

Papel de la TC dual en la evaluación de la hipertensión pulmonar.

Olatz Sáenz de Argandoña¹, Judit Mestres¹, Llúria Cornellas¹, Blanca Domenech-Ximenes¹, Marcelo Sánchez¹, Ivan Vollmer²

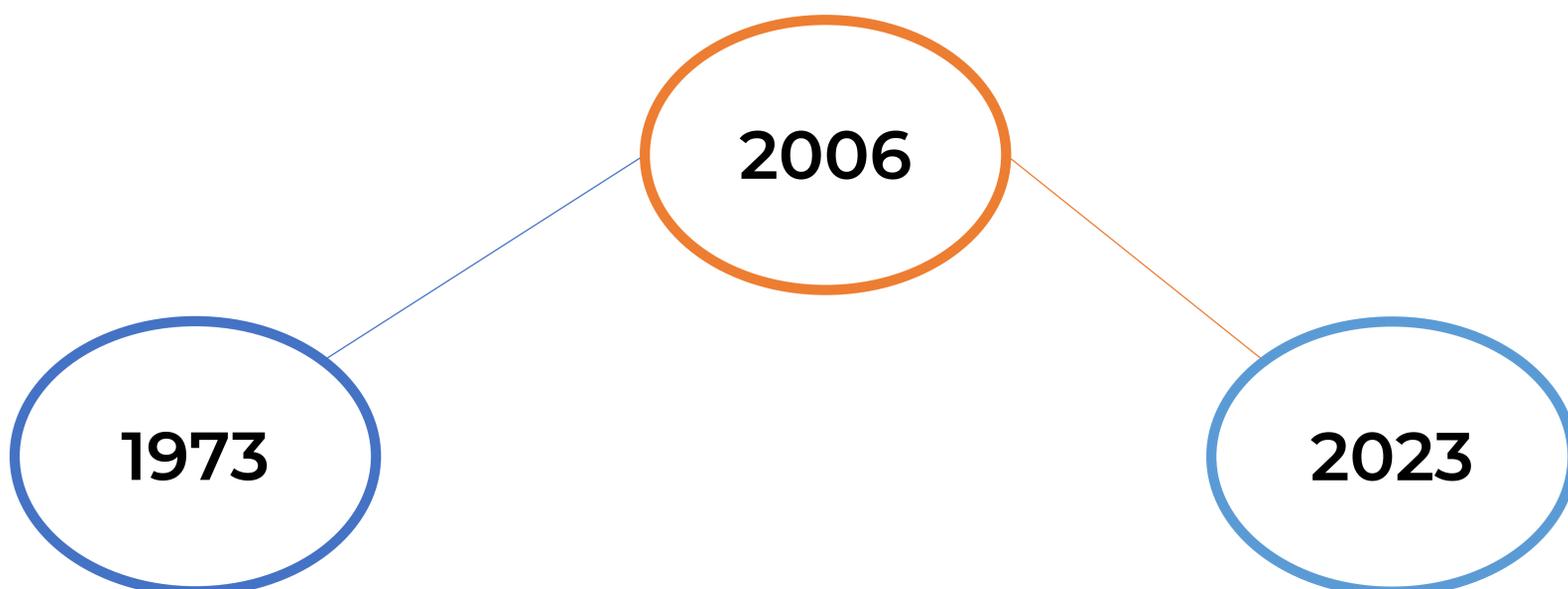
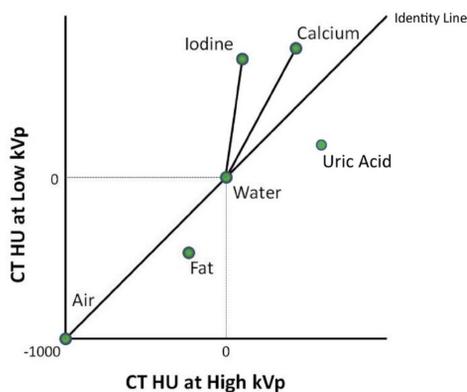
¹Hospital Clínic de Barcelona, Barcelona;

²Hospital Vall d'Hebron, Barcelona;

Objetivos docentes

- Explicar los fundamentos de la Tomografía Computerizada de Doble Energía (TCDE).
- Determinar la utilidad de la TCDE en el diagnóstico, estudio y seguimiento de la Hipertensión Pulmonar (HTP).

Introducción



1973, *British Journal of Radiology*, 46, 1016-1022

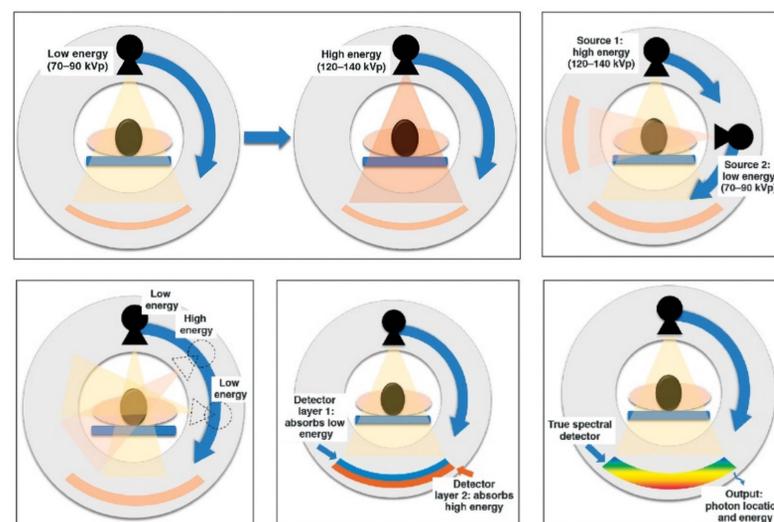
Computerized transverse axial scanning (tomography): Part I. Description of system

G. N. Hounsfield
Central Research Laboratories of EMI Limited, Hayes, Middlesex

DETERMINATION OF ATOMIC NUMBER OF MATERIAL

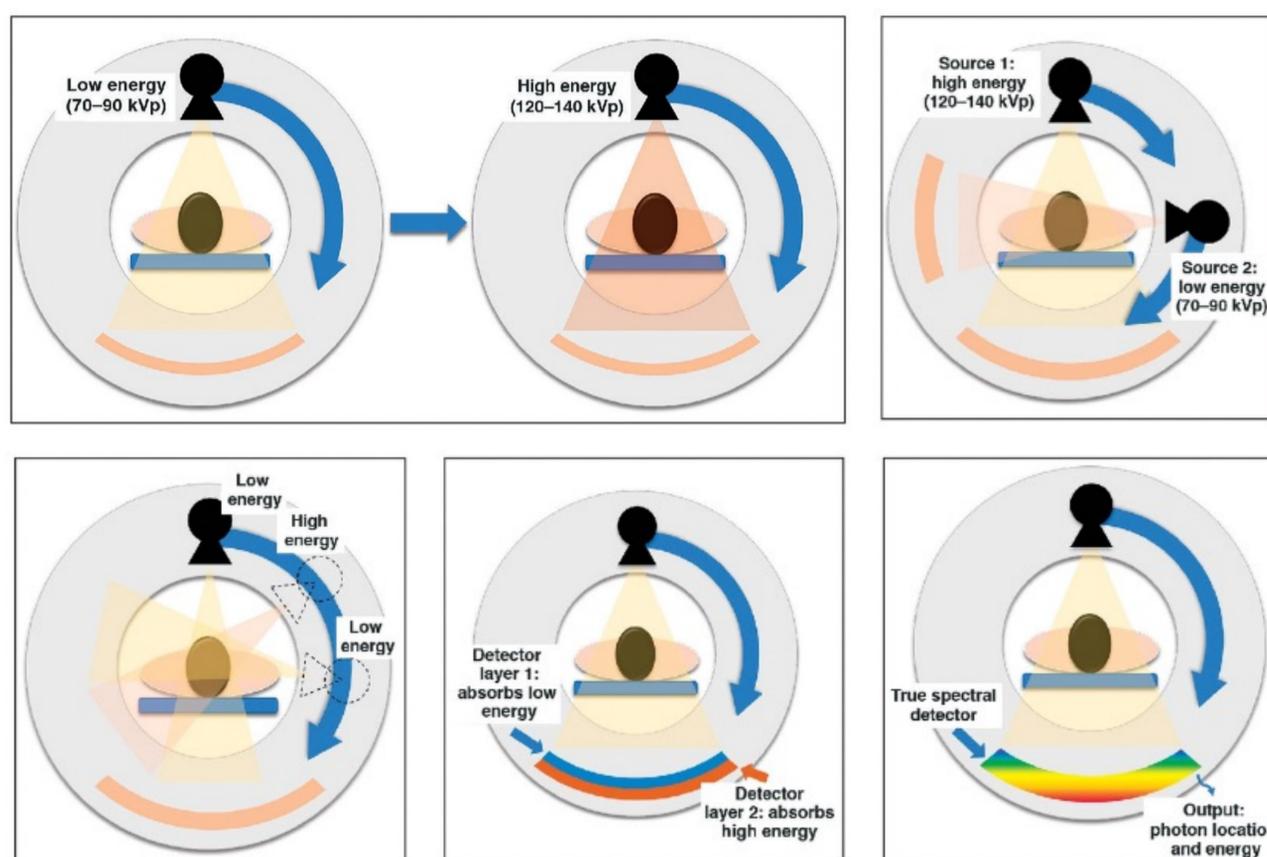
It is possible to use the machine for determining approximately the atomic number of the material within the slice. Two pictures are taken of the same slice, one at 100 kV and the other at 140 kV. If the scale of one picture is adjusted so that the values of normal tissue are the same on both pictures, then

the picture containing material with a high atomic number will have higher values at the corresponding place on the 100 kV picture. One picture can then be subtracted from the other by the computer so that areas containing high atomic numbers can be enhanced. (In practice a contrast medium, sodium iothalamate containing 420 mg of atomic iodine per millilitre (Conray 420) can be readily detected at a concentration of one part in 1,000 by the machine.) For example, tests carried out to date have shown that iodine ($Z=53$) can be readily distinguished from calcium ($Z=20$). The scope of this technique is under further investigation at present.



