

Acercándonos al microscopio: Valoración de la Enfermedad Intersticial con Photon-Counting

Carlos Delgado Solano¹, José Marlon Rodríguez Ortega¹, Daniel Alfonso Zambrano Andrade¹, Adolfo Delgado Brito¹,
Gorka Bastarrika Alemañ¹, Guillermo Gallardo Madueño²

¹Clínica Universidad de Navarra, Pamplona.

²Clínica Universidad de Navarra, Madrid

Objetivos

1

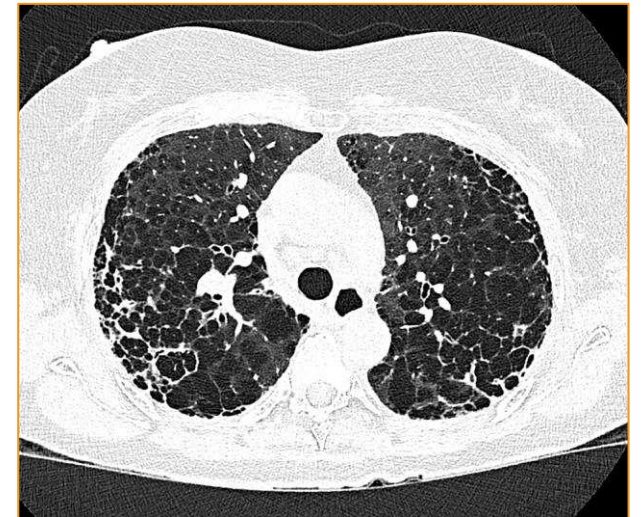
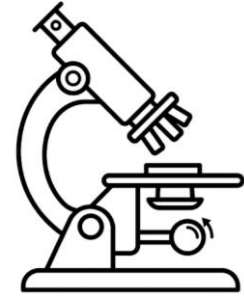
Enseñar las ventajas del photon-counting computed tomography (PCCT) en la valoración de los hallazgos de las enfermedades intersticiales

2

Revisar la evidencia sobre su utilidad clínica y el potencial impacto en el diagnóstico radiológico de las enfermedades intersticiales difusas

Introducción

- Las **enfermedades pulmonares intersticiales (EPI)**
 - Grupo heterogéneo de trastornos pulmonares.
 - Afectan principalmente al intersticio pulmonar.
 - Pueden comprometer los espacios alveolares y vías respiratorias distales.
- Históricamente, el **diagnóstico** ha sido **complejo** y en ocasiones **confuso**
 - Clasificación se basaba en criterios clínicos, radiológicos e histológicos.
 - No siempre presentaban una correlación entre sí.
- Principios del año 2000 clasificación basada en **patrones histológicos**.
 - Estos patrones se asociaban con hallazgos característicos en la **tomografía computarizada (TC)**.
 - Correlación adecuada entre los hallazgos histopatológicos y las imágenes radiológicas.



TC buena correlación pero ...



Problema

La supervivencia y el tratamiento de las EPLs en ocasiones dependen de la detección temprana de cambios físicos microscópicos



Limitaciones de TC convencional

La TC convencional con detectores convencionales de integración de energía (DIE) tienen limitaciones inherentes de resolución espacial y ruido que dificultan ocasionalmente la valoración de patrones



Resultado clínico

Exceso de casos indeterminados, requiriendo biopsias invasivas o retrasando terapias antifibróticas

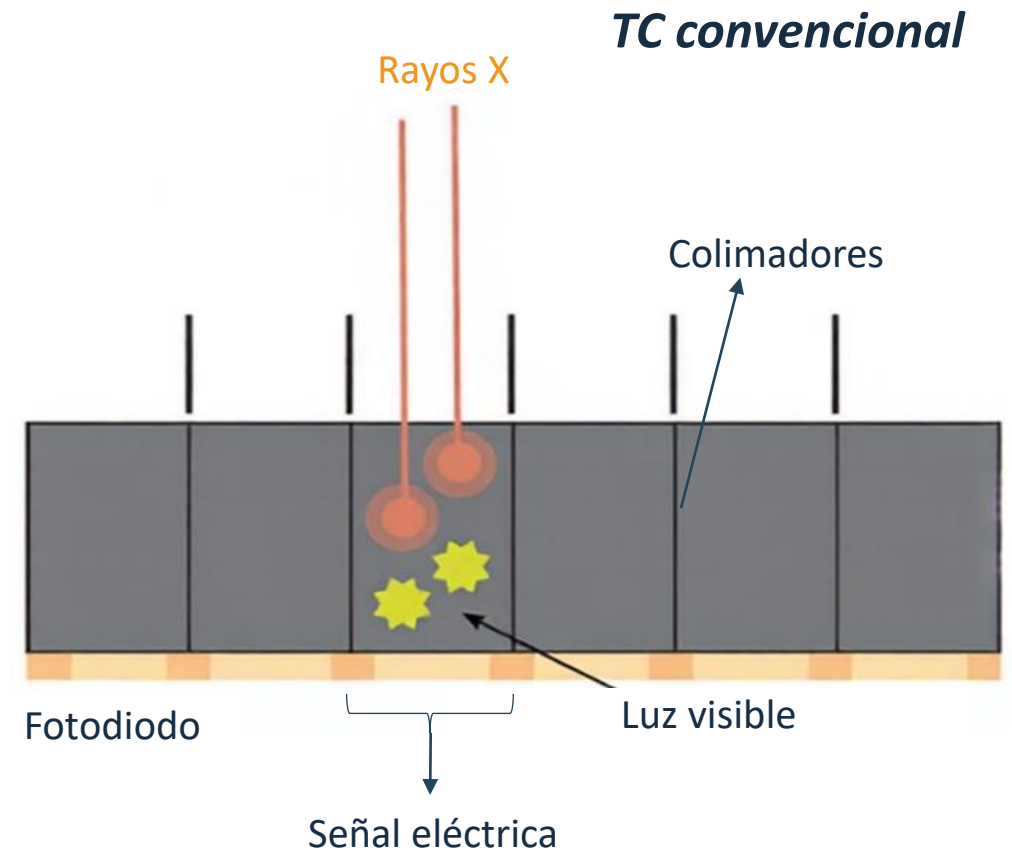
Avance en el diagnóstico: Aparición de la TCCF

- La **tomografía computarizada por conteo de fotones (TCCF)**
 - Avance en la evaluación de las enfermedades pulmonares intersticiales
 - Supera varias limitaciones de la TC convencional basada en detectores de integración de energía.
 - Es relevante, ya que el diagnóstico preciso de las **EPID** depende de la identificación detallada de patrones morfológicos sutiles.
- La **correcta clasificación** de las neumonías intersticiales **es fundamental**:
 - Importantes diferencias en el pronóstico y respuesta al tratamiento entre sus distintas entidades
 - Decisión de introducir terapias antifibróticas, especialmente en la **fibrosis pulmonar progresiva**.

¿Cómo funciona el TC convencional?

Los **detectores de integración de energía** funcionan mediante un proceso indirecto que depende del centelleo para generar la imagen.

1. **Interacción inicial:** Los fotones de **rayos X** que atraviesan al paciente llegan al detector.
2. **Centelleo:** Al impactar contra el detector, un material **centelleador** convierte la energía en luz visible.
3. **Aislamiento de la luz:** Evita que la luz se disperse a los píxeles vecinos, que borraría la imagen. Para lograrlo, cada cristal centelleador está rodeado por capas reflectantes, los **septos (colimadores)**. Estos ocupan parte del detector (espacio muerto), reduciendo la resolución espacial.
4. **Conversión fotoeléctrica:** La luz es captada por un **fotodiodo** que la convierte en señal eléctrica.
5. **Integración de la señal:** Suma la energía de todos los fotones en un intervalo de tiempo. No distingue cuántos llegaron ni la energía individual de cada uno.



¿Cómo funciona el Photon Counting?

Los **detectores de conteo de fotones** se basan en un proceso de conversión directa que elimina los pasos intermedios de la luz.

1. **Interacción inicial:** Los fotones de **rayos X** impactan directamente contra una capa de **material semiconductor**.
2. **Generación de cargas:** Al chocar contra el semiconductor, cada fotón genera una **nube de electrones**.
3. **Pulsos eléctricos:** Estas cargas llegan al ánodo y crean un **pulso eléctrico** directamente proporcional a la energía del fotón.
4. **Conteo individual:** Los pulsos son **contados individualmente** por el sistema.
5. **Clasificación espectral:** Los electrones se clasifican y se asignan a diferentes "**bins**" o **canales de energía** según el voltaje detectado, permitiendo obtener **información espectral** (multienergética).

TCCF

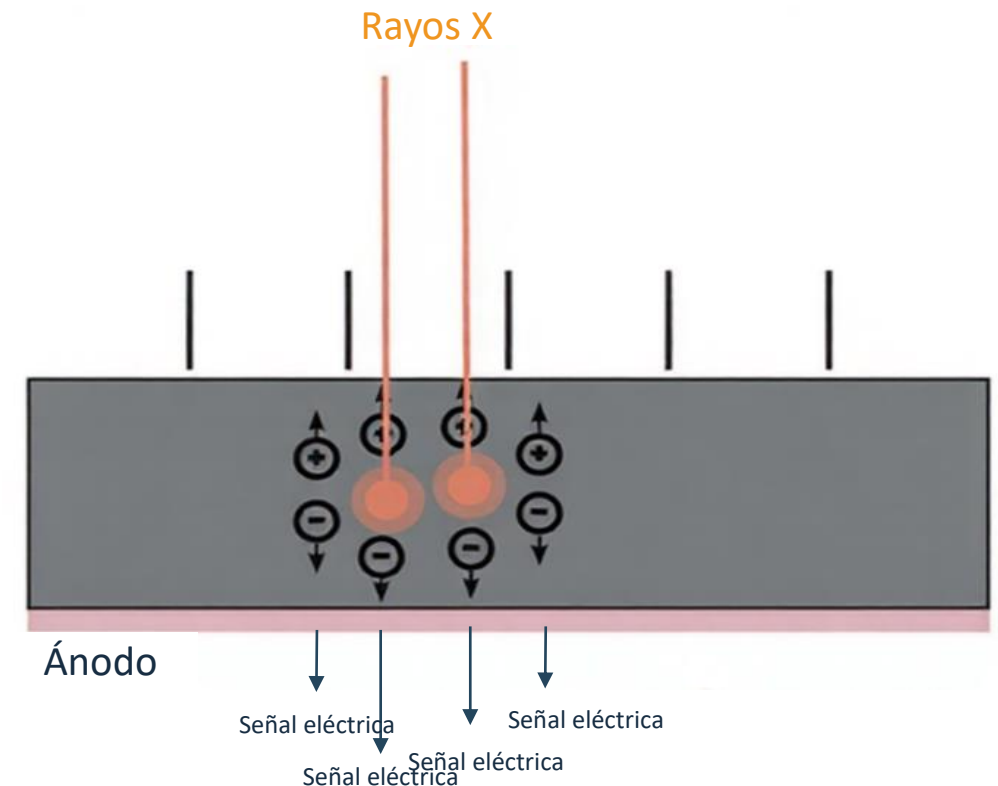
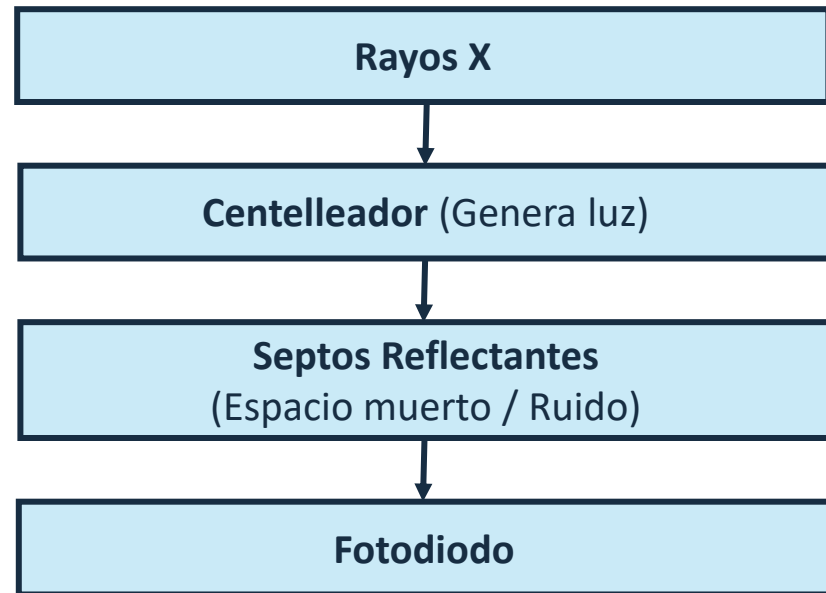


