

# Aplicación clínica de la técnica 4D Flow en la evaluación hemodinámica de cardiopatías congénitas

Clinical Applications of 4D Flow in the Hemodynamic Evaluation of Congenital Heart Diseases



Julián Pineda<sup>1</sup>  
Pedro Abad<sup>2</sup>  
Sara Mesa<sup>2</sup>  
Simón Rascovsky<sup>3</sup>  
Jorge Delgado<sup>4</sup>



## Palabras clave (DeCS)

Imagen por resonancia magnética  
Imagen por resonancia cinemagnética  
Cardiopatías congénitas  
Hemodinámica



## Key words (MeSH)

Magnetic resonance imaging  
Magnetic resonance imaging, cine  
Heart defects, congenital  
Hemodynamics



<sup>1</sup>Bioingeniero, Investigador de Desarrollo. Instituto de Alta Tecnología Médica (IATM). Medellín, Colombia.

<sup>2</sup>Radiólogo(a), Instituto de Alta Tecnología Médica (IATM). Medellín, Colombia.

<sup>3</sup>Radiólogo e Ingeniero Biomédico, Especialista en Informática en Imágenes Médicas. Medellín, Colombia.

<sup>4</sup>Radiólogo, Clínica SOMA. Medellín, Colombia.

## Resumen

La técnica 4D Flow hace referencia a las imágenes de resonancia magnética (RM) adquiridas mediante una secuencia retrospectiva de angiografía contraste de fase, en la cual se obtienen datos de la velocidad de la sangre en las tres direcciones, en un espacio de 3 dimensiones (3D) y a través de todo el ciclo cardíaco. Con las imágenes obtenidas mediante 4D Flow se puede evaluar de forma cuantitativa la dinámica regional y global del flujo sanguíneo con medidas hemodinámicas, tales como: velocidad promedio, máxima y mínima, flujo latido promedio, flujo de avance y regurgitante, volumen de eyección, y aproximaciones matemáticas a los gradientes de presión y fuerzas de cizallamiento en las paredes de los vasos; además, permite analizar cualitativamente la evolución temporal de los complejos patrones de flujo sanguíneo por medio de líneas de flujo, trazadores de partículas, gráficas de velocidad 3D y vectores; representaciones que describen la trayectoria de la sangre, a través del tiempo, en el sistema cardiovascular. Estas características permiten que la técnica tenga muchas aplicaciones potenciales en la práctica clínica, ya que brindan al especialista información valiosa sobre la función y el estado del sistema cardiovascular del paciente. A continuación se evalúa mediante 4D Flow, en algunas patologías congénitas: estenosis valvular pulmonar, conducto arterioso persistente y estenosis aórtica.

## Summary

4D Flow technique refers to MR images acquired through a phase contrast angiography retrospective sequence, in which blood velocity data are obtained in three directions, in a 3-dimensional space, and through all of the cardiac cycle. With the 4D flow images, the regional and global dynamics of blood flow can be quantitatively analyzed through hemodynamic measurements, such as: average, maximum and minimum velocity, average flow, forward and regurgitation flow, ejection volume, and mathematical approximations to pressure gradients and shear forces in vessel walls; It also allows analyze qualitatively the temporal evolution of complex blood flow patterns through flow lines, particle tracers, 3D velocity graphs and vectors; representations that describe the trajectory of the blood, over time, in the cardiovascular system. These characteristics make the technique have many potential applications in clinical practice, as it provides information on the function and status of the patient's cardiovascular system. In this study we evaluated with the 4D flow technique some congenital pathologies: pulmonary stenosis, patent ductus arteriosus, and aortic stenosis.

