

ANGIO-TC DE ENERGÍA DUAL EN EL TROMBOEMBOLISMO PULMONAR: CLAVES PARA UNA CORRECTA INTERPRETACIÓN

Rodrigo Sutil Berjón, Alejandra Somoano Marfull,
Silvia Revuelta Gómez, Elena Peña Gómez, Celia Cantolla Nates



OBJETIVOS DOCENTES

- Describir los fundamentos físicos y técnicos del TC de energía dual.
- Explicar la semiología básica de los mapas de yodo y los errores o *pitfalls* de interpretación más frecuentes.

¿En qué consiste la energía dual?

Es una técnica de tomografía computarizada que emplea dos haces de rayos X de distinta energía de forma simultánea para la adquisición de imágenes diagnósticas.

¿Cuáles son las principales herramientas que aporta?

- Generación de mapas de sustracción mediante la propiedad de descomposición espectral de la materia
- Creación de imágenes monoenergéticas virtuales
- Mapas Z efectivos y de densidad electrónica

Fundamentos físicos

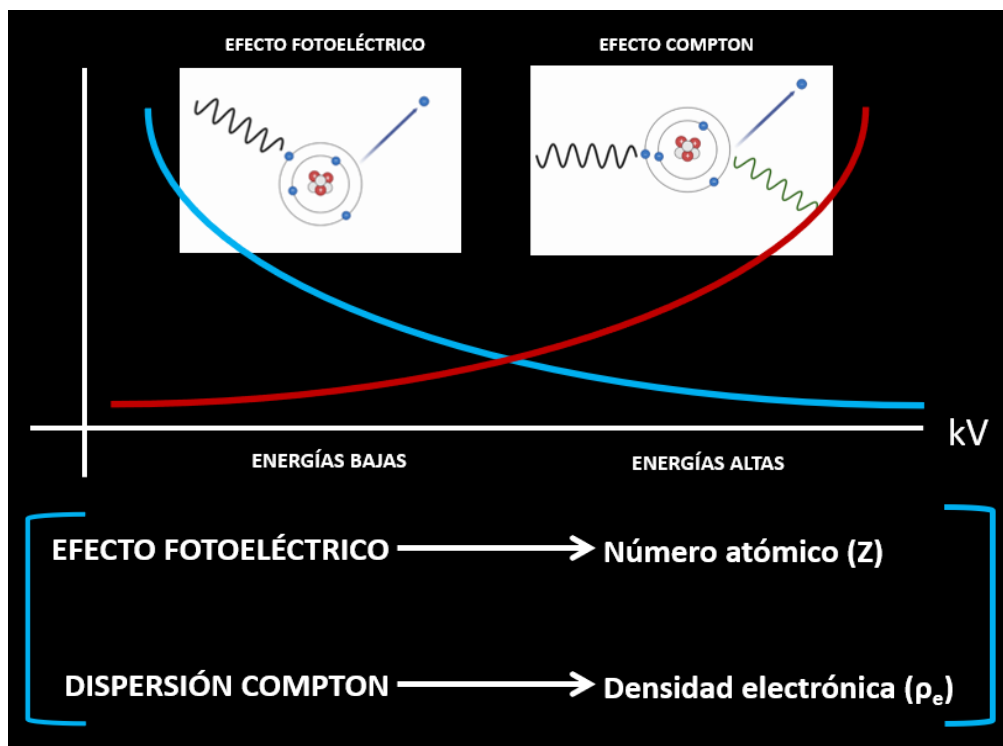
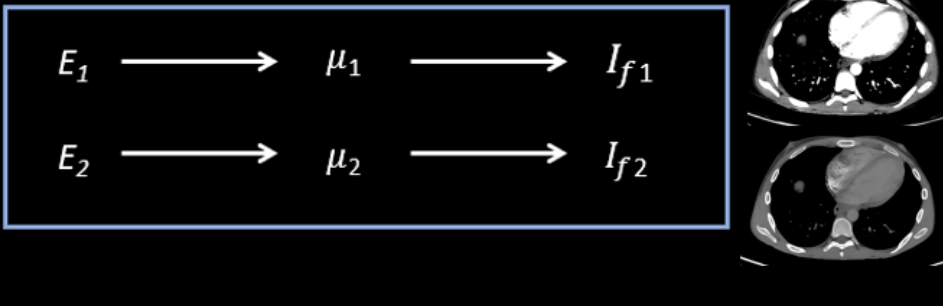