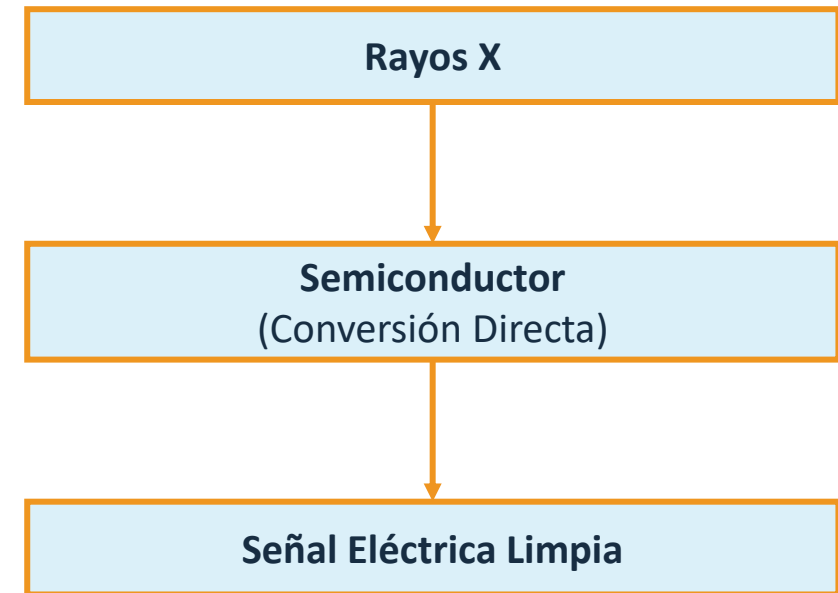
Ilustración adaptada de: van der Bie J et al.

TC convencional



Limitación: La conversión indirecta genera pérdida de señal y requiere septos que limitan el tamaño mínimo del píxel

TC conteo de fotones



Ventaja: Sin septos reflectantes. Los fotones se convierten directamente. Permite píxeles ultra-pequeños y elimina ruido electrónico al descartar señales de baja energía

Características y novedades del TCCF

1

Resolución espacial ultra-alta:

- Al no requerir septos reflectantes, los píxeles del PCCT pueden ser mucho más pequeños.
- Permite alcanzar resoluciones de hasta **0,2 mm** (125 μm in-plane), ideal para estructuras pequeñas como el intersticio pulmonar.

2

Eliminación del ruido electrónico:

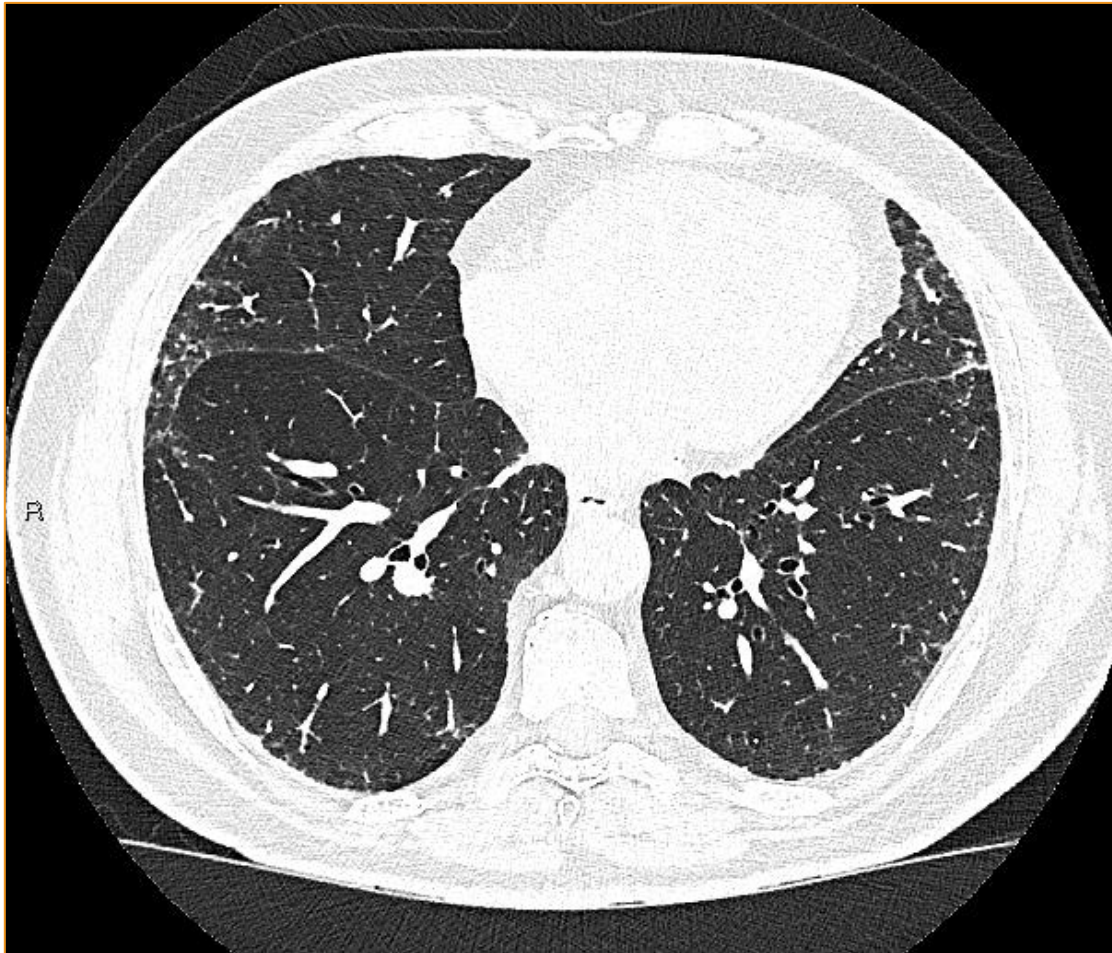
- Al establecer umbrales de energía bajos, el sistema puede ignorar los pulsos eléctricos de muy baja intensidad que corresponden al ruido electrónico del sistema, mejorando drásticamente la calidad de imagen (obesos o estudios de baja dosis).

3

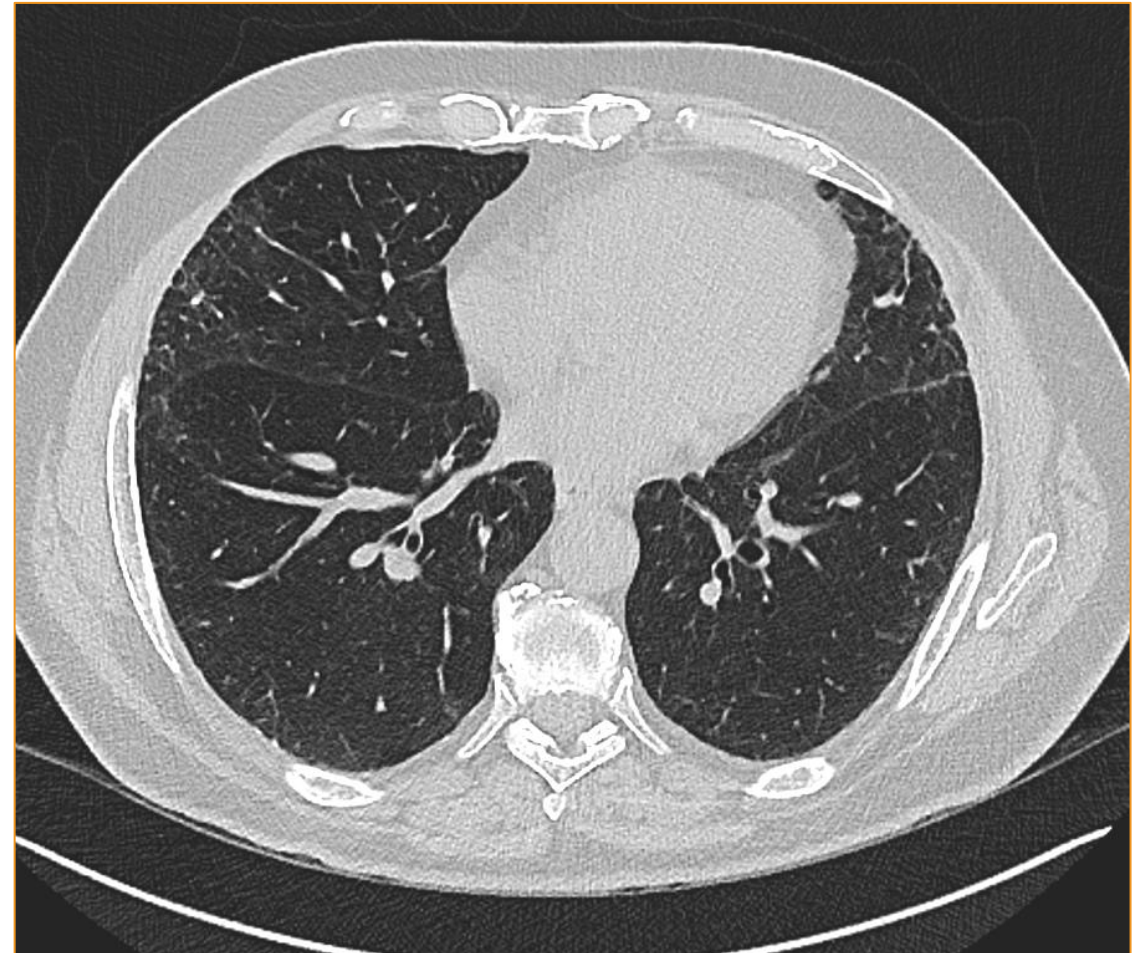
Eficiencia de dosis:

- El PCCT aprovecha mejor los fotones de baja energía, lo que permite reducciones de dosis significativas, estimándose en algunos estudios de neumopatías intersticiales una **reducción de hasta el 66%** manteniendo la calidad diagnóstica.

