido generado en las adquisiciones de bajo kV.
  - mejoría de la **sensibilidad y rapidez** de respuesta de los **detectores** permitiendo su estimulación con menor cantidad de radiación y un procesamiento más veloz de la información recogida.
  - **mejor diferenciación espectral** que optimiza la sustracción de materiales permitiendo sustituir la fase sin contraste de los protocolos multifásicos por la VNC.
  - sistemas de **control de la radiación** -Care dose mA (control automatizado de la dosis de radiación en base al topograma) y del **kilovoltaje-Care kV**.

# REVISIÓN DEL TEMA

## Aplicación en imagen abdominal

### 1. PÁNCREAS: pancreatitis aguda

La clasificación de las **pancreatitis agudas** resulta un reto diagnóstico. El escaso realce del páncreas puede aparecer tanto en la isquemia glandular como en el edema. La TCDE permite diferenciar con mayor facilidad las diferencias entre el parénquima normal y el inflamado.

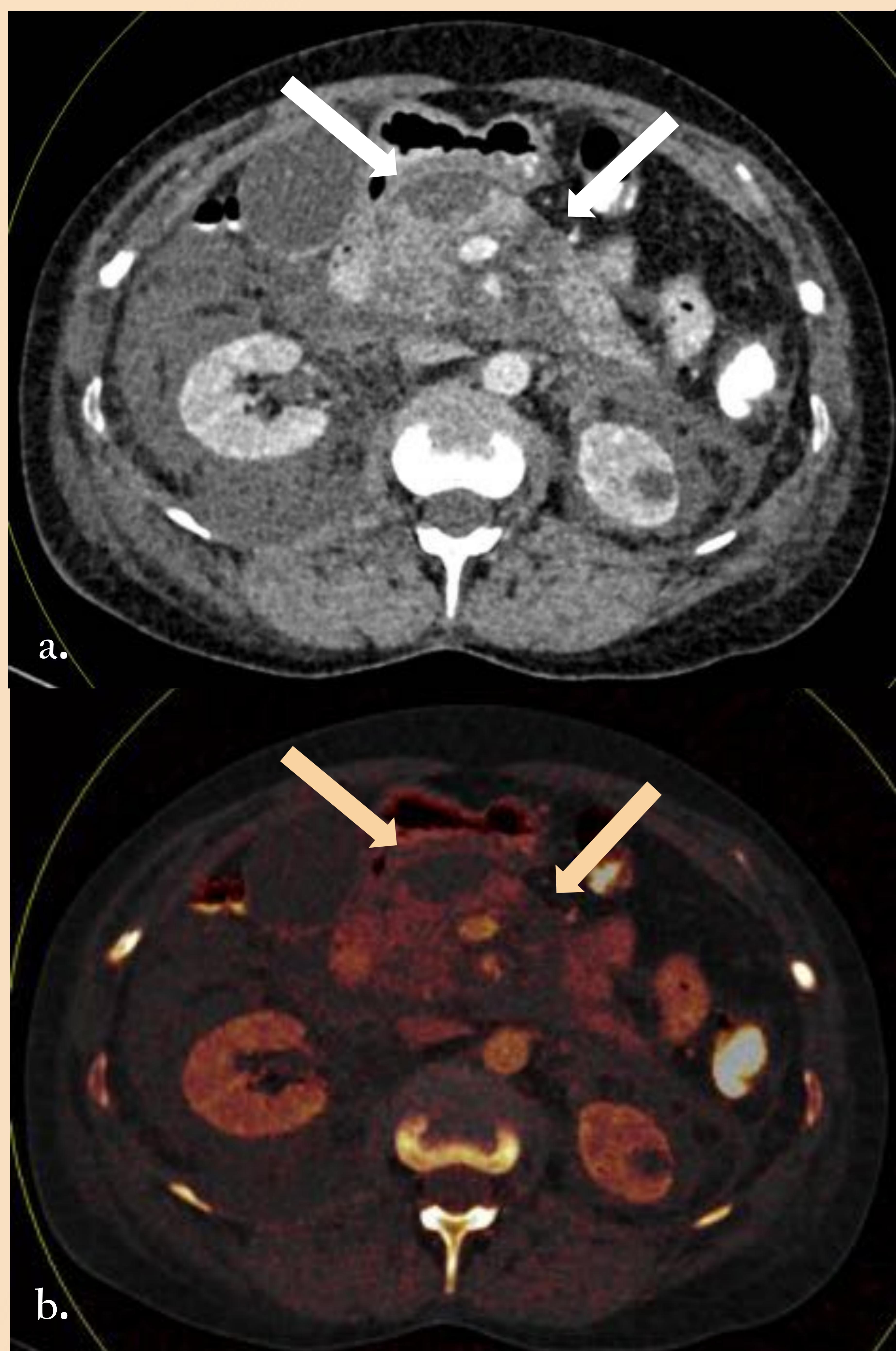


**Pancreatitis aguda edematosa intersticial.** Imágenes de TCDE tras contraste i.v en cortes axial (a) y coronal (b) que muestran hipercaptación homogénea del páncreas, con estriación de la grasa adyacente y líquido libre periduodenal (estrella). Los mapas de yodo en planos axial (c) y coronal (d) muestran captación pancreática conservada.

# REVISIÓN DEL TEMA

## Aplicación en imagen abdominal

### 1. PÁNCREAS: pancreatitis aguda

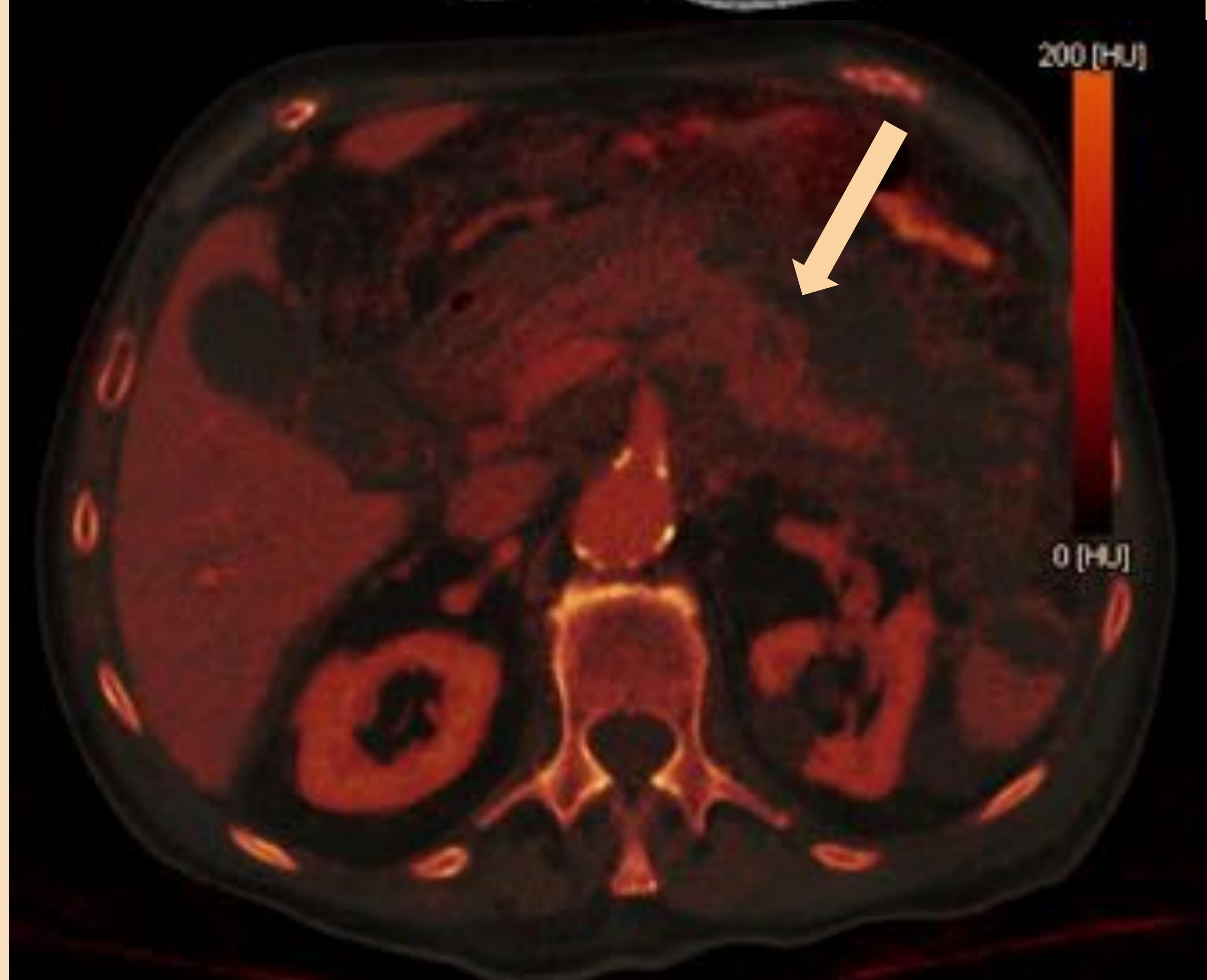
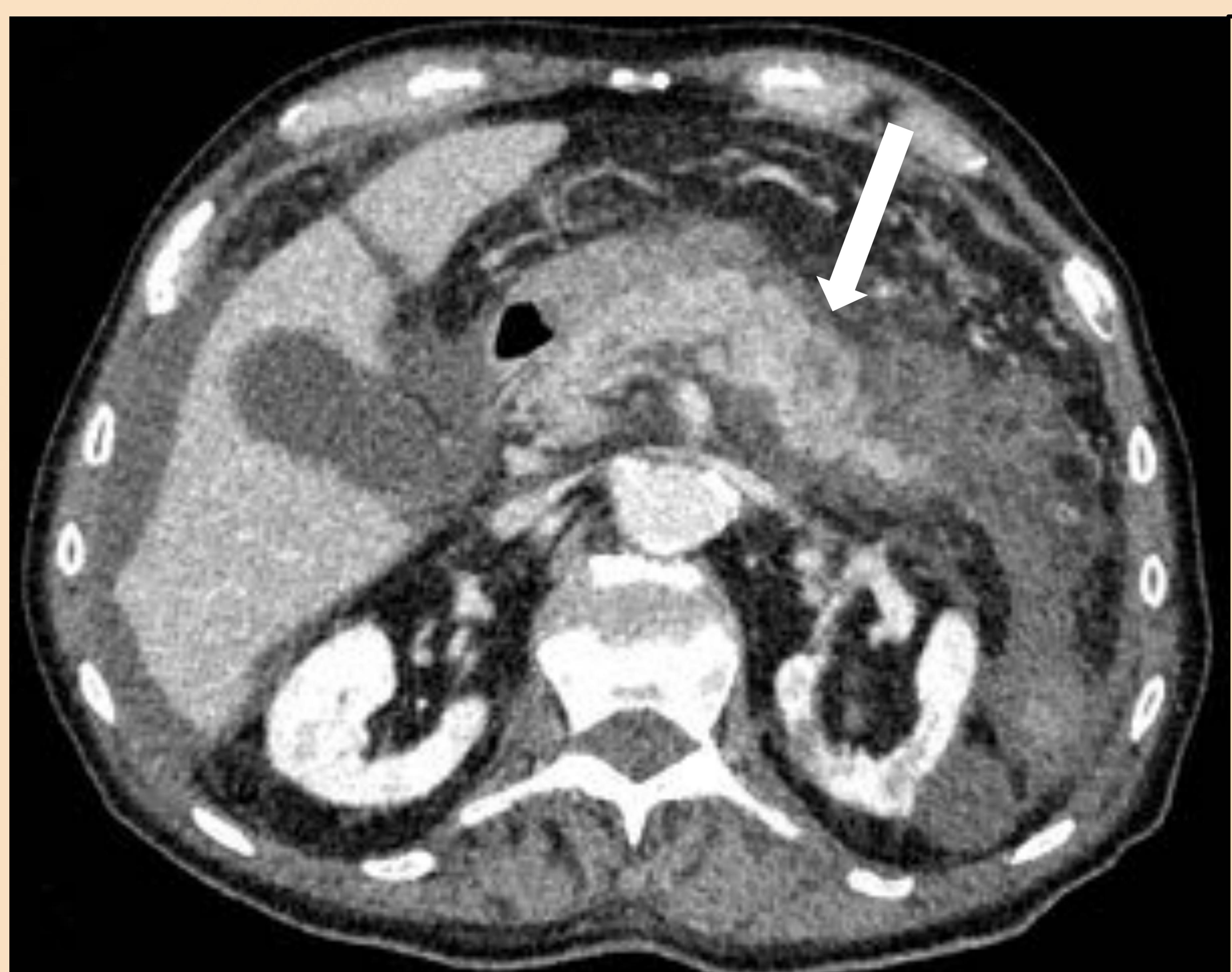