Figura 1. Los fotones de rayos X de baja energía tienden a interactuar con los átomos a través del efecto fotoeléctrico, mientras que a medida de aumenta la energía del haz toma importancia la dispersión Compton. El número de ionizaciones producidas por efecto fotoeléctrico guarda relación con el número atómico (Z), el efecto Compton en cambio no depende de Z .

$$I_f = I_0 \cdot e^{-\mu x}$$
$$\mu = \frac{\mu}{\rho} \cdot \frac{Z}{E} \cdot \rho$$


The diagram illustrates the relationship between energy (E), linear attenuation coefficient (μ), and final intensity (If) for two different energy levels. It shows two rows of arrows: the top row shows E1 leading to μ1, which then leads to If1; the bottom row shows E2 leading to μ2, which then leads to If2. To the right of the diagram are two axial CT scan images of a chest cross-section, showing the heart and lungs, illustrating the result of the attenuation process.

Figura 2. El coeficiente de atenuación lineal (μ) es directamente proporcional a Z e inversamente a la energía de onda (E). A más μ más atenuación y menor intensidad (I_f), es decir, menor número de fotones llegarán al detector. De esta manera podemos entender que elementos como el yodo, con Z de 53, produzca mayor atenuación que el oxígeno, Z de 8. A los detectores llegan pues haces de distinta intensidad, formando dos conjuntos de información, que permiten la reconstrucción de las imágenes diagnósticas.

Fundamentos técnicos

Existen distintos diseños de TC de energía dual en función, esencialmente, del fabricante:

- Dual source: contiene dos tubos dispuestos a 90 grados entre sí, con sus respectivos detectores, y cada uno de ellos emite a un kilovoltaje distinto. Su principal desventaja es que el *field of view* es más limitado que en otros diseños.
- Rapid switching: el mismo tubo conmuta de un kilovoltaje a otro en centésimas de segundo.
- Split filter: el propio tubo dispone de un filtro en su salida, de forma que emite simultáneamente los dos espectros de radiación. La discriminación espectral es peor, pues existen haces dispersos cruzados desde la salida del tubo.

Fundamentos técnicos

- Dual layer: un único tubo emite un haz de alta energía contra dos capas de detectores. A la capa inferior llegan los fotones más energéticos y a la superior los de menor energía. Este diseño tiene concordancia temporal perfecta entre los dos conjuntos de información, pero no permite hacer una adquisición no espectral.

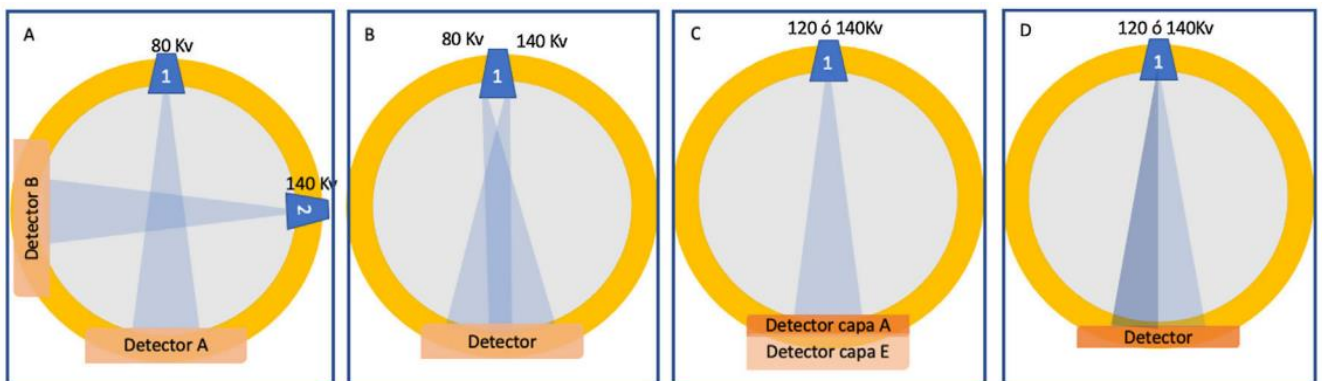


Figura 3. Distintos diseños de TC de energía dual: A) dual source, B) rapid switching, C) dual layer, D) split filter. (5)

Aspectos técnicos de la imagen

El empleo de haces de bajo kilovoltaje logra reconstruir imágenes con mayor resolución de contraste. De este modo el TC de energía dual permite ahorrar dosis de contraste.

En el caso del TEP por ejemplo se logra un realce de los contornos vasculares con menor volumen de contraste yodado intravenoso.

