



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE  
MÉXICO**

---

**FACULTAD DE MEDICINA**

**DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO**

**INSTITUTO NACIONAL DE CARDIOLOGIA IGNACIO CHÁVEZ  
GRUPO CT SCANNER**



**TESIS DE POSGRADO**

**PARA OBTENER EL GRADO DE ESPECIALISTA EN IMAGENOLÓGÍA DIAGNÓSTICA Y  
TERAPÉUTICA**

**Comparación de la angiotomografía pulmonar convencional vs con energía dual en  
el diagnóstico de pacientes con sospecha de tromboembolismo pulmonar agudo en  
el Instituto Nacional de Cardiología Ignacio Chávez (2022).**

**P R E S E N T A:**

**Dr. Edgard Julian Rodriguez Cely**

**Dr. Carlos Rafael Sierra Fernández**

Director de Enseñanza

Instituto Nacional de Cardiología  
Ignacio Chavez

**Dr. Sergio Andrés Criales Vera**

Profesor titular del curso de Imagenología  
Diagnóstica y Terapéutica.

CT Scanner - UNAM

**CIUDAD DE MÉXICO, AGOSTO DE 2023**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**TESIS DE POSGRADO:**

**Comparación de la angiotomografía pulmonar convencional vs con energía dual en el diagnóstico de pacientes con sospecha de tromboembolismo pulmonar agudo en el Instituto Nacional de Cardiología Ignacio Chávez (2022).**



Dirección de Enseñanza

---

**DR. CARLOS RAFAEL SIERRA FERNÁNDEZ**

**DIRECTOR DE ENSEÑANZA**

**INSTITUTO NACIONAL DE CARDIOLOGÍA IGNACIO CHÁVEZ**

---

**DR. SERGIO ANDRÉS CRIALES VERA**

**PROFESOR TITULAR DEL CURSO**

**IMAGENOLOGÍA DIAGNÓSTICA Y TERAPÉUTICA**

**INSTITUTO NACIONAL DE CARDIOLOGÍA IGNACIO CHÁVEZ**

**GRUPO CT SCANNER Y ASESOR DE TESIS.**

---

**DR. EDGARD JULIAN RODRIGUEZ CELY**

**RESIDENTE DE CUARTO AÑO**

**IMAGENOLOGÍA DIAGNÓSTICA Y TERAPÉUTICA**

**INSTITUTO NACIONAL DE CARDIOLOGÍA IGNACIO CHÁVEZ**

**GRUPO CT SCANNER**

**CIUDAD DE MÉXICO, AGOSTO DE 2023**

## Dedicatoria

---

A mi madre, gracias por ser mi inspiración y guía constante. Tu amor y apoyo incondicionales han sido mi roca en los momentos más difíciles.

A mi hermana y sobrina, su amor y apoyo han sido mi impulso para seguir adelante. Vuestra guía y cariño han iluminado mi camino, haciendo que cada sacrificio valga la pena.

A mis amigos y compañeros, gracias por estar a mi lado. Su apoyo ha sido un regalo invaluable. Juntos hemos superado desafíos y celebrado éxitos; y les estoy profundamente agradecido por ser parte de mi vida.

## Agradecimientos

---

A mis compañeros residentes y tutores, quiero expresar mi más profundo agradecimiento por su apoyo incondicional, enseñanzas y contribución a mi trabajo. Vuestra guía y conocimiento han sido pilares fundamentales en mi crecimiento profesional. Gracias por hacer de este proceso una experiencia productiva y gratificante. Vuestra presencia en mi vida profesional es invaluable y estoy sinceramente agradecido por todo lo que han aportado.

## Tabla de contenido

|   |    |
|---|----|
| Título.....   | 5  |
| Marco teórico. ....   | 6  |
| Introducción.....   | 6  |
| Epidemiología.....  | 7  |
| Factores de riesgo.....   | 7  |
| Fisiopatología.....   | 8  |
| Diagnostico. ....   | 8  |
| Presentación clínica.....   | 8  |
| Prueba de Dímero D.....   | 10 |
| Diagnóstico por imagen .....  | 11 |
| Angiotomografía pulmonar.....   | 11 |
| Hallazgos de imagen.....  | 12 |
| Estratificar el riesgo.....   | 14 |
| Energía dual.....   | 16 |
| Mapas de yodo .....   | 17 |
| Imágenes monoenergéticas.....   | 18 |
| Justificación .....   | 20 |
| Hipótesis.....  | 21 |
| Objetivos .....   | 22 |
| Metodología .....   | 23 |
| Plan de análisis estadístico .....  | 25 |
| Resultados .....  | 26 |
| Sensibilidad para la detección de tromboembolismo pulmonar agudo.....                   | 26 |
| Calidad angiográfica.....   | 27 |
| Sensibilidad para la detección de compromiso subsegmentario e infartos pulmonares. .... | 31 |
| Discusión .....   | 34 |
| Bibliografía.....   | 35 |

## **Título**

Comparación de la angiotomografía pulmonar convencional vs con energía dual en el diagnóstico de pacientes con sospecha de tromboembolismo pulmonar agudo en el Instituto Nacional de Cardiología Ignacio Chávez (2022).

## **Introducción**

La embolia pulmonar, una condición que obstruye el sistema arterial pulmonar debido a émbolos, siendo una causa significativa de muerte cardiovascular en pacientes hospitalizados. Se origina principalmente por trombosis venosa profunda en las extremidades inferiores, denominándose tromboembolia pulmonar aguda. Afecta la circulación y el intercambio de gases en los pulmones, con posibles consecuencias graves en el ventrículo derecho y la función respiratoria.

El diagnóstico puede ser complicado debido a sus síntomas inespecíficos. Los pacientes pueden presentar disnea, taquipnea, dolor torácico, y signos de trombosis venosa profunda. Para el diagnóstico, se utilizan reglas de predicción como el puntaje revisado de Ginebra y la escala de Wells, junto con pruebas de imagen como la tomografía computarizada de angiografía pulmonar. La estratificación del riesgo es fundamental para determinar el tratamiento adecuado y se basa en indicadores clínicos, de imagen y de laboratorio, incluyendo la evaluación de la disfunción ventricular derecha y otros hallazgos radiológicos.

La tomografía computarizada de doble energía permite obtener imágenes funcionales junto con imágenes anatómicas tradicionales. Se pueden generar mapas de perfusión pulmonar codificados por colores de yodo, que complementan la angiografía pulmonar por tomografía computarizada en el diagnóstico de embolia pulmonar. También se utilizan imágenes monoenergéticas para reducir artefactos y mejorar la calidad de imagen, lo que beneficia a pacientes con disfunción renal.

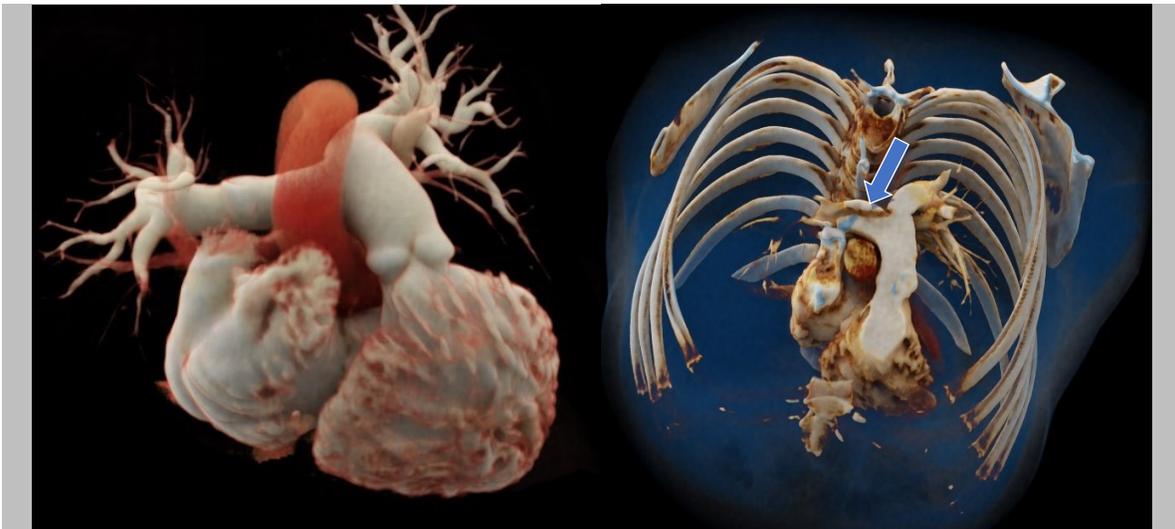
Este estudio busca evaluar la utilidad de la angiotomografía pulmonar de energía dual en comparación con la convencional para el diagnóstico y evaluación de pacientes con sospecha de tromboembolismo pulmonar agudo en el Instituto Nacional de Cardiología Ignacio Chávez en México. Sometidos a angiotomografía pulmonar durante el período de enero de 2022 a diciembre de 2022.

Se compararán las dos técnicas en términos de detección de trombos pulmonares, definición de los vasos sanguíneos pulmonares, evaluación de la extensión y gravedad del tromboembolismo pulmonar. El análisis de los datos se realizará mediante pruebas estadísticas apropiadas, considerando las limitaciones del estudio retrospectivo y la dependencia de los registros médicos disponibles.

## Marco teórico.

### Introducción.

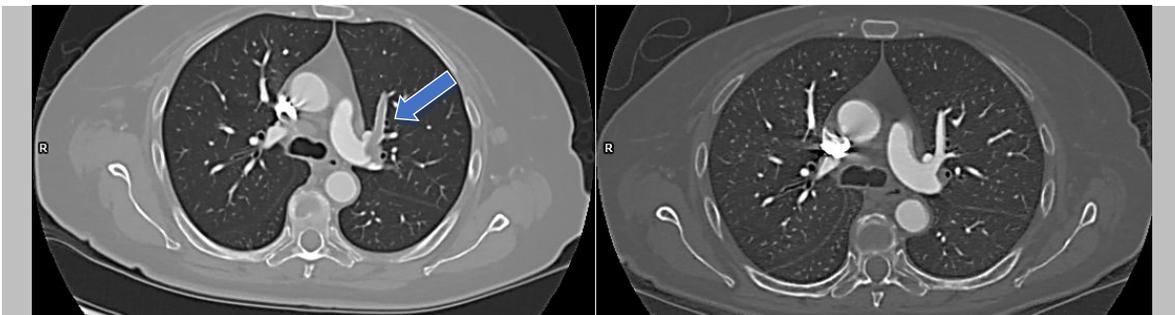
La embolia pulmonar (EP) es la obstrucción del sistema arterial pulmonar de naturaleza embólica y se encuentra entre las principales causas de muerte cardiovascular en pacientes hospitalizados, después del infarto agudo de miocardio y el accidente cerebrovascular. La trombosis venosa profunda en las extremidades inferiores (TVP), es su causa más común, y cuando es secundaria a esta etiología se le llama tromboembolia pulmonar aguda (TEP). Es importante diferenciar entre la EP y el TEP, ya que este último término no considera las causas no trombóticas de la embolia pulmonar. (1,2)



Reconstrucciones tridimensionales.

A) Sistema arterial pulmonar. B) Defecto de llenado (trombo) desde la bifurcación hasta la rama principal derecha.

El diagnóstico y tratamiento tempranos son fundamentales, ya que la mayoría de las muertes por embolia pulmonar aguda ocurren en las primeras horas o días. La clasificación de la EP en masiva o submasiva depende de ciertos criterios, como hipotensión, colapso cardiovascular o trombos que obstruyan una parte significativa del área de la arteria pulmonar. Estos casos requieren una intervención rápida y agresiva debido al riesgo de shock cardiogénico por fallo del ventrículo derecho.(3,4)



Angiotomografías pulmonares en corte axial del mismo paciente con un cuadro de tromboembolia pulmonar.

A). En presentación aguda con evidencia de trombo en la rama principal izquierda con extensión a las ramas segmentarias. B) Control a los tres meses posterior a tratamiento sin evidencia de trombos.