**Pancreatitis aguda con necrosis glandular.** Imagen de TCDE tras contraste i.v en el plano axial (a) objetivándose dos focos hipointensos en el cuerpo pancreático (flechas blancas), sugestivos de necrosis glandular. El mapa de yodo correspondiente (b) muestra disminución de la captación pancreática en dichas áreas (flechas naranjas), confirmando el diagnóstico de sospecha de pancreatitis aguda con necrosis glandular.

# REVISIÓN DEL TEMA

## Aplicación en imagen abdominal

### 1. PÁNCREAS: pancreatitis aguda

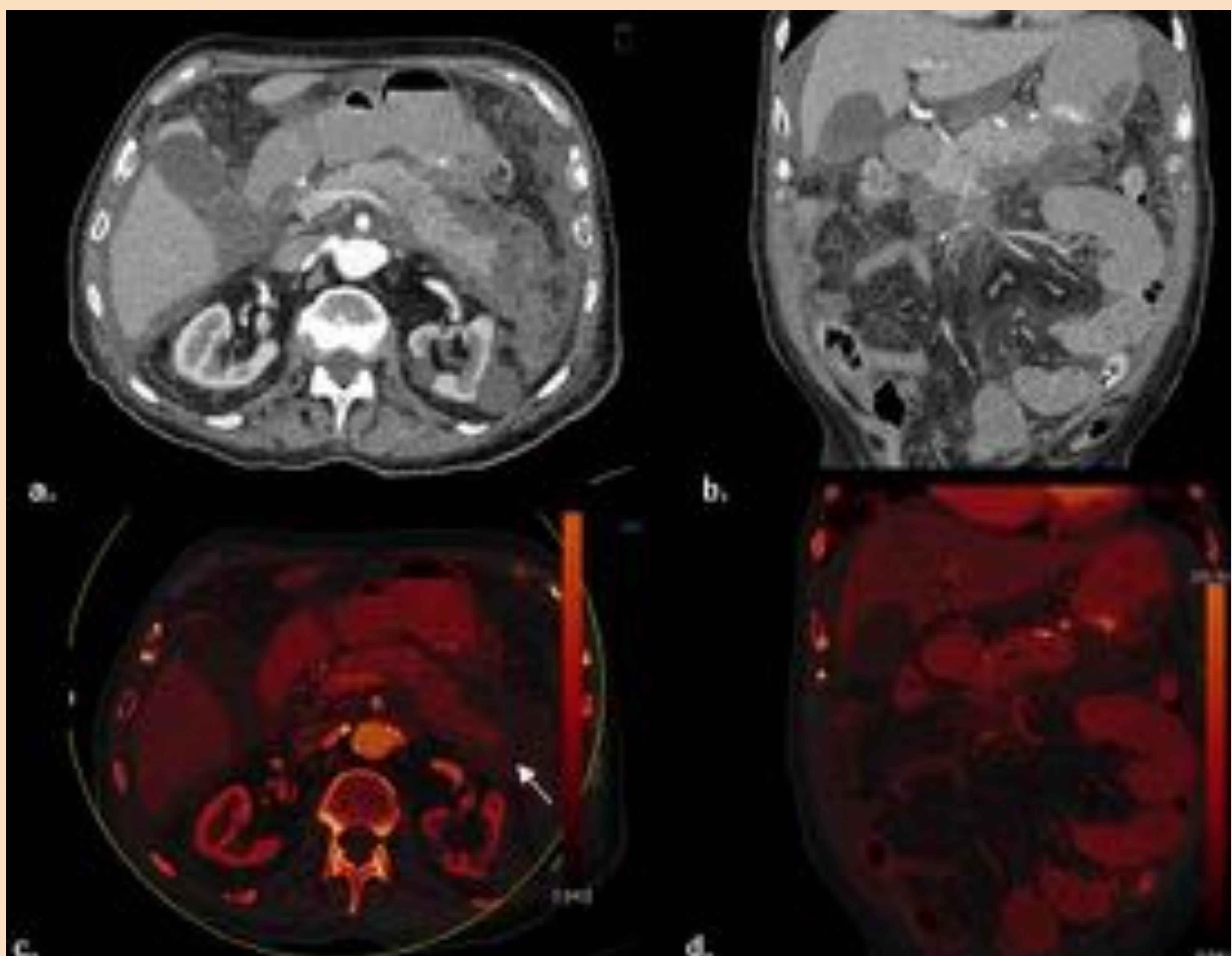


**Pancreatitis aguda con necrosis glandular.** Imagen de TCDE tras contraste i.v en el plano axial (a) objetivándose una gran colección peripancreática que engloba la totalidad del páncreas. Se aprecia, además, un foco de hipodensidad intraglandular en cuerpo-cola del páncreas (flecha blanca), sugestivo de necrosis. El mapa de yodo correspondiente (b) muestra disminución de la captación pancreática en dicha zona (flecha naranja), confirmando el diagnóstico de sospecha de pancreatitis aguda con necrosis glandular.

# REVISIÓN DEL TEMA

## Aplicación en imagen abdominal

### 1. PÁNCREAS: pancreatitis aguda



**Pancreatitis aguda con colecciones necrotizantes.** Imágenes de TCDE tras contraste i.v en cortes axial (a) y coronal (b), observando colecciones peripancreáticas heterogéneas con un aspecto aparentemente conservado del parénquima pancreático. Los mapas de yodo en reconstrucciones axial (c) y coronal (d) muestran detritus en las colecciones peripancreáticas (**flecha blanca**) y captación homogénea de la glándula pancreática. Estos hallazgos son compatibles con pancreatitis aguda con colecciones necrotizantes sin necrosis glandular.

# REVISIÓN DEL TEMA

## Aplicación en imagen abdominal

### 1. PÁNCREAS: complicaciones post-pancreatitis

La TCDE también resulta útil en la evaluación de **complicaciones asociadas a la pancreatitis aguda** como la formación de pseudoquistes o la aparición de alteraciones vasculares, incluyendo trombosis, pseudoaneurismas y malformaciones arteriovenosas.