Sin embargo, la contrapartida es que las imágenes de baja energía tienen un mayor ruido. Asimismo, las imágenes de baja energía presentan mayores artefactos de endurecimiento.

La solución radica en combinar las imágenes de bajo y de alto kilovoltaje para mejorar el ruido sin perder resolución de contraste.

Aspectos técnicos de la imagen

Aunque se empleen imágenes monoenergéticas virtuales de bajo kilovoltaje, no siempre se consigue suprimir totalmente el contraste intravenoso si este está muy concentrado. Este fenómeno ocurre, por ejemplo, en la cava superior, siendo causa de artefactos de endurecimiento del haz a ese nivel.

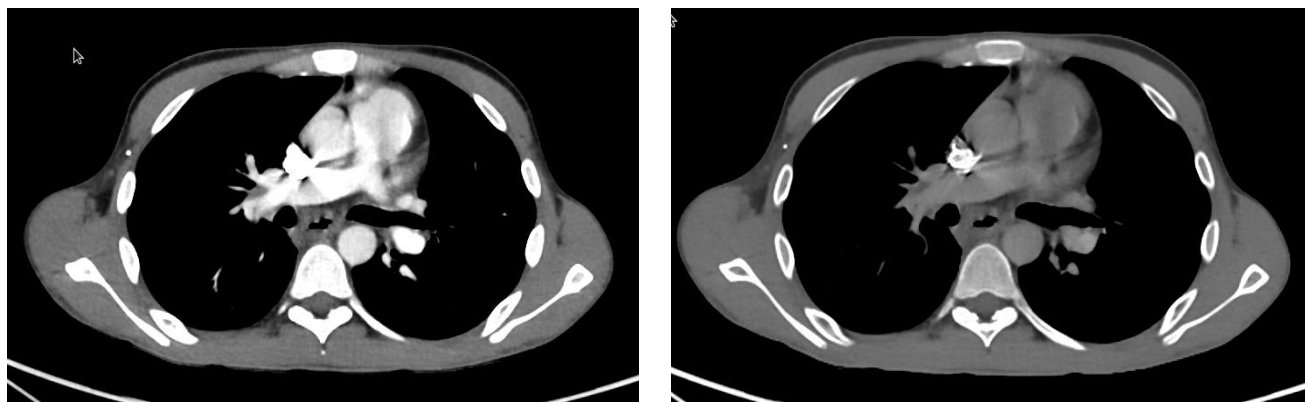


Figura 4. A pesar de utilizar haces de baja energía no se ha logrado suprimir totalmente la atenuación producida por el contraste yodado en la cava superior.

TC de energía dual y TEP

Parámetros de contraste, inyección y adquisición

25 – 35mL de contraste yodado iv

Contrastes de más de 300mg/ml de yodo y lavado con suero

Vía gruesa de 18G o 20G

Inyección de contraste a 4ml/s

Rango de exploración: ápices hasta incluir bases pulmonares

Técnica de *bolus-tracking* con ROI en tronco arterial pulmonar.

Adquisición helicoidal con cortes finos en apnea

Dirección de la adquisición caudo-craneal

1. MAPAS DE PERFUSIÓN PULMONAR (PBV)

Las imágenes de perfusión son mapas de sustracción yodo/agua, es decir, se sustrae el agua y se realiza la atenuación producida por el yodo.

- Mejoran la **sensibilidad** para la detección de embolismos de pequeño tamaño (subsegmentarios).
- Puede suponer una herramienta más para la estratificación de la **gravedad** en función del número y tamaño de los defectos de perfusión.
- Los defectos de perfusión parecen estar correlacionados con la dilatación de cavidades derechas y por ende con el **pronóstico** del TEP.
- Pueden utilizarse en el seguimiento de los TEPs y evaluación de la **respuesta al tratamiento** anticoagulante

TÉCNICAS DE RECONSTRUCCIÓN AUTOMÁTICA Y AJUSTE DE VENTANA

Hay dos tipos de reconstrucciones automáticas de los mapas de perfusión pulmonar:

Thresholding / reconstrucción con umbral: se aplica una ventana de entre -650UH y -900UH por la cual se excluye el mediastino y los grandes vasos.

- **DESVENTAJA:** Si bien los defectos de perfusión son más evidentes, también lo son los artefactos que condicionan los falsos defectos de perfusión.

Reconstrucción sin umbral: No excluye el mediastino y los grandes vasos del mapa. Se tiene una visión más amplia y en conjunto.