El Pulmón en la TC

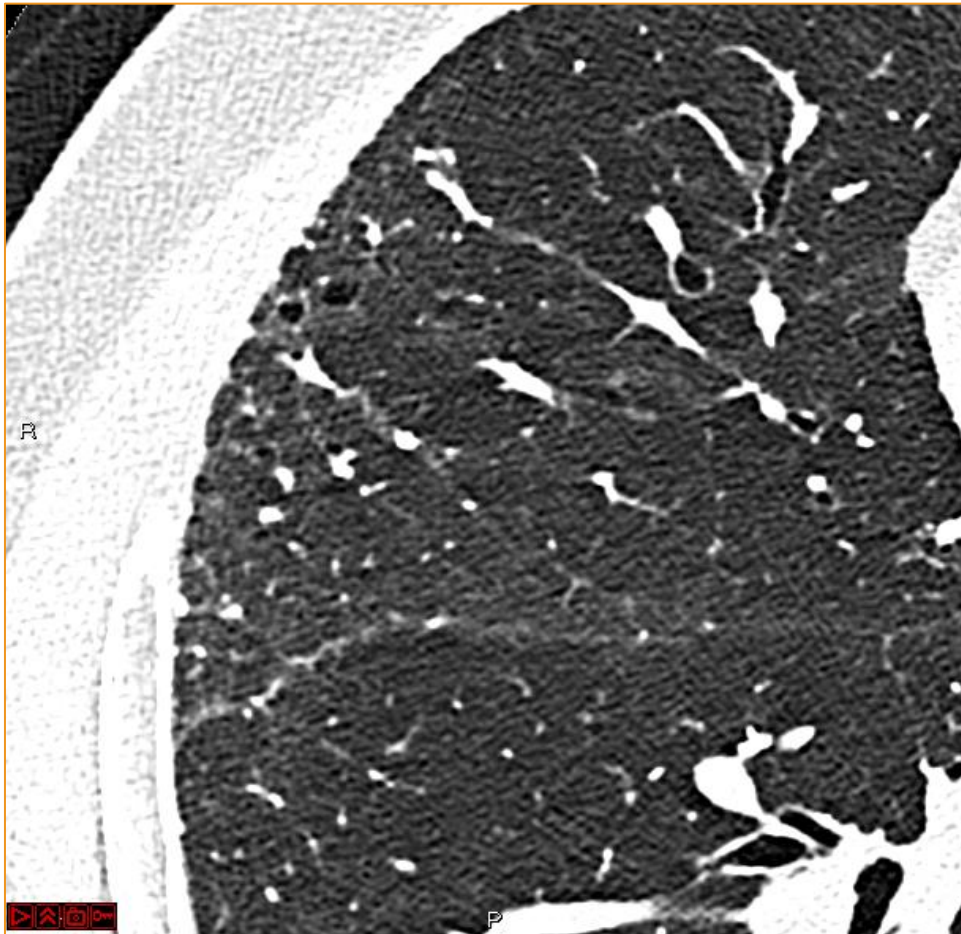


TC CONTEO DE FOTONES

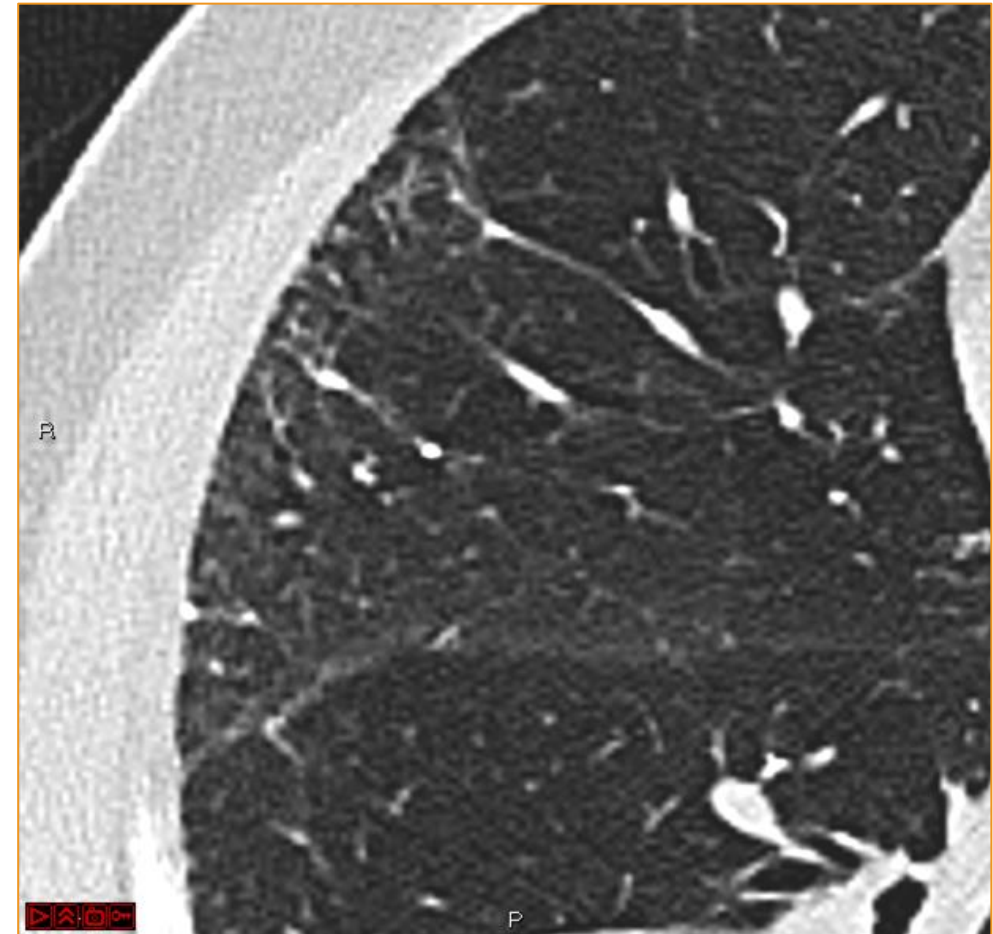


TC CONVENCIONAL

El Pulmón en la TC

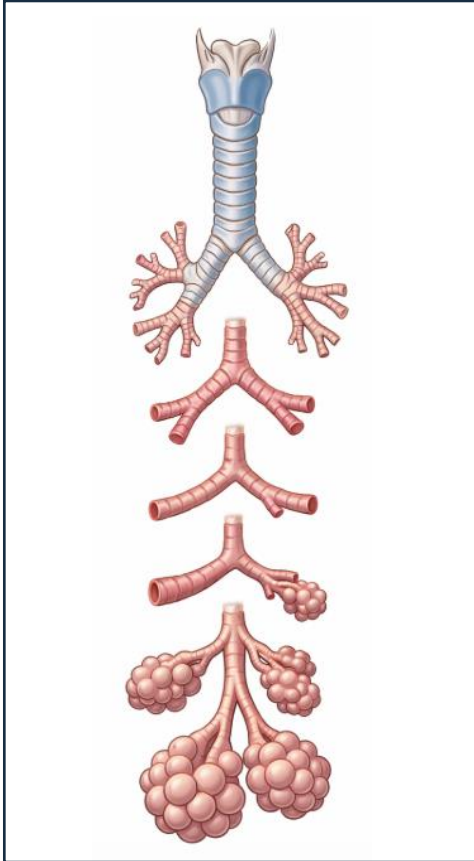


TC CONTEO DE FOTONES



TC CONVENCIONAL

Utilidad en el diagnóstico de neumonías intersticiales



Estructura	Diámetro aproximado
Tráquea	18-20 mm
Bronquios principales	10-15 mm
Bronquios lobares	8-10 mm
Bronquios segmentarios	4-8 mm
Bronquios pequeños	2-4 mm
Bronquiolos	1-2 mm
Bronquiolo terminal	~0.5 mm
Bronquiolos respiratorios	0.3-0.5 mm
Conductos alveolares	0.2-0.3 mm
Sacos alveolares	~0.2 mm

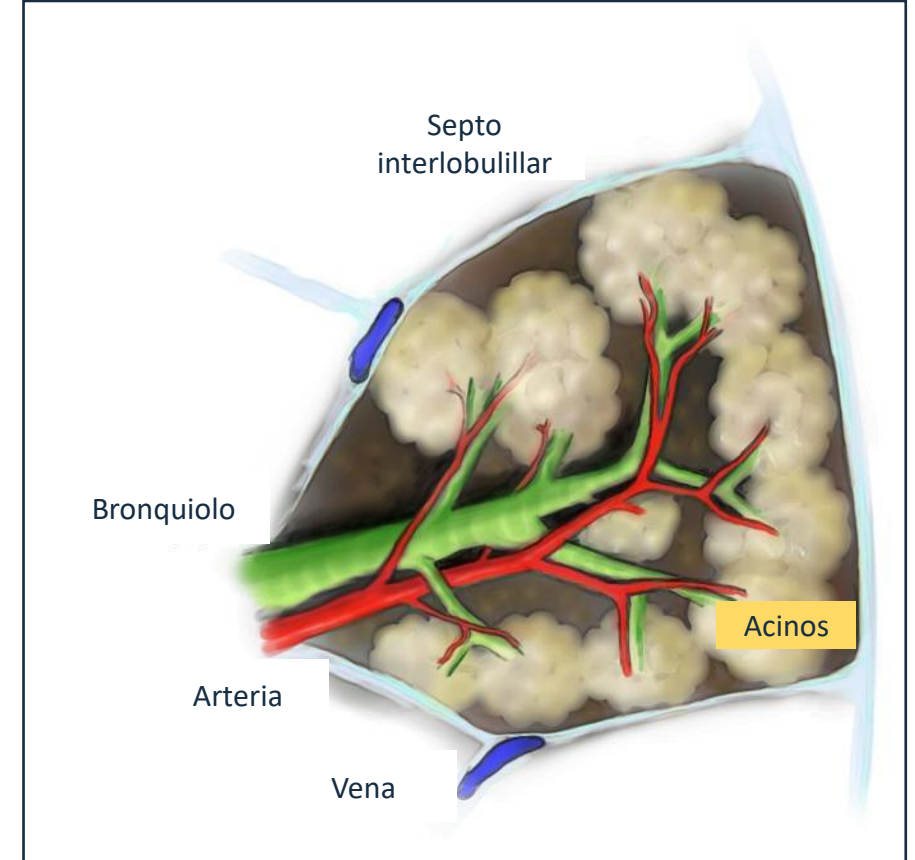
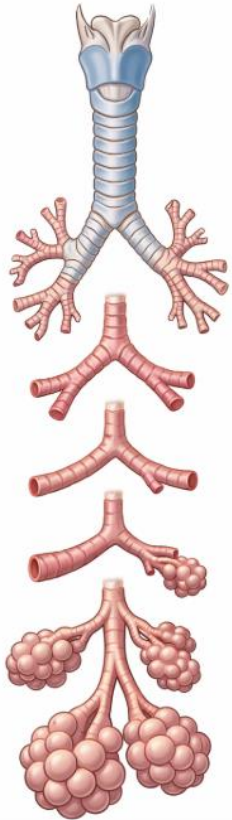


Ilustración del lobulillo pulmonar secundario

Utilidad en el diagnóstico de neumonías intersticiales



Resolución espacial 0,2 mm

Mejora significativamente la
visibilidad de:

