

# Aplicación de la secuencia 4D-flow en RM cardiaca para la evaluación de la hipertensión pulmonar tromboembólica crónica en pacientes tratados con tromboendarterectomía pulmonar

Andreu Ivars<sup>1</sup>, Blanca Domenech-Ximenes<sup>1</sup>, Olatz Saenz de Argandoña<sup>1</sup>, Judit Mestres<sup>1</sup>, Marcelo Sanchez<sup>1</sup>, Isabel Blanco<sup>2</sup>, Manuel Castella<sup>3</sup>, Susana Prat-Gonzalez<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Servicio de Radiología, CDI, Hospital Clínic de Barcelona, Barcelona

<sup>2</sup>Servicio de Neumología, ICR, Hospital Clínic de Barcelona, Barcelona

<sup>3</sup>Servicio de Cirugía Cardiovascular, ICCV, Hospital Clínic de Barcelona, Barcelona

<sup>4</sup>Servicio de Cardiología, ICCV, Hospital Clínic de Barcelona, Barcelona

# INDICE

## 1. OBJETIVO DOCENTE

## 2. REVISIÓN DEL TEMA

- HPTEC e impacto en Salud Cardiopulmonar
- Secuencia 4D-flow en RM cardiaca: descripción y ventajas en la visualización del flujo sanguíneo y evaluación cuantitativa del flujo
- Importancia de la evaluación pre y post PEA del flujo pulmonar y remodelación del VD

## 3. CONCLUSIONES

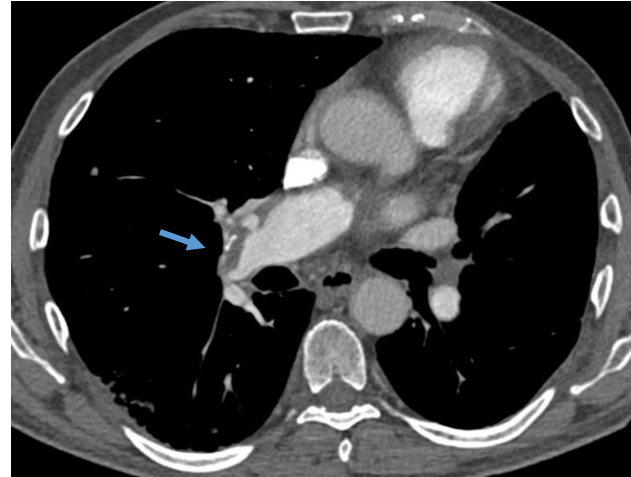
Abreviaciones: HPTEC (*Hipertensión Pulmonar Tromboembólica Crónica*); RM (*Resonancia Magnética*); PEA (*Tromboendarterectomía Pulmonar*); VD (*ventrículo derecho*)

---

OBJETIVO DOCENTE

REVISIÓN DEL TEMA

CONCLUSIONES



**Revisar la utilidad de la secuencia 4D-flow en RM cardíaca para la evaluación pre- y post-quirúrgica del flujo pulmonar en pacientes con HPTEC tratados mediante PEA.**

---

OBJETIVO DOCENTE

REVISIÓN DEL TEMA

CONCLUSIONES

# EPTEC

Espectro de trastornos basados en  
tromboembolismo crónico

# HPTEC

La forma de presentación más **severa** de EPTEC

**Incidencia** estimada del 0.56% to 3.2% tras embolismo pulmonar agudo, entre supervivientes

Hasta un 25% de pacientes con HPTEC no presentan antecedente documentado de embolismo pulmonar agudo (infradiagnóstico)

Abreviaciones: EPTEC (Enfermedad Pulmonar Tromboembólica Crónica);  
HPTEC (Hipertensión Pulmonar Tromboembólica Crónica)

OBJETIVO DOCENTE

REVISIÓN DEL TEMA

CONCLUSIONES

# EPTEC

La EPTEC incluye dos condiciones patológicas:  
la ETEC y la HPTEC.

## ETEC

Pacientes **sintomáticos** (disnea o intolerancia al ejercicio) con oclusiones tromboembólicas crónicas y persistencia de defectos de repleción por **imagen**

**No cumplen criterios hemodinámicos** de HPTEC en reposo

## HPTEC

Requiere de 2 condiciones necesarias para su diagnóstico:

Confirmación  
**radiológica** de trombo  
crónico organizado en  
arterias pulmonares

+

HP pre-capilar en  
reposo confirmada mediante  
**cateterización del VD**  
(PAMm > 20 mmHg; resistencia  
vascular pulmonar > 3W y presión  
oclusiva de PA < 15 mmHg)

*Abreviaciones: EPTEC (Enfermedad Pulmonar Tromboembólica Crónica); ETEC (Enfermedad Tromboembólica Crónica); HPTEC (Hipertensión Pulmonar Tromboembólica Crónica)*

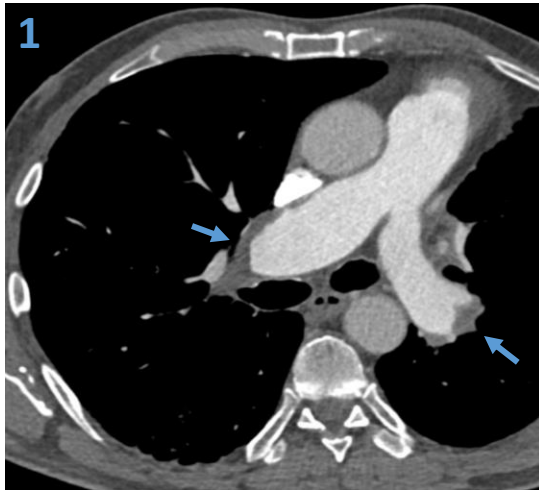
OBJETIVO DOCENTE

REVISIÓN DEL TEMA

CONCLUSIONES

# ETEC

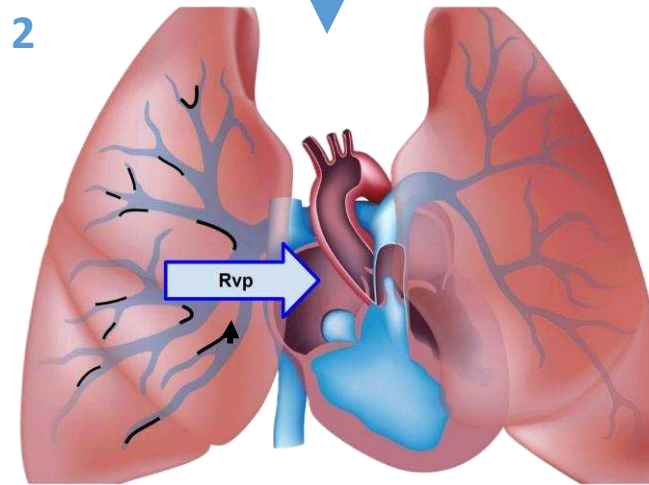
Principal contribuyente de morbilidad cardiopulmonar a largo plazo tras una embolia pulmonar



**Figura 1.** Imagen de TC que muestra material tromboembólico residual organizado (flechas azules) persistente en las arterias pulmonares. Estos trombos crónicos no resueltos generan obstrucción mecánica y remodelado vascular, constituyendo el punto de partida de la ETEC.