- **DESVENTAJA:** los defectos de perfusión son menos visibles, pues el rango de colores es más amplio.

DEFECTOS DE PERFUSIÓN EMBÓLICOS

Suelen ser de morfología triangular con base periférica y que se corresponden con un territorio vascular, lobar o segmentario, conocido

Ante defectos de perfusión visualizados en el PBV pero no en el angio-TC debemos pensar en:

- **Trombo de pequeño tamaño** a nivel subsegmentario que sobrepasa la capacidad de resolución espacial del angio-TC.
- Área perfundida por arterias **bronquiales sistémicas**. Para verla perfundida sería necesario realizar una adquisición más tardía.
- **Defecto de perfusión no embólico / falso positivo**
- **Lesiones en parénquimas** pulmonares o presencia de enfisema.

Los mapas de perfusión presentan numerosos artefactos y por ello **NO SE DEBE ASOCIAR TODO DEFECTO DE PERFUSIÓN A UN EMBOLISMO REAL**, más aún, si no se identifica el defecto de repleción arterial en la imagen de angio-TC.

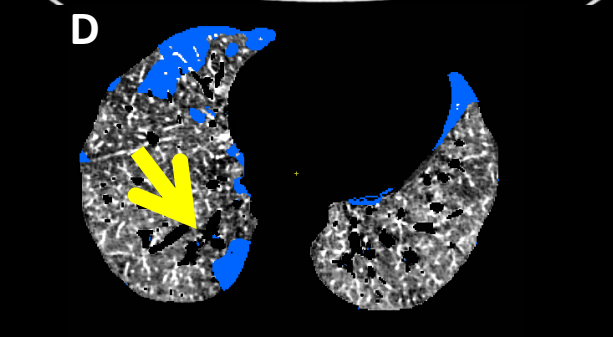
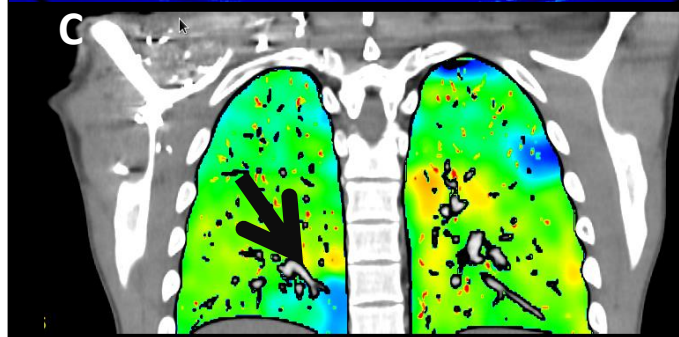
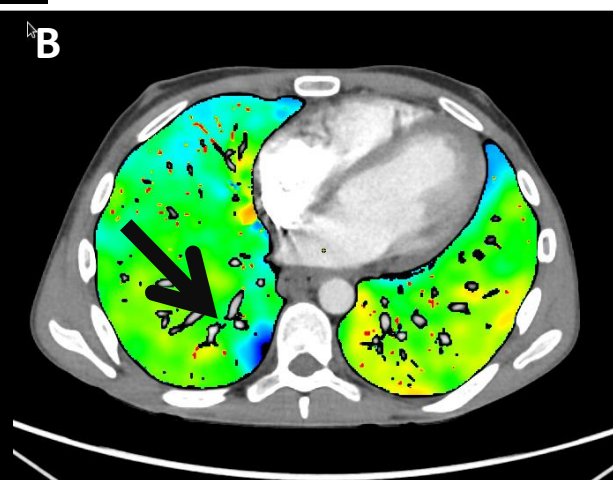
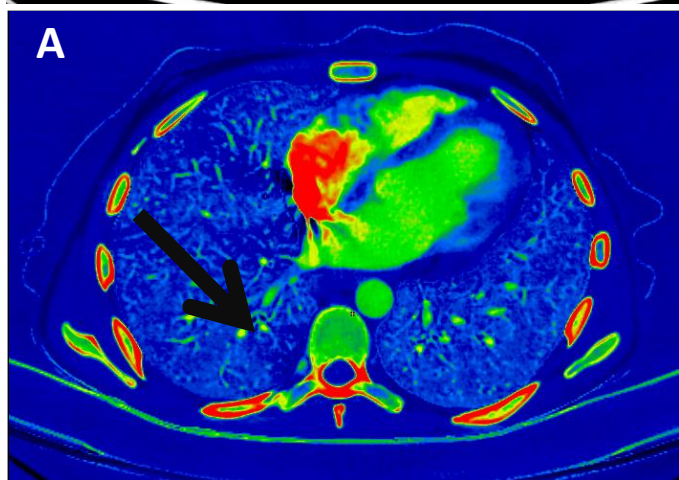
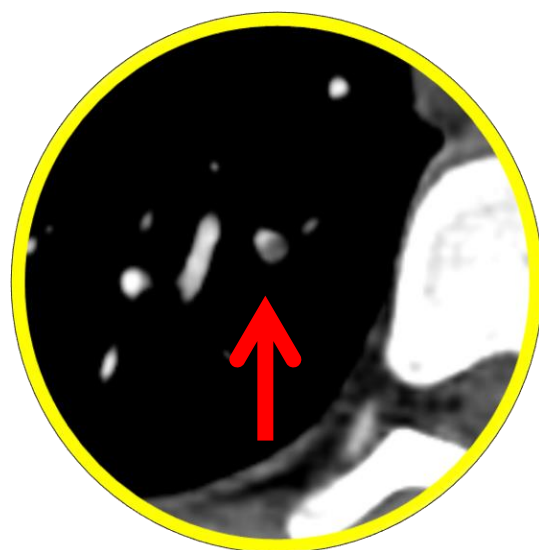
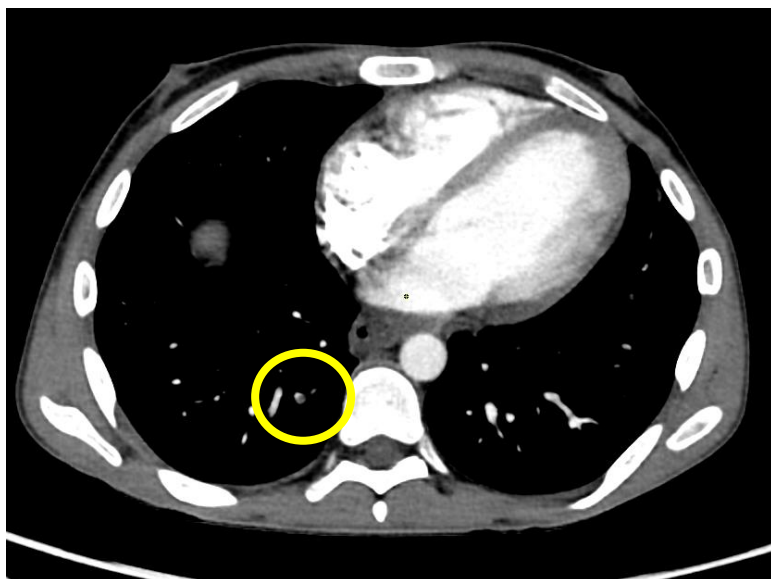