Bronquios de 4º orden

Paredes bronquiales

Septos intersticiales

Cisuras

Vasos distales

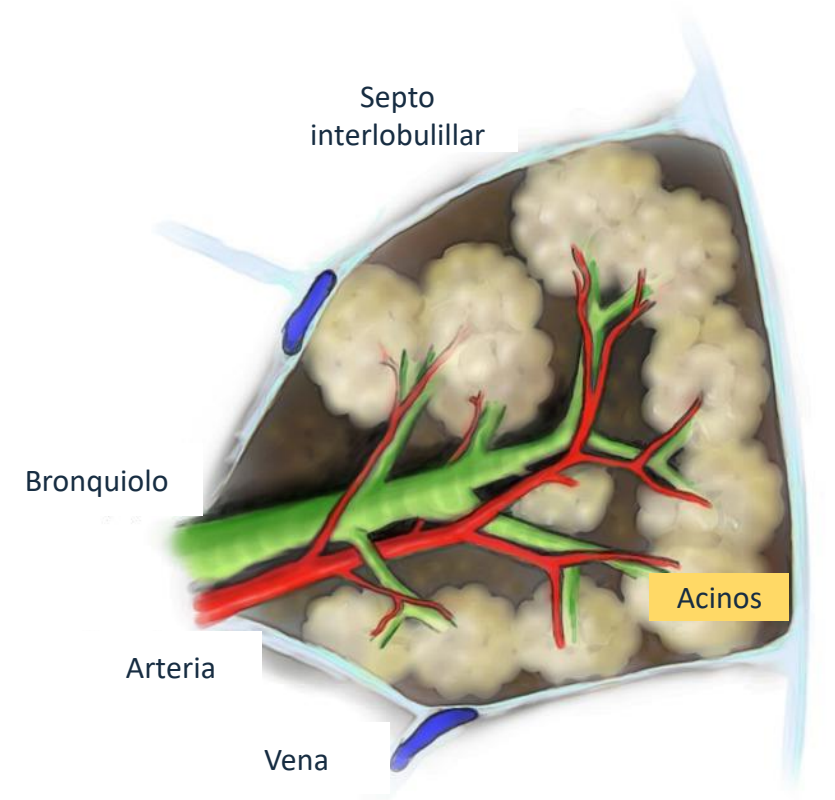
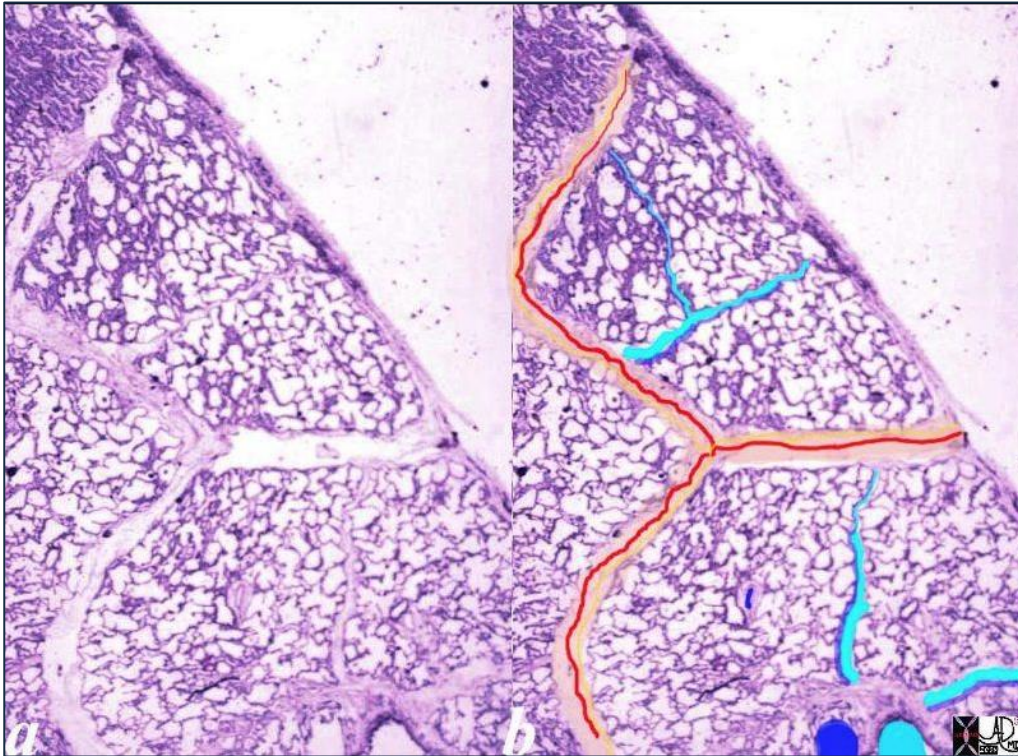