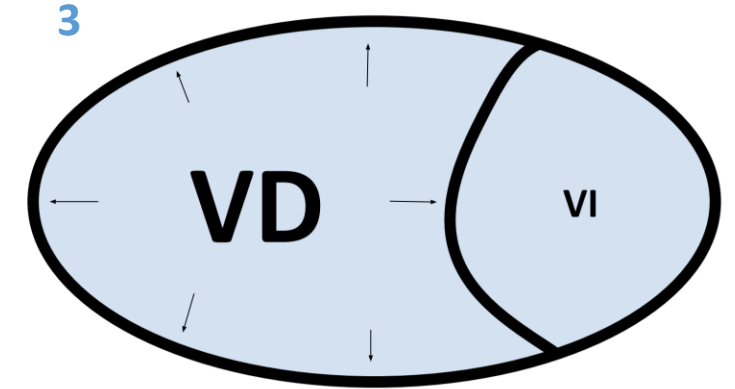
# HPTEC

*Fisiopatología*



**Figura 2.** Representación del incremento progresivo de las resistencias vasculares pulmonares debido a la combinación de obstrucción luminal crónica y arteriopatía secundaria. Este aumento sostenido de la poscarga del circuito pulmonar conduce al desarrollo de hipertensión pulmonar.

# HPTEC



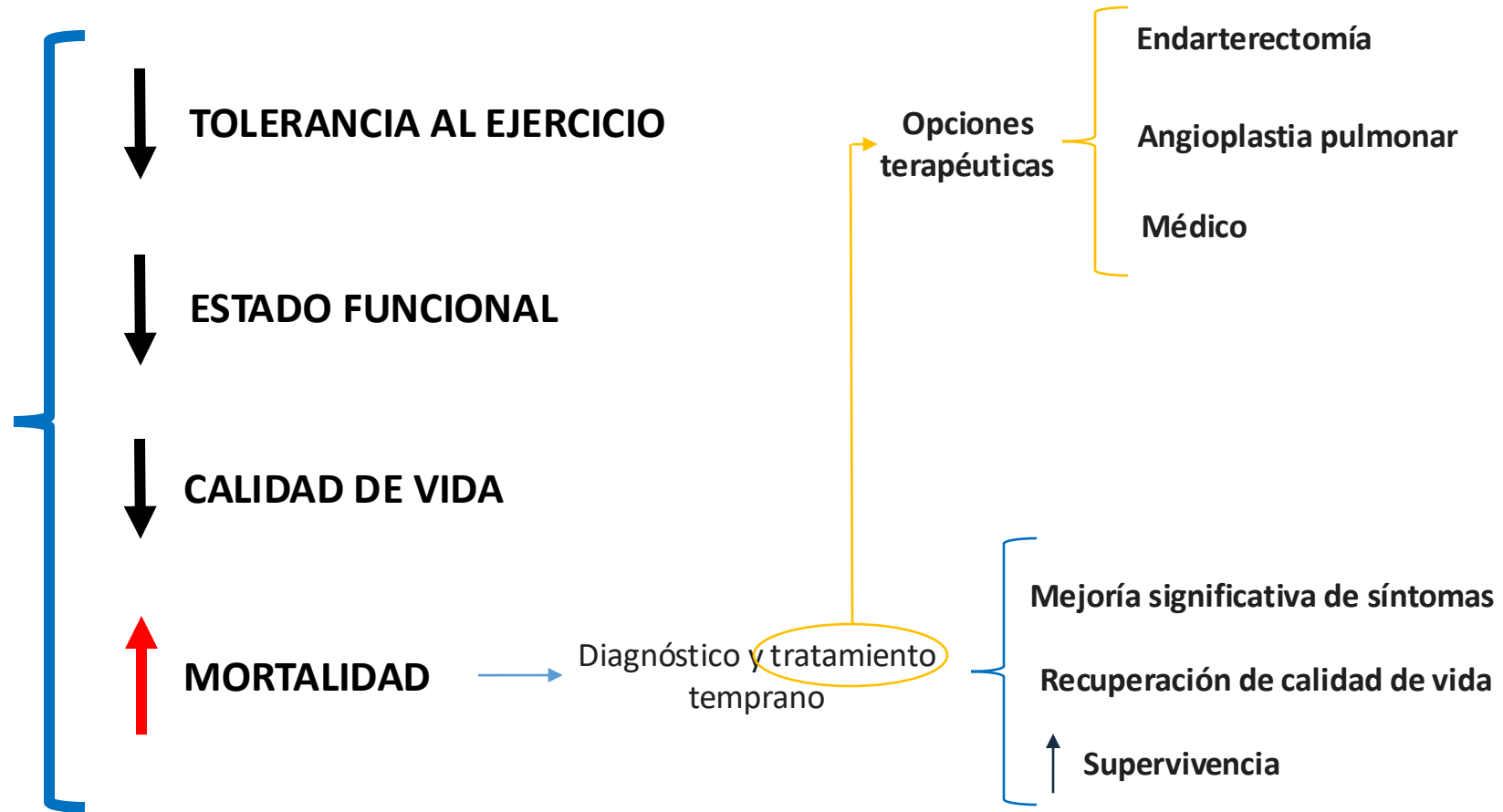
**Figura 3.** Esquema del remodelado ventricular derecho con dilatación progresiva y disfunción sistólica secundarias a la sobrecarga de presión. El ventrículo derecho, incapaz de adaptarse de forma indefinida al incremento crónico de RVP, evoluciona hacia insuficiencia cardíaca derecha, etapa final de la historia natural de la EPTEC con HP.

OBJETIVO DOCENTE

REVISIÓN DEL TEMA

CONCLUSIONES

# HPTEC



## Grupos de HP según etiología

**GRUPO 1:** HP arterial (drogas, mutaciones genéticas, enfermedad venooclusiva pulmonar, hemangiomatosis capilar pulmonar, etc).