Figura 5. En la parte superior se identifica un defecto de repleción en una arteria subsegmentaria en segmento posterior de lóbulo inferior derecho compatible con tromboembolismo pulmonar agudo. Imagen ampliada.

En la parte inferior se exponen los mapas de perfusión pulmonar. **A)** Corte axial con reconstrucción sin umbral con defecto de perfusión triangular de base periférica que concuerda con el trombo observado en el angio-TC (flecha). **B)** Corte axial con umbral, vemos que tanto mediastino como vasos se han excluido del mapa de colores. Nuevamente se aprecia un defecto de perfusión en la misma localización. **C)** Corte coronal con reconstrucción con umbral de ventana de pulmón. **D)** Reconstrucción en la que se señalan en azul las áreas teóricamente más hipoperfundidas incluyendo el área de oligohemia por el trombo (flecha)

DEFECTOS DE PERFUSIÓN NO EMBÓLICOS (FALSOS POSITIVOS)

Por artefactos de endurecimiento del haz: ocurren en ambos ápices pulmonares, en segmentos anterior y apical de LSD, segmento ápico-posterior del LSI y segmento medial del LM.

Son defectos con morfología de banda o semiluna.

SOLUCIÓN: optimizar los parámetros de inyección de contraste y uso de suero salino conjuntamente.

Por artefactos del latido cardiaco:

-Ocurren en LM y língula

Por artefactos de movimiento diafragmático

- Ocurren en ambas bases pulmonares.