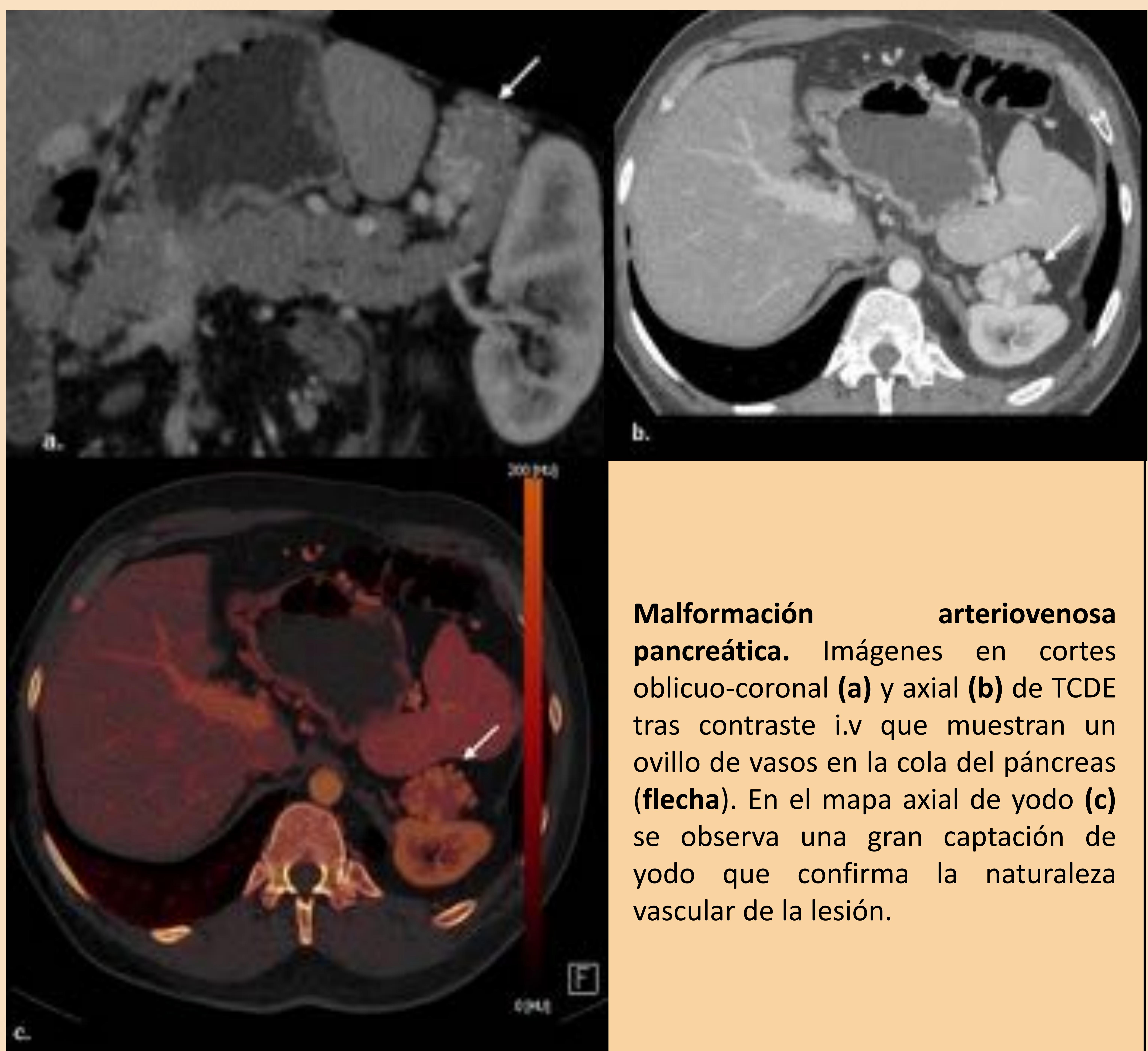


**Pseudoquiste.** Imagen en corte axial de TCDE tras contraste i.v (a) mostrando una colección única en la cola del páncreas de contenido hipodenso y pared fina (flecha), sin signos inflamatorios asociados. En el mapa de yodo (b) la lesión no presenta captación de yodo, siendo sugestiva de pseudoquiste.

# REVISIÓN DEL TEMA

## Aplicación en imagen abdominal

### 1. PÁNCREAS: complicaciones post-pancreatitis

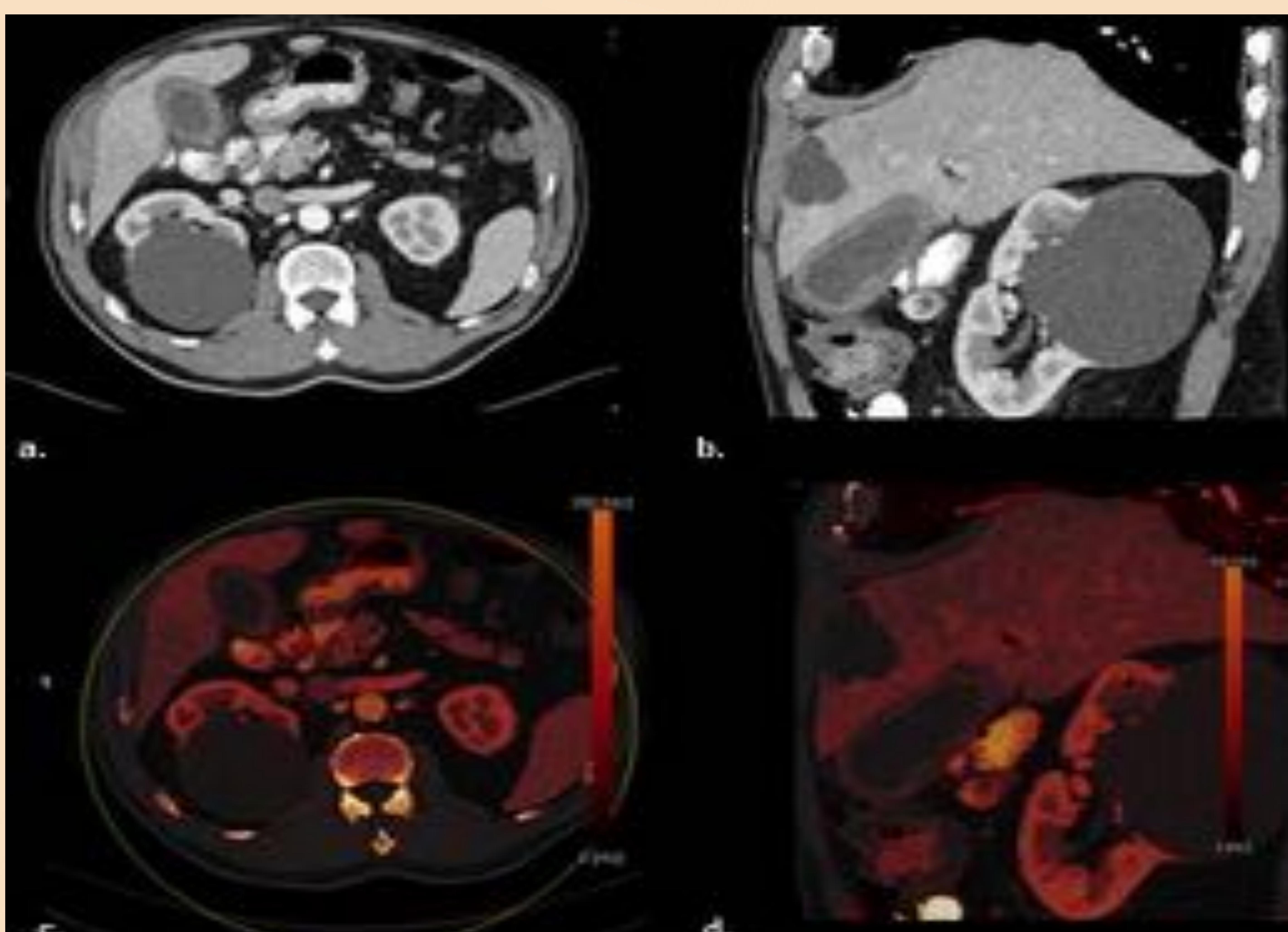


## REVISIÓN DEL TEMA

### Aplicación en imagen abdominal

#### 2. SISTEMA BILIAR

Ante una sospecha de colecistitis aguda, las imágenes obtenidas con el mapa de yodo de la TCDE mejoran la detección de la hiperemia de la pared vesicular así como los focos de hipocaptación de la pared en casos de colecistitis gangrenosa o de vólvulo biliar.