## Introducción

El diagnóstico y estudio de las cardiopatías congénitas representan un gran desafío radiológico debido a su

complejidad anatómica y funcional (1). En la actualidad, muchos diagnósticos se realizan en el periodo prenatal con ecocardiografía fetal, y el seguimiento posnatal se

realiza mediante la ecocardiografía transtorácica o, en casos específicos, la ecocardiografía transesofágica. Estos métodos, por ser no invasivos, de bajo costo y ampliamente disponibles, siguen siendo la primera línea para el diagnóstico y seguimiento. Una de sus mayores limitantes es ser operador-dependiente, lo que conlleva mayor variabilidad inter e intraoperador y se asocia con errores diagnósticos. Esta limitante se podría disminuir con un entrenamiento riguroso. Los métodos complementarios que utilizan radiación ionizante, como la angiografía o la coronariografía convencional y la tomografía deben ser utilizados con cautela con el fin de disminuir los efectos nocivos de las dosis acumuladas de radiación. Sobre todo, si se tiene en cuenta que estos pacientes requieren de un seguimiento periódico, y serán llevados a repetidos estudios de imagen e intervenciones a lo largo de sus vidas (2).

La resonancia magnética (RM) cardíaca es un método no invasivo, reproducible, sensible y específico para el diagnóstico y seguimiento de las cardiopatías congénitas. Entre sus muchas ventajas se destacan el hecho de que no utiliza radiación ionizante, permite una evaluación anatómica y funcional y, a diferencia de los demás métodos, permite realizar caracterización tisular con diferentes secuencias. Por ser un método de mayor costo, que requiere de sedación asistida por anestesiólogo (por protocolo en menores de 6 años, y en casos seleccionados en pacientes de 6 a 10 años de edad), y de tiempos de evaluación prolongados, no se considera como el método estándar de oro para el diagnóstico inicial, pero en muchas ocasiones es el método de elección para el seguimiento posquirúrgico. Los avances tecnológicos permiten que este método diagnóstico sea cada vez más sencillo, con menores tiempos de adquisición y con protocolos más robustos, para obtener información completa anatómica, funcional y de caracterización tisular. Secuencias como la técnica de flujo en 4 dimensiones (4D Flow) están abriendo el campo de aplicación de la RM cardíaca (3), lo que permite evaluar el flujo en válvulas cardíacas, estructuras vasculares y conductos implantados, en los tres planos y en el tiempo (4D). A continuación se describe la experiencia en la aplicación de la técnica 4D Flow para la evaluación cualitativa de tres cardiopatías congénitas diferentes: estenosis valvular pulmonar, conducto arterioso persistente y estenosis aórtica.

## 1. 4D Flow

La técnica 4D Flow parte de la secuencia de angiografía tipo contraste de fase (del inglés Phase Contrast Angiography [PCA]), la cual se compone de adquisiciones retrospectivas en dos dimensiones (2D) sincronizadas con el ciclo cardíaco (PCA cine 2D). La principal aplicación de esta técnica 2D es medir la velocidad de la sangre en un solo plano y obtener parámetros hemodinámicos, como flujos, volúmenes y velocidades, que permiten realizar cálculos matemáticos de gradiente de presión pico basados en la fórmula de Bernoulli.

La técnica PCA cine 2D se puede extender hacia una adquisición espacial en tres dimensiones, con el propósito de codificar la velocidad de la sangre en las tres direcciones del sistema cartesiano y en diferentes fases del ciclo cardíaco. Por tal motivo, es necesario codificar el flujo de sangre en los ejes x, y, z mediante la adquisición de cuatro secuencias, tres sensibles a la velocidad y una de referencia (figura 1). Dicha técnica se conoce como “4D Flow”, debido a su característica de adquisición en cuatro dimensiones (tres espaciales y una temporal).