La embolia pulmonar también puede tener consecuencias a largo plazo, como el desarrollo de hipertensión pulmonar crónica. Si se diagnostica y trata adecuadamente, la embolia

pulmonar clínicamente aparente es una causa poco común de muerte, y las recurrencias son infrecuentes. Sin embargo, los pacientes con embolia pulmonar y enfermedades subyacentes, como cáncer, insuficiencia cardíaca congestiva o enfermedad pulmonar crónica, presentan un mayor riesgo de muerte, especialmente dentro del primer año después del episodio de embolia pulmonar.(5–7)

### **Epidemiología.**

La embolia pulmonar aguda (EP) es una condición grave y potencialmente mortal que afecta a aproximadamente el 5% de la población a lo largo de su vida. La incidencia anual de EP varía entre 39 y 115 casos por cada 100,000 habitantes, mientras que la incidencia de trombosis venosa profunda (TVP), la principal causa de EP, oscila entre 53 y 162 casos por cada 100,000 habitantes. En la mayoría de los casos, la EP se produce a partir de trombos que se desprenden de la TVP en la extremidad inferior, lo que puede dar lugar a eventos embólicos espontáneos o recurrentes.(1,6,8,9)

La embolia pulmonar aguda tiene una mortalidad general del 10 al 30%, convirtiéndose en la tercera causa más común de muerte cardiovascular. En Europa, se estima que provoca entre 300,000 y 370,000 muertes cada año, mientras que en Estados Unidos se estima que causa hasta 300,000 muertes al año. Del total de pacientes, aproximadamente el 34% muere de manera repentina o en las primeras horas del evento agudo, antes de que pueda iniciarse o surtir efecto la terapia. La embolia pulmonar masiva, que representa alrededor del 4.5% al 10% de todos los casos de EP, conlleva una alta morbimortalidad, superando el 50% en algunos casos.(1,6,8)

Las tendencias en las poblaciones europeas, asiáticas y norteamericanas sugieren una posible disminución en las tasas de letalidad de la embolia pulmonar aguda. Esto se atribuye a un mayor uso de terapias y intervenciones más efectivas, así como a una mejor adherencia a las pautas clínicas. Sin embargo, se observa una preocupante tendencia al sobrediagnóstico de casos de embolia pulmonar subsegmentaria o incluso inexistente en la era moderna, lo que puede afectar la precisión de los diagnósticos y los resultados de los pacientes.(5,9–11)

### **Factores de riesgo.**

La embolia pulmonar aguda (EP) está influenciada por diversos factores predisponentes, tanto ambientales como genéticos. El factor de riesgo más común es el antecedente de trombosis venosa profunda (TVP). Además, la EP se considera parte de un continuum de enfermedad cardiovascular, compartiendo factores de riesgo comunes con la enfermedad arterial. La tríada de Virchow, que engloba la estasis sanguínea, la hipercoagulabilidad y la lesión de la pared vascular endotelial, ayuda a explicar otros factores de riesgo asociados a la EP. Entre los principales factores de riesgo para la EP se encuentran la fractura de miembros inferiores, la hospitalización por insuficiencia cardíaca o fibrilación auricular/flutter, el reemplazo de cadera o rodilla, el traumatismo grave, el infarto de miocardio, los antecedentes de EP y las lesiones de médula espinal.(4,9)

Factores de riesgo con una asociación menos fuerte incluyen reposo en cama, diabetes mellitus, obesidad y embarazo. Asimismo, el infarto de miocardio y la insuficiencia cardíaca aumentan el riesgo de EP, y a su vez, los pacientes con EP tienen un mayor riesgo de infarto de miocardio y accidente cerebrovascular. El síndrome del anticuerpo antifosfolípido (SAAF)

puede estar presente en hasta el 9% de los pacientes con un primer episodio de tromboembolismo venoso (TEV) no provocado. (6,10)

### **Fisiopatología.**

La embolia pulmonar aguda (EP) se origina principalmente a partir de trombos en las venas de las piernas o la pelvis, los cuales se desprenden y se embolizan a las arterias pulmonares. Esta obstrucción causa alteraciones hemodinámicas y provoca dilatación e hipocinesia del ventrículo derecho (VD). En casos graves, la sobrecarga aguda en el VD puede llevar a hipotensión y paro cardíaco. Además, la TEP afecta la función respiratoria y puede causar hipoxemia, hemorragias alveolares y derrame pleural. El diagnóstico y tratamiento tempranos son fundamentales, especialmente en casos de TEP de alto riesgo con inestabilidad hemodinámica.(9,12)

La TEP tiene un impacto significativo en la circulación y el intercambio de gases en los pulmones. Cuando se obstruye más del 30-50% del lecho arterial pulmonar, se produce un aumento de la presión en la arteria pulmonar y una vasoconstricción que contribuye a la resistencia vascular pulmonar. La dilatación del VD y la alteración de su función contráctil ocurren como respuesta a este aumento de la resistencia. Sin embargo, la adaptación del VD es limitada y puede haber dificultades en el llenado del ventrículo izquierdo, lo que puede llevar a una reducción del gasto cardíaco y a la hipotensión. Además, la TEP afecta la función respiratoria debido a los trastornos hemodinámicos, lo que provoca hipoxemia y otros síntomas respiratorios.(12)

El fallo agudo del VD y la inestabilidad hemodinámica son determinantes críticos de la gravedad y el pronóstico de la TEP. Es crucial realizar un diagnóstico y tratamiento inmediatos en casos de TEP de alto riesgo con inestabilidad hemodinámica. Sin embargo, incluso en ausencia de inestabilidad hemodinámica, la disfunción del VD puede aumentar el riesgo asociado con la TEP. Por lo tanto, es fundamental abordar de manera temprana y adecuada tanto la disfunción del VD como las complicaciones respiratorias para mejorar los resultados en los pacientes con TEP.(9)

### **Diagnostico.**

#### **Presentación clínica.**

La tromboembolia pulmonar aguda (EP) puede presentarse con una variedad de síntomas inespecíficos, lo que dificulta su diagnóstico. La disnea es el síntoma más común, acompañada de otros como ortopnea, taquipnea y disminución de la saturación de oxígeno en sangre. El dolor torácico, la hemoptisis y los signos de trombosis venosa profunda también pueden estar presentes. En casos raros, la inestabilidad hemodinámica indica una EP grave con una reserva hemodinámica severamente reducida.(5,9)

La evaluación de la probabilidad clínica se basa en la combinación de síntomas, hallazgos clínicos y factores de riesgo para la tromboembolia venosa. Esto permite clasificar a los pacientes en diferentes categorías de probabilidad, que se correlacionan con una mayor prevalencia de TEP confirmada. Se pueden utilizar tanto el juicio clínico empírico basado en la experiencia del médico, como reglas de predicción como el puntaje revisado de Ginebra y la escala de Wells. Estas reglas han sido validadas y simplificadas para facilitar su aplicación en la práctica clínica.(13)

### Puntaje revisado de Ginebra

| Factores  | Puntuación |
|---|------------|
| Edad 65 años o más  | 1          |
| Antecedentes de tromboembolismo venoso previo: TEP o TVP  | 3          |
| Cirugía reciente o fractura en el último mes. Fractura que involucra extremidades inferiores. Cirugía que requiere anestesia                    | 2          |
| Enfermedad maligna activa. Incluye malignidades hematológicas o sólidas. También incluye malignidades curadas en el último año                  | 2          |
| Dolor unilateral en la extremidad inferior. Dolor a la palpación a lo largo de las venas profundas de la extremidad inferior y edema unilateral | 3          |
| Hemoptisis  | 4          |
| Frecuencia cardíaca   | 2          |
| 75 - 94 lpm   | 3          |
| 95 pm o más   | 5          |

Probabilidad de embolia pulmonar: Baja probabilidad: 0-3 puntos Probabilidad intermedia: 4-10 puntos

Alta probabilidad: más de 10 puntos.

### Escala de Wells

| Criterios  | Puntos |
|--|--------|
| TEP o TVP previa                                       | 1.5    |
| Frecuencia cardíaca $\geq$ 100 latidos por minuto      | 1.5    |
| Cirugía o inmovilización en las últimas cuatro semanas | 1.5    |
| Hemoptisis   | 1      |
| Cáncer activo  | 1      |
| Signos clínicos de TVP                                 | 3      |
| Diagnóstico alternativo menos probable que PE          | 3      |

Probabilidad clínica; Baja | 0 - 1 Intermedia | 2 - 6 Alta |  $\geq$  7

Los criterios PERC y YEARS son herramientas utilizadas en la sala de emergencias para descartar la embolia pulmonar aguda (EP) en pacientes sin necesidad de realizar más pruebas. Los criterios PERC se basan en ocho variables clínicas, mientras que los criterios YEARS toman en cuenta tres factores de riesgo y tres síntomas. Estas herramientas han demostrado tener una alta sensibilidad (97.4%) para descartar la EP en pacientes con baja sospecha clínica, aunque su especificidad es baja (21.9%).(9,12,13)

| <b>Puntaje PERC</b>   |
|---|
| Edad <50 años   |
| Pulso <100 latidos por minuto   |
| Saturación de oxígeno >94%  |
| Ausencia de hinchazón unilateral de la pierna, hemoptisis, cirugía/traumatismo recientes, antecedentes de trombosis venosa profunda (TVP)/embolia pulmonar (EP) y uso de anticonceptivos orales |

| <b>Puntaje YEARS *</b>  |
|---|
| <b>Signos clínicos de trombosis venosa profunda (TVP)</b>                   |
| <b>Hemoptisis</b>   |
| <b>Diagnóstico más probable de embolia pulmonar (EP)</b>                    |
| <b>Dímero D <math>\geq 500</math> ng/mL o <math>\geq 1,000</math> ng/mL</b> |

En pacientes sin elementos de YEARS y Dímero D <1,000 ng/mL, o en pacientes con  $\geq 1$  elemento de YEARS y Dímero D <500 ng/mL, se excluyó la EP.

## **Prueba de Dímero D**

Los niveles elevados de Dímero D en plasma indican la presencia de trombosis aguda, pero su valor predictivo positivo es bajo y no es útil para confirmar una embolia pulmonar. Sin embargo, un nivel normal de Dímero D hace poco probable la presencia de una embolia pulmonar o una trombosis venosa profunda. Es importante tener en cuenta que el Dímero D también puede estar elevado en otras condiciones como cáncer, enfermedades inflamatorias o durante el embarazo.(9)

Es una prueba confiable con una sensibilidad diagnóstica de al menos el 95%. En el departamento de emergencias, un resultado negativo de Dímero D, combinado con la probabilidad clínica, puede descartar la embolia pulmonar en aproximadamente el 30% de los pacientes sospechosos, evitando la necesidad de pruebas adicionales.(9)

La especificidad del Dímero D en casos de embolia pulmonar disminuye gradualmente con la edad, siendo alrededor del 10% en pacientes mayores de 80 años. Sin embargo, se ha observado que el uso de umbrales de corte ajustados por edad puede mejorar su rendimiento en el diagnóstico. En particular, se ha validado previamente un umbral de corte