**GRUPO 2:** HP secundaria a enfermedad cardíaca izquierda.

**GRUPO 3:** HP secundaria a enfermedad pulmonar y/o hipoxia.

**GRUPO 4: HPTEC.**

**GRUPO 5:** HP por mecanismos multifactoriales o inciertos.

---

OBJETIVO DOCENTE

REVISIÓN DEL TEMA

CONCLUSIONES

## Herramientas diagnósticas disponibles en HPTEC

| TEST                       | PROS                                                                                                                               | CONTRAS                                                                                              |
|----------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Gamma V/Q                  | Screening; alta sensibilidad; VPN 100%; baja radiación; no-invasiva                                                                | Baja especificidad; información anatómica limitada                                                   |
| SPECT                      | Alta sensibilidad para la detección de perfusión segmentaria; no-invasiva                                                          | Baja especificidad para análisis segmentaria; radiación                                              |
| Angio-TC espectral         | Alta resolución espacial; <b>detecta trombo crónico proximal y distal</b> ; evalúa accesibilidad quirúrgica; amplia disponibilidad | Baja sensibilidad enfermedad distal, interpretación variable; radiación y contraste yodado; bajo VPN |
| Angiografía sustr. digital | Detecta afectación más distal; evalúa operabilidad; combina con hemodinámica                                                       | Invasiva; radiación y contraste yodado; operador-dependiente (riesgos)                               |
| RM                         | No radiación; alta sensibilidad; <b>evaluación funcional VD y hemodinámica pulmonar</b>                                            | Disponibilidad limitada; poco detalle anatómico                                                      |

Ratwatte S. The latest definition and classification of pulmonary hypertension. Int J Cardiol Congenit Heart Dis. 2024.  
Kim NH. Chronic thromboembolic pulmonary disease. Eur Respir J. 2024.

OBJETIVO DOCENTE

REVISIÓN DEL TEMA

CONCLUSIONES

**Signos y/o síntomas de HP +/- historia previa de TEP**

**Ecocardiografía transtorácica**

**Gamma V/Q pulmonar**

Defecto/s  
de mismatch

Ausencia de defecto/s  
de mismatch

**Angio-TC pulmonar.  
Realizar cateterismo de  
cavidades cardíacas derechas  
y angiografía pulmonar**

Angio-TC demuestra un  
origen no  
tromboembólico de HP

**Referir a centro de HP  
para evaluación adicional.  
Manejo médico.**

Enfermedad proximal  
confirmada y  
candidato/a a cirugía

Enfermedad distal  
confirmada o  
contraindicación de cirugía

**PEA**

**Angioplastia Pulmonar con balón  
+/- Manejo Farmacológico**

**TÉCNICA DE  
IMAGEN**

**CATEGORIA DE  
IDONEIDAD**

Angio-RM torácica  
con contraste iv

Angio-TC pulmonar

Gammagrafía V/Q  
pulmonar

Gammagrafía  
V/Q con SPECT

Ecocardiografía  
transtorácica en  
reposo

Angio-RM torácica  
sin y con contraste iv

Angio-RM torácica  
sin contraste iv

**USUALMENTE  
APROPIADA**

**PUEDE SER  
APROPIADA**

OBJETIVO DOCENTE

REVISIÓN DEL TEMA

CONCLUSIONES

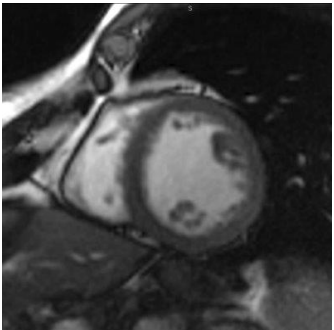
# RM cardíaca

## MORFOLOGIA

### Estructura cardíaca

- Grosor de pared
- Detección de masas
- Anomalías congénitas
- Tamaño de cavidades

### Cine-RM

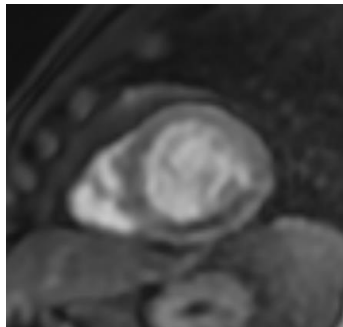


## PERFUSIÓN

### Perfusión Miocárdica

- Detectar enfermedad coronaria funcionalmente significativa
- Principalmente, en condiciones de estrés miocárdico

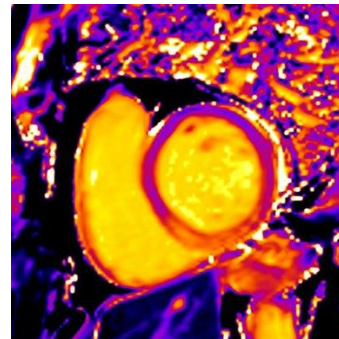
### RM con contraste



## CARACTERIZACIÓN TISULAR

- Fibrosis
- Edema
- Infarto
- Inflamación
- Enfermedades infiltrativas

### T1/T2 mapping



## ESTUDIO VASCULAR

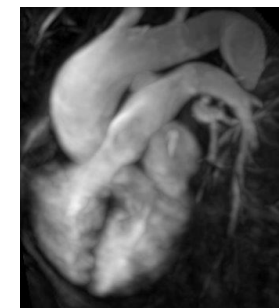
### Anatomía vascular

- Aorta
- Aa coronarias
- Vasos periféricos

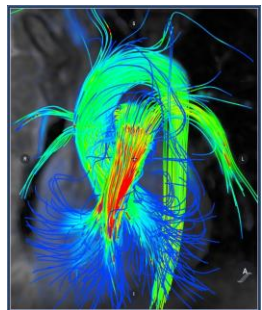
### Parámetros hemodinámicos avanzados

- Visualización y cuantificación de flujo sanguíneo
- Estrés parietal
- Vorticidad

### Angio-RM



### Flujo 2D y 4D flow



OBJETIVO DOCENTE

REVISIÓN DEL TEMA

CONCLUSIONES

# RM cardíaca:

Imagen de flujo por contraste de fase

Cuantificación **no invasiva** del flujo sanguíneo y valoración hemodinámica

FLUJO 2D

Datos de velocidad en un único plano y en una única dirección

4D FLOW

Información de velocidad multidireccional en todo un volumen tridimensional a lo largo del ciclo cardíaco

**Esta información se correlaciona con las mediciones invasivas (cateterismo cardíaco derecho) y aporta valor pronóstico y diagnóstico en el manejo de la HP.**