Esquema con los diferentes equipos comercializados capaces de realizar imagen espectral de doble energía.

TC dual vs. otras modalidades

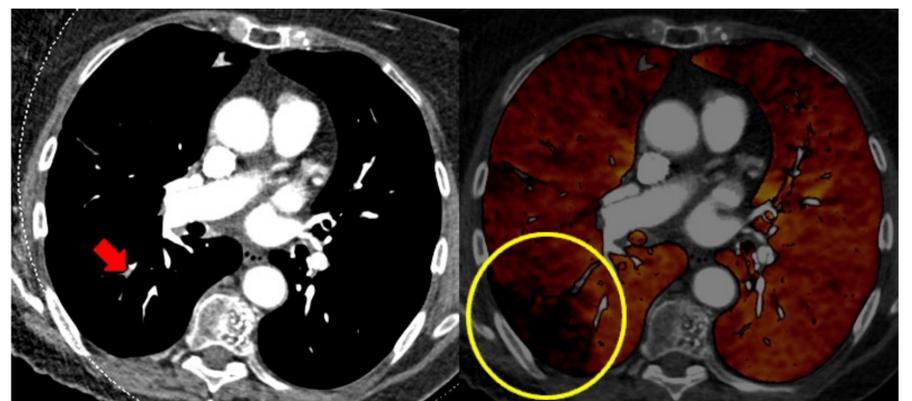


| Complejidad | Implementación | Coste | Dosis de radiación | Ventajas | Inconvenientes | Separación de energías |
|-------------------|-------------------------------|---------------|-----------------------|---|---|--------------------------|
| Sencilla | TC energía única | Bajo | - | - | - | Ninguna |
| | Adquisición secuencial | Bajo | Notablemente elevada | Barato | Desfase temporal entre adquisiciones Uso limitado | Muy buena |
| Moderada | Doble tubo | Moderado | Levemente elevada | Buena resolución temporal | Dosis de radiación Solo prospectivo | Muy buena |
| | Fast-switching | Moderado | Moderadamente elevada | Buena resolución temporal | Dosis de radiación Solo prospectivo No control automático de exposición | Muy buena |
| Moderada-compleja | Detector multicapa | Alto | Equivalente a TCUE | No latencia temporal Retrospectivo | Coste Separación energética | Dependiente del detector |
| Compleja | TC multicolor | No disponible | No disponible | Descomposición avanzada de los materiales Máxima calidad imágenes TCDE | No comercializado Artefacto de saturación del detector | Perfecta (en teoría) |

Patología vascular - TEP agudo:

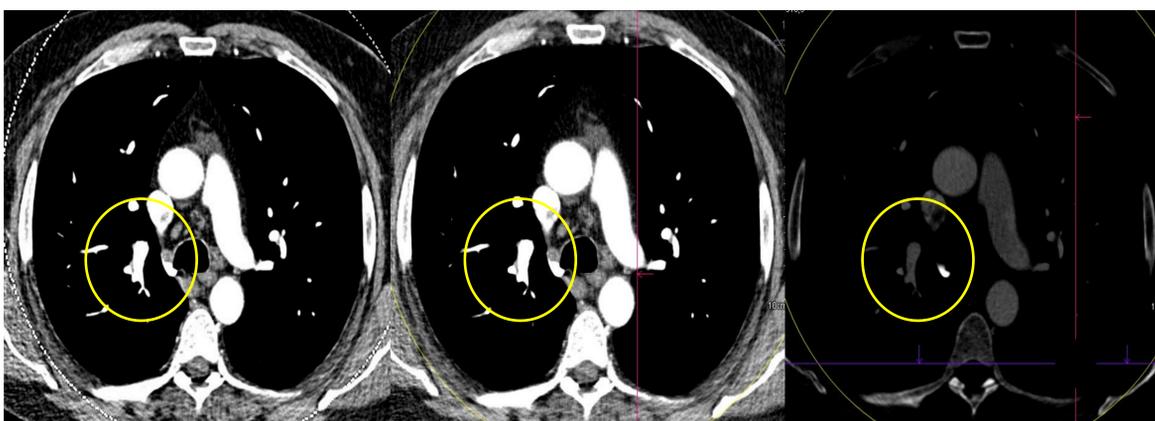
TEP agudo – Diagnóstico:

- Detección de **trombo endoluminal y defectos de perfusión**
 - Trombos oclusivos condicionan áreas de hipoperfusión
 - Identifican áreas de hipoperfusión sin trombos endoluminales
- **Defectos sin trombo asociado**
 - ¿Microémbolos?
- La TCDE Perfusión detecta defectos que ocluyen arterias pulmonares:

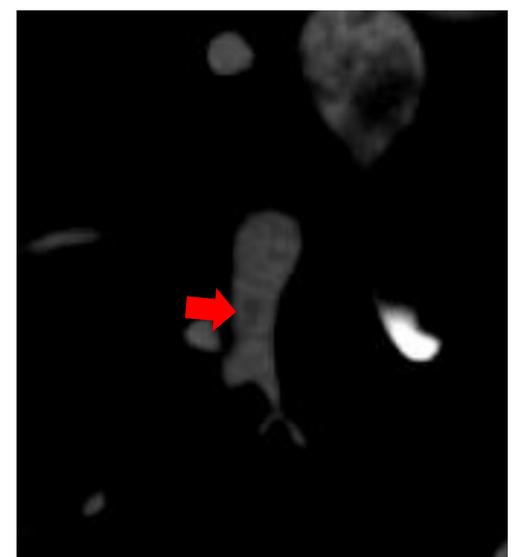


Izquierda: Angio-TC de tórax que demuestra la existencia de un émbolo en el interior de una rama de la arteria pulmonar (flecha roja). Derecha: Mapa de yodo efectuado con TC de doble energía que demuestra un área triangular de hipoperfusión en el territorio del vaso ocluido .

| TCDE Perfusión | NO TEP | TEP |
|--|--------|----------------------------------|
| Homogénea (49) | 46 | 3 (no oclusivos) |
| Patrón parcheado (29) | 24 | 5 (no oclusivos) |
| Defectos segmentarios o subsegmentarios (15) | 4 | 11 (al menos 1 defecto oclusivo) |



Imágenes de posprocesado realizadas tras angio-TC de doble energía. La primera imagen corresponde a la reconstrucción automática, la segunda a 70 KeV y la tercera a 70 KeV pero con ajuste de ventana de 700 – 40. En la imagen ampliada se puede comprobar la existencia de un pequeño defecto de repleción que no puede ser demostrado en las imágenes convencionales.



Patología Vascular – TEP agudo:

TEP agudo – Diagnóstico:

- La TCDE debe reemplazar a la angio-TC porque el tiempo de adquisición y la cantidad de contraste y radiación recibidas son similares
 - Reconstrucción monoenergética: 50-70 keV
- TCDE con mapa de yodo y mapa vascular de yodo aumentan capacidad diagnóstica
 - TEP periférico

Pontana F, et al. Acad Radiol. 2006;15:1494-504
Bauer RW, et al. Eur J Radiol. 2011;80:e476-82

Correlación histológica

- Histología = Patrón de oro (no AngioTC)

| | Sensibilidad | Especificidad |
|--------------|--------------|---------------|
| AngioTC | 98% | 100% |
| Mapa de yodo | 100% | 95% |

| Tiempo | Anatomía Patológica |
|---------|--|
| 2 horas | Émbolos arteriales. No daño en parénquima |
| 1 día | Congestión, hemorragia, inflamación, disminución espacio aéreo |
| 3 días | Congestión, hemorragia, inflamación, necrosis parcial |
| 7 días | Congestión, hemorragia, necrosis |

Chai X, et al. Br J Radiol. 2012;85:613-22

Patología Vascular – TEP agudo:

Severidad

- **Correlación entre disfunción del ventrículo derecho (VD) y defectos de perfusión en TCDE**
 - Correlación entre Ratio VD/VI y lóbulos con émbolo en PBV ($r=0,0663$; $p=0,004$)