Ilustración del lobulillo pulmonar secundario

Acercándonos al microscopio

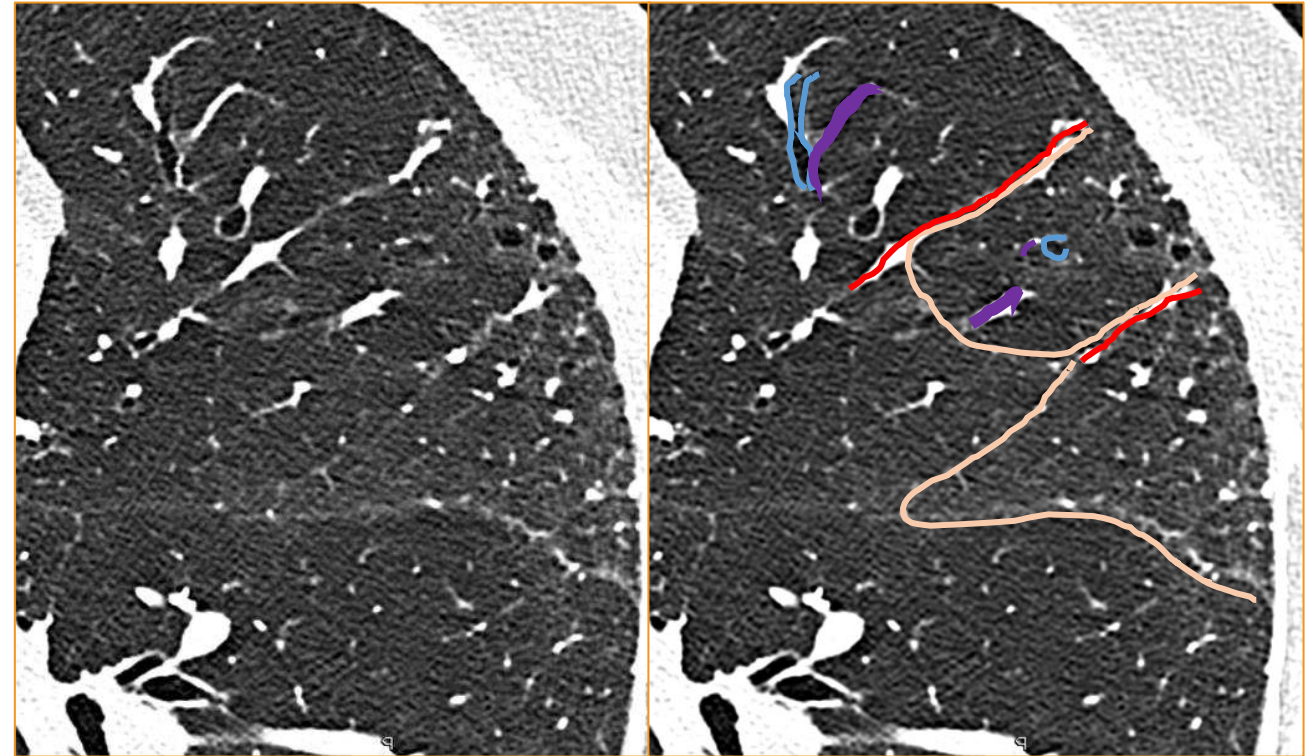


Bronquio

Septo

Arteria

Vena



Bronquio

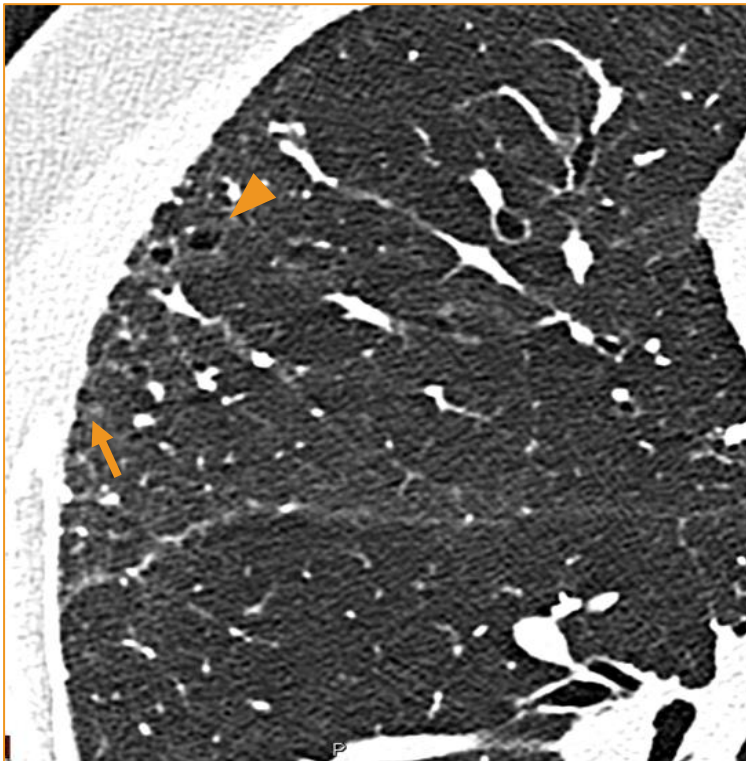
Septo

Arteria

Vena

Utilidad en el diagnóstico de neumonías intersticiales

TC DE CONTEO DE FOTONES



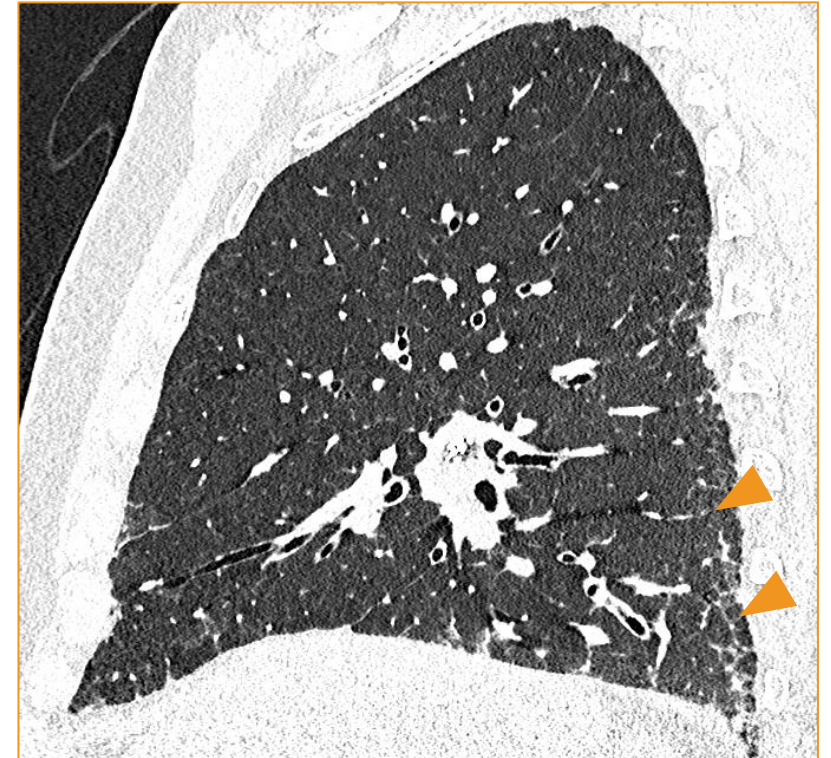
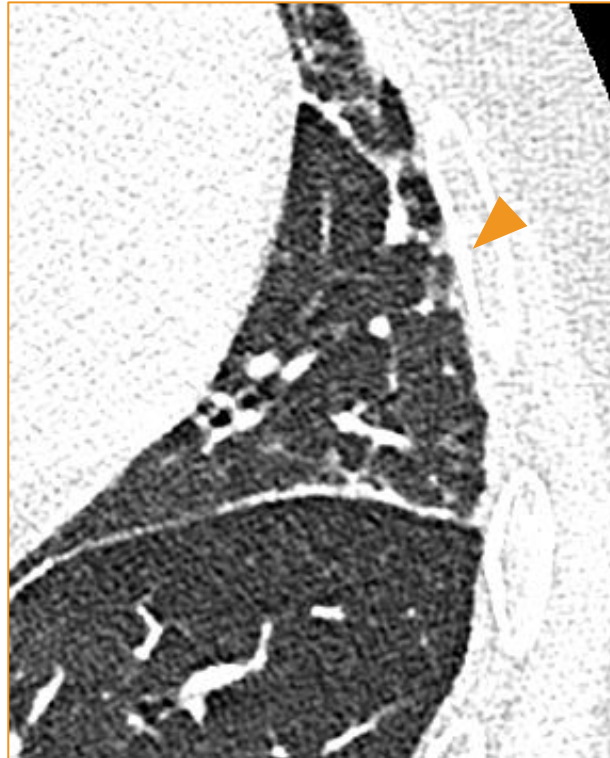
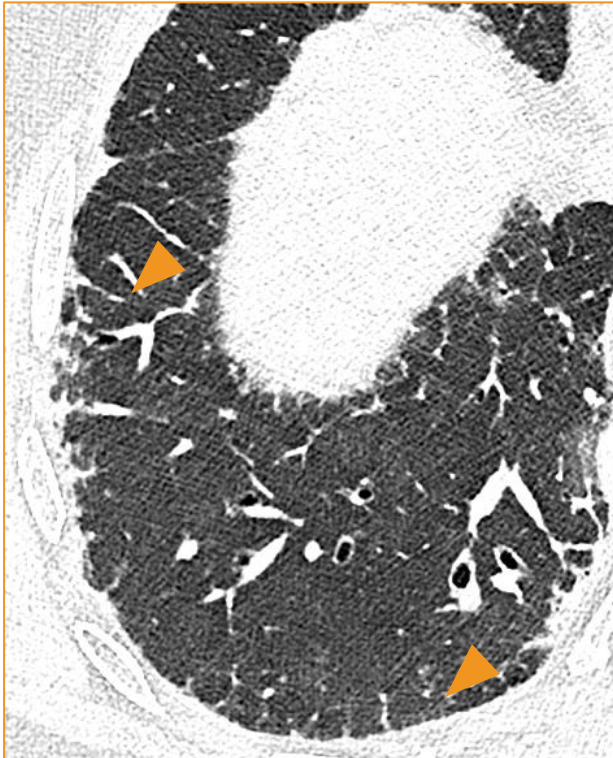
La ultra alta resolución es especialmente útil en **enfermedades intersticiales difusas (EID)** porque permite visualizar mejor:

- **Reticulación fina:** Detecta fibrosis precoz
- **Bronquiectasias por tracción:** Mejor definición de pared bronquial
- **Panal precoz:** Mejor separación entre quistes
- **Septos interlobulillares:** Se distinguen con mayor claridad
- **Vasos submilimétricos:** Mejor evaluación vascular periférica

Estudios muestran **mayor confianza diagnóstica para patrones UIP**

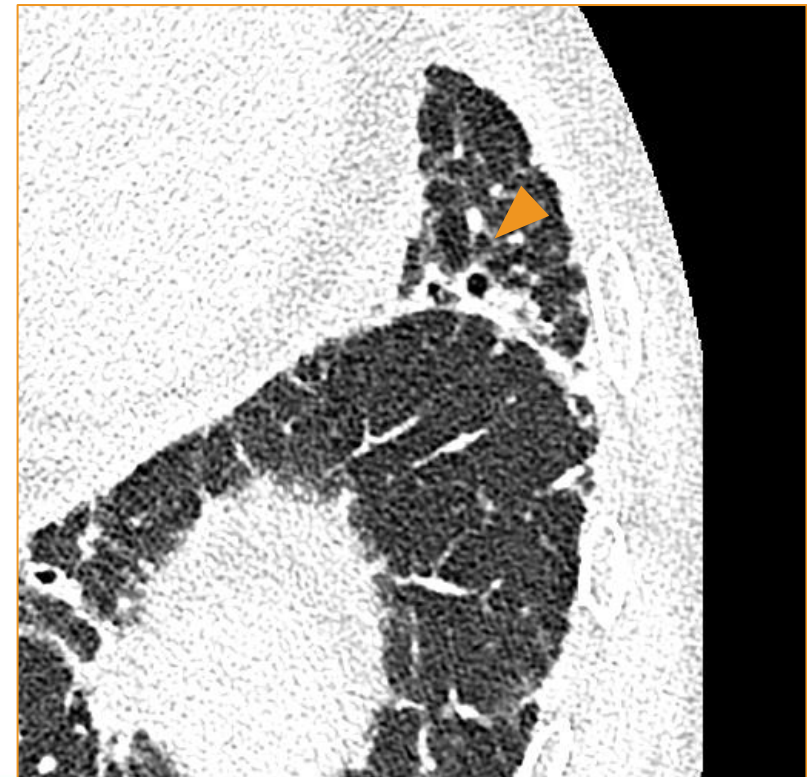
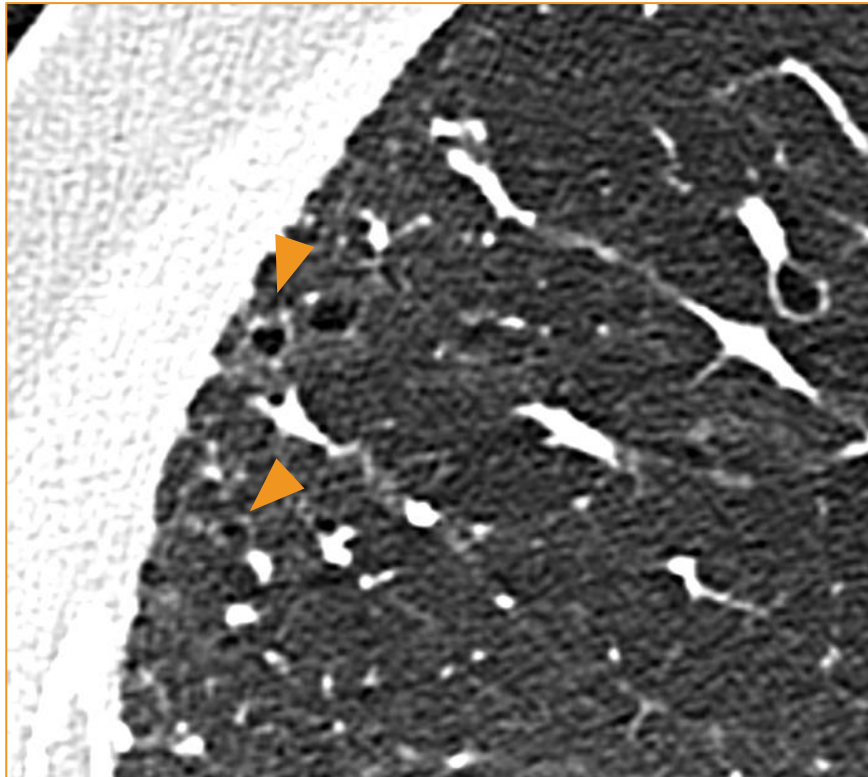
Reticulaciones finas

El TCCF permite reclasificar como **reticulaciones finas** áreas que en la TC convencional se categorizaban erróneamente como simple vidrio deslustrado en el **30% de los pacientes** con síntomas persistentes tras el COVID-19, identificando así un componente fibrótico subyacente antes invisible.



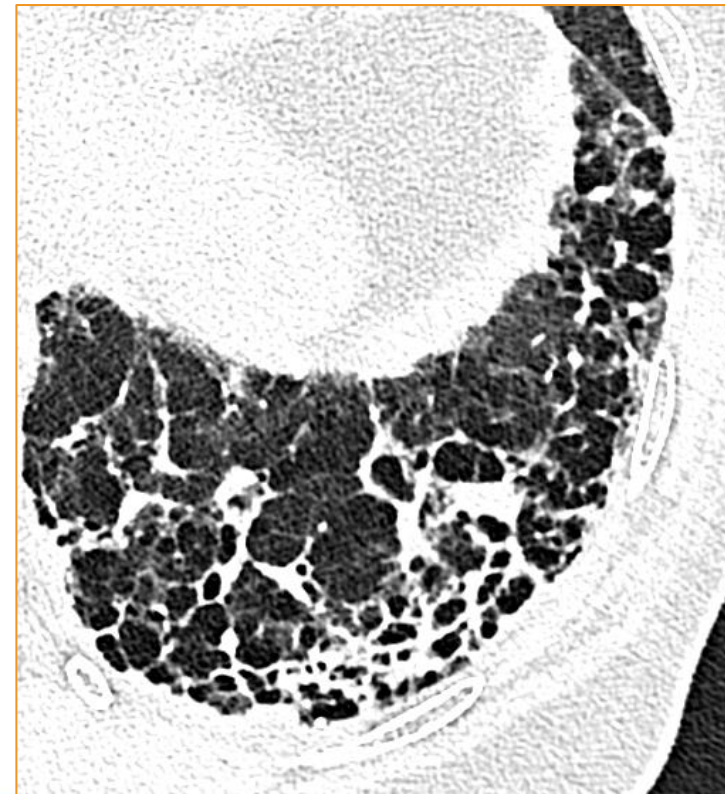
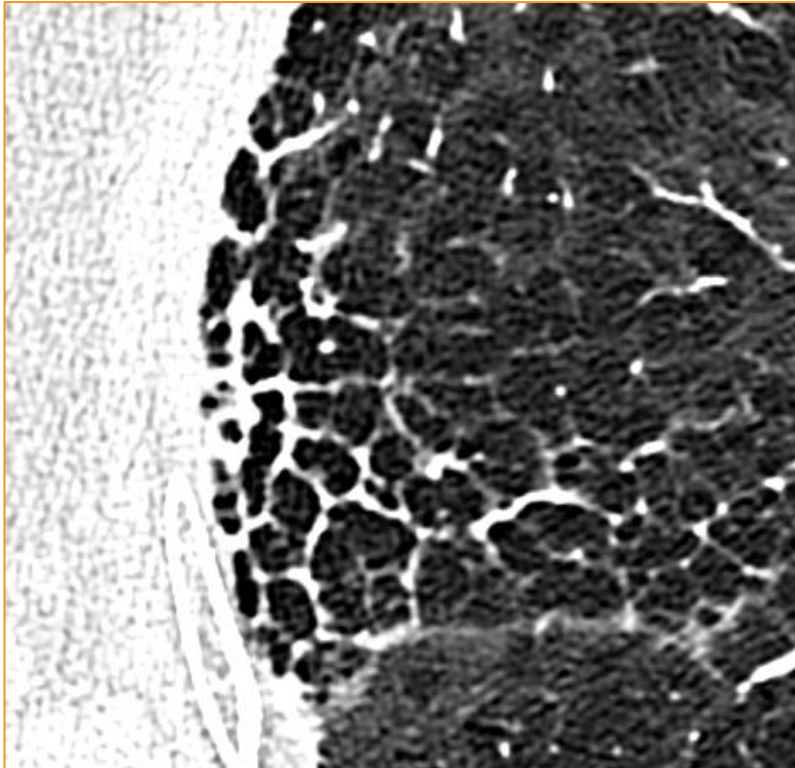
Bronquiectasias por tracción

La TCCF permite visualizar **bronquios de cuarto orden y vías respiratorias terminales**, logrando identificar **bronquiolectasias por tracción adicionales en el 50% de los pacientes** con secuelas de COVID-19 que no eran detectables mediante la TC convencional.