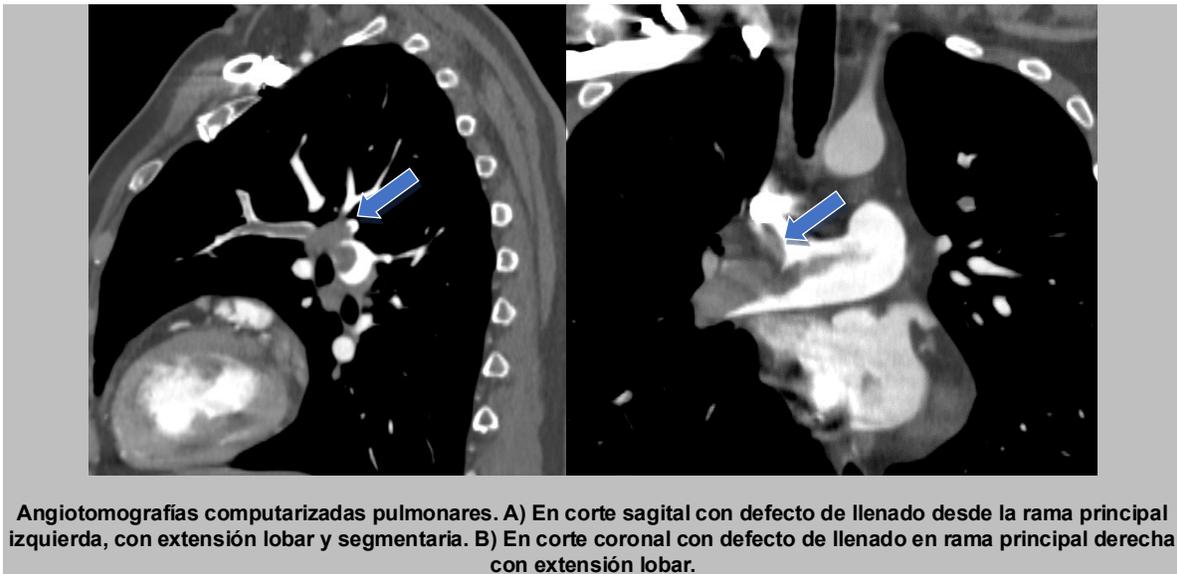
ajustado por edad, calculado como edad multiplicada por 10  $\mu\text{g/L}$ , para pacientes mayores de 50 años. Este enfoque permite una mejor interpretación de los resultados del Dímero D en pacientes más adultos. Estudios aseguran que de aplicar la regla de Wells y un umbral de Dímero D fijo de 500 ng/mL se podrían evitar del 34 al 46% de las angiogramas pulmonares.(9)

### Diagnóstico por imagen

Existen diversas pruebas de imagen utilizadas para el diagnóstico de embolia pulmonar, cada una con sus ventajas y limitaciones. La angiografía pulmonar, considerada históricamente como el estándar, es invasiva y no está ampliamente disponible, además de implicar una mayor exposición a la radiación. Otras pruebas incluyen la gammagrafía de ventilación/perfusión (V/Q) planar y la V/Q SPECT. La V/Q planar es económica pero puede tener limitaciones en su disponibilidad y variabilidad en la interpretación. La V/Q SPECT, por su parte, tiene alta precisión y pocas contraindicaciones, pero aún se requiere de validación en estudios prospectivos. La angiogramografía pulmonar se ha convertido en el nuevo estándar para el diagnóstico de EP debido a su disponibilidad, precisión y menor exposición a la radiación en comparación con la angiografía pulmonar.(9)

### Angiotomografía pulmonar

La tomografía computarizada con angiografía pulmonar (TCAP) es considerada la técnica de imagen de elección para el diagnóstico de embolia pulmonar (EP). Con una alta sensibilidad y especificidad, la TCAP ofrece una visualización precisa de las arterias pulmonares, incluso a nivel subsegmentario. Es ampliamente disponible, proporciona resultados rápidos y permite la reconstrucción multiplanar. Según el estudio PIOPED II, la TCAP tiene una sensibilidad del 83% y una especificidad del 96% en el diagnóstico de EP, aunque la probabilidad clínica debe ser considerada para mejorar su valor predictivo.(3)



Además de la TCAP, la tomografía computarizada de venografía de miembros inferiores también se puede realizar durante la adquisición de la TCAP para visualizar las venas

profundas de las piernas. Sin embargo, su valor añadido es limitado y su aplicación rutinaria no está recomendada debido a la mayor dosis de radiación que implica.(1,9)



La TCAP se ha establecido como el estándar de referencia en la evaluación de la EP aguda debido a su precisión, disponibilidad y capacidad de visualizar las arterias pulmonares. Sin embargo, es importante tener en cuenta la probabilidad clínica y considerar otras pruebas complementarias en caso necesario.(9)

Aunque la TCAP ha mejorado la calidad de imagen y tiene alta precisión diagnóstica, existen limitaciones que pueden resultar en diagnósticos falsos positivos (embolismos pulmonares pequeños) o falsos negativos (embolismos pulmonares pequeños no detectados).(14)

El protocolo estándar para realizar una tomografía computarizada de angiografía pulmonar (TCAP) implica el uso de escáneres de tomografía de múltiples detectores y contraste intravenoso. Se administra un volumen de contraste seguido de solución salina, y se sincroniza la adquisición utilizando la técnica de seguimiento del bolo. Durante la exploración, se evitan los artefactos de movimiento mediante apnea inspiratoria.(1)

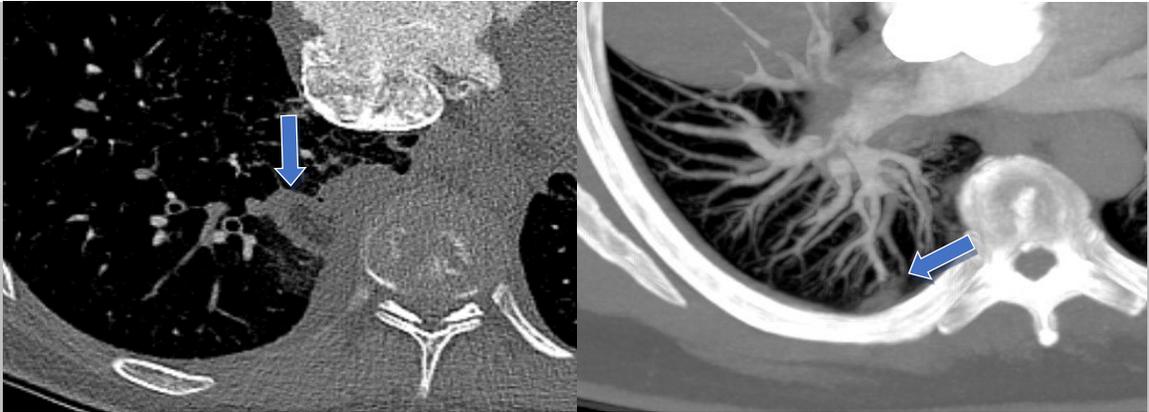
### **Hallazgos de imagen**

En los estudios de imagen de la embolia pulmonar (EP), se pueden observar distintos hallazgos que ayudan a su diagnóstico. Dentro de las arterias pulmonares, se pueden identificar defectos de llenado rodeados por un borde de contraste, lo que da lugar al "signo de la pastilla de polo" en el plano perpendicular y al "signo del ferrocarril" en el plano longitudinal del vaso. Estos defectos de llenado representan la presencia del trombo y muestran una señal de densidad de tejido blando. En el caso de la EP aguda, los trombos tienden a formar ángulos agudos con la pared del vaso y se encuentran frecuentemente en las bifurcaciones de los vasos.



Por otro lado, en la EP crónica, los defectos de llenado están adheridos a la pared del vaso, formando ángulos obtusos, y también pueden observarse bandas intraluminales y trombos recanalizados. Estos hallazgos de imagen son importantes para confirmar el diagnóstico de la EP y diferenciar entre los diferentes estados de la enfermedad.(1)

El infarto pulmonar se presenta en alrededor del 10-15% de los pacientes con embolia pulmonar aguda (EP), especialmente aquellos con insuficiencia cardíaca izquierda que afecta el suministro de sangre colateral a través de las arterias bronquiales. En los estudios de imagen, se visualiza como una opacidad en forma de cuña en la periferia pulmonar, con una zona central de vidrio esmerilado conocida como "halo invertido" o "atolón". La oclusión de las arterias pulmonares distales conduce a la isquemia, hemorragia y necrosis del tejido pulmonar, lo que resulta en el infarto pulmonar. Dependiendo del caso, puede haber una reversión del proceso, donde la sangre intra-alveolar se reabsorbe sin dejar necrosis ni daño residual (hemorragia intra-alveolar o "infarto incompleto"). Sin embargo, si la sangre no se reabsorbe, los eritrocitos extravasados pueden comenzar a descomponerse en hemosiderina en un plazo de 1-2 días, lo que marca el inicio de la necrosis real del parénquima pulmonar circundante y la formación de un "infarto verdadero". Con el tiempo, el área infartada es reemplazada por una cicatriz fibrosa, lo cual puede observarse en semanas desde un punto de vista histológico y meses desde una perspectiva radiológica.(15)



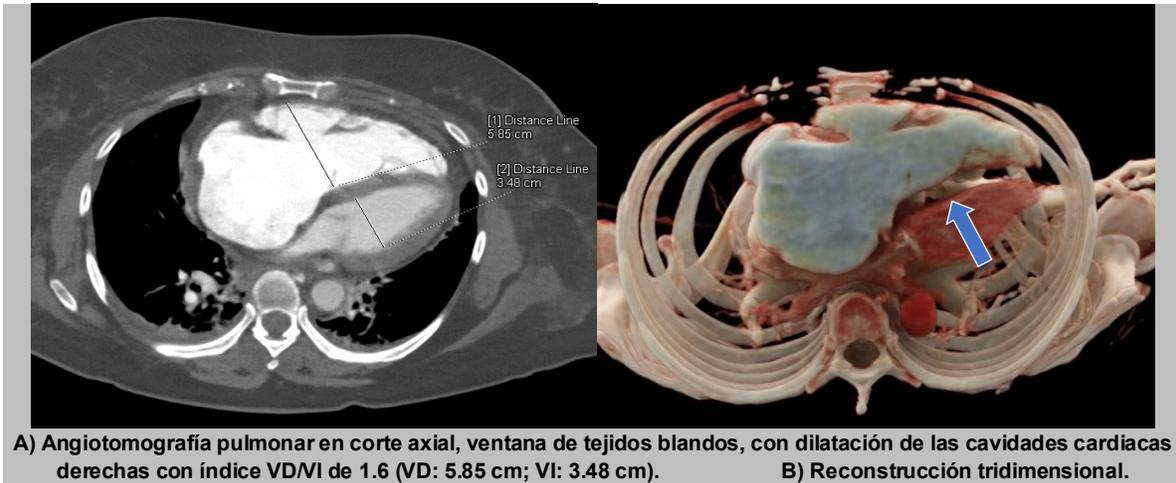
**Angiotomografías pulmonares en cortes axiales. A)** En ventana para tejidos blandos se evidencia en segmento posterior del lóbulo inferior derecho imagen en forma de cuña con vidrio despulido central dando el signo del atolón. **B)** En ventana de tejidos blandos y con máxima intensidad de proyección se evidencia imagen en cuña asociada a defecto de llenado en segmento posterior del lóbulo inferior derecho.