OBJETIVO DOCENTE

REVISIÓN DEL TEMA

CONCLUSIONES

## RM cardíaca:

## FLUJO 2D

INFORMACIÓN  
CUANTITATIVA  
UNIPLANAR

- VELOCIDAD
- VOLUMEN
- DIRECCIÓN DEL FLUJO

## ARTERIA PULMONAR:

- Velocidad pico
- Flujo medio
- Fracción regurgitante
- Distensibilidad

### Hallazgos RM

↓ VELOCIDADES  
↓ FLUJO PULMONAR  
↓ DISTENSIBILIDAD

### Hemodinámica

↑ PRESIONES  
PULMONARES  
↑ POSCARGA VD

HP.  
PEOR PRONÓSTICO

OBJETIVO DOCENTE

REVISIÓN DEL TEMA

CONCLUSIONES

# RM cardíaca: 4D FLOW

## ASPECTOS TÉCNICOS DE ADQUISICIÓN

|                        |                                                              |
|------------------------|--------------------------------------------------------------|
| Sincronización con ECG | Retrospectiva. Cubrir todo el ciclo R-R                      |
| Tiempo de adquisición  | 5-25 minutos                                                 |
| Volumen de Interés     | Corazón y grandes vasos. $\geq 20$ fotogramas/ciclo cardíaco |
| Resolución espacial    | Típicamente, 1.5-3 mm para aorta y arteria pulmonar          |
| Resolución temporal    | 30-50 ms/ciclo cardíaco                                      |

## VENC (Velocidad de Codificación)

Valor de velocidad (cm/s) programado en una secuencia de **RM con contraste** para medir el movimiento de fluidos.

- Si flujo real  $>$  VENC  $\rightarrow$  **aliasing**
- Si VENC **demasiado alto**  $\rightarrow$  **menor sensibilidad**

OBJETIVO DOCENTE

REVISIÓN DEL TEMA

CONCLUSIONES

# RM cardíaca: 4D FLOW

| APLICACIONES CLÍNICAS      | USOS PRINCIPALES                                                                       |
|----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| Cardiopatías congénitas    | Cuantificación de shunts, visualización de flujos anómalos, circulación de Fontan      |
| Valvulopatías              | Cuantificación de regurgitación/estenosis, evaluación multivalvular simultánea         |
| Aortopatías                | Patrones de flujo, estrés de cizallamiento de pared, vorticidad, gradientes de presión |
| HP                         | Flujo en arteria pulmonar, análisis de vórtices, estrés de cizallamiento de pared      |
| Miocardopatías             | Patrones de flujo intracardíaco alterados                                              |
| Seguimiento Postquirúrgico | Evaluación de válvulas reparadas o reemplazadas, stents vasculares, entre otras        |

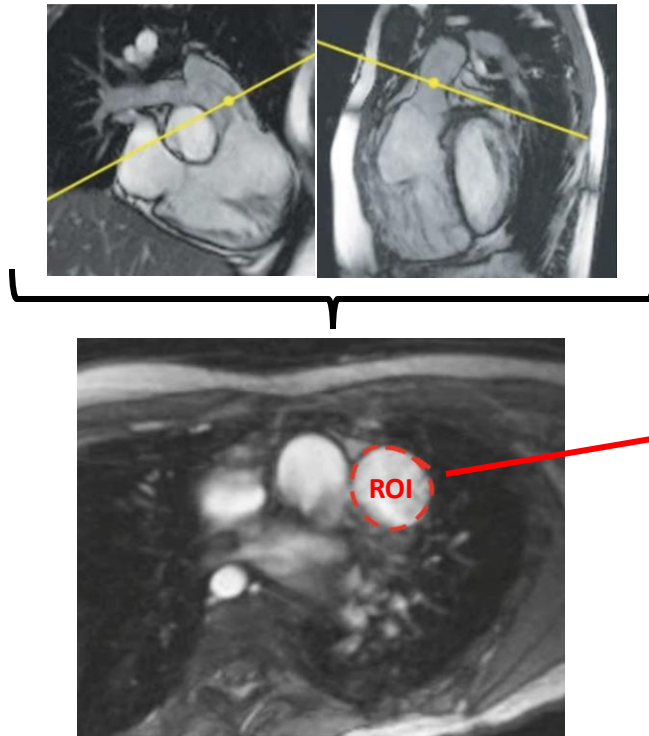
OBJETIVO DOCENTE

REVISIÓN DEL TEMA

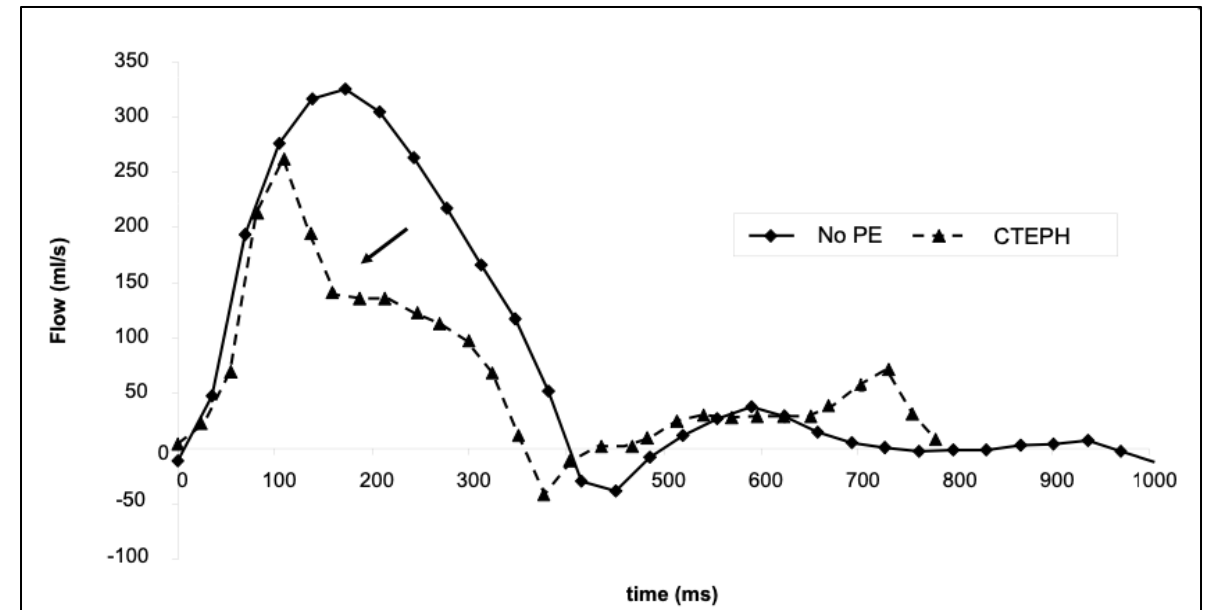
CONCLUSIONES

# RM cardíaca:

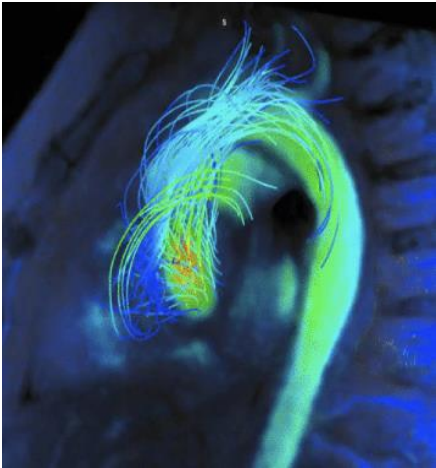
## Valoración del flujo de la AP: Fisiopatología



**Fig.** Planificación de una adquisición de CMR con contraste de fase para la medición del flujo en la APP. El plano se ajusta simultáneamente en vistas ortogonales de la APP (fila superior) para asegurar una orientación perpendicular al vaso. En la fila inferior se muestra la imagen de fase resultante.