Panalización

La **panalización** consiste en quistes bronquiolares que aparecen tras el colapso de los tabiques alveolares fibróticos y la dilatación de las vías respiratorias terminales. La tecnología **TCCF** permite **visualizarlos mejor** que la TC convencional, lo que ayuda a **reclasificar** casos de **neumonía intersticial usual** (NIU) que antes se consideraban indeterminados.



Esto permite

Mayor confianza diagnóstica y reclasificación

La clasificación precisa de los patrones de neumonía intersticial es crítica para el tratamiento, como el uso de antifibróticos.

1. Reducción de casos indeterminados:

En el diagnóstico de la **neumonía intersticial usual (UIP)**, el TCCF ha demostrado reducir el número de casos clasificados como "indeterminados", moviéndolos a la categoría de "**UIP probable**" con mayor certeza.

2. Reclasificación de hallazgos:

En pacientes post-COVID-19 o con esclerosis sistémica, el PCCT ha permitido **reclasificar áreas de vidrio deslustrado como reticulaciones finas**, identificando un componente fibrótico que la TC convencional no detectaba

Eficiencia de dosis y reducción de ruido

Los pacientes con EPID requieren seguimientos frecuentes, por lo que la reducción de la dosis de radiación es una ventaja vital.

3. Eliminación del ruido electrónico:

El TCCF utiliza umbrales de energía para ignorar el ruido de fondo, lo que mejora la calidad de imagen incluso a dosis bajas.

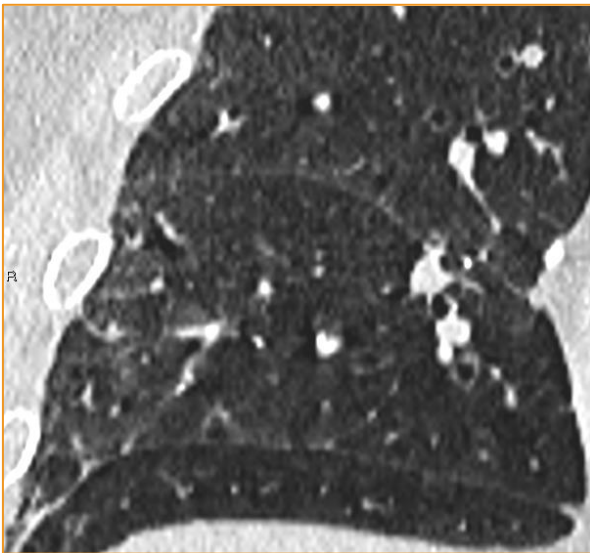
4. Reducción masiva de dosis:

Estudios en pacientes con esclerosis sistémica han mostrado una **reducción de dosis de hasta el 66%** manteniendo una calidad diagnóstica y precisión similares a la TC convencional de dosis completa

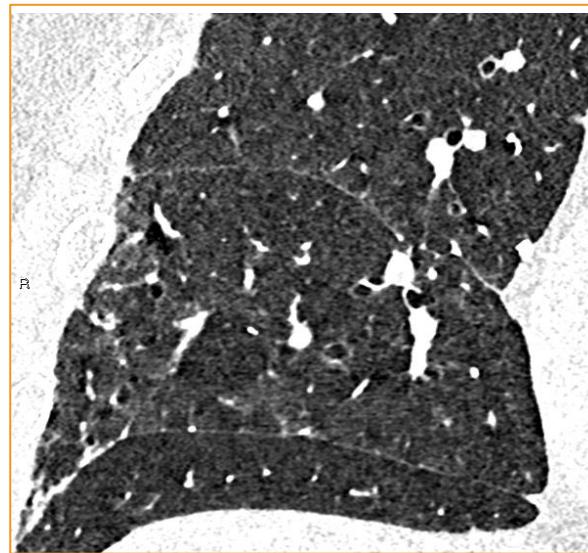
Ejemplo práctico

Hombre de 73 años con antecedentes de nódulos pulmonares y síntomas respiratorios crónicos. Las pruebas funcionales muestran alteración ventilatoria leve con difusión normal, y la TC evidencia granulomas calcificados, micronódulos y un patrón compatible con **probable NIU**, además de bronquiectasias estables.

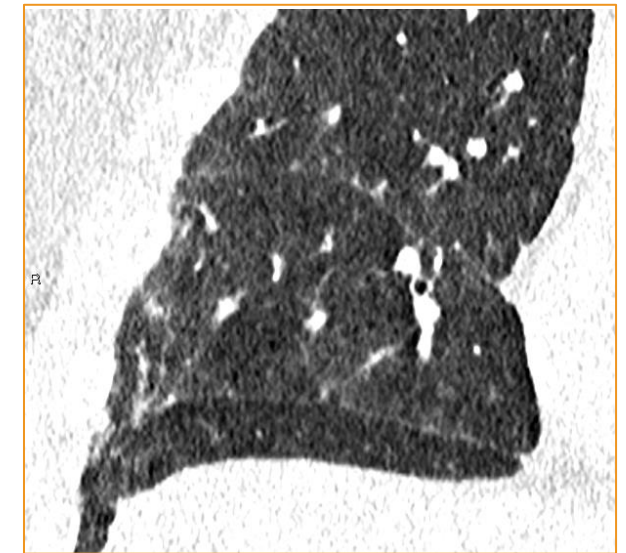
Se realizan **controles anuales** para monitorizar la progresión de la enfermedad, que permanece estable. La tecnología PCCT permite realizar estos estudios de seguimiento con protocolos de **ultrabaja dosis**, logrando una reducción significativa de la exposición a radiación sin comprometer la resolución espacial ni la calidad diagnóstica de la imagen.



EID – DLP: 230 mGy cm



TCCF – DLP: 185 mGy cm

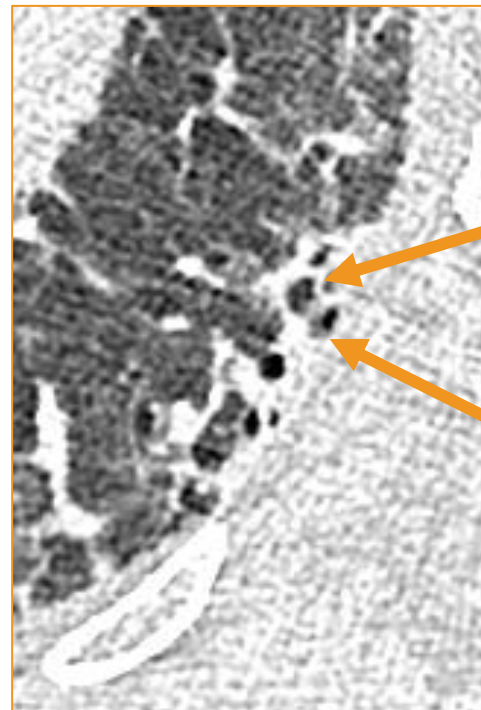
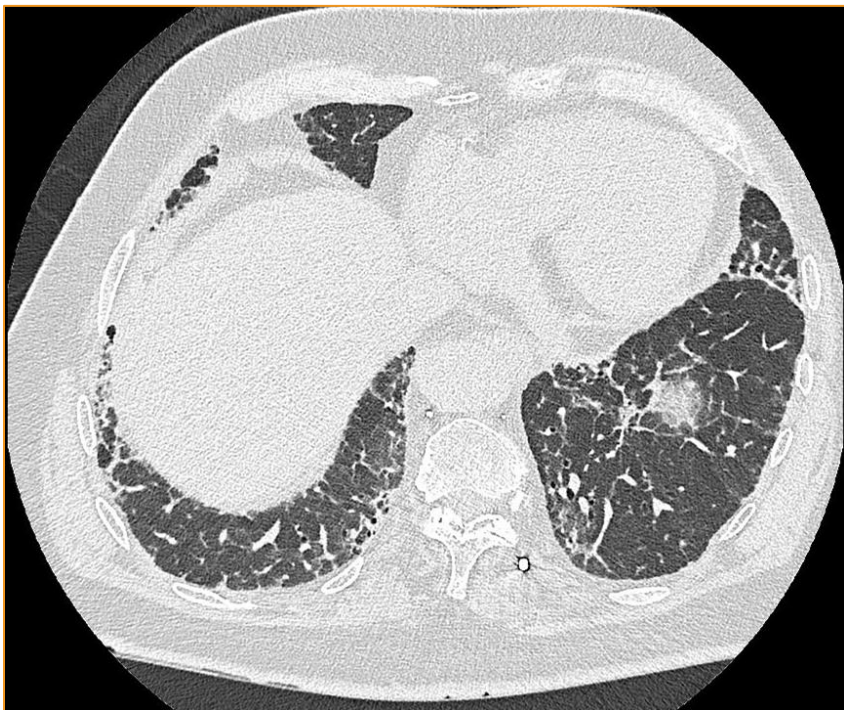


TCCF – DLP: 21 mGy cm

Algunos casos...

NIU

Varón de 75 años con disnea y tos. En la TC se observa reticulación subpleural de predominio basal, bronquiectasias y bronquiolectasias de tracción, además de alguna posible zona de panalización, en relación con patrón de NIU.