La embolia pulmonar subsegmentaria aislada presentan un curso clínico más benigno. La necesidad de tratamiento es incierta, aunque una embolia pulmonar periférica pequeña puede ser relevante en casos de reserva cardiorespiratoria disminuida. Actualmente, no hay datos disponibles sobre las consecuencias a largo plazo de estos eventos, especialmente en relación con la aparición de hipertensión pulmonar crónica. En lugar de iniciar el tratamiento con anticoagulantes de inmediato, la vigilancia clínica puede ser una opción beneficiosa de manejo en pacientes con embolia pulmonar subsegmentaria.(7)

### **Estratificar el riesgo**

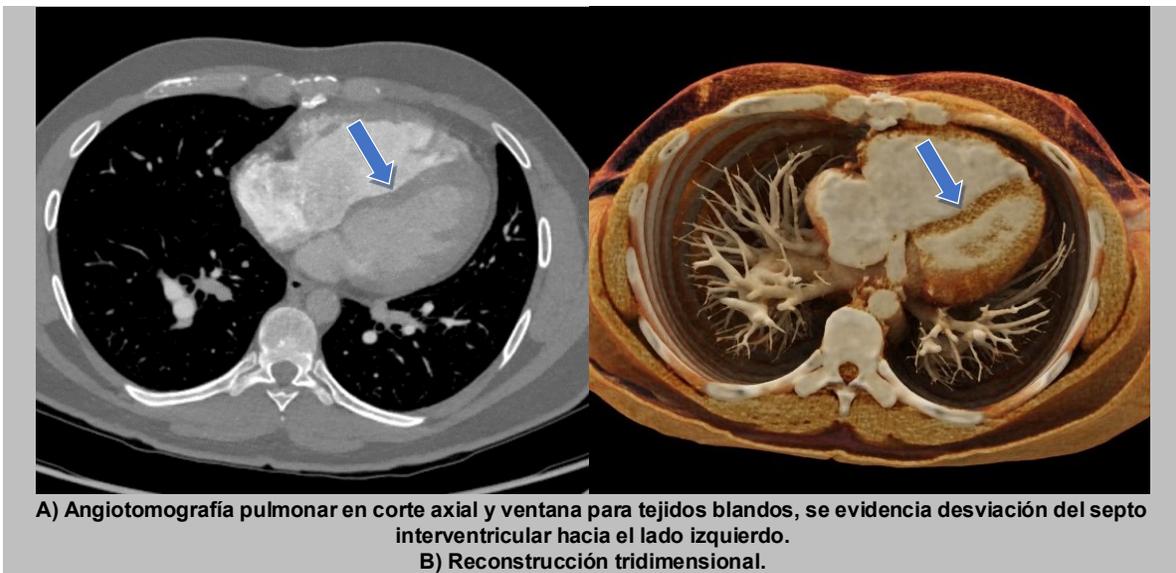
Una vez que se diagnostica una embolia pulmonar (EP), es de vital importancia realizar una estratificación de riesgo para determinar el tratamiento adecuado. Es un paso obligatorio para definir el enfoque terapéutico adecuado. Se consideran los indicadores clínicos, de imagen y de laboratorio que permiten evaluar la gravedad, siendo la presencia de disfunción ventricular derecha uno de los aspectos más relevantes.(9,16,17)

El diámetro del ventrículo derecho (VD) en relación al ventrículo izquierdo (VI) en el plano de corte transversal, conocido como VD/VI, es un indicador de disfunción del ventrículo derecho en la tomografía computarizada de angiografía pulmonar (TCAP). Un valor de VD/VI mayor a 1 se correlaciona con un aumento de la poscarga causado por la embolia pulmonar aguda. Varios estudios han validado la utilidad de este índice como predictor de mortalidad a corto plazo, siendo 2.5 veces mayor en pacientes con VD/VI anormal por cualquier causa y hasta cinco veces mayor en casos de embolia pulmonar.(9,17)



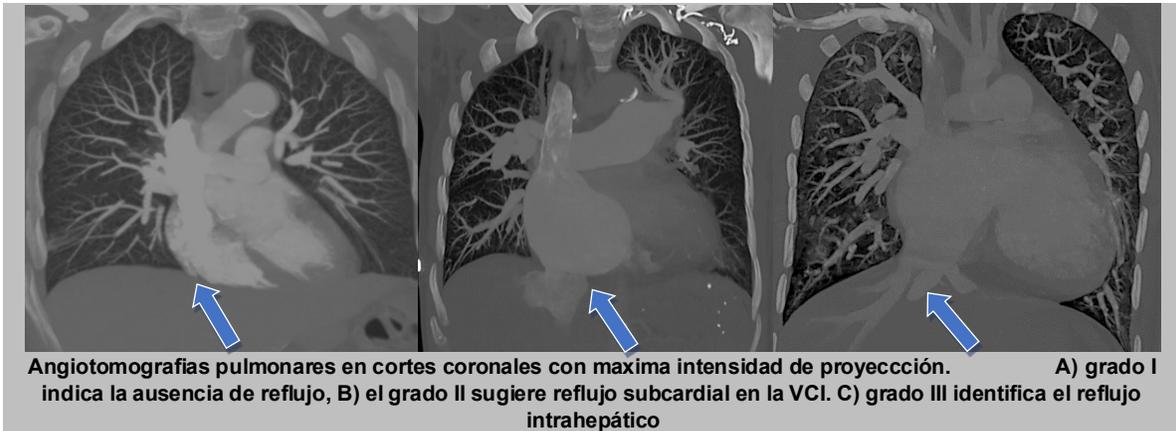
A) Angiotomografía pulmonar en corte axial, ventana de tejidos blandos, con dilatación de las cavidades cardiacas derechas con índice VDMI de 1.6 (VD: 5.85 cm; VI: 3.48 cm). B) Reconstrucción tridimensional.

El desplazamiento del septo interventricular, en el cual se curva hacia el ventrículo derecho, tiene una alta especificidad (100%), su sensibilidad es baja (26%) para predecir la disfunción del ventrículo derecho. Sin embargo, en un estudio, se encontró que la morfología anormal del septo era más común en pacientes con embolia pulmonar de alto riesgo.(3,17)



A) Angiotomografía pulmonar en corte axial y ventana para tejidos blandos, se evidencia desviación del septo interventricular hacia el lado izquierdo. B) Reconstrucción tridimensional.

El reflujo de contraste en la vena cava inferior (VCI) es un indicador de insuficiencia cardíaca derecha. Se utiliza una escala de tres puntos para cuantificar el grado de reflujo, donde el grado I indica la ausencia de reflujo, el grado II sugiere reflujo subcardial en la VCI y el grado III identifica el reflujo intrahepático. Diversos estudios han demostrado que el reflujo de contraste en la VCI se correlaciona con un pronóstico desfavorable. Específicamente, en un estudio, se encontró que el reflujo en la VCI estaba presente en el 81.3% de los pacientes que fallecieron.(3,17)



El diámetro de la arteria pulmonar principal (PA) y la relación entre la arteria pulmonar y la aorta ascendente son parámetros que se utilizan como indicadores potenciales de hipertensión pulmonar. Estudios han mostrado que, en pacientes con resultados adversos, el diámetro promedio de la arteria pulmonar fue de 29.9 mm y la relación del diámetro entre la arteria pulmonar y la aorta ascendente mayor 1. Estos valores resaltan la importancia de evaluar y monitorear estos parámetros en el diagnóstico y manejo de la hipertensión pulmonar.(3,17)



Otros signos propuestos en la evaluación radiológica de la embolia pulmonar incluyen el diámetro del seno coronario y el aumento en el diámetro de las venas. Estudios sugieren que se asocian con un mayor riesgo de muerte por cualquier causa dentro de los 30 días, en el seno coronario (medición mayor de 21 mm) y dilatación de la vena ácigos (más de 12.7 mm). Estos hallazgos resaltan la importancia de evaluar estos parámetros radiológicos en la detección y pronóstico de la embolia pulmonar.(17)

### Energía dual

La tomografía computarizada de doble energía (DECT) ha ampliado las capacidades de imagen al permitir la generación de imágenes funcionales junto con las imágenes anatómicas tradicionales. Con la DECT, se pueden obtener mapas de perfusión pulmonar

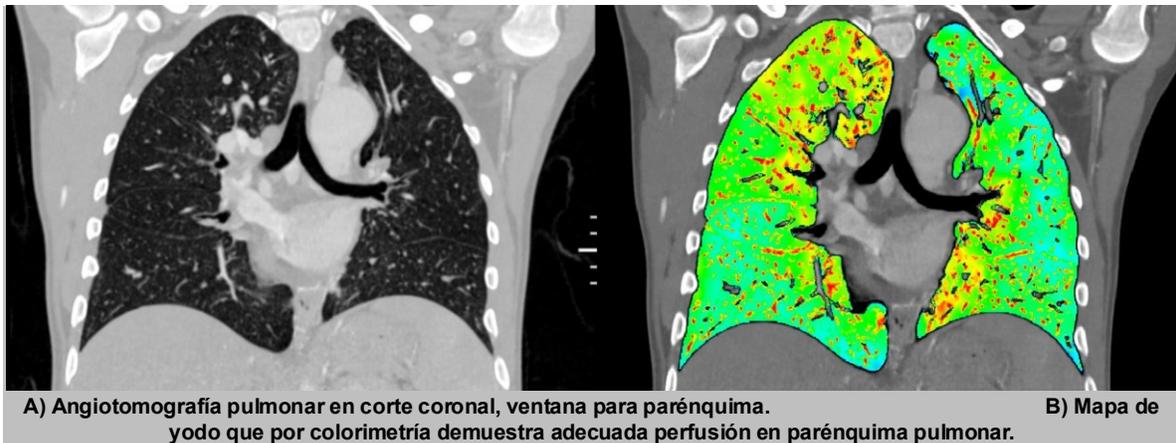
codificados por colores de yodo, lo que facilita la evaluación de la perfusión pulmonar y complementa la angiografía pulmonar por tomografía computarizada (CTPA). Estudios han demostrado que la DECT presenta una buena sensibilidad y especificidad para detectar tanto embolia pulmonar (EP) aguda como crónica, utilizando gammagrafía SPECT o centellografía como referencia. A pesar de las preocupaciones iniciales sobre la exposición a la radiación, se ha observado que la DECT no incrementa la dosis de radiación en comparación con la TC convencional. (18,19)

La CTPA es actualmente la técnica preferida para el diagnóstico de la embolia pulmonar, aunque implica la administración de medios de contraste yodados, lo que puede tener un riesgo de nefropatía inducida por contraste. La tomografía computarizada de baja tensión kilovoltaje mejora el contraste inducido por yodo, pero puede afectar la calidad de la imagen debido al aumento del ruido. Por otro lado, la tomografía computarizada de doble energía permite generar imágenes optimizadas en contraste y ruido al crear imágenes monocromáticas virtuales en niveles de baja y alta energía. Además de las ventajas anatómicas, la CTPA de doble energía también ofrece la evaluación simultánea de la perfusión pulmonar.(7)

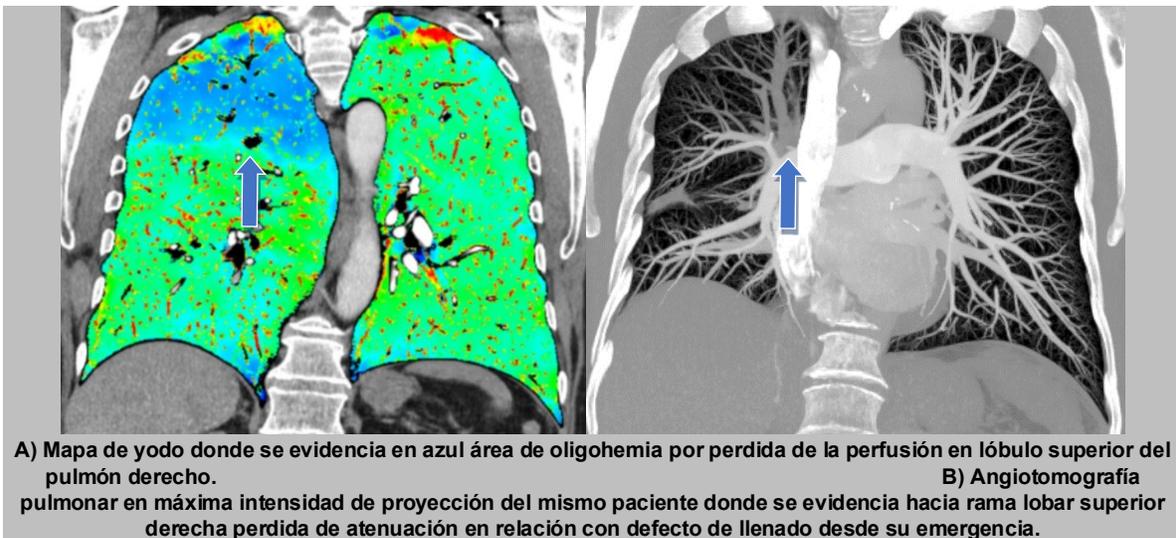
La tomografía computarizada de doble energía (DECT) utiliza dos espectros de energía de rayos X diferentes para mejorar la diferenciación de materiales en imágenes médicas. Esto se logra mediante la absorción fotoeléctrica y la dispersión Compton de los fotones de rayos X, donde átomos pesados como el calcio, el yodo, el bario y el xenón, que tienen una alta absorción fotoeléctrica, pueden distinguirse de otros tejidos con baja absorción. (20) Las modalidades de tomógrafos incluyen de doble fuente, fuente única cambio rápido de espectro energético, detector de doble capa y el filtro dividido; todos permiten obtener datos de doble energía.(21) Se usan dosis de radiación más bajas para la tomografía computarizada detector espectral en comparación con la tomografía computarizada convencional.(22) además da la posibilidad de usar menores dosis de contraste. (17,23)