**Fig.** Curva de flujo pulmonar en un ciclo cardíaco de un paciente diagnosticado de HPTEC (línea discontinua) y de un control sano (línea continua). Obsérvese el ‘notch’ sistólico en la curva de flujo pulmonar (flecha), así como el **flujo anterógrado en diástole**.



OBJETIVO DOCENTE

REVISIÓN DEL TEMA

CONCLUSIONES

# RM cardíaca: 4D FLOW en HP

Cuantificación exhaustiva de patrones complejos de flujo

- Vórtices y vorticidad
- Helicidad
- Estrés parietal
- Energía cinética



ARTERIA PULMONAR  
CORAZÓN DERECHO

| BIOMARCADOR                 | DEFINICIÓN                                                                                                 | RESPUESTA ANTE HP                                                                                                                                                             |
|-----------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Vórtex de la APP            | Flujo "arremolinado" en la APP                                                                             | Aumentado; su duración en el ciclo cardíaco tiene estrecha correlación con PAPm                                                                                               |
| Vorticidad ( $\omega$ )     | Intensidad de giro o grado de rotación local de un fluido                                                  | Disminuidas; la rigidez arterial y debilidad del VD características de la HP reducen la energía disponible para generar los patrones de giro fisiológicos del flujo sanguíneo |
| Helicidad (Vel x $\omega$ ) | Coherencia y el orden del giro del flujo sanguíneo en 3D                                                   |                                                                                                                                                                               |
| Estrés parietal (WSS)       | Fuerza del flujo sanguíneo ejercida sobre la pared del vaso, calculada a partir del gradiente de velocidad | Disminuido; la dilatación y el aumento de la rigidez de las arterias pulmonares incrementa la poscarga del VD                                                                 |
| Otros                       | Velocidad sistólica pico, Volumen sistólico, Tasa de flujo                                                 | Disminuidas; estos valores se correlacionan con mediciones hemodinámicas invasivas                                                                                            |

Alghamdi KS. Pulmonary hypertension and the role of MRI flow assessment: a systematic review. Br J Radiol. 2025.  
Cerne JW. Evaluation of Pulmonary Hypertension Using 4D Flow MRI. J Magn Reson Imaging. 2022.  
Reiter U. MR 4D flow-based mean pulmonary arterial pressure tracking in pulmonary hypertension. Eur Radiol. 2021.

OBJETIVO DOCENTE

REVISIÓN DEL TEMA

CONCLUSIONES

# RM cardíaca: 4D FLOW en HP

La gravedad de la HP puede inferirse según la fase del ciclo cardíaco afectada

VORTICIDAD

DIASTÓLICA

HP LEVE

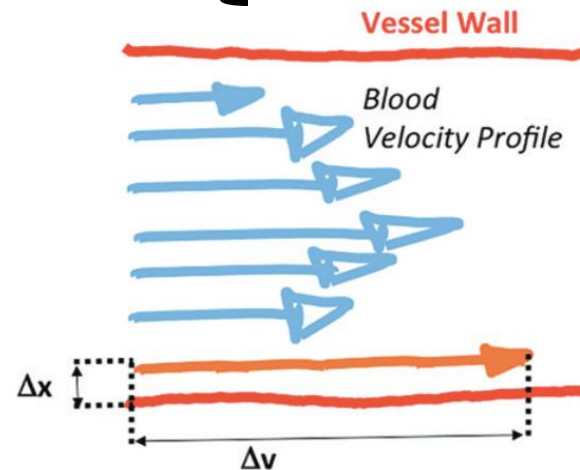
SISTÓLICA

HP GRAVE

ESTRÉS  
PARIETAL

"Estrés de cizallamiento fluido-pared" o efecto de los cambios de flujo sobre las células endoteliales y matriz extracelular