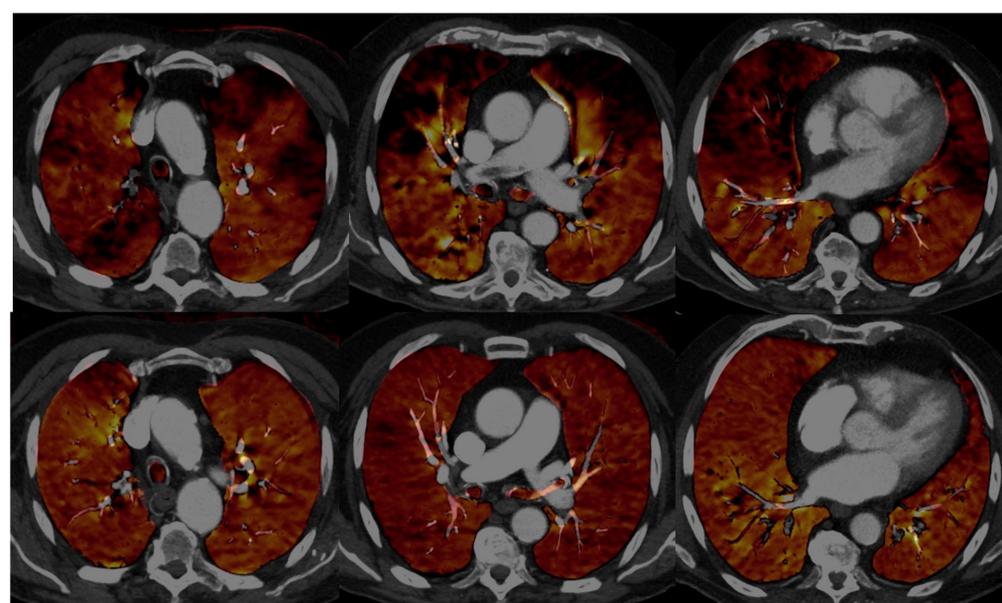
| | Sensibilidad | Especificidad |
|--------------|--------------|---------------|
| PBV paciente | 93,8% | 93,3% |
| PBV lóbulo | 93,2% | 94,7% |
| PBV segmento | 76,1% | 97,6% |

- **TCDE Perfusión discrimina la severidad de TEP**
 - Mejor que ratio VD/VI
 - Permite medir perfusión global, regional y heterogeneidad

Table 3. Capability of each index to differentiate NRHD from RHD subjects.

| | TV (%) | SE (%) | SP (%) | PPV (%) | NPV (%) | AC (%) |
|----------------------|--------|---------------|--------------|--------------|---------------|-----------------|
| OP index A | 70 | 85.7 (6/7) | 100 (6/6) | 100 (6/6) | 85.7 (6/7) | 92.3 (12/13) |
| OP index B | 70 | 85.7 (6/7) | 100 (6/6) | 100 (6/6) | 85.7 (6/7) | 92.3 (12/13) |
| RV/LV ratio | 1.2 | 57.1 (4/7) | 100 (6/6) | 100 (4/4) | 66.7 (6/9) | 76.9 (10/13) |
| RV/LV ratio+OP index | | 85.7 (6/7) | 100 (6/6) | 100 (6/6) | 85.7 (6/7) | 92.3 (12/13) |

AC, accuracy; NPV, negative predictive value; PPV, positive predictive value; SE, sensitivity; SP, specificity; TV, threshold value.



| | Volume [cm ³] | Full Volume [cm ³] | Below Min [% of Voxels] | Above Max [% of Voxels] | Enhancement [HU] |
|---------------------|---------------------------|--------------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------|
| Total | 4027 | 4063 | 1 | 8 | 32+/39 |
| Left and Right Lung | | | | | |
| Right | 2206 | 2206 | 1 | 8 | 30+/40 |
| Left | 1822 | 1858 | 1 | 8 | 35+/39 |
| Parts of Right Lung | | | | | |
| Right - Upper | 882 | 882 | 0 | 7 | 28+/33 |
| Right - Middle | 443 | 443 | 2 | 8 | 29+/38 |
| Right - Lower | 880 | 880 | 1 | 9 | 32+/46 |
| Parts of Left Lung | | | | | |
| Left - Upper | 930 | 930 | 1 | 8 | 39+/36 |
| Left - Middle | - | - | - | - | - |
| Left - Lower | 892 | 927 | 1 | 8 | 31+/40 |

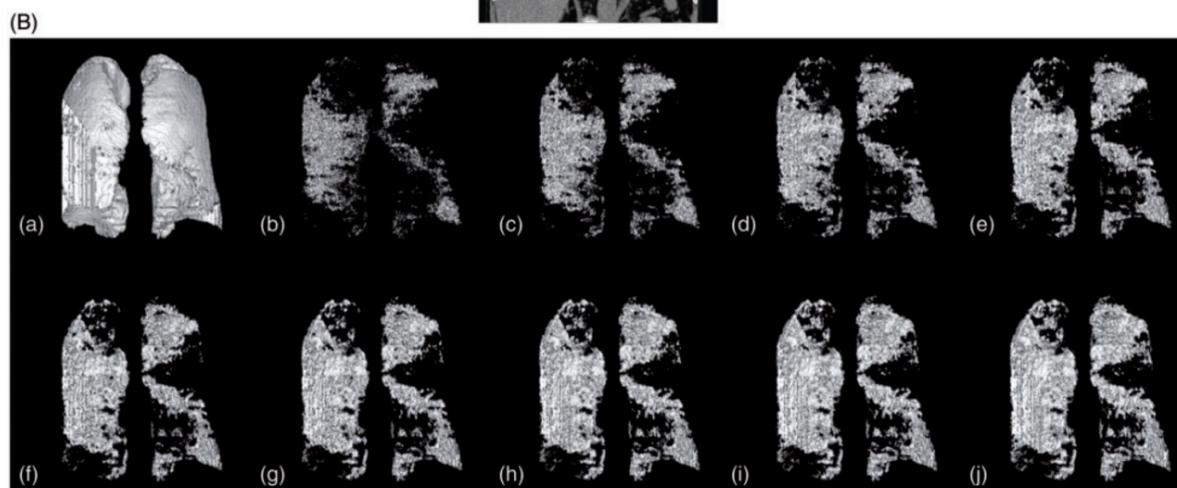
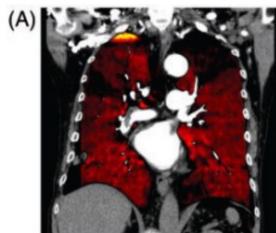
| | Volume [cm ³] | Full Volume [cm ³] | Below Min [% of Voxels] | Above Max [% of Voxels] | Enhancement [HU] |
|---------------------|---------------------------|--------------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------|
| Total | 3123 | 3132 | 0 | 10 | 46+/31 |
| Left and Right Lung | | | | | |
| Right | 1730 | 1730 | 0 | 11 | 47+/29 |
| Left | 1394 | 1402 | 0 | 10 | 45+/33 |
| Parts of Right Lung | | | | | |
| Right - Upper | 697 | 697 | 0 | 12 | 50+/33 |
| Right - Middle | 345 | 345 | 0 | 9 | 41+/17 |
| Right - Lower | 688 | 688 | 0 | 10 | 46+/29 |
| Parts of Left Lung | | | | | |
| Left - Upper | 703 | 703 | 0 | 10 | 49+/40 |
| Left - Middle | - | - | - | - | - |
| Left - Lower | 691 | 699 | 0 | 11 | 41+/24 |

Imágenes de angio-TC de tórax en el mismo paciente durante el episodio de TEP agudo (arriba) y después del tratamiento anticoagulante (debajo). Puede apreciarse la resolución de los defectos de perfusión identificados en el mapa de yodo. Esto también queda reflejado en los parámetros perfusionales analizados (imágenes de la derecha).

Patología Vascular – TEP agudo:

Severidad

- Volumetría de la perfusión con TCDE **correlacionan con los factores que sugieren severidad en TEP agudo.**
 - Rango 1-2 UH



Kunihiro Y, et al.
Acta Radiol. 2017;59:1061-7
Okada M, et al.
Clin Radiol. 2013;68:e669-75

Estudio de volumetría de la perfusión pulmonar con TC de doble energía.

- **La ratio VD/VI predice la mortalidad a los 30 días**
- El volumen de perfusión TCDE NO predice mortalidad a 30 días
- No diferencias con ratio VD/VI
- Valoración de defectos de perfusión en ausencia de trombos endovasculares
- **Aumenta la predicción de la mortalidad**
 - Por cualquier causa
 - Mejor que el ratio ventricular

Im DJ, et al.
AJR Am J Roentgenol. 2017;209:1-8
Im DJ, et al. Korean J Radiol 2020;21:1095-103
Takx RAP, et al. J Cardiovasc Comput Tomogr.
2017;11:183-7

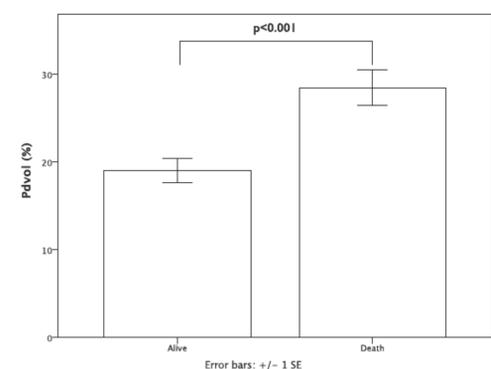


Fig. 2. Bar chart PDvol alive vs. death.