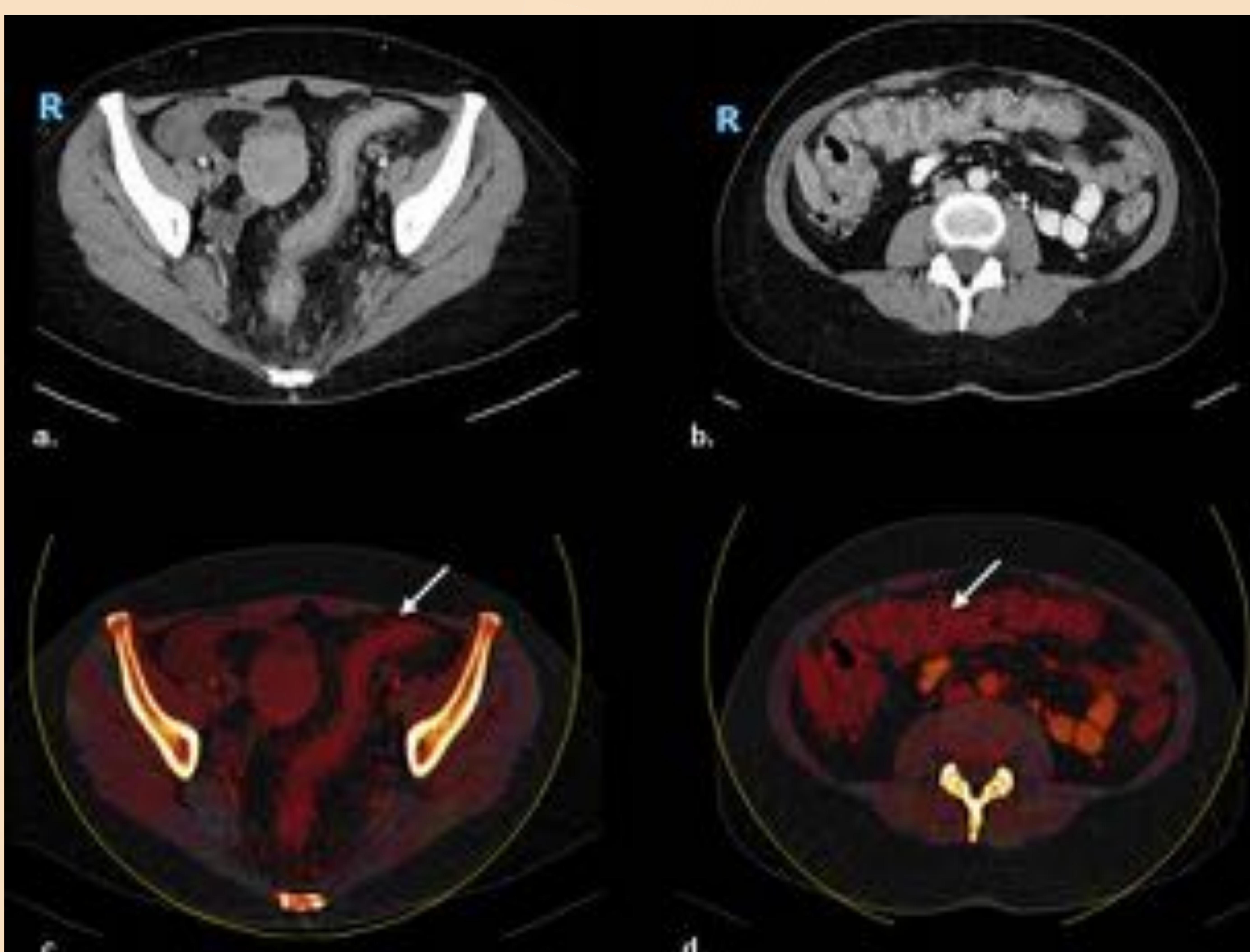
**Colecistitis aguda.** Imágenes de TCDE tras contraste i.v con reconstrucciones en planos axial (a) y sagital (b), mostrando distensión de la vesícula biliar y engrosamiento de su pared con edema perivesicular. En los mapas de yodo correspondientes en planos axial (c) y sagital (d) se objetiva captación homogénea de contraste de la pared vesicular, confirmando la ausencia de colecistitis complicada.

# REVISIÓN DEL TEMA

## Aplicación en imagen abdominal

### 3. SISTEMA GASTROINTESTINAL:

a) **Patología inflamatoria intestinal.** La TCDE es más sensible que la TC convencional para detectar el realce aumentado de la pared intestinal engrosada y los cambios de la grasa adyacente en la enfermedad inflamatoria intestinal.



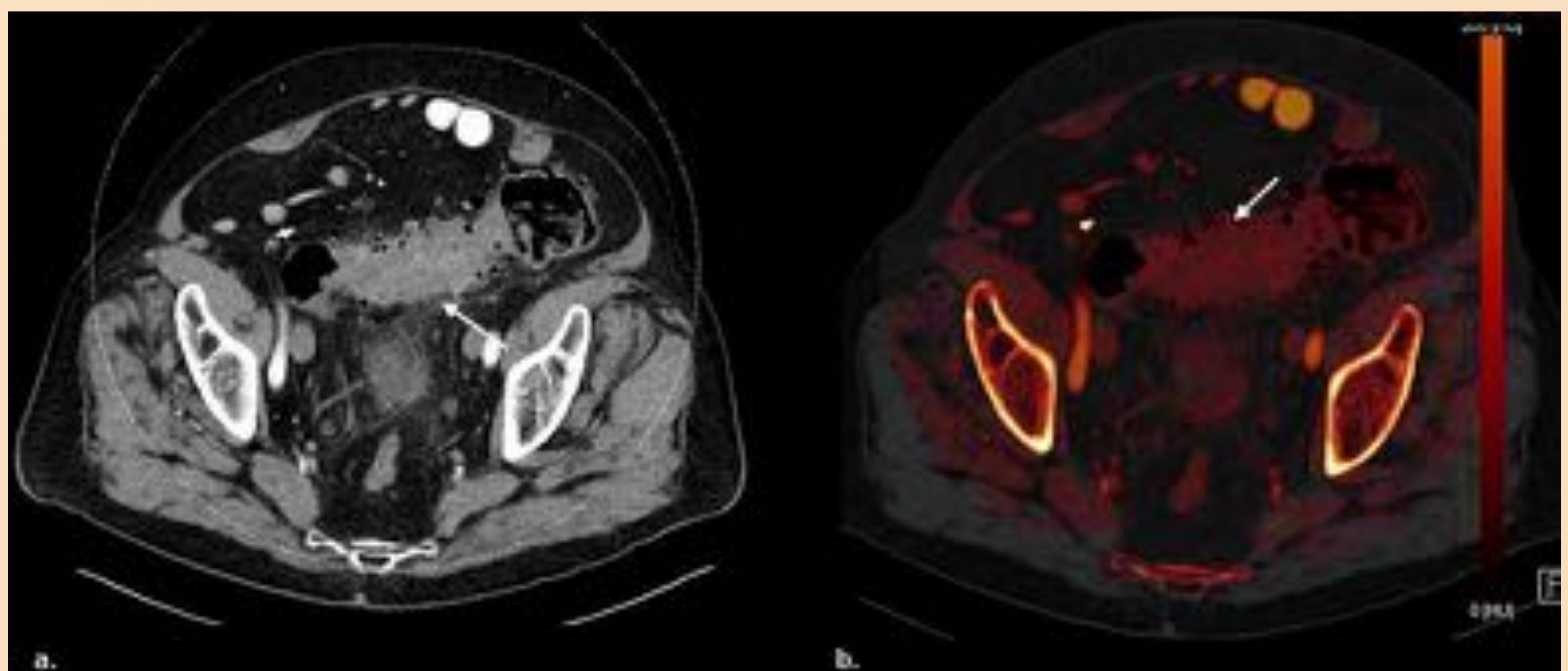
**Colitis ulcerosa.** Imágenes de TCDE tras contraste i.v en cortes axiales (a, b), mostrando un engrosamiento de la pared intestinal, con marcada irregularidad de la mucosa y moderada estriación de la grasa adyacente. Los mapas de yodo en cortes axiales (c, d) muestran una captación de yodo difusa en la mucosa del segmento del colon afecto (flechas).

# REVISIÓN DEL TEMA

## Aplicación en imagen abdominal

### 3. SISTEMA GASTROINTESTINAL:

#### a) Patología inflamatoria intestinal



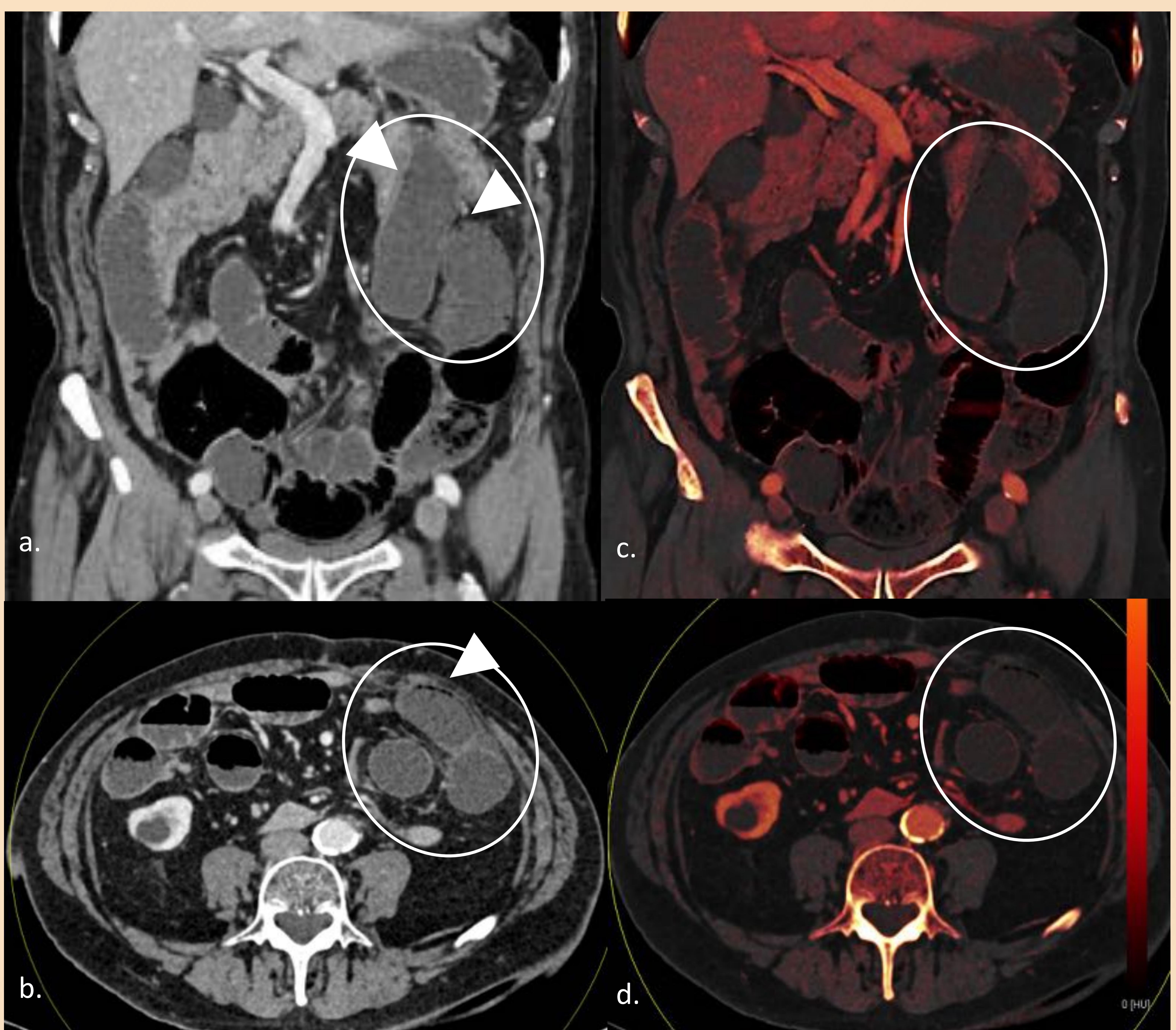
**Diverticulitis aguda con estenosis secundaria del colon.** Imagen de TCDE tras contraste i.v en corte axial (a) que muestra un engrosamiento de la pared del colon sigmoide (**flecha**) con estenosis de la luz intestinal y estriación de la grasa pericólica. El mapa de yodo (b) evidencia la hiperemia asociada de la pared (**flecha**).