4D flow determina el punto de mayor estrés de cizallamiento en la pared vascular



$$WSS = \Delta v / \Delta x \cdot \eta$$

Gradiente de velocidad radial sobre la pared del vaso sanguíneo

Viscosidad sanguínea

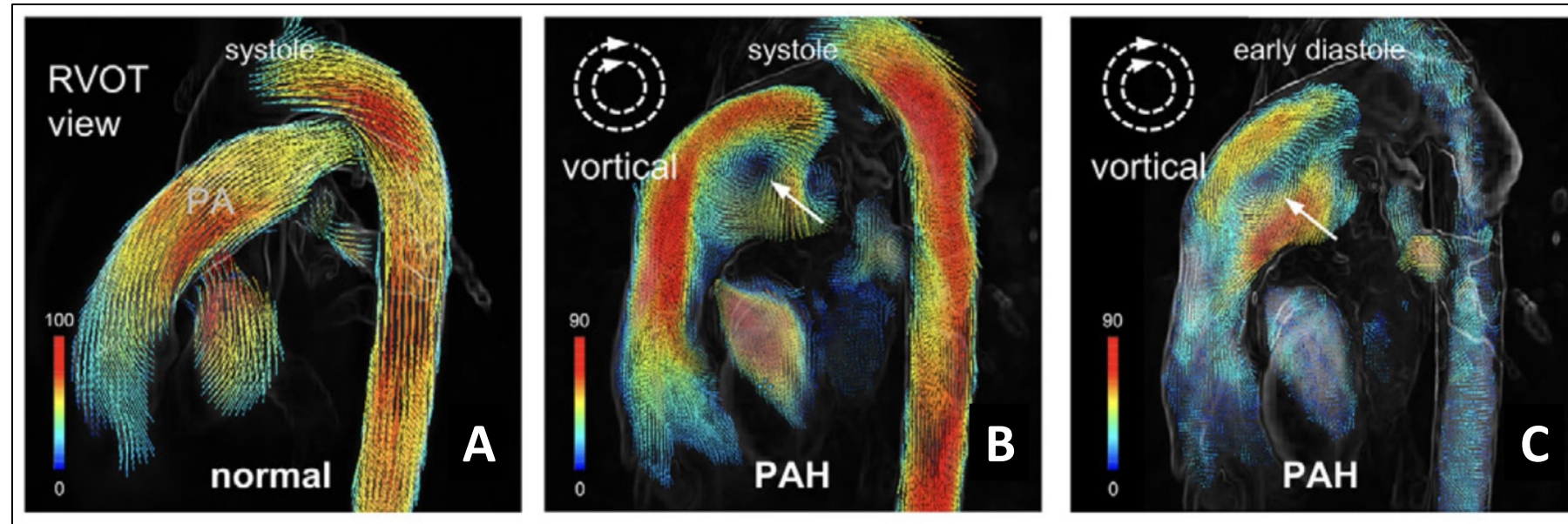
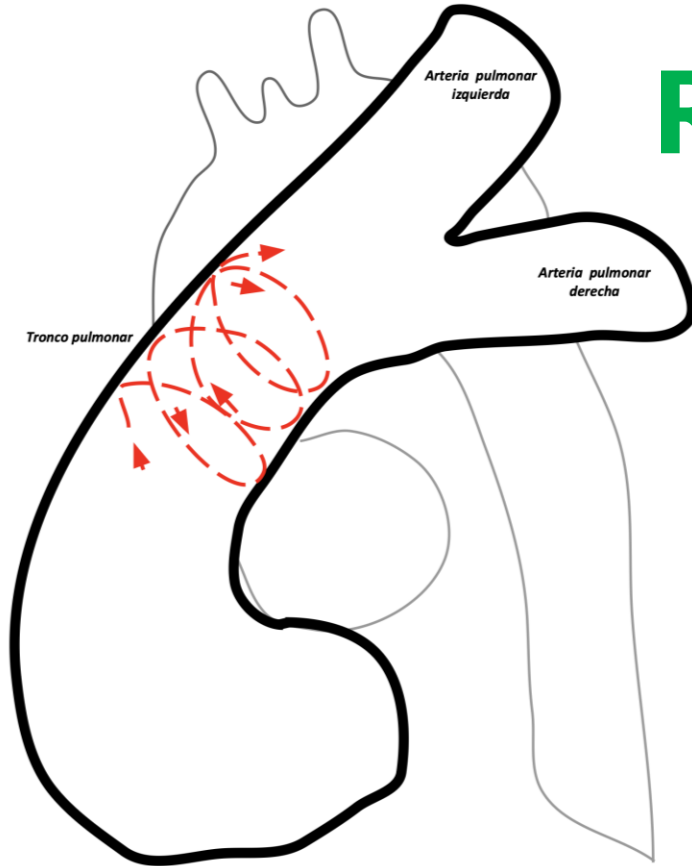
**Fig.** El estrés parietal (WSS) derivado de la RM 4D-flow estima las fuerzas de cizallamiento del flujo sanguíneo tangencial a la pared del vaso.

OBJETIVO DOCENTE

REVISIÓN DEL TEMA

CONCLUSIONES

# RM cardíaca: 4D FLOW en HP



**Fig.** Representación del Tracto de Salida del VD, con evidencia de flujo turbulento en la APP, reflejo de la alteración hemodinámica característica de la HP y del aumento de la poscarga del VD.

**Fig.** Flujo sanguíneo vortical sistólico anómalo a lo largo de la arteria pulmonar principal en un paciente con HAP (B y C; flecha blanca), en comparación con el flujo sistólico normal en un sujeto sano (A).

OBJETIVO DOCENTE

REVISIÓN DEL TEMA

CONCLUSIONES

## RM cardíaca: Evaluación del flujo pulmonar pre- y post- endarterectomía

Herramienta fundamental para determinar el impacto hemodinámico del procedimiento y la recuperación funcional cardíaca.

### PREOPERATORIA

Severidad de la obstrucción vascular  
Grado de remodelado del VD  
Presencia de Insuficiencia tricuspídea

Selección de pacientes con  
indicación quirúrgica

Predicción  
riesgo quirúrgico

### POSTOPERATORIA

Presión arterial pulmonar media  
Flujo pulmonar  
Rigidez vascular  
Normalización de volumen de VD y reducción de IT