### **Mapas de yodo**

Los mapas de yodo o Z-efectivos resaltan los píxeles que contienen yodo y se utilizan para generar mapas de volumen sanguíneo de perfusión de los pulmones.(1) Mejoran la visualización de los defectos de llenado/trombos en arterias segmentarias o subsegmentarias pequeñas.(24) Es un sustituto de los estudios dinámicos de perfusión pulmonar.(25) La cuantificación automática del volumen sanguíneo perfundido pulmonar (PBV) permite evaluar de manera rápida e independiente la distribución de yodo en el parénquima pulmonar, lo cual se correlaciona con la carga de trombos y parámetros de gravedad de la EP.(19)



Este último representa una medida de la circulación microvascular y la perfusión, y permite una mejor detección de las obstrucciones periféricas. En la fase aguda, el mapa de yodo generalmente muestra oligemia relativa en la embolia pulmonar, como ocurre en pacientes con hemorragia alveolar. En la fase subaguda y crónica, el infarto pulmonar generalmente se presenta como una completa ausencia de yodo debido a la formación de una cicatriz fibrótica resultante. La distribución segmentaria de las lesiones de perfusión puede ayudar en la diferenciación del infarto de otras entidades como la neumonía o el tumor. (15)

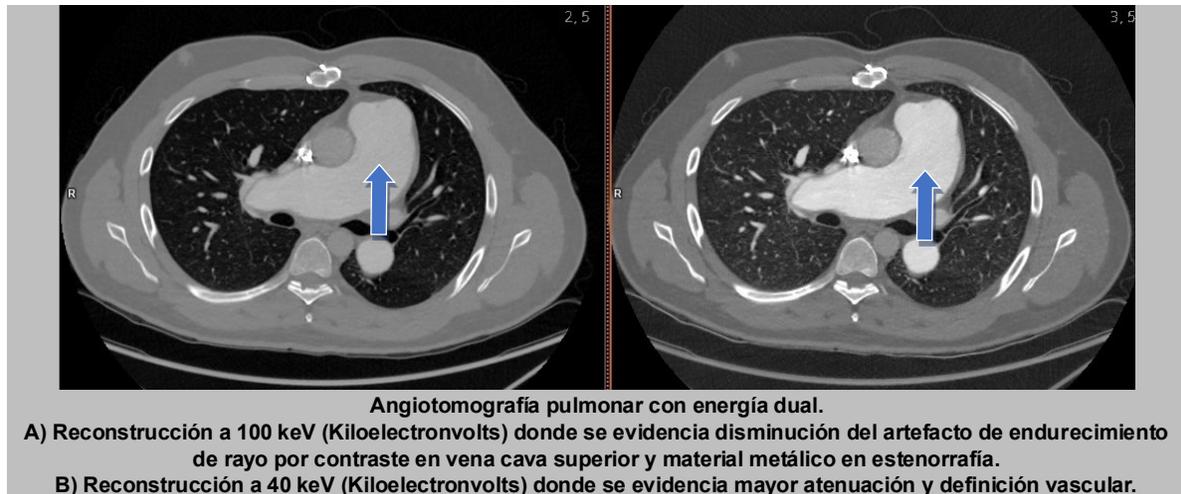


Es importante tener en cuenta que pueden aparecer artefactos en las imágenes que se pueden confundir con defectos de perfusión. En los lóbulos superiores debido a artefactos de endurecimiento del haz, en el segmento medial del lóbulo medio derecho y en la lingula debido a la pulsación cardíaca, y en las bases pulmonares debido al movimiento del diafragma.(24)

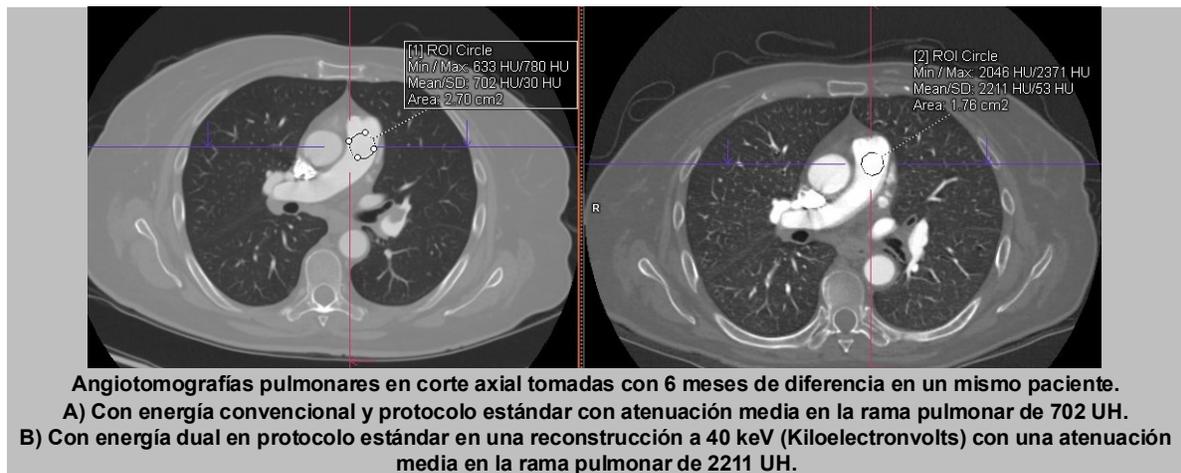
Los defectos de perfusión medidos en DECT se correlacionan con resultados adversos en PE, y las puntuaciones de defectos de perfusión pueden utilizarse como biomarcadores de gravedad. (26)

### Imágenes monoenergéticas.

Las imágenes virtuales de alta energía en la tomografía computarizada de doble energía (DECT) se utilizan para reducir los artefactos causados por implantes metálicos, mientras que las imágenes virtuales sin contraste son útiles para caracterizar lesiones incidentales como granulomas calcificados. (1,27)



Las imágenes virtuales de baja energía en la tomografía computarizada de doble energía (DECT) se utilizan para reducir el volumen de medio de contraste y mejorar la calidad angiográfica, lo cual resulta beneficioso para pacientes con disfunción renal y un mayor riesgo de embolia pulmonar. (14) Se ha demostrado que es posible realizar angiografías pulmonares con una mínima cantidad de medio de contraste yodado, manteniendo una calidad de imagen suficiente para el diagnóstico de la embolia pulmonar. Aunque estas imágenes presentan mayor ruido, la mejora en la relación señal-ruido permite una mejor evaluación de la calidad de imagen. (3,5)



## Justificación

El tromboembolismo pulmonar agudo es una condición médica de alta complejidad que requiere una detección y diagnóstico precisos para garantizar un manejo óptimo del paciente. En el Instituto Nacional de Cardiología de México Ignacio Chávez, nos enfrentamos a casos de alta complejidad con pacientes que presentan comorbilidades, como la nefropatía crónica, que limitan el uso de contraste intravenoso y dificultan la realización de protocolos convencionales de angiotomografía pulmonar. Por tanto, es crucial evaluar la utilidad de la energía dual en comparación con la energía única en este contexto, con el objetivo de mejorar la precisión diagnóstica y la evaluación del riesgo en pacientes con sospecha de tromboembolismo pulmonar agudo.

Este estudio nos permitirá determinar si la angiotomografía pulmonar de energía dual puede mejorar la detección de trombos pulmonares, proporcionar una mejor definición de los vasos sanguíneos pulmonares y permitir una evaluación más precisa de la extensión y gravedad del tromboembolismo pulmonar en pacientes con comorbilidades que limitan el uso de contraste intravenoso. Además, podremos comprender mejor los beneficios y limitaciones de la energía dual en comparación con la energía única en la angiotomografía pulmonar, lo que nos ayudará a establecer pautas y protocolos más efectivos para el diagnóstico y manejo de pacientes con sospecha de tromboembolismo pulmonar agudo en nuestro centro.

## **Hipótesis**

### **Hipótesis Nula:**

No hay diferencias significativas en la angiotomografía pulmonar convencional vs con energía dual para el diagnóstico de pacientes con sospecha de tromboembolismo pulmonar agudo.

### **Hipótesis Alterna:**

Existe diferencia significativa en la angiotomografía pulmonar convencional vs con energía dual para el diagnóstico de pacientes con sospecha de tromboembolismo pulmonar agudo, demostrando que una de las técnicas es superior en términos de ser menos lesiva para el paciente, precisión diagnóstica y evaluación de riesgos.

## Objetivos

### Objetivo General:

Evaluar la utilidad de la angiotomografía pulmonar con energía dual en comparación con la convencional para el diagnóstico y evaluación de pacientes con sospecha de tromboembolismo pulmonar agudo en el Instituto Nacional de Cardiología Ignacio Chávez.

### Objetivos específicos:

1. Determinar si el uso de la angiotomografía pulmonar de energía dual mejora la detección de trombos pulmonares en comparación con la angiotomografía pulmonar convencional.
2. Evaluar si la angiotomografía pulmonar de energía dual proporciona una mayor definición de los vasos sanguíneos pulmonares en comparación con la angiotomografía pulmonar convencional
3. Comparar la sensibilidad para tromboembolismos pulmonares subsegmentarios e infartos pulmonares en la angiotomografía pulmonar de energía dual vs la angiotomografía pulmonar convencional.

## Metodología

**Tipo de estudio:** observacional, transversal y retrospectivo.

**Lugar de Estudio:** El estudio se llevó a cabo en el Instituto Nacional de Cardiología Ignacio Chávez.

**Población de Estudio:** Se incluyeron pacientes mayores de 18 años, consecutivos y registrados en el sistema de registros médicos del Instituto Nacional de Cardiología Ignacio Chávez. Estos pacientes fueron sometidos a angiotomografía pulmonar por sospecha clínica de tromboembolismo pulmonar agudo durante el periodo de enero de 2022 a diciembre de 2022.

### Criterios de Inclusión

- Pacientes mayores de 18 años.
- Ambos sexos.
- Pacientes con sospecha clínica de tromboembolismo pulmonar agudo.
- Pacientes atendidos en el Instituto Nacional de Cardiología Ignacio Chávez durante el periodo de 2022.
- Pacientes que hayan sido sometidos a angiotomografía pulmonar.

### Criterios de Exclusión

- Pacientes sin sospecha clínica de tromboembolismo pulmonar agudo.
- Pacientes con diagnóstico de tromboembolismo pulmonar crónico.
- Pacientes cuyos estudios de imagen no sean institucionales o su información se encuentre incompleta.
- Pacientes menores de 18 años.

**Tamaño de la muestra:** Se estableció una muestra de 571 pacientes con sospecha de tromboembolismo pulmonar agudo de los cuales 112 fueron positivos por angiotomografía pulmonar, en 415 se realizó con energía convencional y 156 .

### Definición de variables:

| Variable                              | Clasificación:                 | Descripción:   | Indicador:                 |
|---------------------------------------|--------------------------------|--|----------------------------|
| <b>Tromboembolismo pulmonar agudo</b> | Cualitativa nominal dicotómica | Presencia o no de defectos de llenado en arterias pulmonares que por sus características corresponderían con tromboembolismo pulmonar agudo. | 1. Positivo<br>2. Negativo |

|  |                                |  |  |
|--|--------------------------------|--|--|
| <b>Atenuación del tronco de la pulmonar</b>                  | Cuantitativa continua          | Atenuación en el tronco de la arteria pulmonar como criterio validado de calidad del estudio.        | Unidades de atenuación Hounsfield en el tronco de la arteria pulmonar. |
| <b>Infarto o tromboembolismo pulmonar de subsegmentario.</b> | Cualitativa nominal dicotómica | Presencia de imágenes en parénquima pulmonar que cumplan criterios radiológicos de infarto pulmonar. | 1.Presente<br>2.Ausente  |

**Protocolo de angiogramografía Pulmonar:** Los estudios de angiogramografía pulmonar se realizó utilizando un tomógrafo de última generación con energía dual el Revolution CT de 512 con tecnología Gemstone (GE, USA). Las imágenes se adquirieron en fase inspiratoria y se realizaron reconstrucciones con un corte de 1.25 mm.