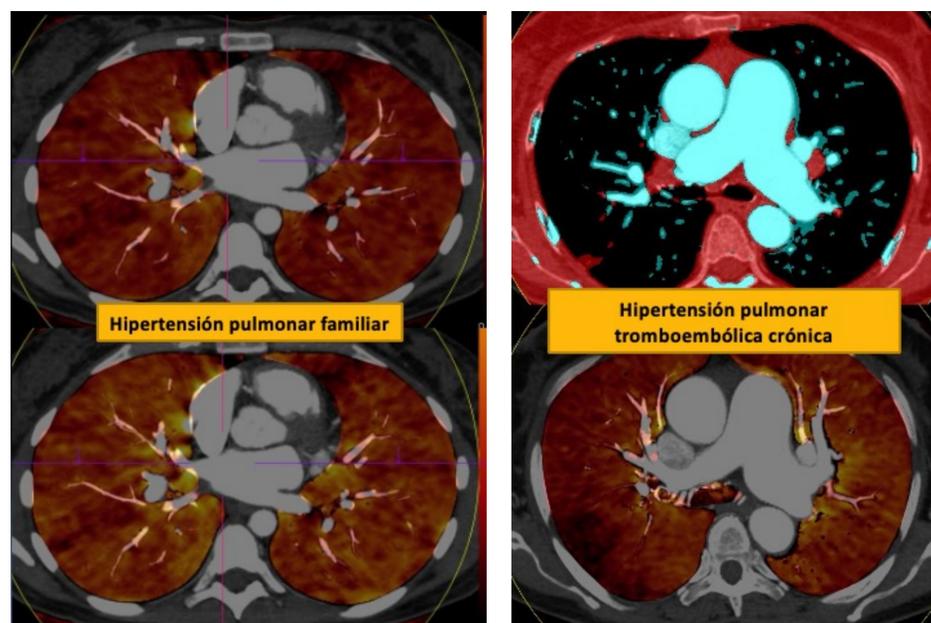
Patología Vascular – TEP crónico:

TEP crónico vs. HTP pulmonar

| | Group 1 (PAH) | Group 2 (pCTEPH) | <i>p</i> |
|---|--------------------|------------------|----------|
| Patient-based analysis | 19 patients | 12 patients | |
| - Normal perfusion, <i>n</i> (%) | 9 (47.4 %) | 0 | 0.0051* |
| Including smokers, <i>n</i> | 4 | | |
| - Abnormal perfusion, <i>n</i> (%) | 10 (52.6 %) | 12 (100 %) | |
| Including smokers, <i>n</i> | 4 | 7 | |
| Segment-based analysis | 380 segments | 240 segments | |
| • Number of segments with perfusion abnormalities, <i>n</i> | 146 | 152 | |
| • Patterns of perfusion abnormalities | | | |
| - Triangular, <i>n</i> (%) | - 3/146 (2 %) | -57/152 (37.5 %) | <0.0001* |
| - Patchy, <i>n</i> (%) | - 141/146 (96.6 %) | -89/152 (58.5 %) | |
| - Diffuse, <i>n</i> (%) | -2/146 (1.4 %) | -6/152 (3.9 %) | |

Abbreviation: PAH: pulmonary arterial hypertension; pCTEPH: peripheral chronic thromboembolic pulmonary hypertension.

*Fisher's exact test



Las imágenes de la izquierda corresponden a un caso de hipertensión arterial pulmonar familiar que muestra pequeños defectos de perfusión parcheados de morfología redondeada. Las imágenes de la derecha corresponden a un caso de hipertensión pulmonar tromboembólica crónica con defectos de llenado en el mapa vascular de yodo (arriba) y un defecto de perfusión de morfología triangular en el lóbulo inferior derecho.

Chang S, et al. Eur Radiol 2016;26:3162-70

TEP crónico vs. Sarcoma de arterias pulmonares

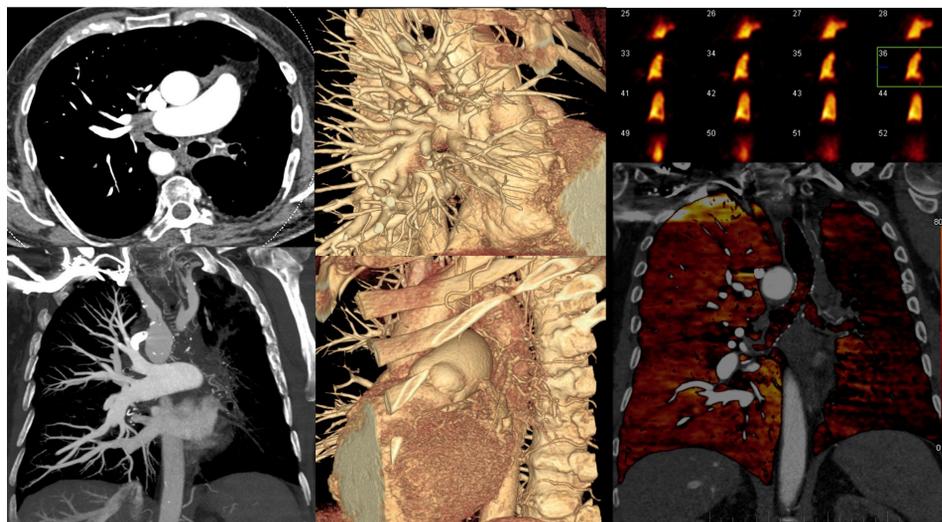
- UH no muestran diferencias
- **Diferencias significativas entre UH relativas al yodo y concentración de yodo:**
 - Sarcoma > TEP crónico

Hoey ETD, et al. AJR Am J Roentgenol. 2011;196:524-32

Patología Vascular – TEP crónico:

TEP crónico:

- **Correlación perfusión TCDE y patrón mosaico**
- No correlación perfusión TCDE y parámetro $HT_{Pulmonar}$ (PAP y PVR)
- Lóbulos ocluidos → perfusión en TCDE
- Técnica prometedora como guía para decisión terapéutica sobre tromboendarterectomía
- **TCDE con perfusión es más preciso que AngioTC para detectar TEP crónico**
- **30% incremento flujo arterial sistémico**
 - Arterias bronquiales
 - TCDE con dos fases permite determinar incremento de flujo arterial sistémico



Agnesia de la arteria pulmonar izquierda con hipertrofia secundaria de las arterias bronquiales. Las imágenes de angio-TC demuestra la ausencia de la arteria pulmonar izquierda y la hipertrofia de las arterias bronquiales. La imagen superior derecha corresponde a una gammagrafía de perfusión que muestra ausencia de llegada de macroagregados de albúmina marcados con Tecnecio al pulmón izquierdo. La imagen inferior derecha corresponde a un mapa de perfusión con TC de doble energía que muestra escasa perfusión en el pulmón izquierdo que sería atribuible a las arterias bronquiales.

Meyer M, et al. Eur J Radiol. 2015;84:2432-7

TCDE vs SPECT/TC

TCDE Perfusión > SPECT (modelo canino, histología)

Tang CX, et al. Eur J Radiol. 2016;85:498-506

| | DECT | SPECT/TC |
|---------------------------------|----------------------------------|-----------------|
| Sensibilidad | 89,4% | Estándar |
| Especificidad | 96,5% | |
| VPP | 95,6% | |
| VPN | 91,4% | |
| Precisión defectos perfusión | 93,0% | |
| Delimitación defectos perfusión | P<0,0001 | |
| Dosis radiación | 4,1 +/- 2,3 mSv | 5,3 +/- 1,1 mSv |
| | 21,2% reducción dosis (p=0,0004) | |

Patología Vascular – TEP crónico:

Diagnóstico

- TCDE genera **imagen diagnóstica estándar y análisis de perfusión**
- La valoración de lesiones centrales recae en imagen estándar
- **Detección de lesiones periféricas se incrementa con imagen de perfusión (incremento de 26,6%)**

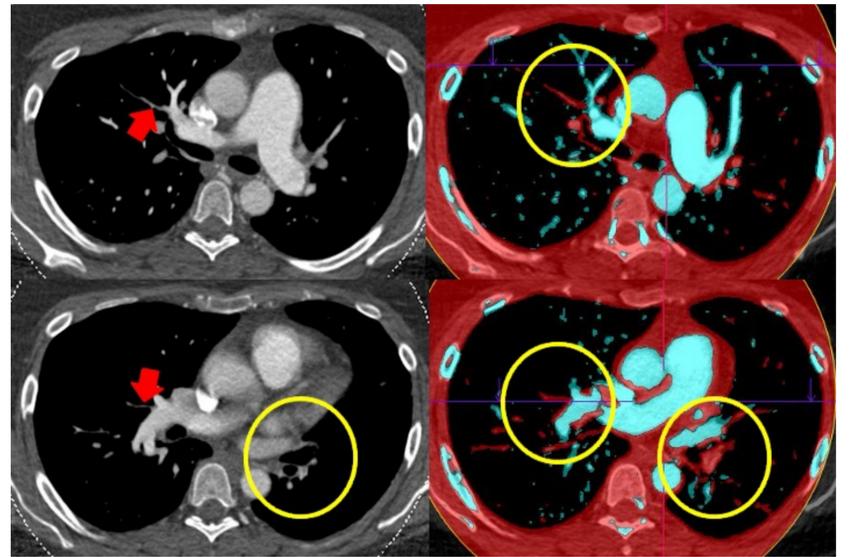


Table 5 Extent of peripheral CPE on diagnostic and perfusion images: segment-based analysis. Comparison of the extent of peripheral CPE between perfusion imaging and diagnostic images read using the "detailed reading method"

| | | Perfusion imaging | | |
|---------------------------------------|--|--|---|---|
| | | Segments without perfusion defects (n = 549) | Segments with perfusion defects (n = 630) | Segments rated as non analyzable (n = 61) |
| Detailed reading of diagnostic images | Segments without CT features of peripheral CPE (n = 321) | 242 | 66 | 13 |
| | Segments with CT features of peripheral CPE (n = 919) | 307 | 564 | 48 |