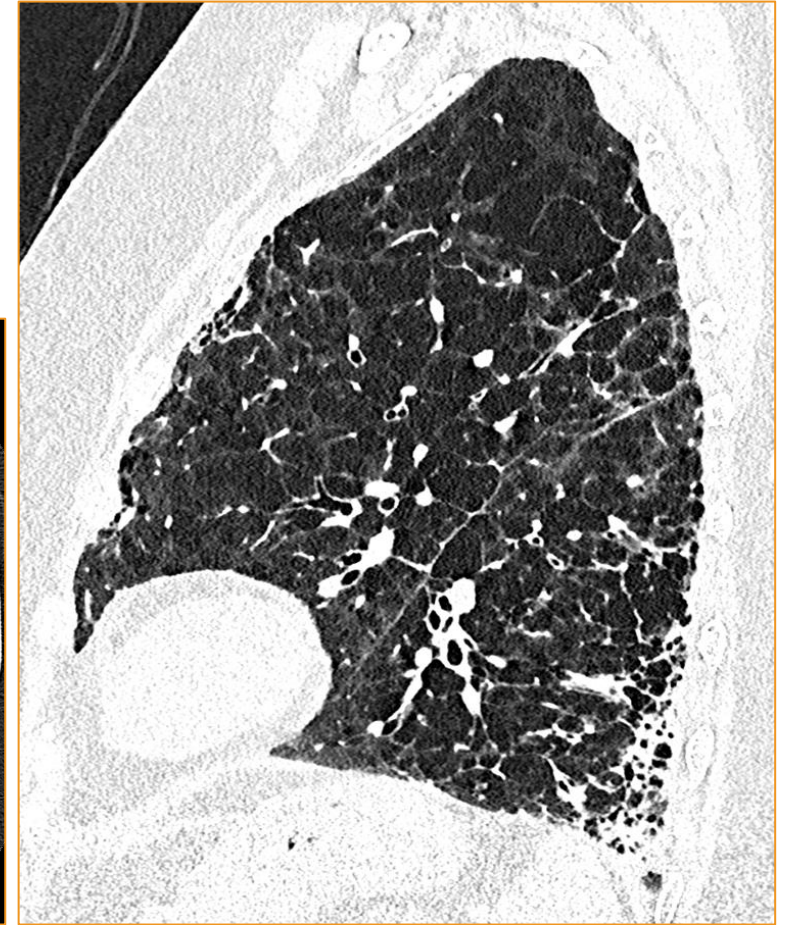
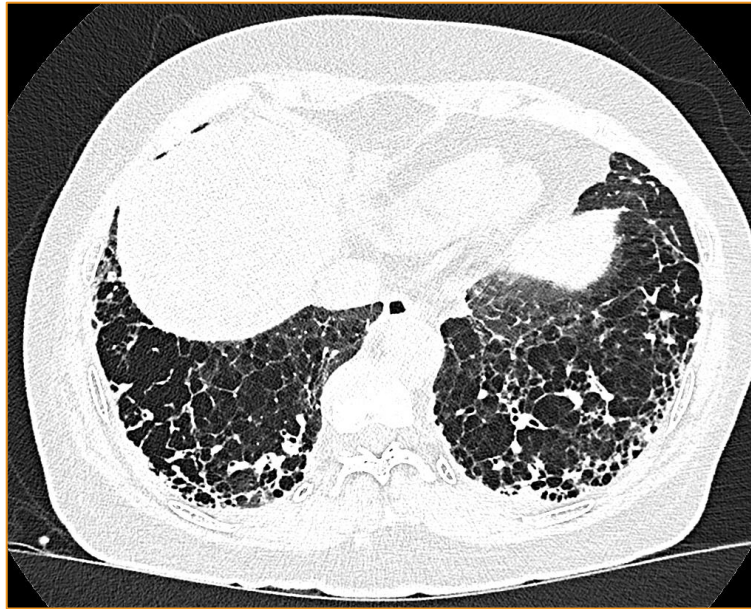
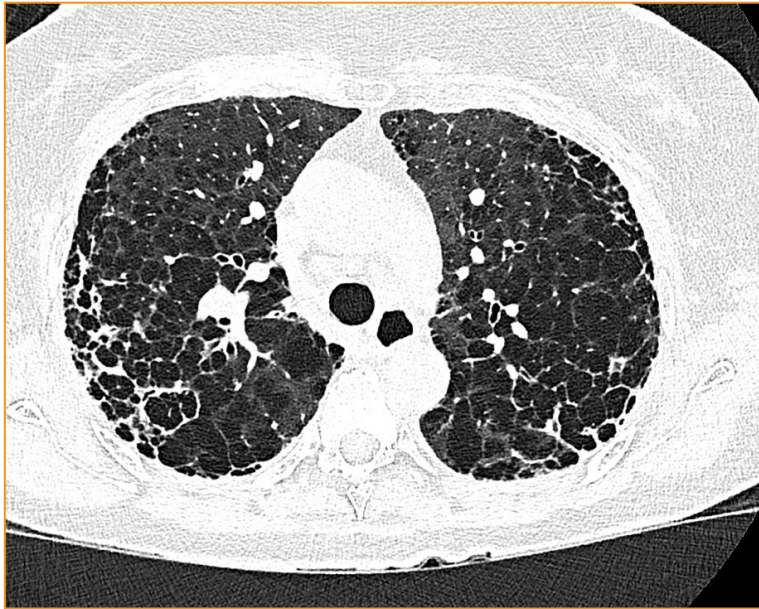
Bronquiolectasias por tracción

Posible área de panalización

Síndrome enfisema - fibrosis

Mujer de 66 años, fumadora activa. Disnea de mínimos esfuerzos. Alteración ventilatoria obstructiva leve.

Se observa un extenso enfisema panlobulillar y un engrosamiento de septos interlobulillares con gradiente ápico basal, sin panalización ni bronquiectasias significativas.

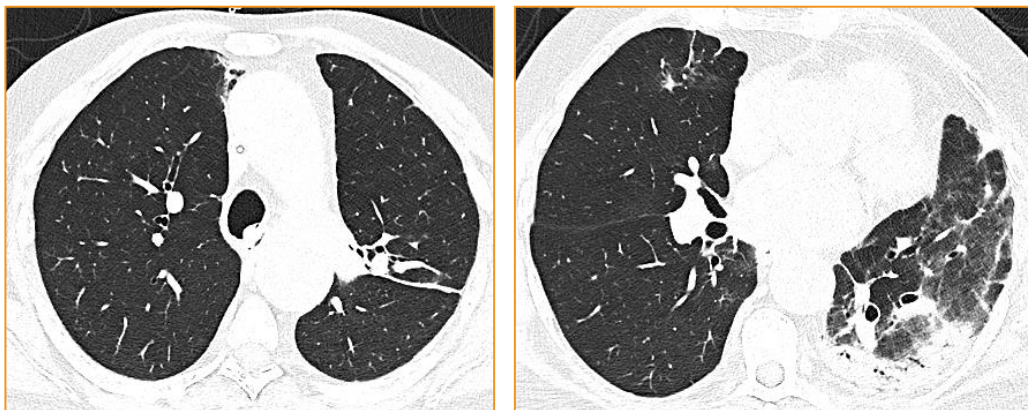


Neumonía organizada

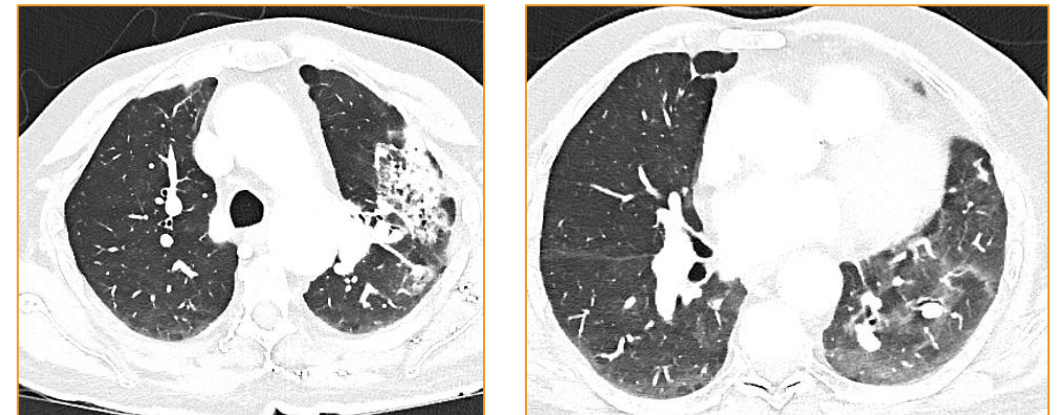
Varón de 81 años, exfumador, con antecedente de carcinoma vesical de alto grado en tratamiento con cetrelimab (inhibidor PD-1).

En TC de agosto de 2025 se observan consolidaciones parcheadas bilaterales. En control de octubre, resolución de las lesiones previas con aparición de nuevas consolidaciones en lóbulo y LII, patrón sugestivo de neumonía organizada.

Se inicia antibioterapia de amplio espectro sin aislamientos microbiológicos. Ante la mejoría clínica y radiológica tras corticoterapia sistémica, se concluye **neumonitis grado 3 secundaria a anti-PD-1**.



Agosto 2025

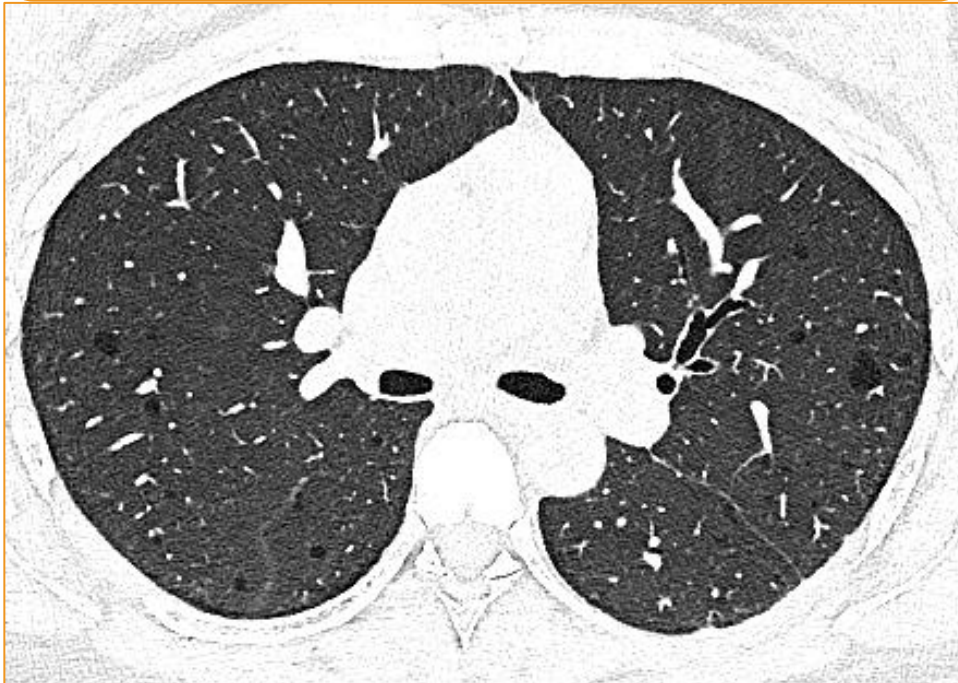


Octubre 2025

Linfangioleiomiomatosis

Mujer de 49 años con linfangioleiomiomatosis. El TCCF permite una valoración más precisa del número y morfología de los quistes pulmonares.