La técnica 4D Flow hace referencia a las imágenes de RM adquiridas mediante una secuencia retrospectiva de angiografía contraste de fase, en la cual se obtienen datos de la velocidad de la sangre en las tres direcciones, en un espacio de tres dimensiones (3D) y durante todo el ciclo cardíaco (4). Con las imágenes obtenidas mediante 4D Flow (figura 2), se puede evaluar de forma cuantitativa la dinámica regional y global del flujo sanguíneo por medio de medidas hemodinámicas, como velocidad promedio, máxima y mínima, flujo latido promedio, flujo de avance y regurgitante, volumen de eyección, y aproximaciones matemáticas a los gradientes de presión y fuerzas de cizallamiento; además, permite analizar cualitativamente la evolución temporal de los complejos patrones de flujo sanguíneo por medio de líneas de flujo, trazadores de partículas, gráficas de velocidad 3D y vectores, representaciones que describen la trayectoria de la sangre a través del tiempo (5-7). Estas características hacen que la técnica tenga muchas aplicaciones potenciales en la práctica clínica, ya que brindan al especialista información valiosa sobre la función y el estado del sistema cardiovascular del paciente.

La técnica 4D Flow tiene un gran potencial clínico como herramienta para el estudio de pacientes con cardiopatías congénitas, debido a que permite realizar análisis cuantitativos y cualitativos del comportamiento hemodinámico de la sangre y su relación con las estructuras cardíacas y vasculares (8-10).

### 1.1 Adquisición de datos

Se adquirieron imágenes de 4D Flow en 3 pacientes, cada uno con una cardiopatía congénita distinta: estenosis valvular pulmonar, conducto arterioso persistente y estenosis aórtica. Utilizando un resonador 1.5T (Philips, Achieva) se obtuvieron secuencias cine Balance-FFE, imágenes de cuantificación de flujo 2D y 4D con la técnica 4D Flow, imágenes de sangre negra T2 y de angiorresonancia con medio de contraste 3D.

Las imágenes de 4D Flow se adquirieron con los siguientes parámetros: Field of View (mm) = 350 × 350, Voxel size (mm) = 2,5 × 2,5, slice thickness (mm) = 5, slices = 48, TR(ms)/TR(ms) = 4/2,1, Venc (cm/s) = 200-150, SENSE (factor) = 2, Flip angle (grados) = 6, Fases = 16, adicionalmente los datos se realizaron con respiración libre, sincronización electrocardiográfica y una bobina torso-cardíaca.

### 1.2 Procesamiento de datos

Todos los datos obtenidos con la técnica 4D Flow fueron exportados desde el equipo de resonancia en un formato de imágenes llamado PAR-REC. Posteriormente fueron procesados en una estación de trabajo mediante el software GTFlow (Gyrotools LLC, Zurich, Suiza), el cual permite calcular, para cada vóxel, la velocidad de la sangre en los tres ejes coordenados y en todas las fases del ciclo cardíaco. Posteriormente, se pueden generar representaciones tridimensionales del flujo sanguíneo y calcular las variables hemodinámicas correspondientes.

El procesamiento de las imágenes de 4D Flow se resume a continuación: primero se segmentan las estructuras vasculares en las imágenes de magnitud mediante un método de umbralización, en segundo lugar se crea una isosuperficie 3D basada en la segmentación previa y finalmente la isosuperficie es utilizada para generar un determinado número de semillas o partículas, los cuales corresponden a los puntos donde se calculan los datos de velocidad de la sangre en las imágenes de fase.