# REVISIÓN DEL TEMA

## Aplicación en imagen abdominal

### 3. SISTEMA GASTROINTESTINAL:

#### b) Isquemia intestinal



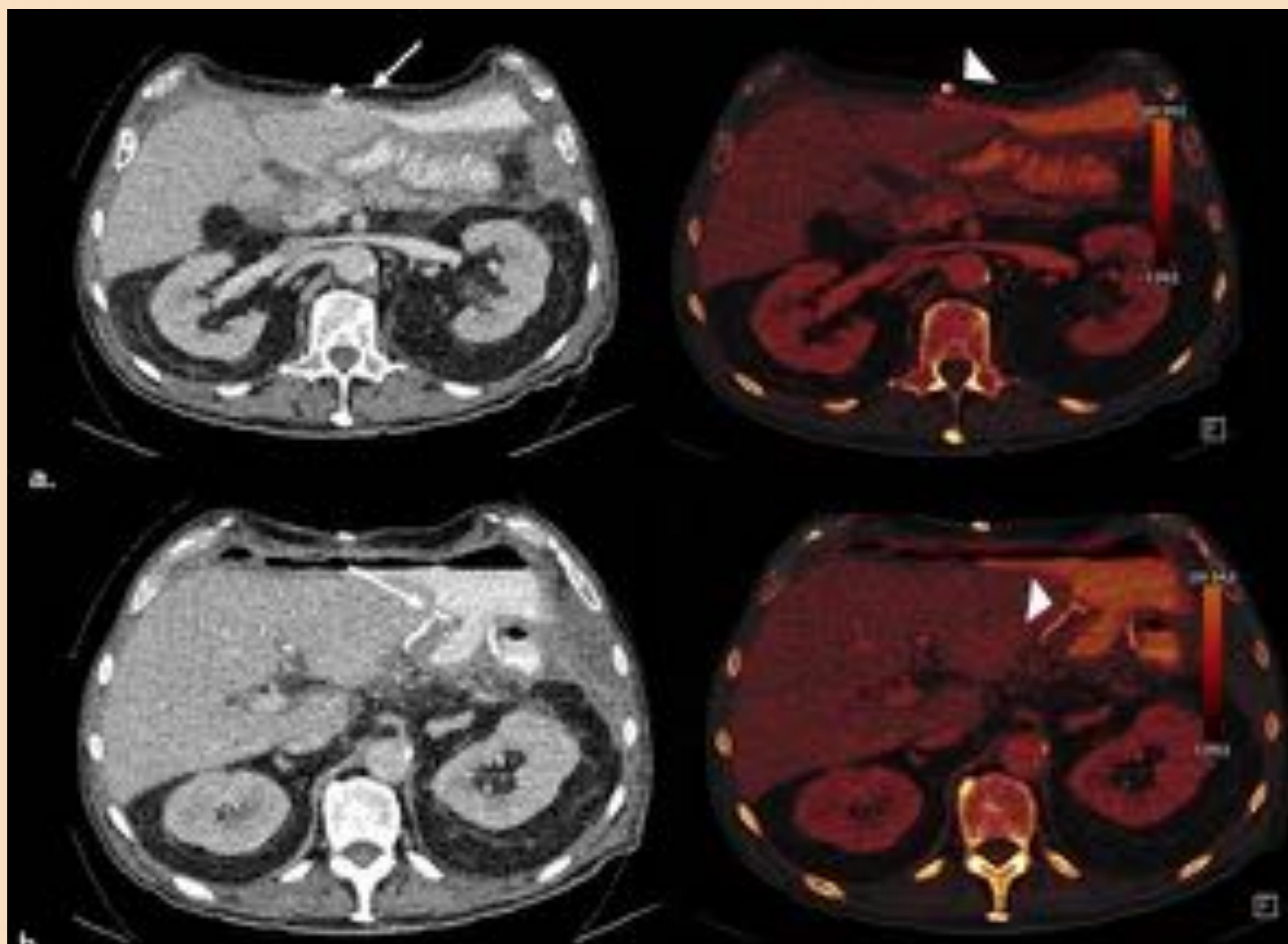
**Obstrucción intestinal con signos de sufrimiento intestinal.** Imagen de TCDE tras contraste i.v en cortes coronal (a) y axial (b) mostrando dilatación de asas de intestino delgado con signos de neumatosis (**puntas de flecha**) y disminución del realce de la pared de las asas intestinales (**círculos**). Los mapas de yodo respectivos en proyecciones coronal (c) y axial (d) evidencian menor captación de yodo (**círculos**) confirmando la sospecha de isquemia intestinal.

# REVISIÓN DEL TEMA

## Aplicación en imagen abdominal

### 3. SISTEMA GASTROINTESTINAL:

c) **Complicaciones abdominales postquirúrgicas.** La TCDE hace más evidentes áreas de extravasación de contraste al aumentar la resolución del yodo.



**Complicaciones post-quirúrgicas.** Imagen de TCDE tras contraste i.v en reconstrucciones axiales (a, b), mostrando una fuga de contraste por la cicatriz laparoscópica (a) y una dehiscencia de la sutura quirúrgica (b). En sus respectivas imágenes en el mapa de yodo, la extravasación de contraste se evidencia con mayor claridad (puntas de flecha).

# REVISIÓN DEL TEMA

## Aplicación en imagen abdominal

### 4. RIÑÓN: masas renales

La TCDE aporta una información adicional para caracterizar las lesiones renales. Los mapas de yodo y las imágenes monocromáticas de baja energía mejoran el contraste entre el tumor y el parénquima sano.

El diagnóstico diferencial principal del carcinoma renal son los quistes hiperdensos:

- Las **lesiones tumorales** mostrarán un aumento de la atenuación en las imágenes VNC y también un aumento del contenido de yodo.
- Los **quistes hiperdensos** también mostrarán una mayor atenuación en las imágenes VNC pero no presentarán contenido de yodo.

Por tanto, mediante el mapa de yodo se puede identificar más fácilmente las lesiones que captan contraste, reduciendo el tiempo de interpretación, la radiación y el número de masas indeterminadas.

# REVISIÓN DEL TEMA

## Aplicación en imagen abdominal

### 4. RIÑÓN: masas renales



**Cáncer renal de células claras.** Reconstrucciones axiales en fases córtico-medular (a), nefrogénica (b) y tardía (c) obtenidas mediante TCDE, que muestran una lesión exofítica hipercaptante (flecha). En el mapa de yodo (d) se observa una importante captación, propia de una lesión tumoral con elevada vascularización.