**Análisis de Datos:** Se realizó un análisis comparativo de los hallazgos obtenidos con la energía dual y la energía única en la angiogramografía pulmonar. Se evaluaron la detección de trombos pulmonares, la definición de los vasos sanguíneos pulmonares y la evaluación de la extensión y gravedad del tromboembolismo pulmonar en cada grupo. Se utilizaron pruebas estadísticas apropiadas para comparar los resultados.

**Consideraciones Éticas** El estudio se llevó a cabo de acuerdo con los principios éticos y las regulaciones establecidas para la investigación médica. Se aseguro la anonimización de la información recopilada.

**Limitaciones del Estudio:** Se reconocen algunas limitaciones en el estudio, como su diseño retrospectivo y la dependencia de los datos disponibles en los registros médicos. Además, pueden existir factores confusos no controlados que podrían influir en los resultados. Sin embargo, se llevarán a cabo análisis estadísticos adecuados y se discutirán las limitaciones en la interpretación de los resultados.

**Interpretación de los Resultados:** Los resultados serán interpretados y discutidos en el contexto de la literatura existente y las limitaciones del estudio. Se brindará una descripción detallada de los hallazgos encontrados y se realizarán conclusiones basadas en los resultados obtenidos.

**Implicaciones Clínicas y Futuras Direcciones** Se discutirán las implicaciones clínicas de los resultados y se proporcionarán recomendaciones para la práctica clínica en relación con el uso de la energía dual y la energía única en la angiogramografía pulmonar para el diagnóstico y evaluación del riesgo en pacientes con sospecha de tromboembolismo pulmonar agudo. Además, se identificarán áreas para futuras investigaciones que puedan abordar las limitaciones del estudio y ampliar el conocimiento en este campo.

## **Plan de análisis estadístico**

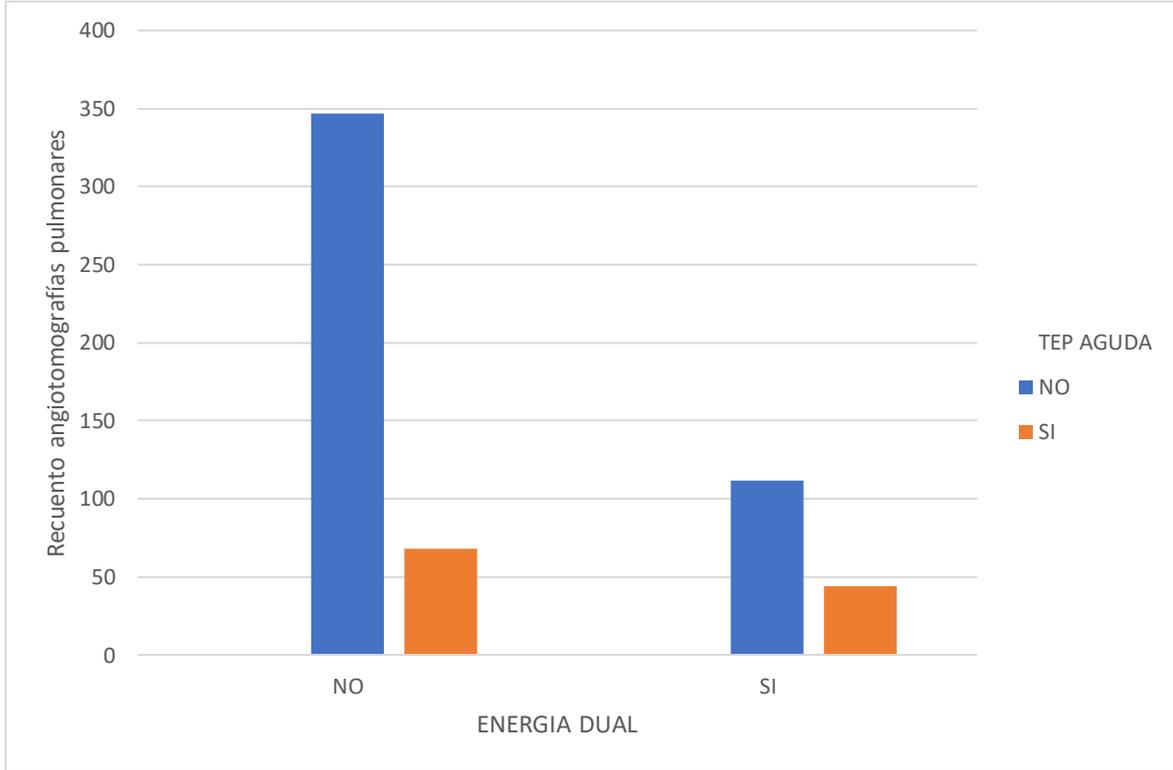
Para alcanzar los objetivos planteados, llevaremos a cabo un análisis descriptivo utilizando distintas técnicas estadísticas. Para las variables cualitativas, presentaremos sus distribuciones de frecuencia, mientras que para las variables cuantitativas utilizaremos medidas de resumen o tendencia central, según la distribución identificada. Para este propósito, emplearemos pruebas de normalidad como Kolmogorov-Smirnov o Shapiro-Wilk.

Para incluir las variables en el modelo, se utilizarán criterios clínicos por parte de los investigadores, complementados con el criterio estadístico de Hosmer-Lemeshow. Este último nos permitirá seleccionar las variables candidatas con un valor  $p \leq 0.05$  en el análisis bivariado. Utilizaremos la prueba Chi cuadrado de Pearson o la prueba exacta de Fisher para variables cualitativas independientes, y las U de Mann-Whitney para las variables cuantitativas, después de verificar su distribución.

Para el procesamiento de los datos, exportaremos la información al programa estadístico IBM SPSS Statistics® versión 29. Esta herramienta nos permitirá realizar análisis más complejos y obtener resultados precisos para alcanzar nuestros objetivos de investigación.

## Resultados

### Sensibilidad para la detección de tromboembolismo pulmonar agudo.



Angiotomografías pulmonares con energía convencional en pacientes con sospecha de tromboembolismo pulmonar agudo durante 2022 (Recuento: 415): De los pacientes sometidos a angiotomografía pulmonar con energía dual, el 83.6% fue negativo para TEP aguda, mientras que el 16.4% fue positivo para TEP aguda.

Angiotomografías pulmonares con energía dual durante 2022 en pacientes con sospecha de tromboembolismo pulmonar agudo (Recuento: 156): De los pacientes sometidos a angiotomografía pulmonar con energía dual, el 71.8% fue negativo para TEP aguda, mientras que el 28.2% fue positivo para TEP aguda.

|  |                       | TEP AGUDA |       | Total  |
|--|-----------------------|-----------|-------|--------|
|  |                       | NO        | SI    |        |
| Angiotomografía pulmonar convencional. | Recuento              | 347       | 68    | 415    |
|  | %                     | 83.6%     | 16.4% | 100.0% |
|  | Residuo               | 13.4      | -13.4 |        |
|  | Residuo estandarizado | .7        | -1.5  |        |
|  | Recuento              | 112       | 44    | 156    |

|  |                       |       |       |        |
|--|-----------------------|-------|-------|--------|
| Angiotomografía pulmonar con energía dual. | %                     | 71.8% | 28.2% | 100.0% |
|  | Residuo               | -13.4 | 13.4  |        |
|  | Residuo estandarizado | -1.2  | 2.4   |        |
| Total                                      | Recuento              | 459   | 112   | 571    |
|  | %                     | 80.4% | 19.6% | 100.0% |

Se realizó una prueba de chi-cuadrado para determinar la significancia de la diferencia observada entre los grupos. El valor de chi-cuadrado fue 10.046, con un grado de libertad (gl) de 1, y la significancia asintótica bilateral fue de 0.002. Además, se realizó una corrección de continuidad, y el valor de chi-cuadrado corregido fue 9.310, con una significancia asintótica bilateral de 0.002.

| Pruebas de chi-cuadrado                |                     |    |                                      |                                  |                                   |
|--|---------------------|----|--------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
|  | Valor               | Gl | Significación asintótica (bilateral) | Significación exacta (bilateral) | Significación exacta (unilateral) |
| Chi-cuadrado de Pearson                | 10.046 <sup>a</sup> | 1  | .002                                 |                                  |                                   |
| Corrección de continuidad <sup>b</sup> | 9.310               | 1  | .002                                 |                                  |                                   |
| Razón de verosimilitud                 | 9.517               | 1  | .002                                 |                                  |                                   |
| Prueba exacta de Fisher                |                     |    |                                      | .002                             | .001                              |
| N de casos válidos                     | 571                 |    |                                      |                                  |                                   |

a. 0 casillas (0.0%) han esperado un recuento menor que 5. El recuento mínimo esperado es 30.60.

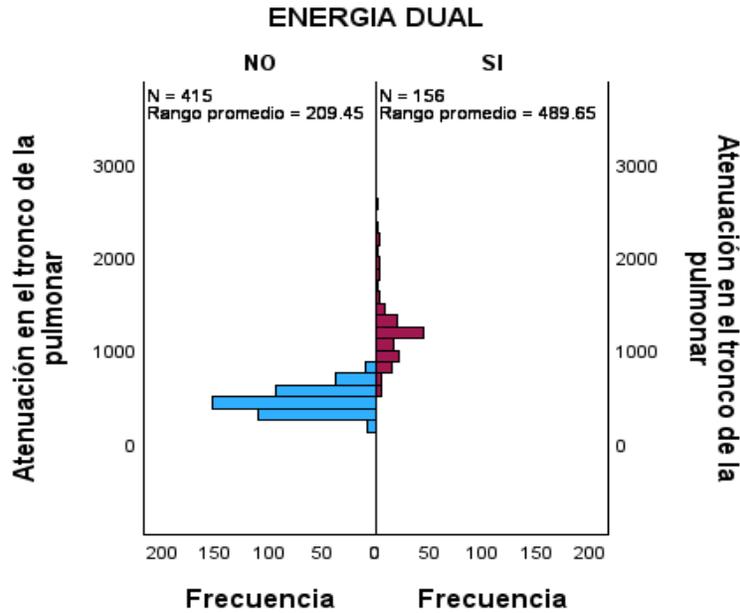
b. Sólo se ha calculado para una tabla 2x2

La angiotomografía pulmonar con energía dual parece estar más relacionada con un aumento en el porcentaje de casos positivos para TEP aguda (28.2%) en pacientes con sospecha clínica, en comparación con los casos positivos por angiotomografía convencional (16.4%) con una diferencia del 13.4%. Las pruebas estadísticas muestran una asociación significativa entre las variables.

### Calidad angiográfica.

Para evaluar si la angiotomografía pulmonar de energía dual proporciona una mayor definición de los vasos sanguíneos pulmonares en comparación con la angiotomografía pulmonar convencional se hicieron mediciones de la atenuación en unidades Hounsfield del tronco de la arteria pulmonar en ambos grupos. Se obtuvo un valor promedio de atenuación de 209.45 unidades Hounsfield (UH) en las angiotomografías convencionales de y un valor promedio de atenuación 489.65 UH en las angiotomografías con energía dual. Y se realizaron las siguientes pruebas no paramétricas de la asociación de variables.

Prueba U de Mann-Whitney para muestras ...



|   | Hipótesis nula   | Prueba  | Sig. <sup>a,b</sup> | Decisión                   |
|---|--|---|---------------------|----------------------------|
| 1 | La distribución de Atenuación en el tronco de la pulmonar es la misma entre las angiotomografías de energía dual y convencional. | Prueba U de Mann-Whitney para muestras independientes | <.001               | Rechace la hipótesis nula. |

a. El nivel de significación es de .050.

b. Se muestra la significancia asintótica.

Se analizaron inicialmente bajo la prueba U de Mann-Whitney que muestra un valor de p (significancia asintótica bilateral) menor que 0.001. Esto significa que la probabilidad de obtener una diferencia tan grande entre las distribuciones de atenuación en el tronco de la pulmonar y bajo la hipótesis nula de que las distribuciones son iguales, es muy baja. Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula.