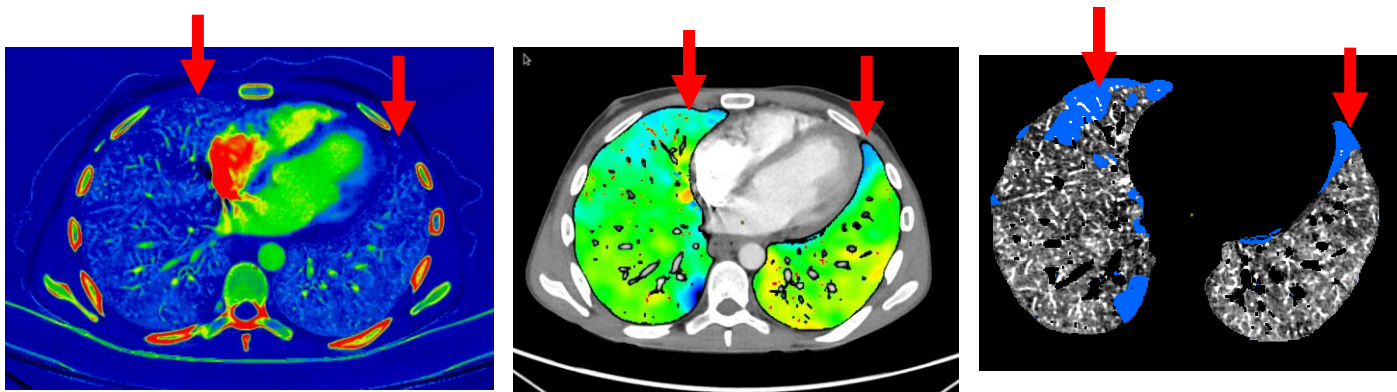


Figura 6. Las áreas de teórica hipoperfusión en lóbulo medio y língula señalados con flechas se corresponden con artefactos por latido cardiaco.

Por enfisema pulmonar

El enfisema produce hipoperfusión pulmonar tanto por destrucción del parénquima como por fenómeno de vasoconstricción hipóxico-alveolar. Se refleja como áreas hipoperfundidas tanto en mapas con umbral como sin él. En el caso del enfisema centrolobulillar típicamente ocasiona áreas oligohémicas en lóbulos superiores que dan un aspecto moteado a los mapas.

DEFECTOS DE PERFUSIÓN NO EMBÓLICOS (FALSOS POSITIVOS)

Por lesiones en el parénquima pulmonar

Alteraciones como condensaciones, atelectasias o masas sólidas presentan mayor densidad que el parénquima pulmonar normal y por ello se excluyen de los mapas cuando se aplica un umbral de reconstrucción.

En el caso de no emplear umbral las atelectasias reciben mayor aporte sanguíneo que las condensaciones y eso se pueden ver como áreas de mayor concentración de yodo, sin ser en realidad áreas hiperperfundidas.

Los mapas de yodo también pueden servir en la caracterización de masas pulmonares en función de su grado de perfusión.