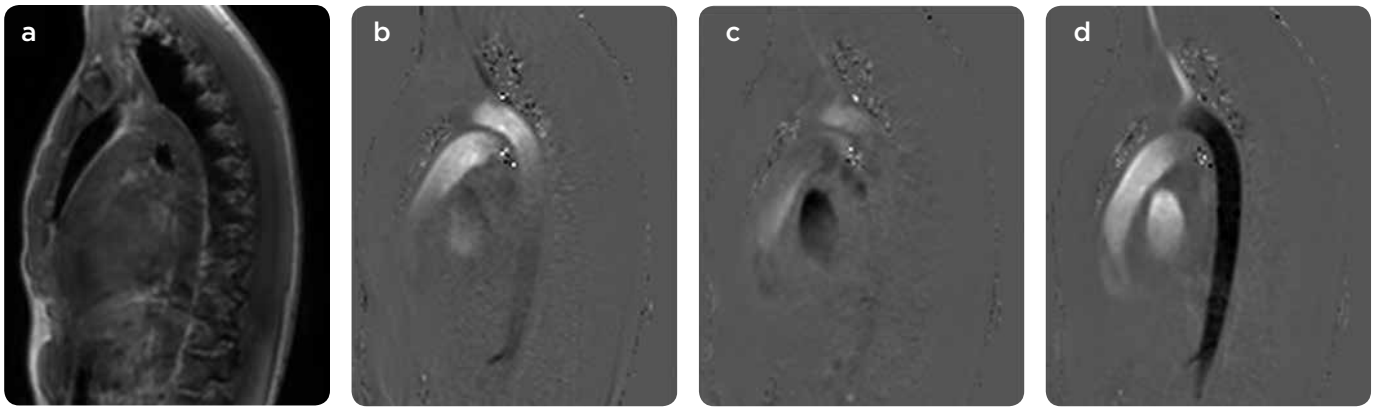


Figura 1. La técnica de 4D Flow necesita adquirir cuatro conjuntos de datos tridimensionales: uno de magnitud y tres para la codificación del flujo. a) Magnitud en corte sagital. b-d) Imágenes que representan la codificación de la velocidad de la sangre en las tres direcciones del espacio. La intensidad de los píxeles representa la velocidad y la dirección de la sangre. Direcciones de codificación: (b) anteroposterior, (c) derecha-izquierda y (d) cabeza-pies.

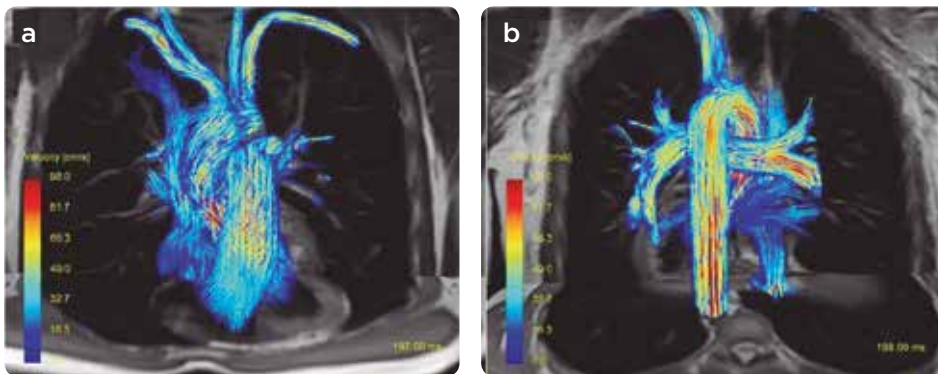


Figura 2. Representación 3D de los patrones de flujo sanguíneo en el corazón y grandes vasos. Secuencia de 4D Flow sobrepuesta (registrada) con imágenes anatómicas. a) Vista anteroposterior. b) Vista posteroanterior. La velocidad de la sangre está codificada mediante colores.