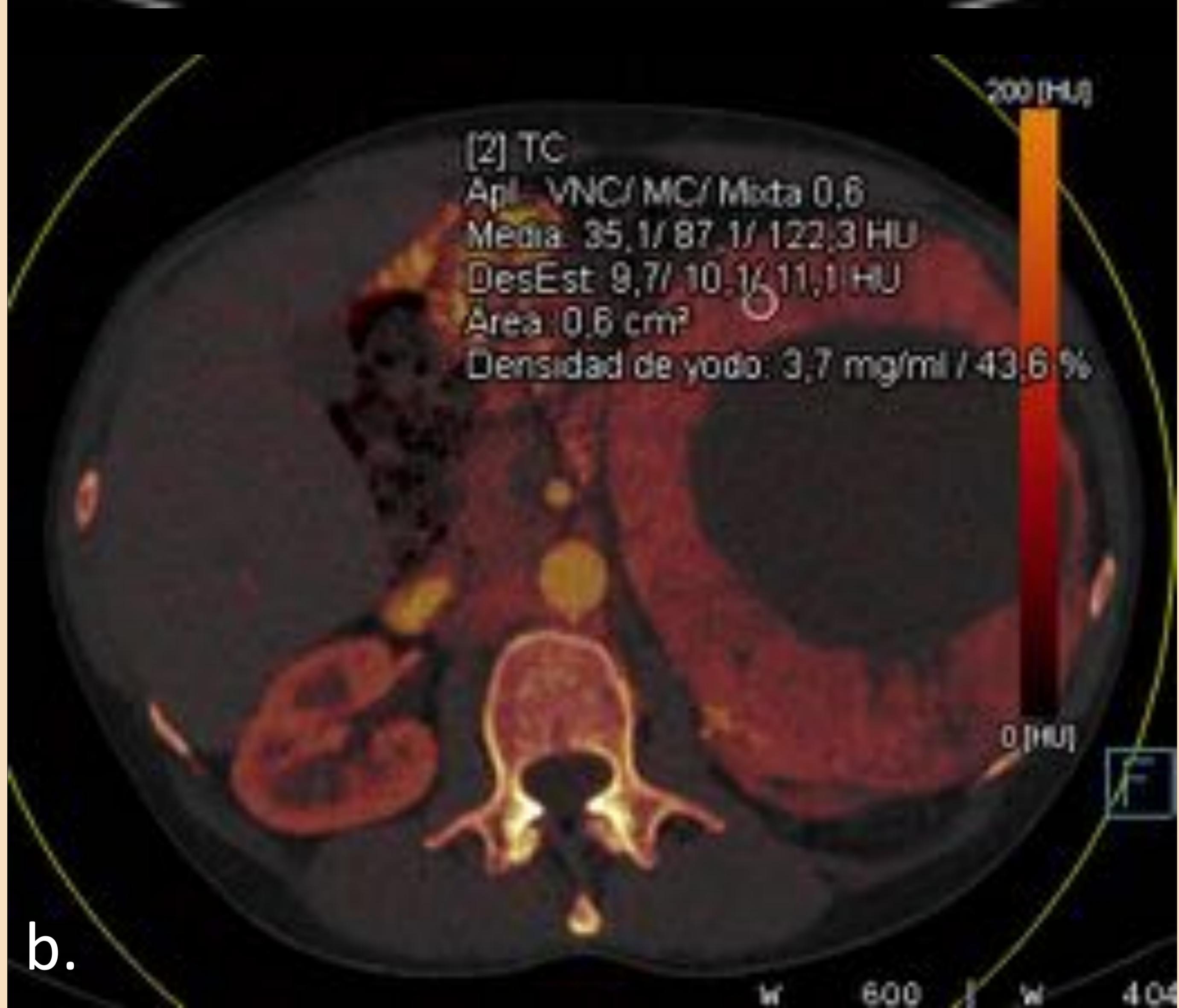


**Quiste renal hiperdenso.** En tercio medio-inferior del riñón derecho, se identifica una masa polilobulada con un fino tabique en su interior de aproximadamente 41 UH (a). En la serie VNC la lesión presenta una densidad similar con 43 UH (b) y, además, no presenta captación de yodo (c) por lo que es compatible con un quiste hiperdenso, probablemente de contenido hemorrágico.

# REVISIÓN DEL TEMA

## Aplicación en imagen abdominal

### 4. RIÑÓN: masas renales



**Oncocitoma gigante.** Imagen de TCDE tras contraste i.v en corte axial (a), mostrando una gran masa renal izquierda que se origina de la cortical del tercio medio.

El mapa de yodo evidencia la captación del componente sólido periférico.

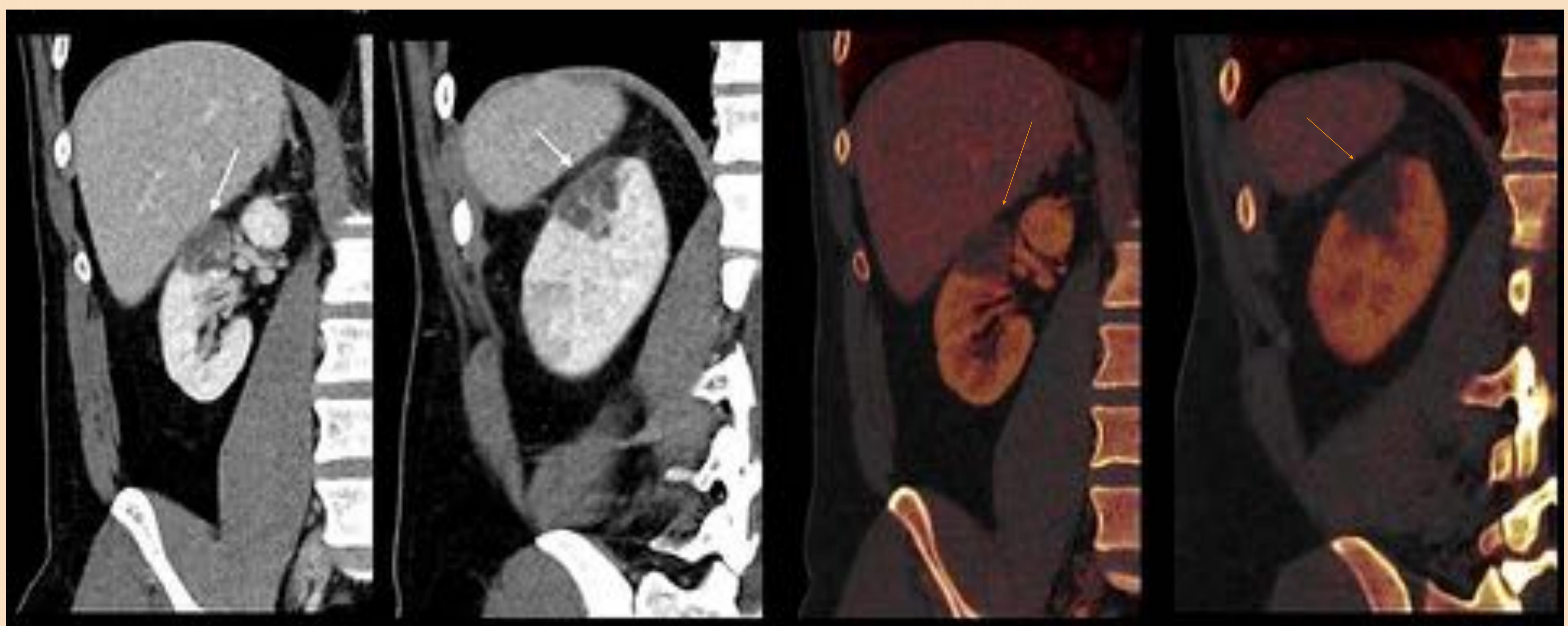
Mediante la cuantificación de yodo se objetiva que la zona hipercaptante presenta 122 UH (b) mientras que el centro necrótico tiene valores de 24 UH (c).

# REVISIÓN DEL TEMA

## Aplicación en imagen abdominal

### 4. RIÑÓN: masas renales

Los mapas de yodo también facilitan la detección de focos patológicos de hipoatenuación en el parénquima renal.



**Infartos renales.** Imágenes de TCDE tras contraste i.v en cortes coronales (a, b), observándose áreas sin realce de contraste, de morfología triangular, en el polo superior del riñón derecho (**flechas blancas**). Los mapas de yodo (c, d) confirman la ausencia de captación en dichas áreas (**flechas naranjas**).

# REVISIÓN DEL TEMA

## Aplicación en imagen abdominal

### 5. VEJIGA: lesiones tumorales

Las imágenes monocromáticas de baja energía y las imágenes de descomposición de material yodo-agua suponen una herramienta útil para la mejor visualización de los tumores uroteliales.



**Tumor urotelial en divertículo vesical.** Corte axial de TCDE tras contraste i.v (a), mostrando una lesión sólida en el interior de un divertículo vesical (**flecha**). La reconstrucción VNC (b) evidencia hiperdensidad intralesional sugestiva de sangrado reciente (**punta de flecha**). Con el mapa de yodo (c) se evidencia una captación difusa de la pared del divertículo vesical compatible con inflamación (probablemente de origen infiltrativo).

# REVISIÓN DEL TEMA

## Aplicación en imagen abdominal

# 6. CARACTERIZACIÓN DE LAS LITIASIS RENALES.

La identificación del componente principal de las litiasis renales (ácido úrico vs no ácido úrico) es esencial para establecer el tratamiento. La TCDE puede diferenciar ambos tipos de litiasis mediante las reconstrucciones de materiales específicos.