Table 6 Extent of peripheral CPE on diagnostic and perfusion images: segment-based analysis. Comparison of the extent of peripheral CTE between perfusion imaging and diagnostic images read using the "standard reading method"

| | | Perfusion imaging | | |
|---------------------------------------|--|--|---|---|
| | | Segments without perfusion defects (n = 549) | Segments with perfusion defects (n = 630) | Segments rated as non analyzable (n = 61) |
| Standard reading of diagnostic images | Segments without CT features of peripheral CPE (n = 557) | 348 | 182 | 27 |
| | Segments with CT features of peripheral CPE (n = 683) | 201 | 448 | 34 |

Hipertensión pulmonar tromboembólica crónica. En las imágenes de angio-TC de la izquierda se identifica un trombo crónico en la arteria pulmonar lobar inferior izquierda y dudosos defectos de repleción en ramas de la arteria pulmonar en el pulmón derecho. Las imágenes de reconstrucción con mapa vascular de yodo (derecha) muestran ausencia de concentración de yodo en los vasos que eran dudosos en la angio-TC convencional.

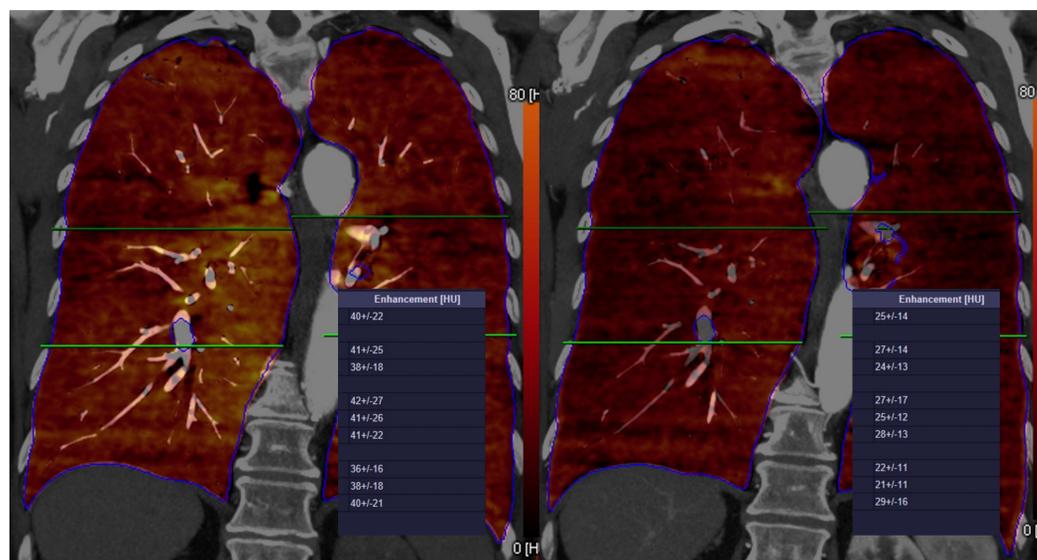
Severidad

- Score PBV TCDE
 - En cada segmento (18)
 - 0: no defecto; 1: <50%; 2: >50%
- k=0,88
- Correlaciona con PAP, presión VD, RVP
 - **Patrón de oro**

TC de doble energía:

Doble fase

- Adquisición normal seguida de nueva serie 7 segundos después
- Cuantificación mediante TCDE con doble fase **mejora la predicción no invasiva de mPAP y PVR**
- **Mejora discriminación entre TEP agudo y crónico:** Incremento de la captación de TEP crónico en fase tardía.



Mapas de yodo realizados en una adquisición en doble fase donde se aprecian las modificaciones perfusionales que se producen tanto visuales como cuantitativas entre ambas fases.

CTPED vs CTEPH

- Similar obstrucción vascular
- Menor extensión de defectos de perfusión TCPDE
- Menor presencia de mosaico en TCPDE
- Probable expresión de ausencia de afectación microvascular

TC de doble energía:

Perfusión de yodo vs nº atómico efectivo

- Algunos materiales pueden interferir y confundirse con el yodo
- Comparación mapas de yodo y de número atómico efectivo (Z_{eff})
- **PB Z_{eff} muestra defectos de perfusión no evidentes en mapa de yodo.**

DECT vs RM

- Comparación entre perfusión mediante TCDE y RM
 - $R=0,78$ $p<0.001$
 - **Resultados similares el evaluar perfusión tras endarterectomía**

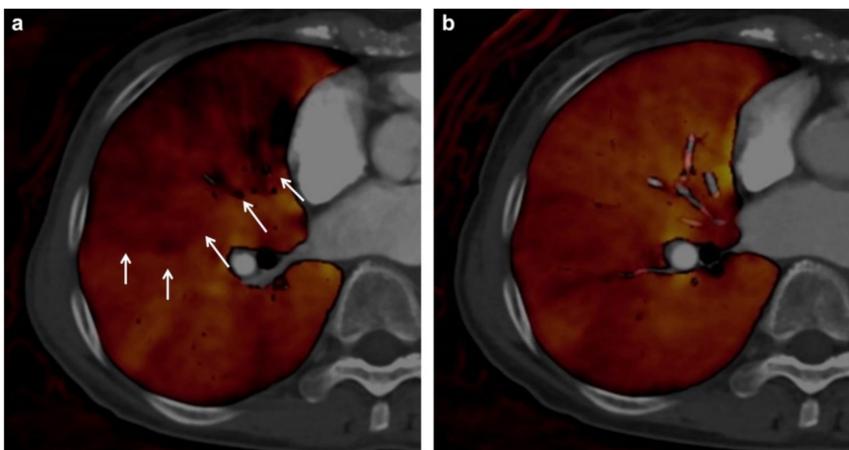
TC de doble energía:

| Variable | Rx | V/Q | SPECT/CT V/Q | Angio-TCUE | Angio-TCDE | RM | Angiografía pulmonar |
|---|--|---|---|--|--|---|--|
| Detección HP | + | - | - | + | + | + | - |
| Evaluación compartimentos anatómicos | | | | | | | |
| Pulmón | + | - | + | +++ | +++ | - | - |
| Cámaras cardíacas | + | - | - | ++ | ++ | +++ | - |
| Vasos pulmonares | + | + | + | +++ | ++++ | ++ | ++ |
| Mediastino | - | - | - | +++ | +++ | +++ | - |
| Determinación etiología HP | ++ | ++ | ++ | +++ | ++++ | ++ | ++ |
| Fortalezas | Disponibilidad | Cribado HPTEC | Evaluación combinada del parénquima y de la perfusión pulmonar | Excelente evaluación de etiología HP | Valoración de la anatomía y de la perfusión pulmonar (mapas de yodo) en una sola prueba. | No radiación. Valoración excelente de función cardíaca y flujo pulmonar en una exploración | Planteamiento de tratamiento endovascular (PEA, BPA) |
| Debilidades | Papel limitado en la determinación de la etiología | Necesita otras pruebas para determinar la causa de HP. Limitaciones en la interpretación en pacientes con otras patologías. | Valoración pulmonar limitada, Necesita mayor validación. Dosis de radiación añadida con el uso de TC. | Valoración hemodinámica limitada. Evaluación limitada de arterias pulmonares distales (más allá de nivel subsegmentario) | Necesita validación de todas las tecnologías de TCDE. | Valoración limitada del parénquima pulmonar. No disponible ampliamente. Mayor conocimiento técnico. | Incapacidad de valoración de estructura perivascular. Test invasivo. |

Patología Vascular – TEP crónico:

Angioplastia

- Incremento de PBV correlaciona con PAP, PVR y 6-min test de la marcha.
- Aumento de perfusión y **disminución de heterogeneidad** desde la primera sesión.
- TCDE perfusión puede ser indicador del efecto del tratamiento