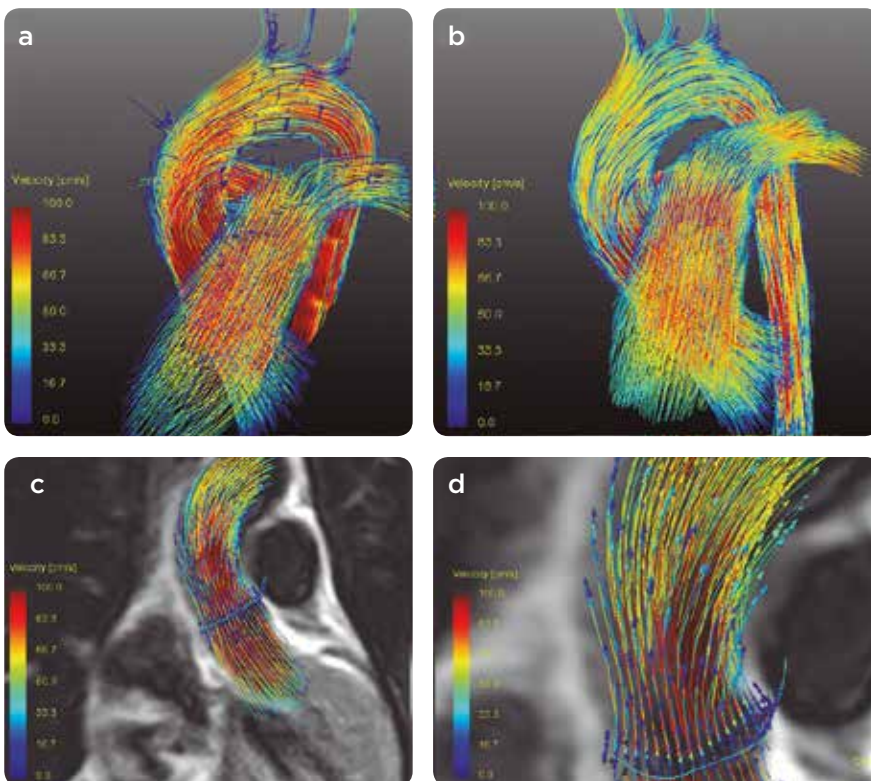


Figura 3. Análisis cualitativo de la técnica 4D Flow. a) Líneas de flujo en las arterias aorta y pulmonar. b) Visualización mediante trazadores de partículas. c) Trazadores de partículas en la aorta ascendente generados a partir de una región de interés, corte a la altura de la arteria pulmonar. d) Representación vectorial de los trazadores de partículas en la misma región de interés descrita en (c).

### 1.3 Análisis de datos: Representación 3D

Las imágenes adquiridas con la técnica 4D Flow permiten visualizar el movimiento de la sangre mediante representaciones tridimensionales a través del ciclo cardíaco y realizar un análisis cualitativo de los complejos patrones de flujo sanguíneo en un paciente (figura 3). Las representaciones más comunes se describen a continuación.

- » Líneas de flujo: Permiten visualizar el campo de velocidad de flujo en cada punto de tiempo. Las líneas de flujo brindan, mediante una representación de campo, la trayectoria de las partículas del fluido (sangre) en cada punto del tiempo. Esto proporciona una visión general del patrón de flujo sanguíneo (11).
- » Trazadores de partículas: Permiten visualizar la trayectoria de las partículas del fluido en el campo de velocidad a través del tiempo. Esta representación depende de la posición y del punto de tiempo de la partícula en el ciclo cardíaco. Los trazadores de partículas son utilizados para analizar la evolución temporal de los patrones de flujo de sangre durante el ciclo cardíaco (12).

### 1.4 Análisis de datos: cuantificación

Una importante ventaja de la técnica 4D Flow radica en la cuantificación retrospectiva de los parámetros hemodinámicos que se pueden obtener en cualquier localización de las imágenes tridimensionales. Para la cuantificación de los parámetros de flujo se pueden seleccionar cortes en cualquier angulación y localizarlos perpendicularmente a cualquier vaso o estructura cardíaca. 4D Flow permite realizar cálculos hemodinámicos en contornos o regiones de interés, como: Velocidad promedio, máxima y mínima, velocidad pico, flujo promedio, flujo de avance y regurgitante, fracción regurgitante, volumen sistólico y distancia sistólica, entre otros. Adicionalmente, permite analizar los valores en cada punto de tiempo del ciclo cardíaco y realizar los cálculos para vóxeles individuales. Por otra parte, los datos de la técnica 4D Flow permiten realizar aproximaciones matemáticas a los gradientes de presión en estructuras vasculares y calcular las fuerzas de cizallamiento en la pared del vaso producida por el flujo de sangre. En la figura 4 se presentan las gráficas de algunas medidas cuantitativas.