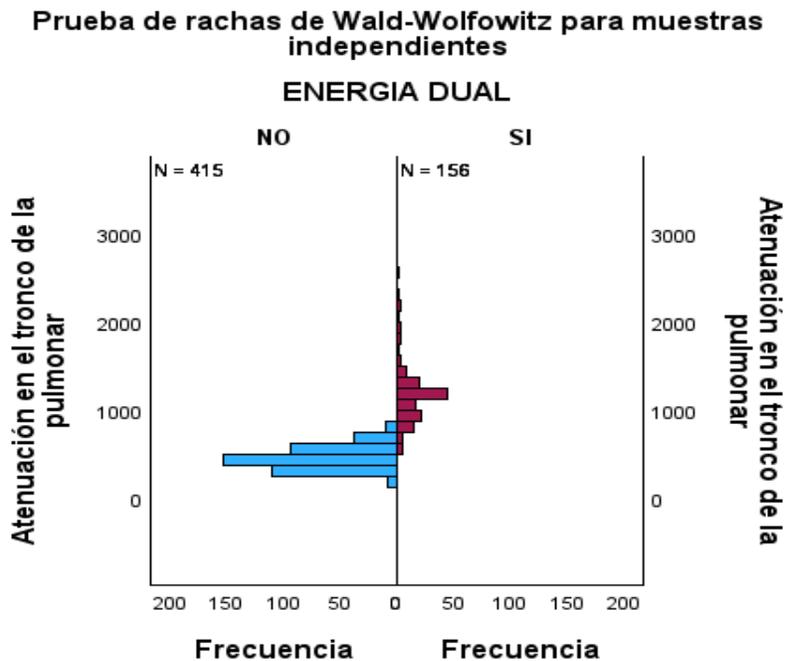
Luego se corroboró la validez de este análisis con tres pruebas diferentes para comparar las distribuciones de atenuación en el tronco de la pulmonar entre las categorías de angiotomografía convencional vs angiotomografía con energía dual. A continuación, se presenta un resumen de los resultados de las pruebas:

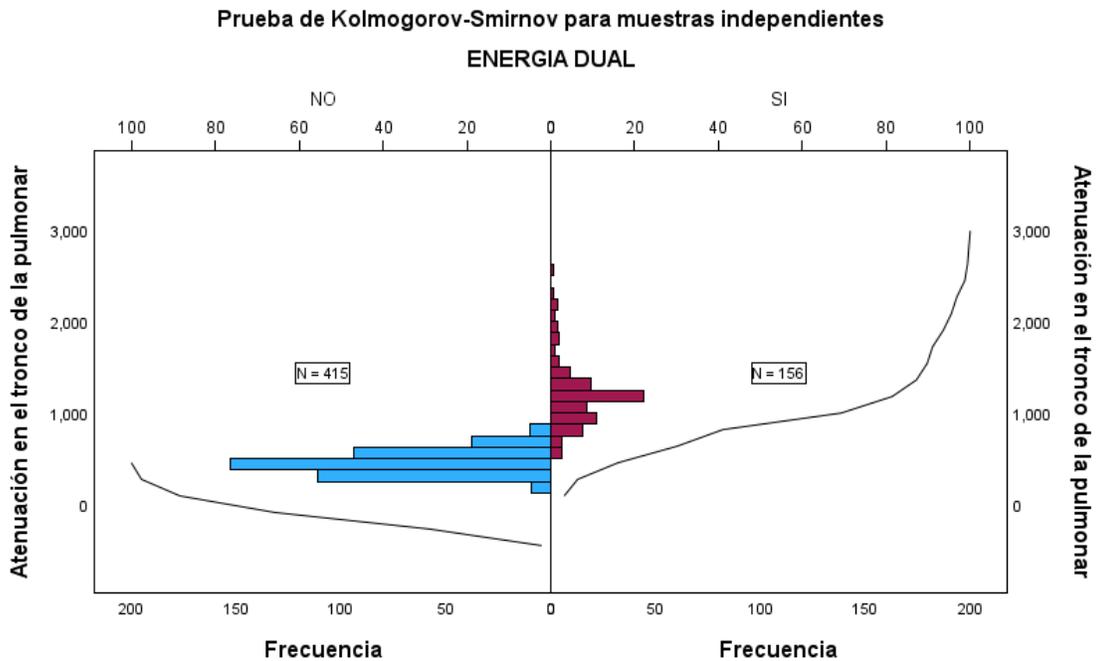
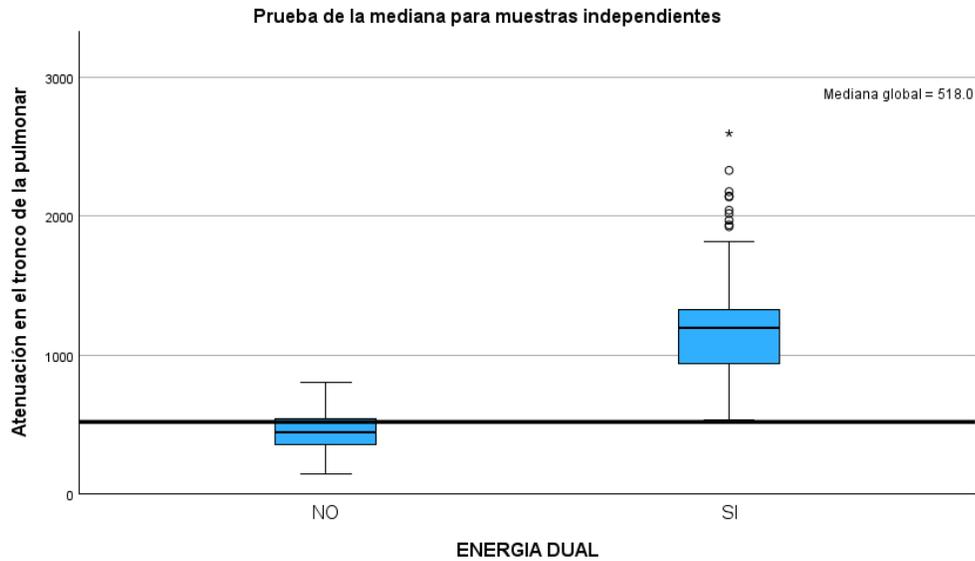
|   | Hipótesis nula   | Prueba  | Sig. <sup>a,b</sup> | Decisión                   |
|---|--|---|---------------------|----------------------------|
| 1 | La distribución de Atenuación en el tronco de la pulmonar es la misma entre las angiotomografías de energía dual y convencional. | Prueba de rachas de Wald-Wolfowitz para muestras independientes | <.001               | Rechace la hipótesis nula. |
| 2 | Las medianas de Atenuación en el tronco de la pulmonar son las mismas entre las angiotomografías de energía dual y convencional. | Prueba de la mediana para muestras independientes               | <.001 <sup>c</sup>  | Rechace la hipótesis nula. |
| 3 | La distribución de Atenuación en el tronco de la pulmonar es la misma entre las angiotomografías de energía dual y convencional. | Prueba de Kolmogorov-Smirnov para muestras independientes       | <.001               | Rechace la hipótesis nula. |

a. El nivel de significación es de .050.

b. Se muestra la significancia asintótica.

c. Significación asintótica corregida de continuidad de Yates





En todas las pruebas, se encontró que existen diferencias significativas en la distribución de atenuación en el tronco de la pulmonar entre las angiotomografías realizadas con energía convencional y las realizadas con energía dual. Los valores de significancia muy bajos (menores de 0.001) indican que estas diferencias observadas no se deben al azar y son genuinas.

## Sensibilidad para la detección de compromiso subsegmentario e infartos pulmonares.

Al comparar la sensibilidad para tromboembolismos pulmonares subsegmentarios e infartos pulmonares entre la angiotomografía pulmonar de energía dual y la angiotomografía pulmonar convencional.

Se han realizado tablas cruzadas que muestran el número de casos en los que se detectaron tromboembolismos pulmonares subsegmentarios e infartos pulmonares en función de si se utilizó la angiotomografía pulmonar de energía dual o la convencional.

En la tabla cruzada para los tromboembolismos pulmonares subsegmentarios, se observa que de un total de 415 pacientes analizados con angiotomografía pulmonar de energía convencional, 369 no presentaron tromboembolismo subsegmentario (88.9%), mientras que 46 sí lo presentaron (11.1%). Por otro lado, de los 156 pacientes analizados con angiotomografía pulmonar con energía dual, 121 no presentaron tromboembolismo subsegmentario (77.6%) y 35 sí lo presentaron (22.4%). Estos resultados muestran una diferencia en la detección de tromboembolismos pulmonares subsegmentarios entre ambas técnicas.

|  |                       | Tromboembolismo pulmonar subsegmentario |          | Total  |
|--|-----------------------|---|----------|--------|
|  |                       | Negativo                                | Positivo |        |
| Angiotomografía pulmonar convencional.     | Recuento              | 369                                     | 46       | 415    |
|  | %                     | 88.9%                                   | 11.1%    | 100.0% |
|  | Residuo               | 12.9                                    | -12.9    |        |
|  | Residuo estandarizado | .7                                      | -1.7     |        |
| Angiotomografía pulmonar con energía dual. | Recuento              | 121                                     | 35       | 156    |
|  | %                     | 77.6%                                   | 22.4%    | 100.0% |
|  | Residuo               | -12.9                                   | 12.9     |        |
|  | Residuo estandarizado | -1.1                                    | 2.7      |        |
| Total                                      | Recuento              | 490                                     | 81       | 571    |
|  | %                     | 85.8%                                   | 14.2%    | 100.0% |

En la tabla cruzada para los infartos pulmonares, se observa que de un total de 415 pacientes analizados con angiotomografía pulmonar de energía convencional, 397 no presentaron infarto pulmonar (95.7%), mientras que 18 sí lo presentaron (4.3%). En cuanto a los 156 pacientes analizados con angiotomografía pulmonar con energía dual, 141 no presentaron infarto pulmonar (90.4%) y 15 sí lo presentaron (9.6%). Estos resultados también muestran una diferencia en la detección de infartos pulmonares entre ambas técnicas.

|  |                       | Infarto pulmonar |          | Total  |
|--|-----------------------|------------------|----------|--------|
|  |                       | Negativo         | Positivo |        |
| Angiotomografía pulmonar convencional      | Recuento              | 397              | 18       | 415    |
|  | %                     | 95.7%            | 4.3%     | 100.0% |
|  | Residuo               | 6.0              | -6.0     |        |
|  | Residuo estandarizado | .3               | -1.2     |        |
| Angiotomografía pulmonar con energía dual. | Recuento              | 141              | 15       | 156    |
|  | %                     | 90.4%            | 9.6%     | 100.0% |
|  | Residuo               | -6.0             | 6.0      |        |
|  | Residuo estandarizado | -.5              | 2.0      |        |
| Total                                      | Recuento              | 538              | 33       | 571    |
|  | %                     | 94.2%            | 5.8%     | 100.0% |

Los resultados de las pruebas de chi-cuadrado tanto para el tromboembolismo pulmonar subsegmentario como para las áreas de infarto muestran que hay una diferencia significativa entre el uso de la angiotomografía pulmonar de energía dual y la angiotomografía pulmonar convencional.

El valor del chi-cuadrado de Pearson y la significancia asintótica bilateral indica que existe una relación altamente significativa entre el tipo de angiotomografía pulmonar y la detección de tromboembolismos pulmonares subsegmentarios y zonas de infarto pulmonar.