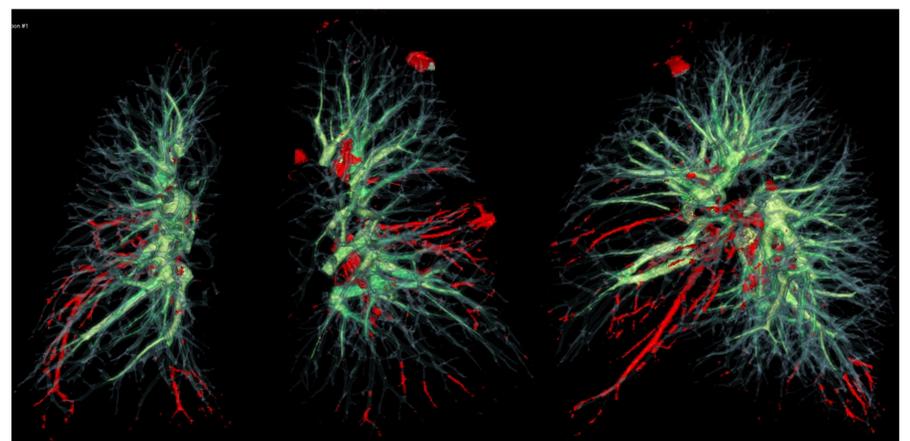
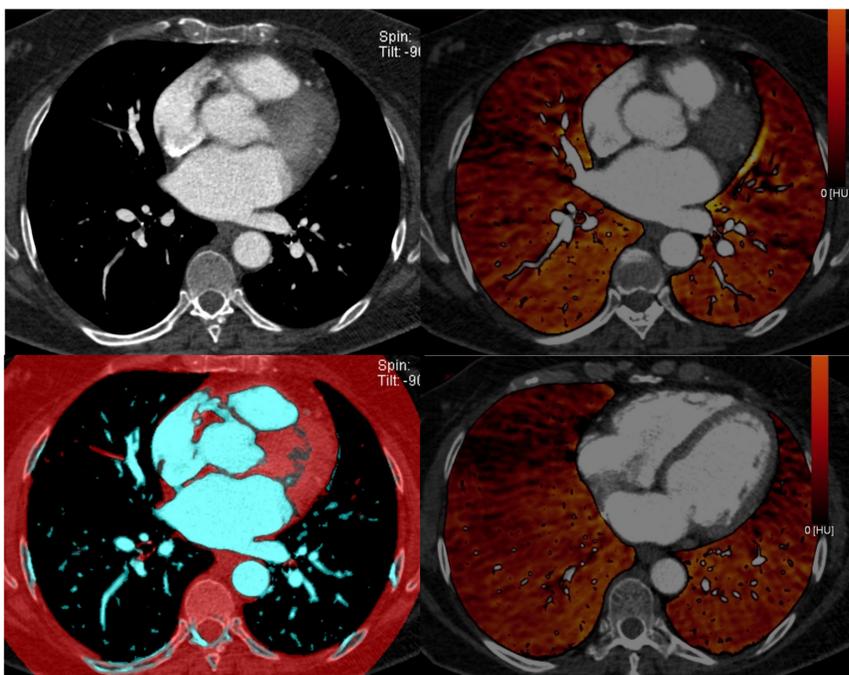


Arriba.

Defectos de perfusión en el mapa de yodo localizado en el lóbulo medio (izquierda) que se normalizan tras el tratamiento de angioplastia (izquierda).

Abajo.

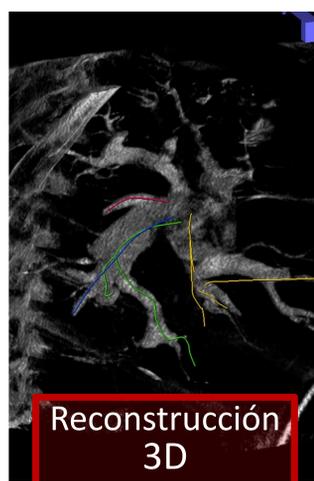
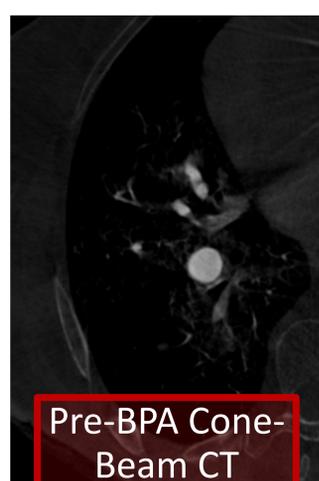
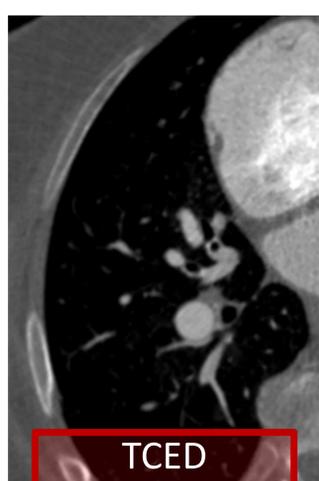
Defectos de repleción distales en paciente con hipertensión pulmonar tromboembólica crónica. El mapa vascular 3D con doble energía permite delimitar el origen de las lesiones y evaluar el posible tratamiento mediante angioplastia.



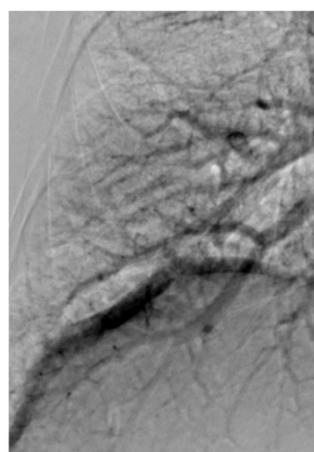
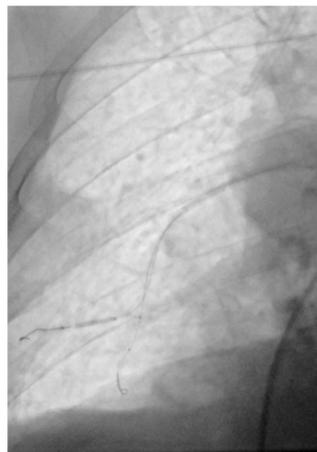
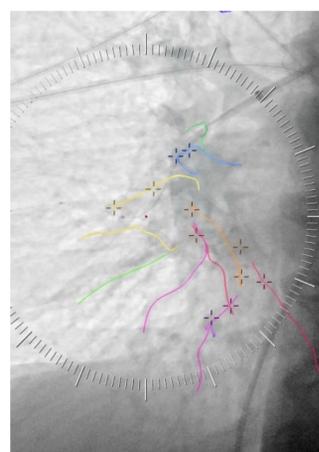
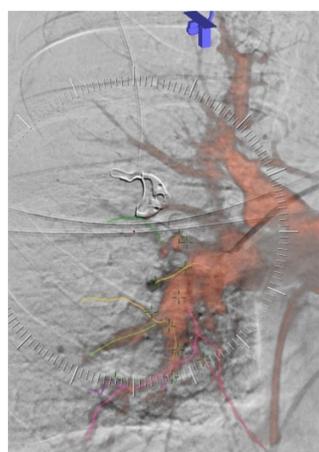
Patología Vascular – TEP crónico:

Angioplastia

- Incremento de PBV correlaciona con PAP, PVR y 6 min test de la marcha.
- Aumento de perfusión y disminución de heterogeneidad desde la primera sesión.
- TCDE perfusión puede ser indicador del **efecto del tratamiento**.



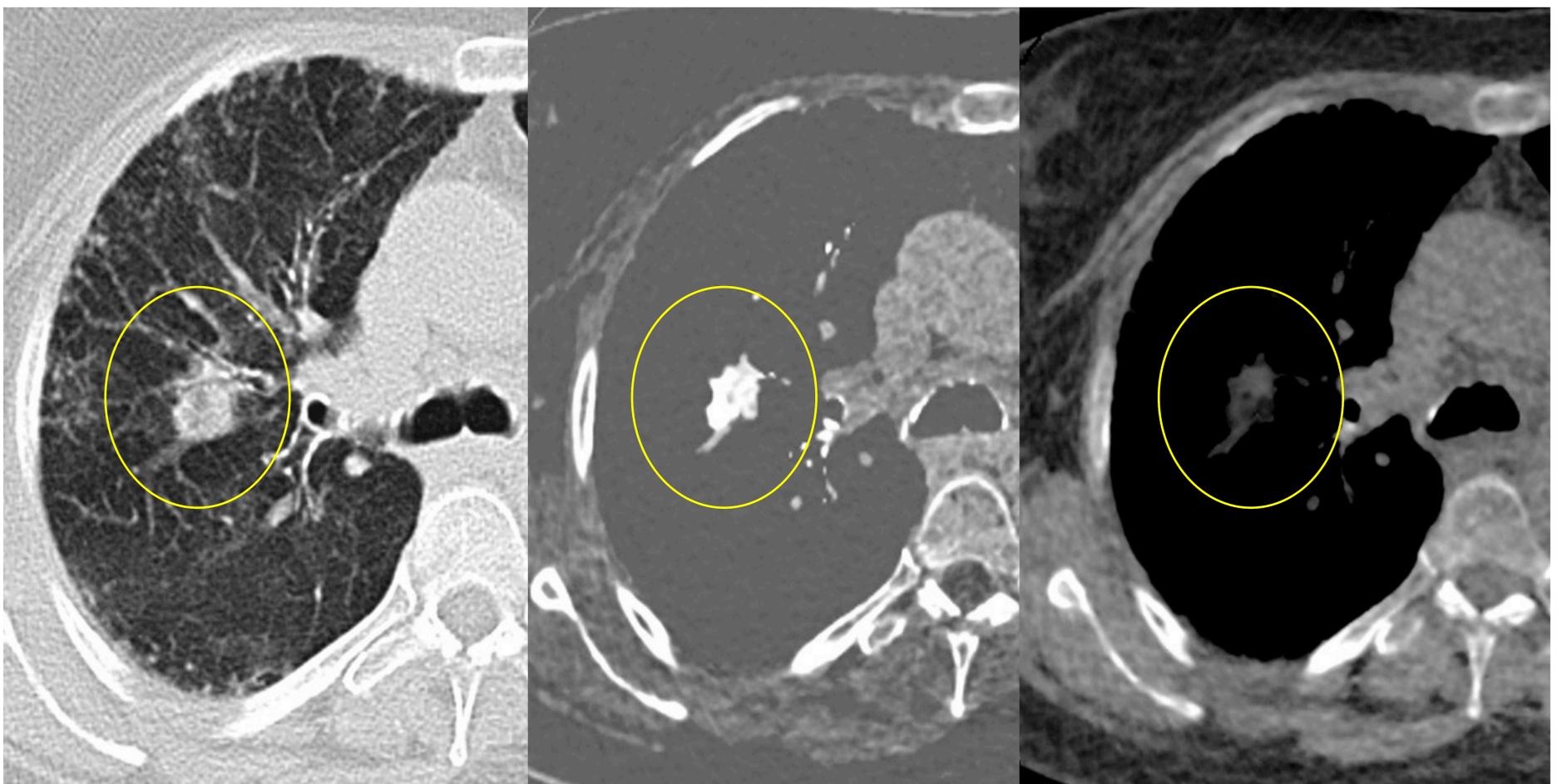
Esquema de las diferentes contribuciones de la imagen para el tratamiento con angioplastia de los pacientes con hipertensión tromboembólica crónica con afectación no tributaria de tromboendarterectomía.