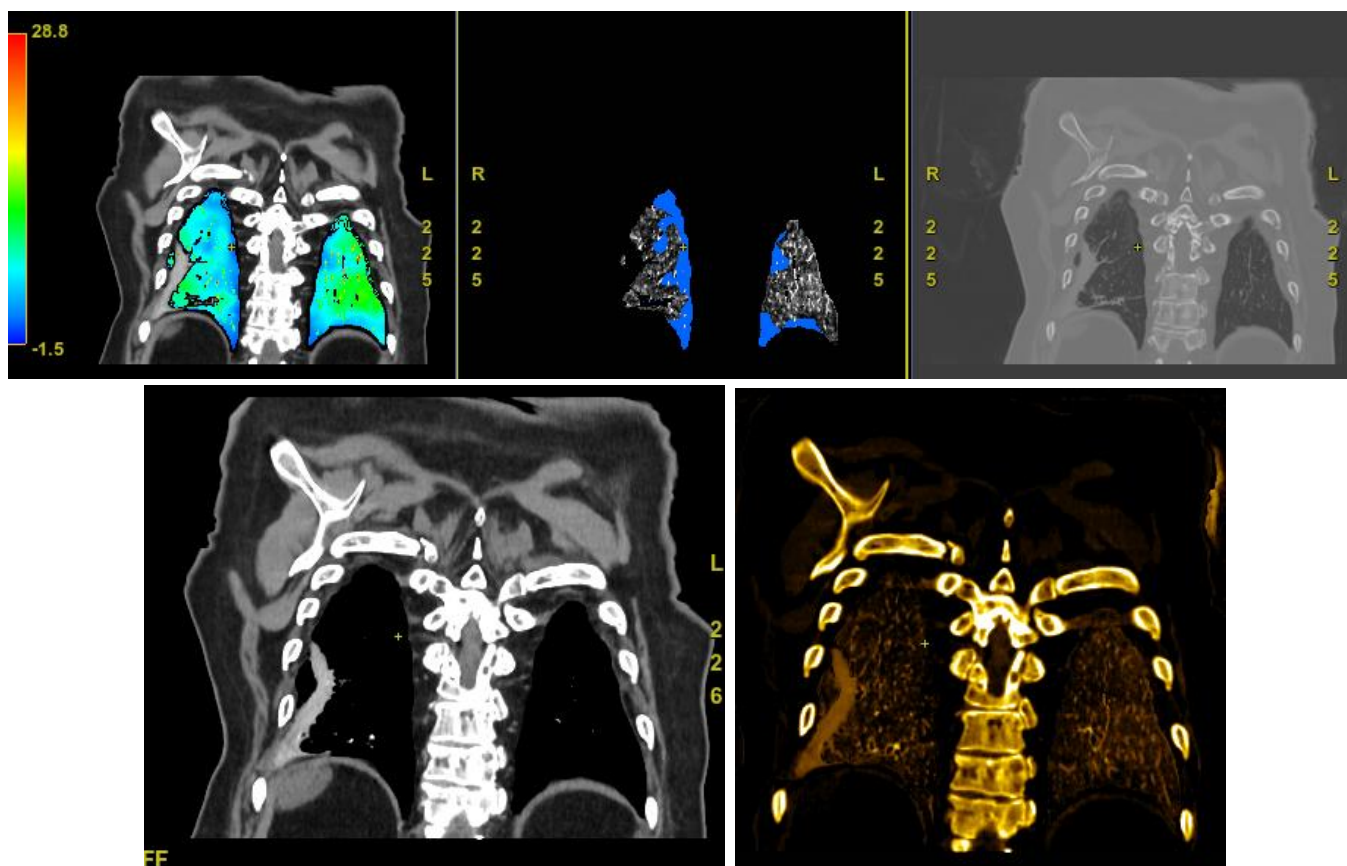


Figura 7. En la parte superior vemos distintos cortes coronales con presencia de una atelectasia en lóbulo inferior derecho. La atelectasia presenta mayor densidad que el parénquima normal y por eso es excluida del mapa con umbral.

En la parte inferior los mapas se han reconstruido sin umbral y por ello la atelectasia se ve como un área de mayor concentración de yodo.

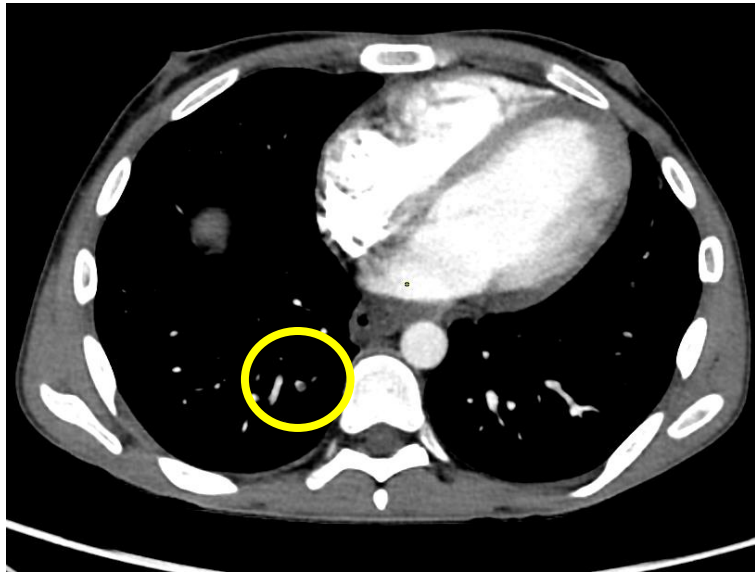
2. IMÁGENES MONOCROMÁTICAS DE BAJA ENERGÍA

- **Facilitan la detección** de defectos de repleción en arterias pulmonares al aumentar el realce de las mismas mejorando el CNR (*contrast to noise ratio*).
- **Permiten disminuir la dosis** de contraste en torno a **25-35ml**, especialmente útil en pacientes con riesgo intermedio de fallo renal inducido por contraste yodados (FG de 30 a 60 ml/min).
- Disminución de **los artefactos** de endurecimiento del haz por concentración del contraste iv.
- EL equilibrio óptimo para la detección de trombos, sin generar falsos positivos, según la bibliografía consultada, es de **60keV**.