## 2. Presentación de casos

La técnica de 4D Flow fue utilizada con éxito en el protocolo de RM cardiovascular en cada una de las siguientes cardiopatías: estenosis valvular pulmonar, conducto arterioso persistente y estenosis aórtica. Además, con las imágenes de 4D Flow se obtuvieron representaciones tridimensionales de la evolución del flujo sanguíneo en los grandes vasos del corazón mediante trazadores de partículas. A continuación se exponen los tres casos para ilustrar la utilidad de esta técnica.

### 2.1 Caso 1

Hombre de 28 años de edad, con antecedente de soplo cardíaco desde la infancia. Hospitalizado por dolor torácico y disnea. Al examen físico presentó soplo sistólico en foco pulmonar y osteoartritis hipertrófica en dedos de miembros superiores. Se descartó síndrome coronario agudo con electrocardiograma (ECG) y medicio-

nes enzimáticas. Se realizó ecocardiografía donde se observó dilatación e hipertrofia del ventrículo derecho, sin signos de cortocircuito de izquierda a derecha. Se practicó RM cardíaca para caracterización anatómica y funcional (figura 5).

### 2.2 Caso 2

Mujer de 18 años de edad. Antecedente de síndrome de Down y cardiopatía congénita cianosante; con deterioro de la clase funcional ahora con estadio 3 de la clasificación de Nueva York (NYHA) y dolor torácico atípico. Al examen físico se encontró soplo sistodiastólico en foco aórtico, cianosis perioral y distal. En informes de ecocardiografía previos existía un conducto arterioso persistente y sospecha de síndrome de Eisenmenger. Se realiza RM para caracterización anatómica y funcional (figura 6).

### 2.3 Caso 3

Hombre de 16 años de edad con antecedente de asma en la niñez. Manifiesta múltiples episodios de palpitaciones y síncope. Se le documentó mediante ECG una taquicardia regular de complejos QRS estrechos que respondió a la adenosina. En la ECG se observan signos de hipertensión pulmonar grave y una válvula aórtica bivalva. Se realizó estudio electrofisiológico en el que se evidencia taquicardia automática de la unión, hallazgo asociado a cardiopatías congénitas. Se decide realizar RM cardiovascular para valorar cardiopatía no visualizada por ECG y el ventrículo derecho (figura 7).

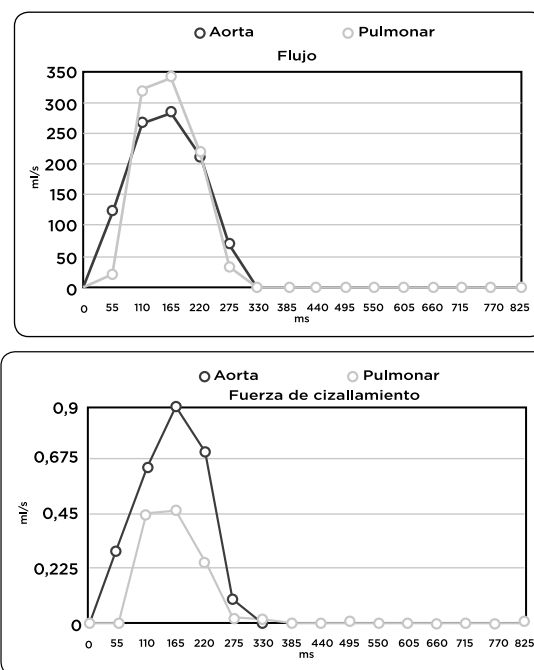


Figura 4. Medidas cuantitativas obtenidas mediante la técnica de 4D Flow en la aorta y la arteria pulmonar en una sección específica de cada arteria. Superior: gráficas del flujo de sangre en las arterias, inferior: el promedio de la fuerza de cizallamiento que se ejerce en la pared del vaso debido al paso de sangre. La línea azul representa la aorta y la verde la arteria pulmonar. El eje x de las gráficas corresponde a la duración del ciclo cardíaco del sujeto.