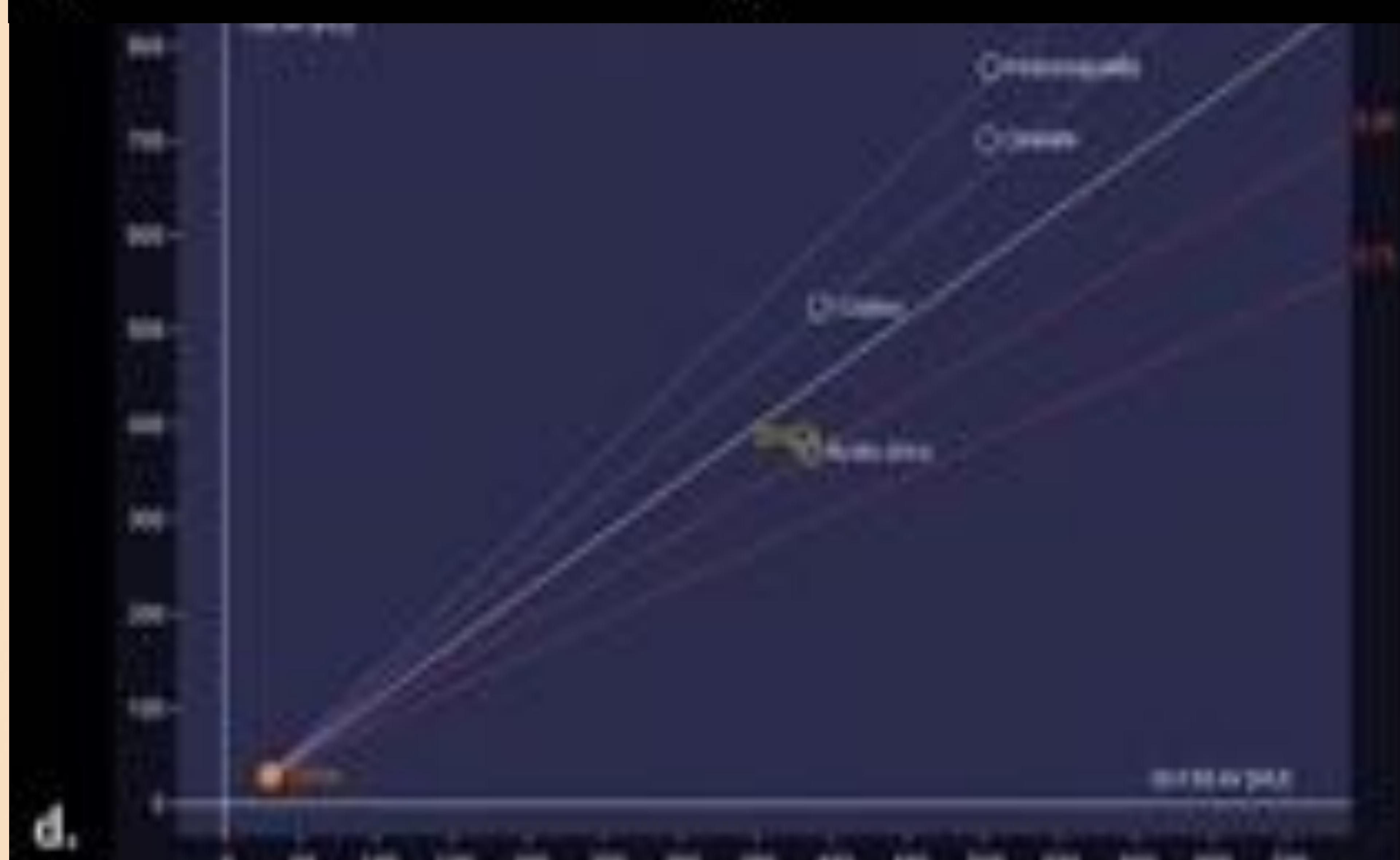
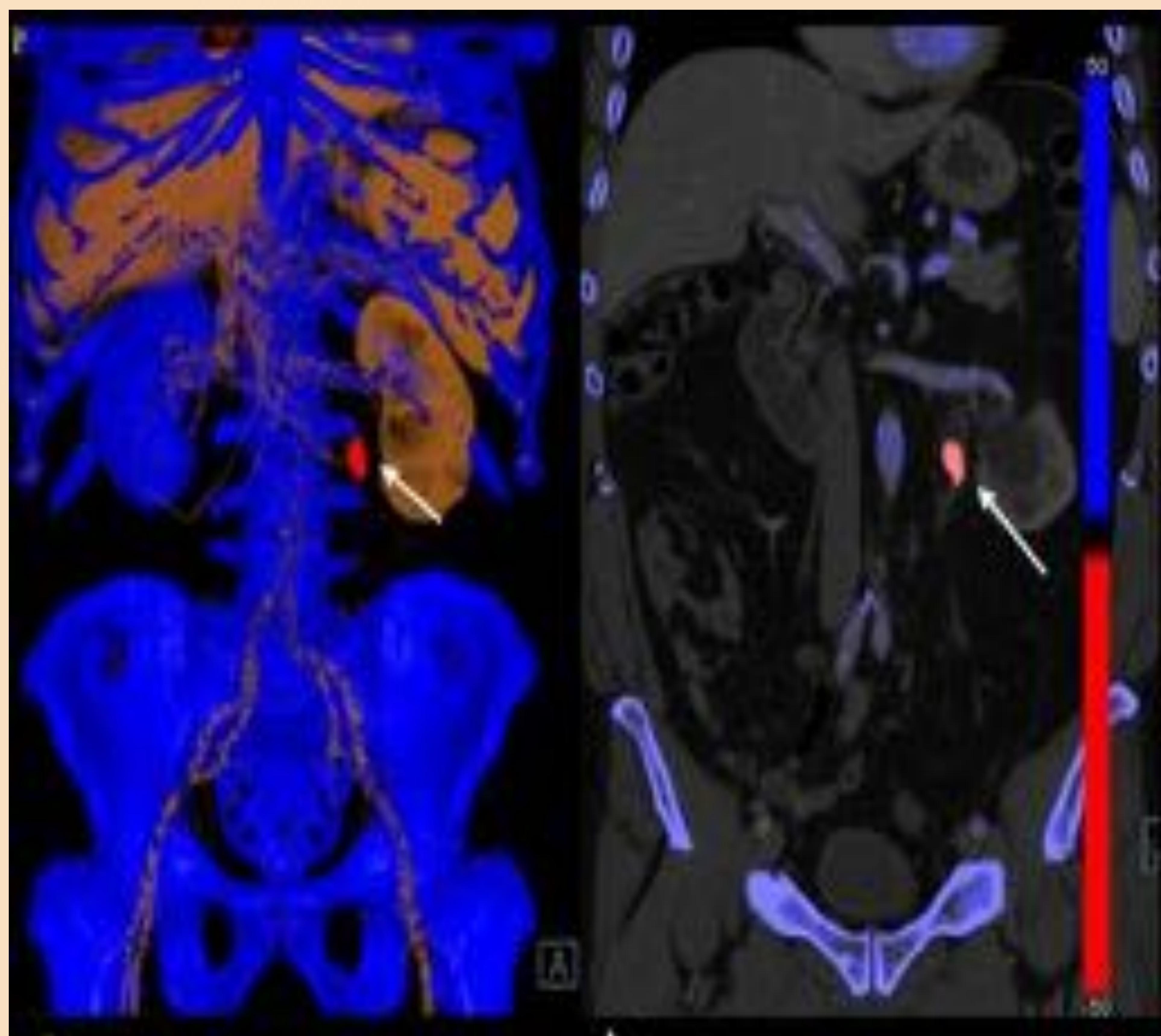
Las litiasis que no contienen ácido úrico presentan elementos pesados (calcio), mostrando mayor atenuación a niveles bajos de energía (80 kVp). Este tipo de litiasis se tienden a representar con el color azul en las reconstrucciones con software de descomposición de materiales.

Por otro lado, las litiasis de ácido úrico presentan elementos ligeros (hidrógeno) y mayor atenuación a niveles altos de energía (140 kVp). En las reconstrucciones de descomposición de materiales, suelen aparecer codificadas en rojo.