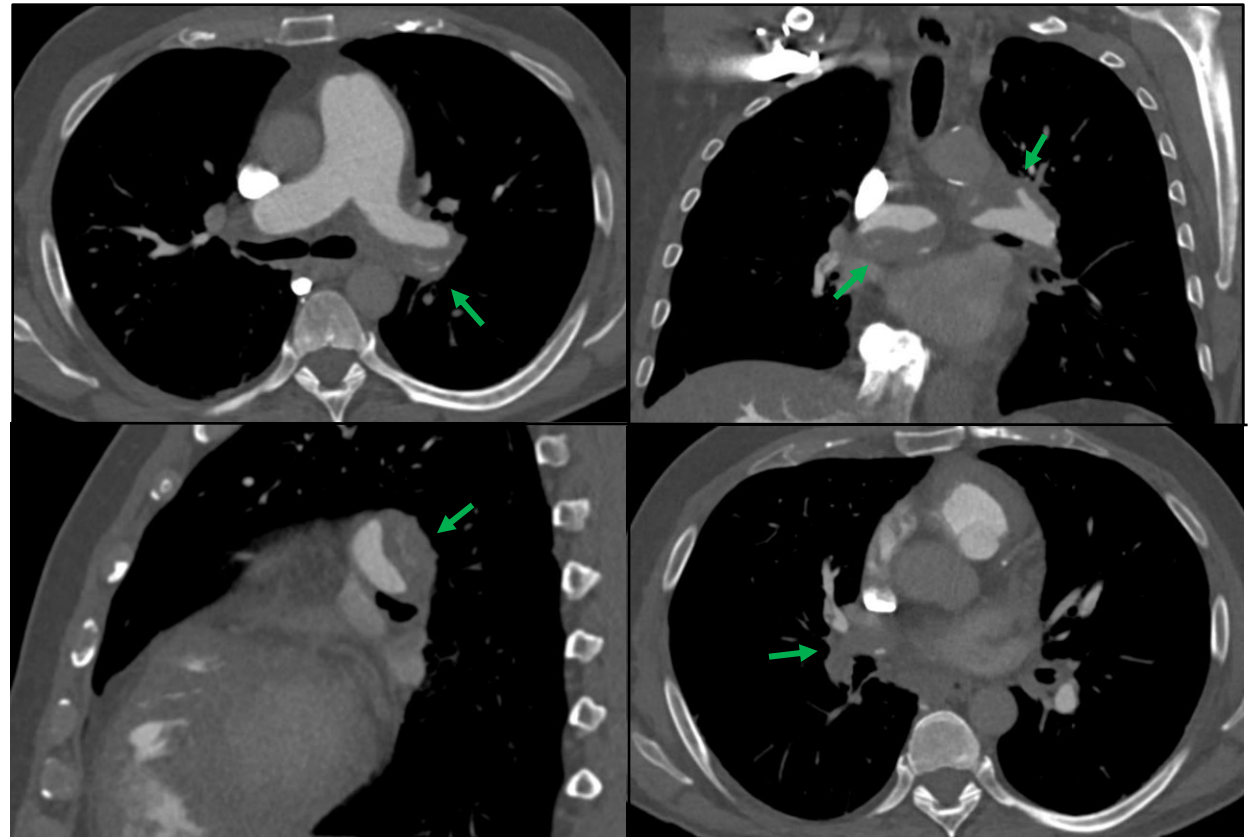
4D flow

Cuantificación de cambios en velocidad,  
vorticidad, helicidad y volumen en PA

Mejor pronóstico  
Menor mortalidad

## CASO PRÁCTICO 1

Hallazgos de TEP crónico en forma de extensos defectos de repleción periféricos en ambas APP con inicio en la bifurcación del tronco pulmonar con imágenes hiperdensas en el interior del trombo, en relación a zonas de revascularización intratrombo.



OBJETIVO DOCENTE

REVISIÓN DEL TEMA

CONCLUSIONES

## CASO PRÁCTICO 1 PRE-IQ

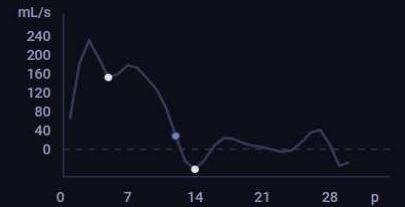
### CURVA DE FLUJO PULMONAR:

'Notch' sistólico  
y flujo anterógrado en fases  
diastólicas

Flujo pulmonar disminuido y  
fracción de  
flujo regurgitante del 5%

Estrés parietal disminuido

Measurement #4



Anti-aliasing

No se ha detectado ningún aliasing

MEDICIÓN

|                             | l/min | ml/latido |
|-----------------------------|-------|-----------|
| Flujo                       | 55.72 |           |
| Flujo hacia adelante        | 58.47 |           |
| Flujo inverso               | -2.75 |           |
| Fracción regurgitante (%)   | 5     |           |
| Velocidad máxima (cm/s)     | 37.91 |           |
| Gradiente de presión (mmHg) | 1     |           |
| Diámetro medio (mm)         | 43.61 |           |
| Diámetro máx. (mm)          | 44.23 |           |

ESTRÉS DE CIZALLAMIENTO DE LA

PARED

|                    |    |
|--------------------|----|
| WSS máximo (cPa)   | 27 |
| WSS promedio (cPa) | 9  |

OBJETIVO DOCENTE

REVISIÓN DEL TEMA

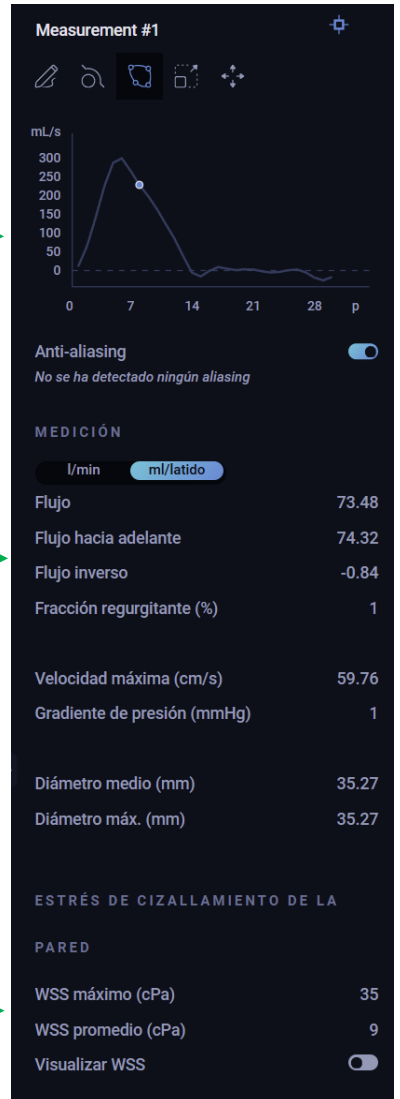
CONCLUSIONES

## CASO PRÁCTICO 1 POST-IQ

### MEJORIA EN LA MORFOLOGIA CURVA DE FLUJO DE LA AP

Aumento del flujo pulmomar con  
reducción de la fracción de flujo  
regurgitante (1%)

Estrés parietal  
aumentado respecto al estudio  
prequirúrgico

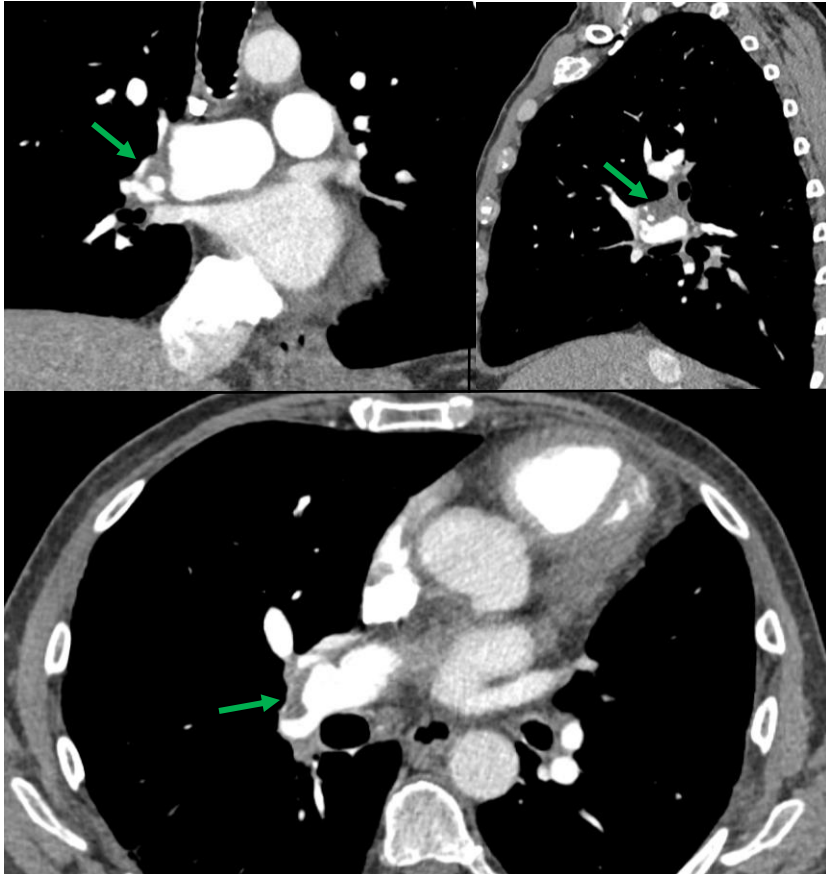


OBJETIVO DOCENTE

REVISIÓN DEL TEMA

CONCLUSIONES

### Estudio previo a endarterectomía



## CASO PRÁCTICO 2

Imágenes de Angio-TC que muestran la resolución de los defectos de repleción excéntricos en la arteria pulmonar derecha tras PEA