#### Pruebas de chi-cuadrado para tromboembolismo pulmonar subsegmentario

|  | Valor               | gl | Significación asintótica (bilateral) | Significación exacta (bilateral) | Significación exacta (unilateral) |
|--|---------------------|----|--------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
| Chi-cuadrado de Pearson                | 12.002 <sup>a</sup> | 1  | <.001                                |                                  |                                   |
| Corrección de continuidad <sup>b</sup> | 11.087              | 1  | <.001                                |                                  |                                   |
| Razón de verosimilitud                 | 11.133              | 1  | <.001                                |                                  |                                   |
| Prueba exacta de Fisher                |                     |    |                                      | .001                             | <.001                             |
| N de casos válidos                     | 571                 |    |                                      |                                  |                                   |

a. 0 casillas (0.0%) han esperado un recuento menor que 5. El recuento mínimo esperado es 22.13.

b. Sólo se ha calculado para una tabla 2x2

#### Pruebas de chi-cuadrado para infarto pulmonar.

|  | Valor              | gl | Significación<br>asintótica (bilateral) | Significación<br>exacta (bilateral) | Significación<br>exacta<br>(unilateral) |
|--|--------------------|----|---|-------------------------------------|---|
| Chi-cuadrado de Pearson                | 5.800 <sup>a</sup> | 1  | .016                                    |                                     |   |
| Corrección de continuidad <sup>b</sup> | 4.872              | 1  | .027                                    |                                     |   |
| Razón de verosimilitud                 | 5.278              | 1  | .022                                    |                                     |   |
| Prueba exacta de Fisher                |                    |    |   | .025                                | .016                                    |
| N de casos válidos                     | 571                |    |   |                                     |   |

a. 0 casillas (0.0%) han esperado un recuento menor que 5. El recuento mínimo esperado es 9.02.

b. Sólo se ha calculado para una tabla 2x2

Todas estas pruebas confirman que las diferencias observadas entre los dos grupos (energía dual y convencional) en cuanto a la detección de tromboembolismos subsegmentarios como para infartos pulmonares es estadísticamente significativa

Los resultados indican que la angiotomografía pulmonar de energía dual tiene una mayor sensibilidad para detectar tromboembolismos pulmonares subsegmentarios en comparación con la angiotomografía pulmonar convencional.

## Discusión

La angiotomografía pulmonar de energía dual demuestra una mayor sensibilidad en la detección de trombos pulmonares en comparación con la angiotomografía pulmonar convencional. Se observó que el 28.2% de los pacientes analizados con angiotomografía pulmonar de energía dual bajo sospecha de tromboembolismo pulmonar agudo fue positivo, mientras que solo el 16.4% de los pacientes analizados con angiotomografía pulmonar convencional fue positivo. Esta diferencia del 13.4% en la detección de trombos pulmonares sugiere que la angiotomografía pulmonar de energía dual es más sensible en pacientes con sospecha clínica.

Además, para evaluar la calidad angiográfica y la definición de los vasos sanguíneos pulmonares, se midió la atenuación en unidades Hounsfield del tronco de la arteria pulmonar en ambos grupos. Los resultados mostraron que la angiotomografía pulmonar de energía dual tiene un valor promedio de atenuación de 489.65 UH, mientras que la angiotomografía pulmonar convencional tiene un valor promedio de 209.45 UH. Esta diferencia en los valores de atenuación sugiere que la energía dual puede mejorar la visualización y definición de los vasos pulmonares, lo que es beneficioso para una mejor evaluación del tromboembolismo pulmonar agudo y puede reducir la cantidad de contraste necesario para obtener una imagen de calidad adecuada.

Al comparar la sensibilidad para tromboembolismos pulmonares subsegmentarios e infartos pulmonares en la angiotomografía pulmonar de energía dual respecto a la convencional, las tablas cruzadas y las pruebas de chi-cuadrado muestran que hay una diferencia significativa en la detección de tromboembolismos pulmonares subsegmentarios e infartos pulmonares entre ambas técnicas. La energía dual mostró una detección del 22.4% en tromboembolismos pulmonares subsegmentarios, mientras que la convencional detectó el 11.1%. En el caso de los infartos pulmonares, la energía dual tuvo una detección del 9.6%, mientras que la convencional detectó el 4.3%.

Estos resultados respaldan los objetivos planteados y sugieren que la angiotomografía pulmonar de energía dual es una técnica más efectiva para la detección de tromboembolismos pulmonares y proporciona una mayor definición de los vasos sanguíneos pulmonares en comparación con la angiotomografía pulmonar convencional. Además, demuestra una mayor sensibilidad para detectar tromboembolismos pulmonares subsegmentarios e infartos pulmonares, lo que la convierte en una opción más adecuada para pacientes con sospecha de tromboembolismo pulmonar agudo.

Por lo tanto, la angiotomografía pulmonar de energía dual resulta ser una herramienta útil y eficaz en el diagnóstico y evaluación de pacientes con sospecha de tromboembolismo pulmonar agudo en el Instituto Nacional de Cardiología Ignacio Chávez. No obstante, es esencial considerar las limitaciones del estudio, como su diseño retrospectivo, el tamaño de la muestra limitado y la posibilidad de sesgos, antes de generalizar los resultados a otras poblaciones. Se recomienda realizar más investigaciones y estudios controlados para confirmar estos hallazgos y establecer pautas clínicas más sólidas en el futuro.

## Bibliografía

1. Palm V, Rengier F, Rajiah P, Heussel CP, Partovi S. Acute Pulmonary Embolism: Imaging Techniques, Findings, Endovascular Treatment and Differential Diagnoses. *RoFo Fortschritte auf dem Gebiet der Rontgenstrahlen und der Bildgebenden Verfahren*. 2020;192(1):38–49.
2. Sosa DF, Lehr AL, Zhao H, Roth S, Lakhther V, Bashir R, et al. Impact of pulmonary embolism response teams on acute pulmonary embolism: a systematic review and meta-analysis. Vol. 31, *European Respiratory Review*. European Respiratory Society; 2022.
3. Zantonelli G, Cozzi D, Bindi A, Cavigli E, Moroni C, Luvarà S, et al. Acute Pulmonary Embolism: Prognostic Role of Computed Tomography Pulmonary Angiography (CTPA). Vol. 8, *Tomography. MDPI*; 2022. p. 529–39.
4. Licha CRM, McCurdy CM, Maldonado SM, Lee LS. Current management of acute pulmonary embolism. Vol. 26, *Annals of Thoracic and Cardiovascular Surgery*. Japanese Association for Coronary Artery Surgery; 2020. p. 65–71.
5. Kulka HC, Zeller A, Fornaro J, Wuillemin WA, Konstantinides S, Christ M. Akute Lungenarterienembolie. *Dtsch Arztebl Int*. 2021 Sep 17;118(37):618–28.
6. Konstantinides S, Mavromanoli A, Hobohm L. Diagnosis and treatment of pulmonary embolism. *Herz*. 2021 Dec 1;46(6):589–604.
7. An J, Nam Y, Cho H, Chang J, Kim DK, Lee KS. Acute Pulmonary Embolism and Chronic Thromboembolic Pulmonary Hypertension: Clinical and Serial CT Pulmonary Angiographic Features. *J Korean Med Sci*. 2022;37(10).
8. Klok FA, Ageno W, Ay C, Bäck M, Barco S, Bertolotti L, et al. Optimal follow-up after acute pulmonary embolism: A position paper of the European Society of Cardiology Working Group on Pulmonary Circulation and Right Ventricular Function, in collaboration with the European Society of Cardiology Working Group on Atherosclerosis and Vascular Biology, endorsed by the European Respiratory Society. *Eur Heart J*. 2022 Jan 14;43(3):183–9.
9. Konstantinides S V., Meyer G, Bueno H, Galié N, Gibbs JSR, Ageno W, et al. 2019 ESC Guidelines for the diagnosis and management of acute pulmonary embolism developed in collaboration with the European respiratory society (ERS). Vol. 41, *European Heart Journal*. 2020.
10. Klok FA, Couturaud F, Delcroix M, Humbert M. Diagnosis of chronic thromboembolic pulmonary hypertension after acute pulmonary embolism. Vol. 55, *European Respiratory Journal*. European Respiratory Society; 2020.
11. Barco S, Valerio L. Management of acute pulmonary embolism: Towards a (truly) global reach. Vol. 58, *European Respiratory Journal*. European Respiratory Society; 2021.

12. Tapson VF, Ishaaya E. Advances in the diagnosis of acute pulmonary embolism. Vol. 9, F1000Research. F1000 Research Ltd; 2020.
13. Perez-Johnston R, Plodkowski AJ, Halpenny DF, Hayes SA, Capanu M, Araujo-Filho JAB, et al. Perfusion defects on dual-energy CTA in patients with suspected pulmonary embolism correlate with right heart strain and lower survival. *Eur Radiol*. 2021 Apr 1;31(4):2013–21.
14. Vlahos I, Jacobsen MC, Godoy MC, Stefanidis K, Layman RR. Dual-energy CT in pulmonary vascular disease. Vol. 95, *Br J Radiol*. 2021.
15. Kaptein FHJ, Kroft LJM, Hammerschlag G, Ninaber MK, Bauer MP, Huisman M V., et al. Pulmonary infarction in acute pulmonary embolism. Vol. 202, *Thrombosis Research*. Elsevier Ltd; 2021. p. 162–9.
16. Theroux CD, Aliotta JM, Mullin CJ. *High-Risk Pulmonary Embolism: Current Evidence-Based Practices*.
17. Rivera-Lebron B, McDaniel M, Ahrar K, Alrifai A, Dudzinski DM, Fanola C, et al. *Diagnosis, Treatment and Follow Up of Acute Pulmonary Embolism: Consensus Practice from the PERT Consortium*. Vol. 25, *Clinical and Applied Thrombosis/Hemostasis*. SAGE Publications Inc.; 2019.
18. Çeltikçi P, Hekimoğlu K, Kahraman G, Haberal KM, Kılıç D. Dual-energy computed tomography pulmonary angiography with ultra-low dose contrast administration: Comparison of image quality with standard computed tomography pulmonary angiography. *Turkish Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery*. 2022;30(4):549–56.
19. Kosmala A, Gruschwitz P, Veldhoen S, Weng AM, Krauss B, Bley TA, et al. Dual-energy CT angiography in suspected pulmonary embolism: influence of injection protocols on image quality and perfused blood volume. *International Journal of Cardiovascular Imaging*. 2020 Oct 1;36(10):2051–9.
20. Petritsch B, Pannenbecker P, Weng AM, Veldhoen S, Grunz JP, Bley TA, et al. Comparison of Dual- And Single-Source Dual-Energy CT for Diagnosis of Acute Pulmonary Artery Embolism. *RoFo Fortschritte auf dem Gebiet der Rontgenstrahlen und der Bildgebenden Verfahren*. 2021 Apr 1;193(4):427–36.
21. Goo HW, Goo JM. Dual-energy CT: New horizon in medical imaging. Vol. 18, *Korean Journal of Radiology*. Korean Radiological Society; 2017. p. 555–69.
22. Sauter AP, Shapira N, Kopp FK, Aichele J, Bodden J, Knipfer A, et al. CTPA with a conventional CT at 100 kVp vs. a spectral-detector CT at 120 kVp: Comparison of radiation exposure, diagnostic performance and image quality. *Eur J Radiol Open*. 2020 Jan 1;7.
23. Grob D, Oostveen LJ, Prokop M, Schaefer-Prokop CM, Sechopoulos I, Brink M. Imaging of pulmonary perfusion using subtraction CT angiography is feasible in clinical practice. *Eur Radiol*. 2019 Mar 2;29(3):1408–14.

24. Sanghavi PS, Jankharia BG. Applications of dual energy CT in clinical practice: A pictorial essay. *Indian Journal of Radiology and Imaging*. 2019 Jul;29(03):289–98.
25. Lee HJ, Wanderley M, Rubin VC da S, Rodrigues ACT, Diniz AR, Parga JR, et al. Lobar pulmonary perfusion quantification with dual-energy CT angiography: Interlobar variability and relationship with regional clot burden in pulmonary embolism. *Eur J Radiol Open*. 2022 Jan 1;9.
26. Hong YJ, Shim J, Lee SM, Im DJ, Hur J. Dual-energy ct for pulmonary embolism: Current and evolving clinical applications. Vol. 22, *Korean Journal of Radiology*. Korean Radiological Society; 2021. p. 1555–68.
27. Ma G, He T, Yu Y, Duan H, Yang C. Improving image quality of bronchial arteries with virtual monochromatic spectral CT images. *PLoS One*. 2016 Mar 1;11(3).