Tratamiento

Patología Vascular – TEP crónico:

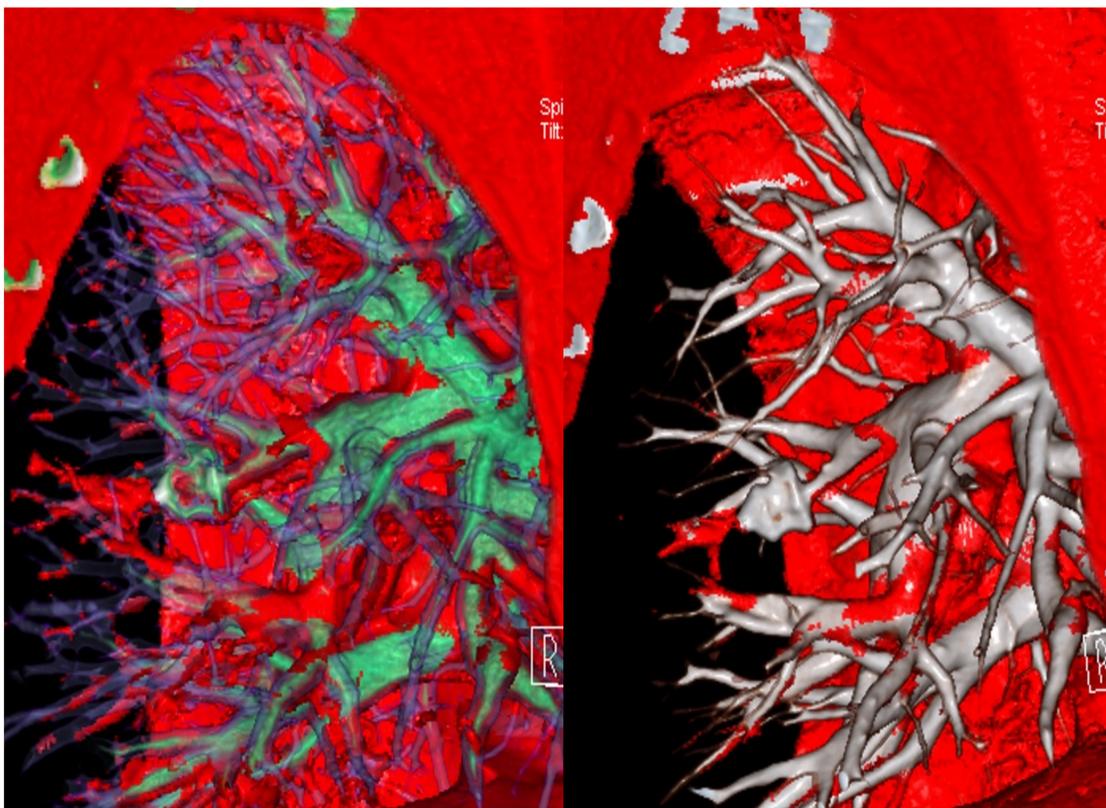
Complicaciones angioplastia



Consolidación en el lóbulo superior derecho tras tratamiento de angioplastia. El tratamiento de las imágenes de TC de doble energía permite determinar que se trata de una hemorragia posangioplastia.

Patología Vascular – TEP crónico:

Malformaciones vasculares

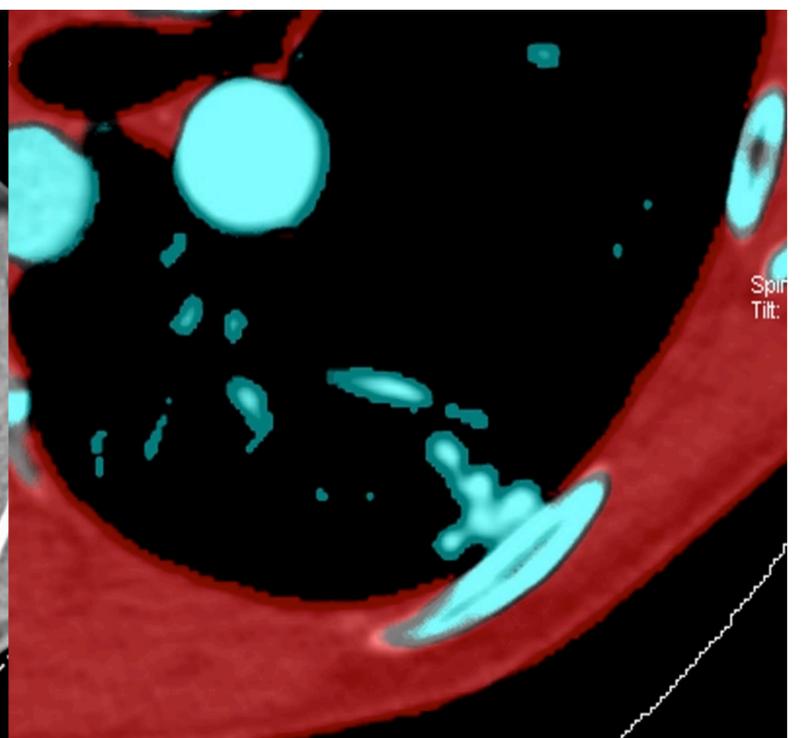


Arriba.

Malformación arteriovenosa tratada con cierre metálico. El posprocesado de las imágenes permite determinar la ausencia de concentración de yodo distal al nidus embolizado lo que sugiere un tratamiento correcto con ausencia de reperfusión.

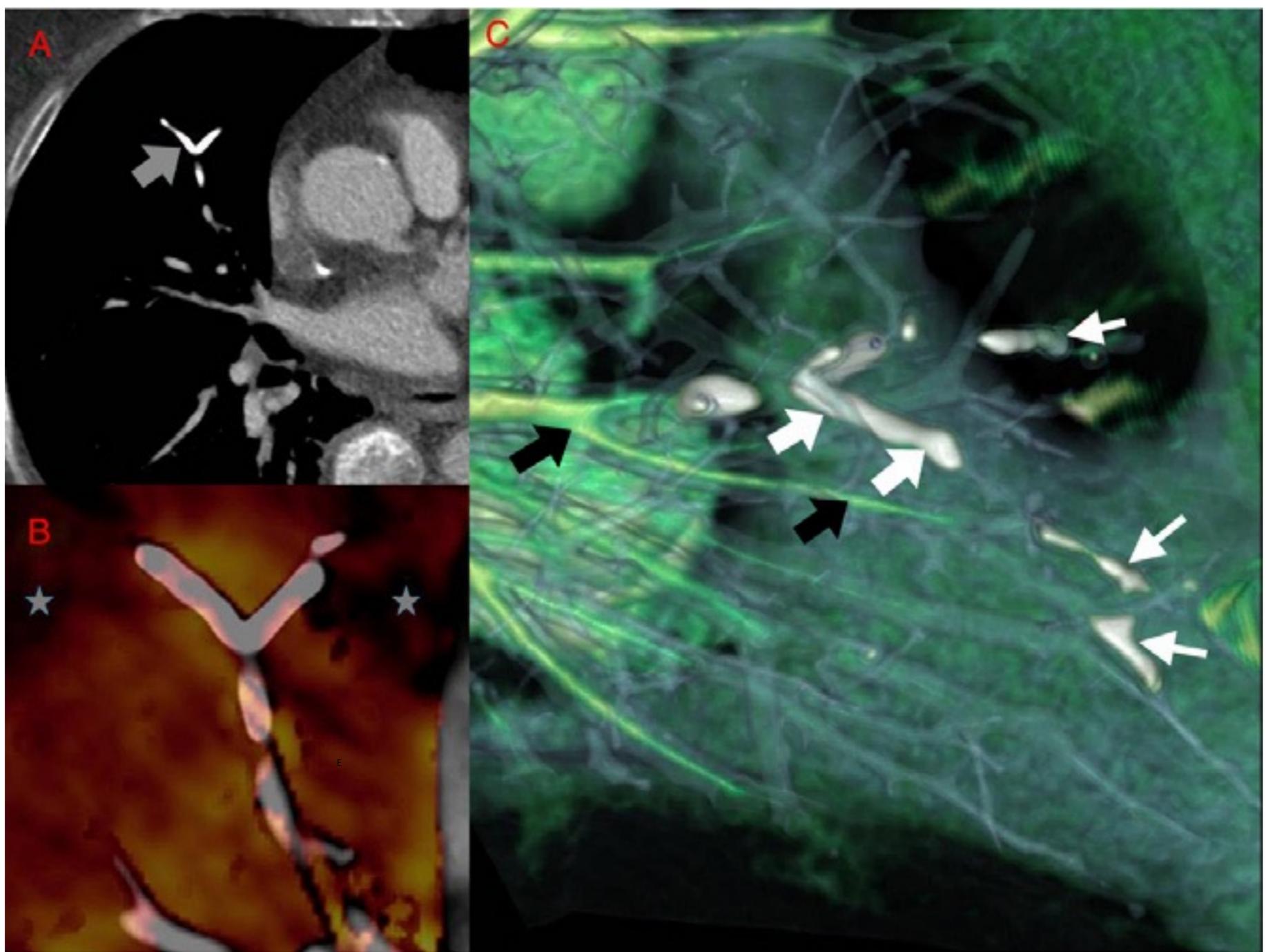
Abajo.