40keV



60keV



140keV



Figura 8. A medida que aumenta la energía de las imágenes monocromáticas virtuales disminuye la resolución de contraste y por ello es más difícil identificar el trombo en arterias subsegmentaria en lóbulo inferior derecho (círculo).

Otras aplicaciones

ENFERMEDAD TROMBOEMBÓLICA PULMONAR CRÓNICA

- Diferenciar la hipertensión arterial pulmonar de la enfermedad tromboembólica crónica por la distribución de los defectos de perfusión.
- El patrón de realce tardío a expensas de ramas bronquiales hipertróficas es típico de la enfermedad tromboembólica pulmonar crónica.
- Evaluar los resultados de la endarterectomía.

TC VENTILACIÓN / PERFUSIÓN

- El TC-dual con inhalación de xenón permitiría hacer un mapa de ventilación que junto con los mapas de perfusión de yodo daría resultados similares a la gammagrafía ventilación / perfusión, si bien esta técnica se encuentra aún en estudio.

Diagnóstico diferencial entre sarcoma de arteria pulmonar y trombo.

Caracterización de masas pulmonares en función de su patrón de captación de yodo, y estudios de perfusión tumoral.

Respuesta a la termoablación de masas pulmonares

Conclusiones

- El TC de energía dual ha traído consigo innegables avances y nuevas aplicaciones que son útiles para llegar a un diagnóstico más fiable y más preciso.
- En el caso del diagnóstico del TEP, los mapas de perfusión y las imágenes monocromáticas deben ser consideradas como una herramienta más a la hora de hallar el trombo arterial, pues permiten una búsqueda más guiada del mismo y disminuye los falsos negativos.
- Los mapas de yodo cuentan con numerosos artefactos que no se corresponden con defectos de perfusión reales, y por ese motivo la imagen del angio-TC sigue siendo la técnica de referencia que determina si existe o no TEP.

BIBLIOGRAFÍA

- 1) Vlahos I, Jacobsen MC, Godoy MC, Stefanidis K, Layman RR. Dual-energy CT in pulmonary vascular disease. *Br J Radiol.* 2022 Jan 1;95(1129):20210699.
- 2) Hong YJ, Shim J, Lee SM, Im DJ, Hur J. Dual-Energy CT for Pulmonary Embolism: Current and Evolving Clinical Applications. *Korean J Radiol.* 2021 Sep;22(9):1555–68.
- 3) Monti CB, Zanardo M, Cozzi A, Schiaffino S, Spagnolo P, Secchi F, et al. Dual-energy CT performance in acute pulmonary embolism: a meta-analysis. *Eur Radiol.* 2021 Aug 1;31(8):6248–58.
- 4) Otrakji A, Digumarthy SR, Lo Gullo R, Flores EJ, Shepard JAO, Kalra MK. Dual-Energy CT: Spectrum of Thoracic Abnormalities. *Radiographics.* 2016;36(1):38–52.
- 5) Fernandez-Pérez G, Piñeiro C, Miranda M, Blanco M, Chaín J, Martínez MA. Energía Dual en TC. Consideraciones técnicas y aplicaciones clínicas. *Radiología.* 2022 Aug 1;64.
- 6) Kim SM, Chang SA, Shin W, Choe YH. Dual-energy CT perfusion during pharmacologic stress for the assessment of myocardial perfusion defects using a second-generation dual-source CT: A comparison with cardiac magnetic resonance imaging. *J Comput Assist Tomogr.* 2014;38:44–52.
- 7) Kong X, Sheng HX, Lu GM, Meinel FG, Dyer KT, Schoepf UJ, et al. Xenon-Enhanced Dual-Energy CT Lung Ventilation Imaging: Techniques and Clinical Applications. *American Journal of Roentgenology.* 2014 Feb;202(2):309–17.
- 8) García SG, Ruiz ALM, Tomás EN, García SS, Quílez MV, Fernandez AP. Angio-TC de energía dual en el tromboembolismo pulmonar agudo (TEPA): revisión de las causas, semiología y pitfalls de los defectos de perfusión y otras alteraciones en el mapa de yodo. *Seram [Internet].* 2018 Nov 16 [cited 2023 Mar 28]
- 9) FJ Cabrero. *Imagen radiológica: principios físicos e instrumentación.* Barcelona: Masson, 2004.