# REVISIÓN DEL TEMA

## Aplicación en imagen abdominal

### 6. a) Litiasis de ácido úrico.

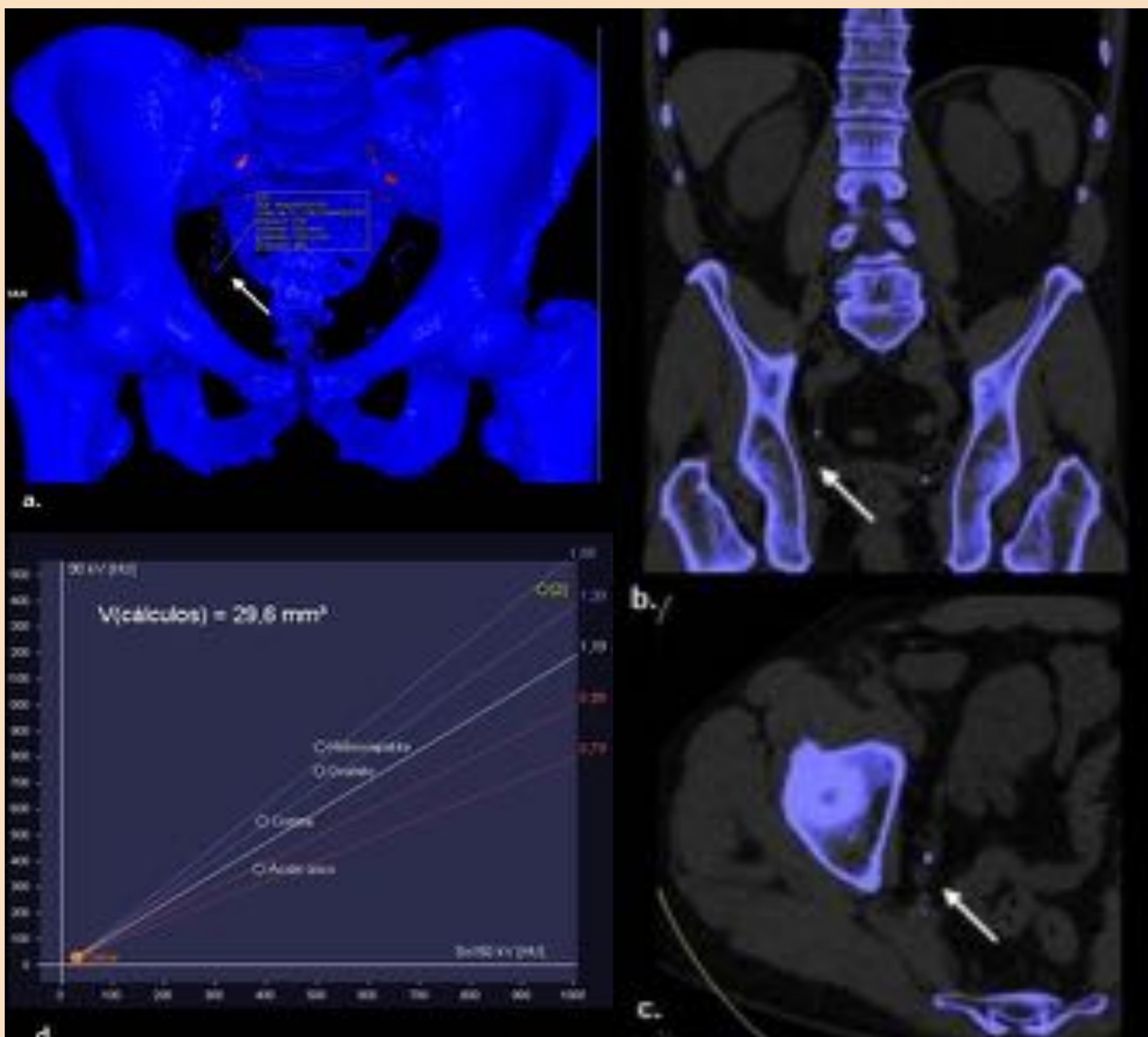


**Litiasis renal de ácido úrico.** Imágenes en reconstrucción 3D (a) y descomposición de materiales en planos coronal (b) y axial (c), obtenidas en el post-procesado, mostrando una litiasis (flecha) en el tercio superior del uréter izquierdo, que origina un retraso de la eliminación de contraste (riñón izquierdo con mayor acumulación de contraste). El gráfico (d) muestra la composición de ácido úrico de la litiasis, codificada en color rojo.

# REVISIÓN DEL TEMA

## Aplicación en imagen abdominal

### 6. b) Litiasis de material no ácido úrico.



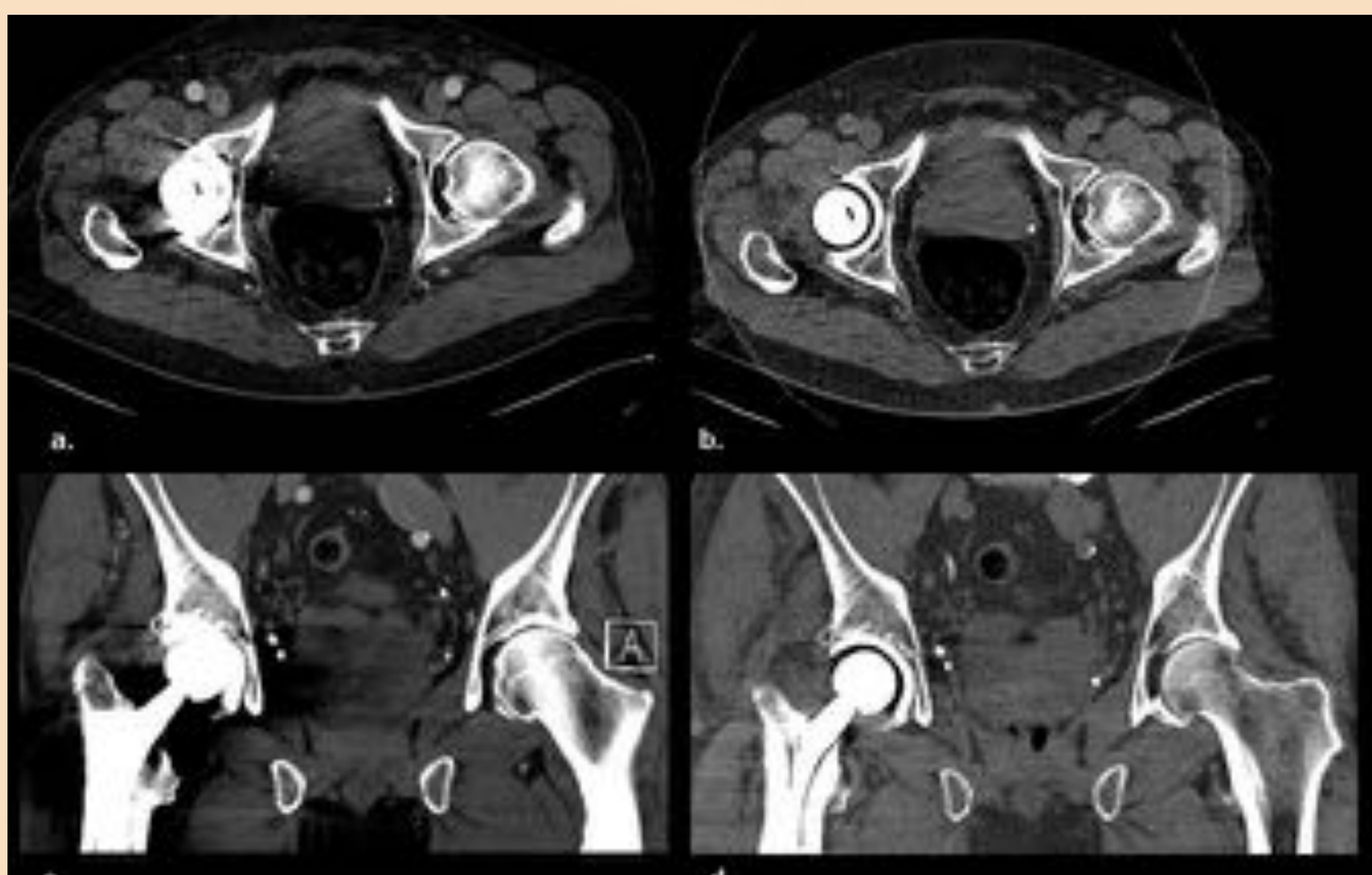
**Litiasis renal cárquica.** Imágenes en reconstrucción 3D (a) y descomposición de materiales en planos coronal (b) y axial (c), obtenidas en el post-procesado, objetivándose una litiasis (flecha) en el tramo final del uréter derecho. El gráfico (d) presenta la composición de origen cárquico de la litiasis, codificada en color azul.

# REVISIÓN DEL TEMA

## Aplicación en imagen abdominal

### 7. REDUCCIÓN DE ARTEFACTOS

Las prótesis metálicas producen artefacto de endurecimiento de haz (*beam hardening*), que disminuye sustancialmente la calidad de la imagen. Las imágenes monoenergéticas de alta energía permiten disminuir dicho artefacto.



**Reducción de artefacto de endurecimiento de haz.** Cortes axiales y coronales de TC convencional (a, c) y de TCDE con reconstrucción monoenergética de alta energía (b, d), mostrando una importante reducción del artefacto metálico de la prótesis de cadera derecha.

# REVISIÓN DEL TEMA

## Aplicación en imagen abdominal

### **8. PROCESOS NEOPLÁSICOS**

La TCDE tiene múltiples aplicaciones en el diagnóstico y seguimiento de las neoplasias debido a un mayor realce y diferenciación de las lesiones, lo que permite establecer de forma más precisa las medidas y los márgenes tumorales.

Estas ventajas permiten mejorar la evaluación de la respuesta tumoral, influyendo en las decisiones terapéuticas y el manejo del paciente.

## LIMITACIONES

Una de las principales desventajas de la TCDE es que las reconstrucciones de materiales específicos sólo pueden realizarse con calcio, yodo y ácido úrico.

Otro inconveniente es el gran número de imágenes generadas, que triplica las de un estudio convencional. Esto supone un problema de almacenamiento para los sistemas informáticos y una mayor carga de trabajo para el técnico y el radiólogo.

Sería deseable, además, una mayor accesibilidad formativa tanto para los radiólogos como para los técnicos.

Por último, el alto coste de los equipos es otro gran inconveniente para implantar esta nueva tecnología.

# CONCLUSIONES

- La TCDE permite una mejor caracterización de ciertas patologías abdominales, gracias a nuevas herramientas como la determinación y cuantificación del yodo o la caracterización de la composición química de diferentes materiales.
  - El rápido desarrollo y mejora de la técnica condicionará una creciente influencia diagnóstica y, en concreto, a nivel abdominal, superando las limitaciones de la imagen anatómica.
  - Se ha demostrado un valor añadido de la doble energía en procesos hemorrágicos, patología inflamatoria e isquémica abdominal, caracterización de cálculos renales, reducción de artefactos e identificación de lesiones neoplásicas.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Johnson TR. Dual-energy CT: general principles. *AJR Am J Roentgenol* 2012;199(5 Suppl):S3–S8.
2. De Cecco CN, Darnell A, Rengo M, et al. Dual-energy CT: oncologic applications. *AJR Am J Roentgenol* 2012;199(5 Suppl):S98–S105.
3. Wichmann JL, Hardie AD, Schoepf UJ, et al. Single- and dual-energy CT of the abdomen: comparison of radiation dose and image quality of 2nd and 3rd generation dualsource CT. *Eur Radiol* 2017;27(2):642–650.
4. Nicolas Murray, MD, FRCPC Kathryn E. Darras, MD, FRCPC Frances E. Walstra, MD Mohammed F. Mohammed, MBBS, SB-RAD, CIIP Patrick D. McLaughlin, MB BCh BAO, FFR RCSI, FRCPC Savvas Nicolaou, MD, FRCPC Dual-Energy CT in Evaluation of the Acute Abdomen.
5. Megibow AJ, Sahani D. Best practice: implementation and use of abdominal dual-energy CT in routine patient care. *AJR Am J Roentgenol* 2012;199(5 Suppl):S71–S77.