Paciente con sospecha de comunicación vascular intratorácica. En la imagen de la izquierda se visualiza el ligamento arterioso que, mediante técnicas de posprocesado de la imagen dual, se confirma como calcificado y sin flujo persistente. En la imagen de la derecha se evidencia una malformación arteriovenosa y el posprocesado permite determinar que no existe trombosis en el interior de los vasos dilatados.



Patología Vascular – TEP crónico:

Émbolos de cemento



Émbolos de cemento tras tratamiento de vertebroplastia. Las reconstrucciones del mapa vascular con técnica de doble energía permiten diferenciar claramente el material trombótico de los vasos con yodo en su interior, a pesar de la elevada densidad de ambos.

TC de doble energía:

Doble energía ≠ Doble radiación

- **Misma dosis de radiación** que equipos convencionales de TC
 - Idéntica calidad diagnóstica
 - Imágenes monocromáticas de baja energía (40-60 keV) permiten disminuir dosis de contraste
 - Disminuye dosis de radiación y contraste globalmente:
 - Estudios con menos fases de adquisición
 - Disminución de estudios subóptimos

| Complejidad | Implementación | Coste | Dosis de radiación | Ventajas | Inconvenientes | Separación de energías |
|-------------------|------------------------|---------------|-----------------------|---|---|--------------------------|
| Sencilla | TC energía única | Bajo | - | - | - | Ninguna |
| | Adquisición secuencial | Bajo | Notablemente elevada | Barato | Desfase temporal entre adquisiciones Uso limitado | Muy buena |
| Moderada | Doble tubo | Moderado | Levemente elevada | Buena resolución temporal | Dosis de radiación Solo prospectivo | Muy buena |
| | Fast-switching | Moderado | Moderadamente elevada | Buena resolución temporal | Dosis de radiación Solo prospectivo No control automático de exposición | Muy buena |
| Moderada-compleja | Detector multicapa | Alto | Equivalente a TCUE | No latencia temporal Retrospectivo | Coste Separación energética | Dependiente del detector |
| Compleja | TC multicolor | No disponible | No disponible | Descomposición avanzada de los materiales Máxima calidad imágenes TCDE | No comercializado Artefacto de saturación del detector | Perfecta (en teoría) |

Futuro

- **Validación de los resultados** con diferentes equipos de TCDE
- Definición de **tiempos óptimos de adquisición**
 - ¿Doble fase?
- Papel de la **multienergía**
- **Papel de la IA** en la lectura del TCDE

Conclusiones

- La TCDE **debe sustituir a angioTC convencional en el estudio del TEP agudo, HT_{Pulmonar} y TEP crónico.**
 - Estudio vascular y del parénquima equivalente
 - Dosis de radiación similar
 - Añade un estudio funcional: perfusión pulmonar

Referencias

1. Zhou Y, Shi H, Wang Y, Kumar AR, Chi B, Han P. Assessment of correlation between CT angiographic clot load score, pulmonary perfusion defect score and global right ventricular function with dual-source CT for acute pulmonary embolism. *Br J Radiol.* 2012 Jul;85(1015):972-9. doi: 10.1259/bjr/40850443. Epub 2011 Oct 5. PMID: 21976633; PMCID: PMC3474062..
2. Pontana F, Faivre JB, Remy-Jardin M, Flohr T, Schmidt B, Tacelli N, Pansini V, Remy J. Lung perfusion with dual-energy multidetector-row CT (MDCT): feasibility for the evaluation of acute pulmonary embolism in 117 consecutive patients. *Acad Radiol.* 2008 Dec;15(12):1494-504. doi: 10.1016/j.acra.2008.05.018. PMID: 19000866.
3. Bauer RW, Kerl JM, Weber E, Weisser P, Korkusuz H, Lehnert T, Jacobi V, Vogl TJ. Lung perfusion analysis with dual energy CT in patients with suspected pulmonary embolism--influence of window settings on the diagnosis of underlying pathologies of perfusion defects. *Eur J Radiol.* 2011 Dec;80(3):e476-82. doi: 10.1016/j.ejrad.2010.09.009. Epub 2010 Oct 12. PMID: 20943337.
4. Chai X, Zhang LJ, Yeh BM, Zhao YE, Hu XB, Lu GM. Acute and subacute dual energy CT findings of pulmonary embolism in rabbits: correlation with histopathology. *Br J Radiol.* mayo de 2012;85(1013):613-22.
5. Zhang LJ, Yang GF, Zhao YE, Zhou CS, Lu GM. Detection of pulmonary embolism using dual-energy computed tomography and correlation with cardiovascular measurements: a preliminary study. *Acta Radiol.* 2009 Oct;50(8):892-901. doi: 10.1080/02841850903095393. PMID: 19639470
7. Kunihiro Y, Okada M, Matsunaga N. Evaluation of a proper cutoff value on quantitative dual-energy perfusion CT for the assessment of acute pulmonary thromboembolism. *Acta Radiol.* 2017 Sep;58(9):1061-1067. doi: 10.1177/0284185116683577. Epub 2017 Jan 31. PMID: 28142251.
8. Okada M, Nakashima Y, Kunihiro Y, Sano Y, Suga K, Kido S, Matsunaga N. Volumetric evaluation of dual-energy perfusion CT for the assessment of intrapulmonary clot burden. *Clin Radiol.* 2013 Dec;68(12):e669-75. doi: 10.1016/j.crad.2013.07.018. Epub 2013 Sep 8. PMID: 24025862.

Referencias

9. Chang S, Hur J, Im DJ, Suh YJ, Hong YJ, Lee HJ, Kim YJ, Choi BW. Dual-energy CT-based iodine quantification for differentiating pulmonary artery sarcoma from pulmonary thromboembolism: a pilot study. *Eur Radiol.* 2016 Sep;26(9):3162-70. doi: 10.1007/s00330-015-4140-2. Epub 2015 Dec 5. PMID: 26638163.
10. Hoey ETD, Ganeshan A, Nadar SK, Gulati GS. Evaluation of the Aortic Root With MRI and MDCT Angiography: Spectrum of Disease Findings. *Am J Roentgenol.* agosto de 2012;199(2):W175-86.
11. Meyer M, Haubenreisser H, Sudarski S, Doesch C, Ong MM, Borggrefe M, Schoenberg SO, Henzler T. Where do we stand? Functional imaging in acute and chronic pulmonary embolism with state-of-the-art CT. *Eur J Radiol.* 2015 Dec;84(12):2432-7. doi: 10.1016/j.ejrad.2015.09.015. Epub 2015 Sep 25. PMID: 26431747.
12. Tang CX, Yang GF, Schoepf UJ, Han ZH, Qi L, Zhao YE, Wu J, Zhou CS, Zhu H, Stubenrauch AC, Mangold S, Zhang LJ, Lu GM. Chronic thromboembolic pulmonary hypertension: Comparison of dual-energy computed tomography and single photon emission computed tomography in canines. *Eur J Radiol.* 2016 Feb;85(2):498-506. doi: 10.1016/j.ejrad.2015.11.035. Epub 2015 Nov 28. PMID: 26781157.
13. Remy-Jardin M, Ryerson CJ, Schiebler ML, Leung ANC, Wild JM, Hoeper MM, Alderson PO, Goodman LR, Mayo J, Haramati LB, Ohno Y, Thistlethwaite P, van Beek EJR, Knight SL, Lynch DA, Rubin GD, Humbert M. Imaging of Pulmonary Hypertension in Adults: A Position Paper from the Fleischner Society. *Radiology.* 2021 Mar;298(3):531-549. doi: 10.1148/radiol.2020203108. Epub 2021 Jan 5. PMID: 33399507.
14. Koike H, Sueyoshi E, Sakamoto I, Uetani M, Nakata T, Maemura K. Quantification of lung perfusion blood volume (lung PBV) by dual-energy CT in patients with chronic thromboembolic pulmonary hypertension (CTEPH) before and after balloon pulmonary angioplasty (BPA): Preliminary results. *Eur J Radiol.* 2016 Sep;85(9):1607-12. doi: 10.1016/j.ejrad.2016.06.016. Epub 2016 Jun 21. PMID: 27501896.