TC CONTEO FOTONES

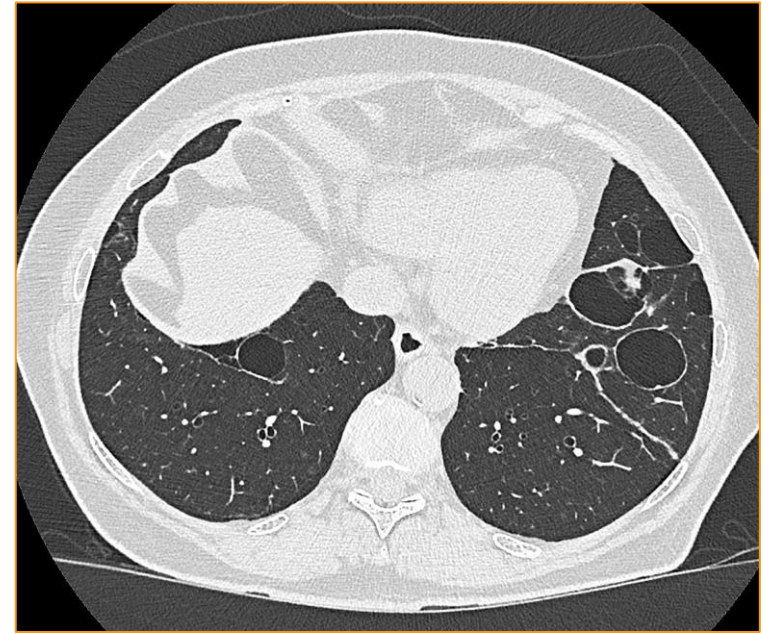
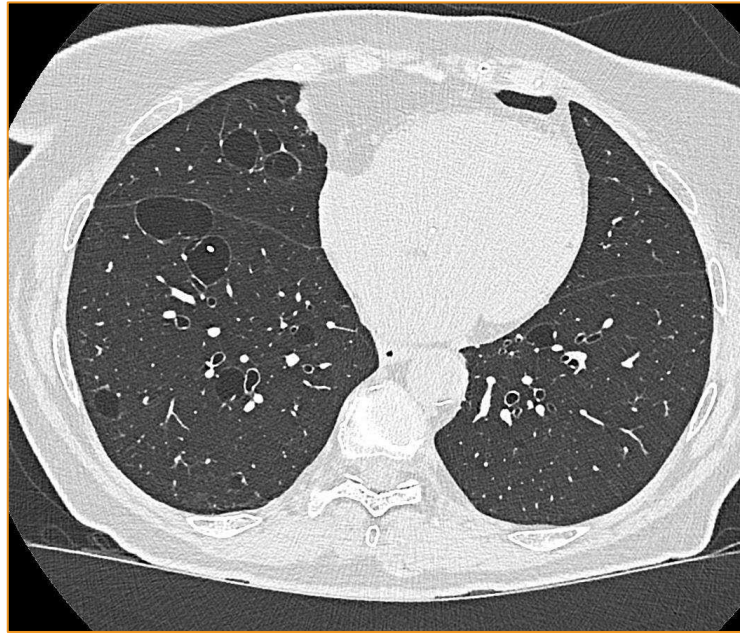
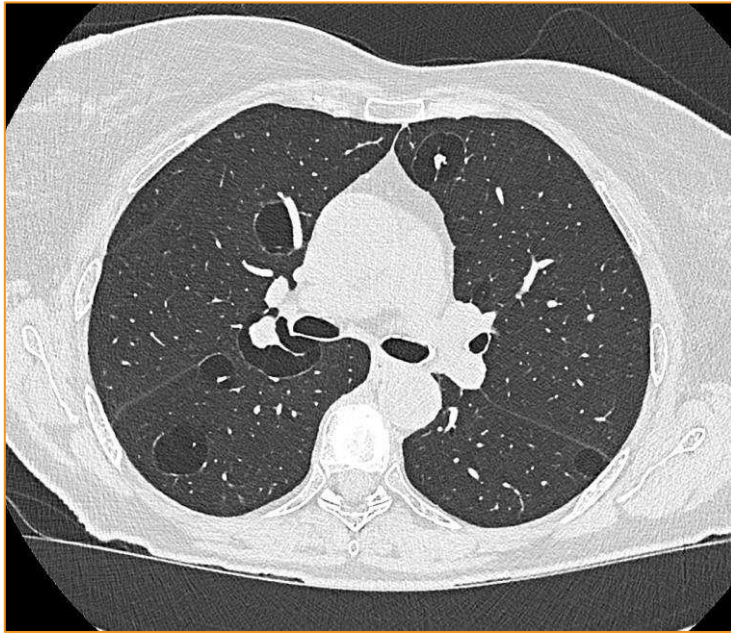


TC CONVENCIONAL



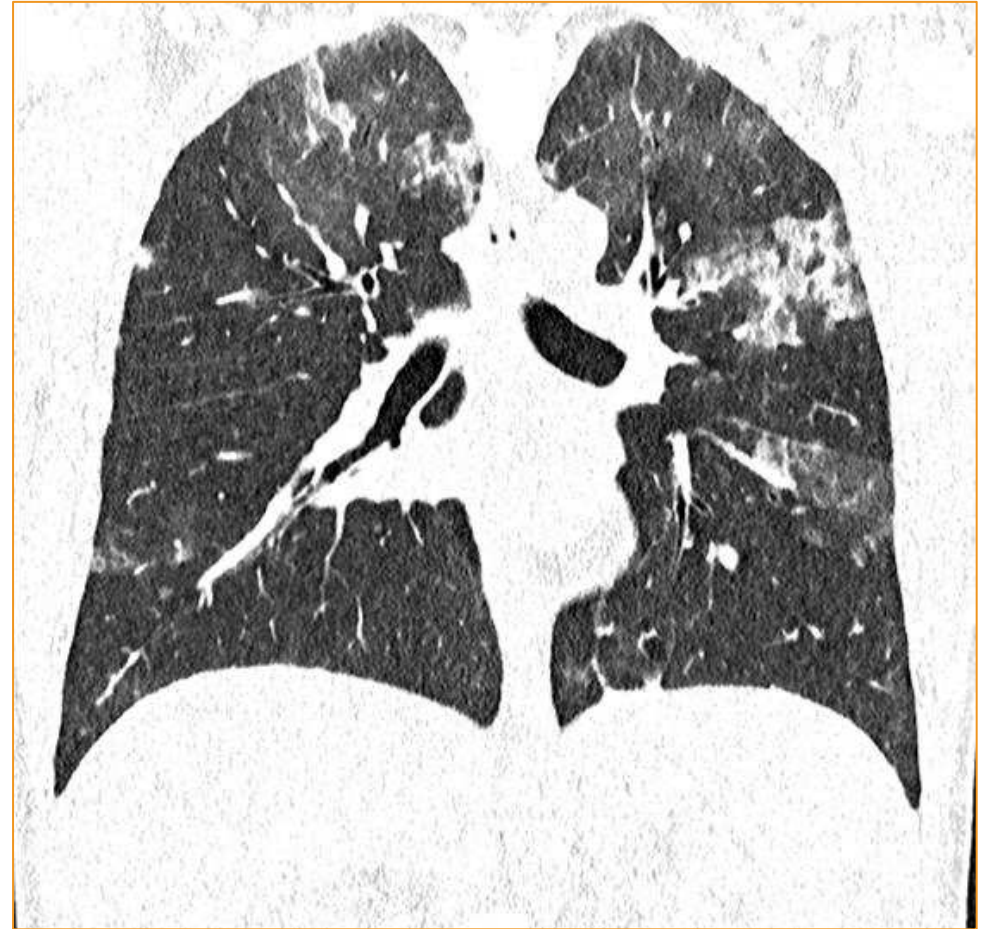
Neumonía intersticial linfocítica

Mujer de 73 años en seguimiento de intersticial linfoide y Sd. De Sjögren. Se observan múltiples lesiones quísticas perivasculars de pared fina y predominio en ambos lóbulos inferiores.



Neumonía eosinofílica aguda

Mujer de 45 años con tos y disnea. En la Rx se observan consolidaciones pulmonares bilaterales. TC con **consolidaciones** subpleurales con opacidades en **vidrio deslustrado** y áreas de patrón en empedrado de predominio en campos medios y superiores, sugestivas de proceso inflamatorio, con neumonía eosinofílica aguda como primera posibilidad. No se observan bronquiectasias ni panalización pulmonar.



Neumonía eosinofílica aguda

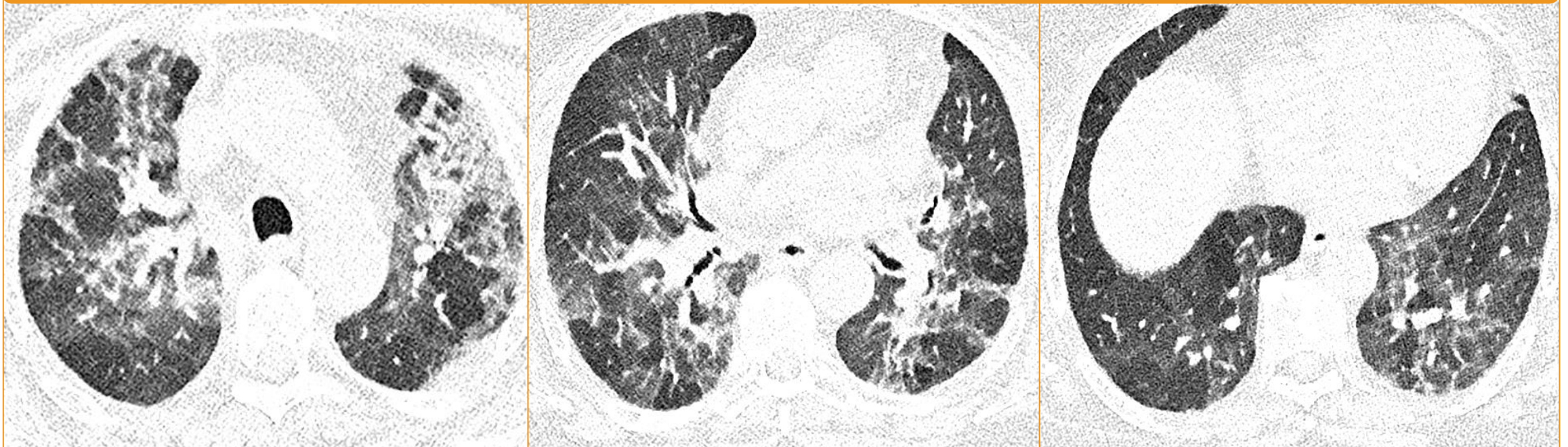
Signos de respuesta radiológica completa tras tratamiento con corticoides.



Neumonitis por hipersensibilidad crónica

Mujer de 76 años con tos y disnea de meses de evolución. Se realiza TC en la que se describe reticulación subpleural y áreas parcheadas en vidrio deslustrado. El lavado broncoalveolar mostró un 63% de linfocitos. Mejoría sintomática significativa tras corticoterapia.

TC realizada con baja dosis. DLP: 29 mGy cm



Conclusiones

TC de conteo de fotones representa una innovación relevante en la evaluación de las **Enfermedades Intersticiales Pulmonares**

Su **alta resolución espacial y menor ruido** permiten una **caracterización más precisa** de los **patrones fibróticos** pulmonares

Ofrece **beneficio directo para el paciente** gracias a una **reducción significativa de la dosis de radiación**

Mejora la visualización **detallada** de la microarquitectura pulmonar

Constituye además una **herramienta docente útil** para comprender la **anatomía** pulmonar y los **mecanismos** de la enfermedad intersticial

Referencias

1. Fletcher JG, Inoue A, Bratt A, Horst KK, Koo CW, Rajiah PS, et al. Photon-counting CT in Thoracic Imaging: Early Clinical Evidence and Incorporation Into Clinical Practice. *Radiology*. 2024;310(3):e231986.
2. Douek PC, Boccalini S, Oei EHG, Cormode DP, Pourmorteza A, Boussel L, et al. Clinical Applications of Photon-counting CT: A Review of Pioneer Studies and a Glimpse into the Future. *Radiology*. 2023;309(1):e222432.
3. Yanagawa M, Han J, Wada N, Song JW, Hwang J, Lee HY, et al. Advances in Concept and Imaging of Interstitial Lung Disease. *Radiology*. 2025;315(2):e241252.
4. Mueller-Mang C, Grosse C, Schmid K, Stiebellehner L, Bankier AA. What Every Radiologist Should Know about Idiopathic Interstitial Pneumonias. *RadioGraphics*. 2007;27(3):595-615.



CUN Pamplona



CUN Madrid