### Estudio post- endarterectomía

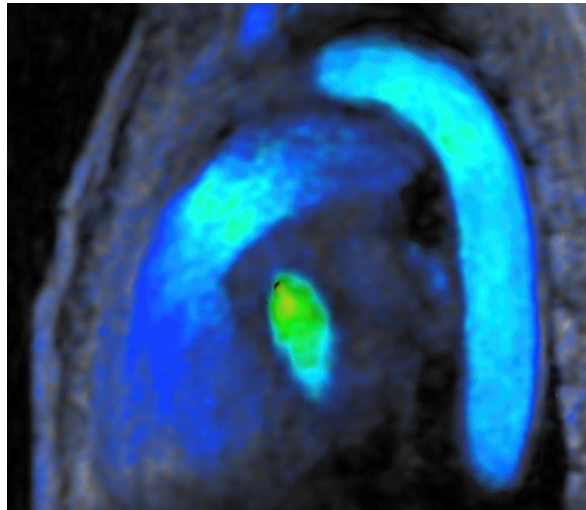


OBJETIVO DOCENTE

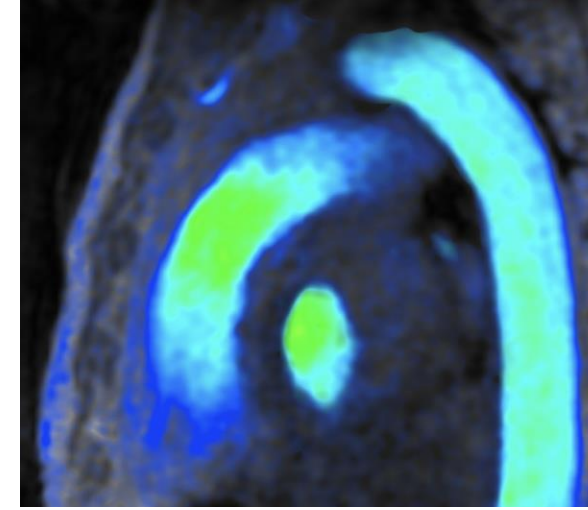
REVISIÓN DEL TEMA

CONCLUSIONES

4D flow  
previa a endarterectomía

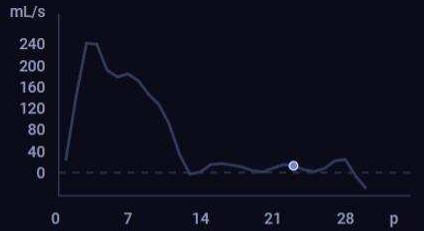


4D flow  
post endarterectomía



## CASO PRÁCTICO 2

Imágenes comparativas de la secuencia RMC 4D flow que muestran mejoría tanto visual (subjetiva) y cuantitativa hemodinámica (objetiva) de la arteria pulmonar tras endarterectomía



Anti-aliasing ☒  
No se ha detectado ningún aliasing

MEDICIÓN

☐ l/min ☒ ml/latido

Flujo 68.61

Flujo hacia adelante 69.2

Flujo inverso -0.6

Fracción regurgitante (%) 1

Velocidad máxima (cm/s) 53.32

Gradiente de presión (mmHg) 1

Diámetro medio (mm) 36.15

Diámetro máx. (mm) 36.15

ESTRÉS DE CIZALLAMIENTO DE LA

PARED

WSS máximo (cPa) 36

WSS promedio (cPa) 8



Anti-aliasing ☒  
No se ha detectado ningún aliasing

MEDICIÓN

☐ l/min ☒ ml/latido

Flujo 81.04

Flujo hacia adelante 81.13

Flujo inverso -0.09

Fracción regurgitante (%) 0

Velocidad máxima (cm/s) 88.43

Gradiente de presión (mmHg) 3

Diámetro medio (mm) 28.49

Diámetro máx. (mm) 28.49

ESTRÉS DE CIZALLAMIENTO DE LA

PARED

WSS máximo (cPa) 71

WSS promedio (cPa) 17

# PERSPECTIVAS DE FUTURO



OBJETIVO DOCENTE

REVISIÓN DEL TEMA

CONCLUSIONES

## Futuro de las secuencias 2D y 4D flow en el seguimiento post-PEA

Estimación no invasiva de resistencias vasculares periféricas pulmonares (RVP)



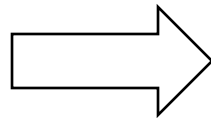
Las secuencias **2D-flow** y **4D-flow** permiten **estimar RVPs de forma no invasiva**

Ventajas principales



- Técnica no invasiva
- Sin radiación y altamente reproducible
- Permite una **evaluación multiparamétrica** (WSS, velocidad, vorticidad,...)
- **Mayor seguridad del paciente**

## Perspectiva clínica



Las secuencias **2D-flow** y **4D-flow** podrían convertir a la RMC en una **herramienta hemodinámica** con potencial para **sustituir el cateterismo pulmonar derecho** en el seguimiento post-PEA de pacientes con HPTEC

# CONCLUSIONES

---

OBJETIVO DOCENTE

REVISIÓN DEL TEMA

CONCLUSIONES

La **RM cardíaca con 2D-flow y 4D-flow** constituye una herramienta avanzada capaz de caracterizar de forma integral la hemodinámica pulmonar en la HPTEC.

Tras la tromboendarterectomía pulmonar (PEA), la secuencia 4D-flow demuestra **cambios cuantificables** que reflejan la **mejoría hemodinámica y el remodelado vascular**, entre otras aplicaciones posibles.

Los **biomarcadores derivados de 4D-flow** (estrés parietal, helicidad, vorticidad y energía cinética) ofrecen información complementaria sobre la **función endotelial, la rigidez arterial, etc.**

La correlación de los parámetros de 4D-flow con mediciones invasivas respalda su valor como herramienta no invasiva para monitorizar la evolución postoperatoria y se posiciona como técnica clave en el seguimiento de la HPTEC tras PEA. Una de las grandes ventajas podría ser **sustituir el cateterismo pulmonar derecho en el seguimiento postoperatorio**, reduciendo la necesidad de procedimientos invasivos y mejorando la seguridad del paciente.

---