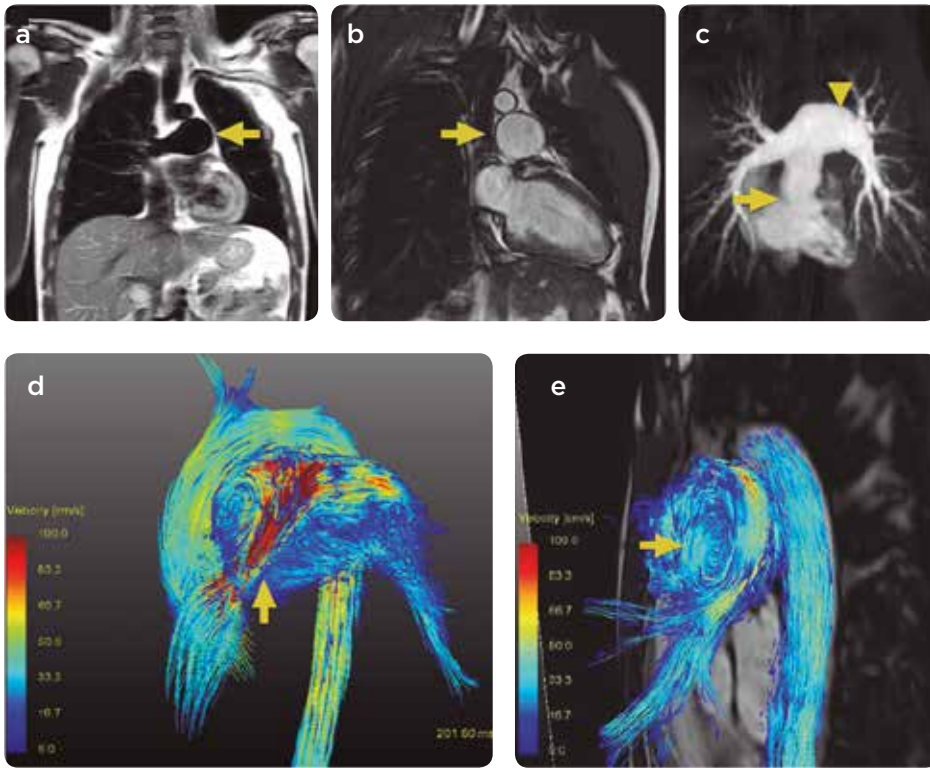


Figura 5. Caso 1. a) Imagen de sangre negra, corte coronal. b) Imagen obtenida de una secuencia de cine Balance-FFE en eje largo. a y b) Marcada dilatación de la arteria pulmonar izquierda (flechas), con un diámetro de 39 mm. c) Reconstrucción multiplanar de secuencia de angiografía contraste de fase de circulación pulmonar, donde se observa estenosis valvular pulmonar (flecha) y dilatación postestenótica del tronco de la arteria pulmonar, con un diámetro de 38 mm, y la arteria pulmonar izquierda (cabeza de flecha). d) Imagen obtenida mediante 4D Flow: aumento de velocidad (color rojo) de la sangre en la zona de estenosis valvular (flecha) y los patrones de flujo turbulento en la arteria pulmonar izquierda. La velocidad de la sangre se codifica según la escala de colores. e) Representación del flujo de sangre mediante trazadores de partículas con la técnica 4D Flow. Nótese como la sangre se desplaza en forma de "remolino" en la arteria pulmonar izquierda (flecha).

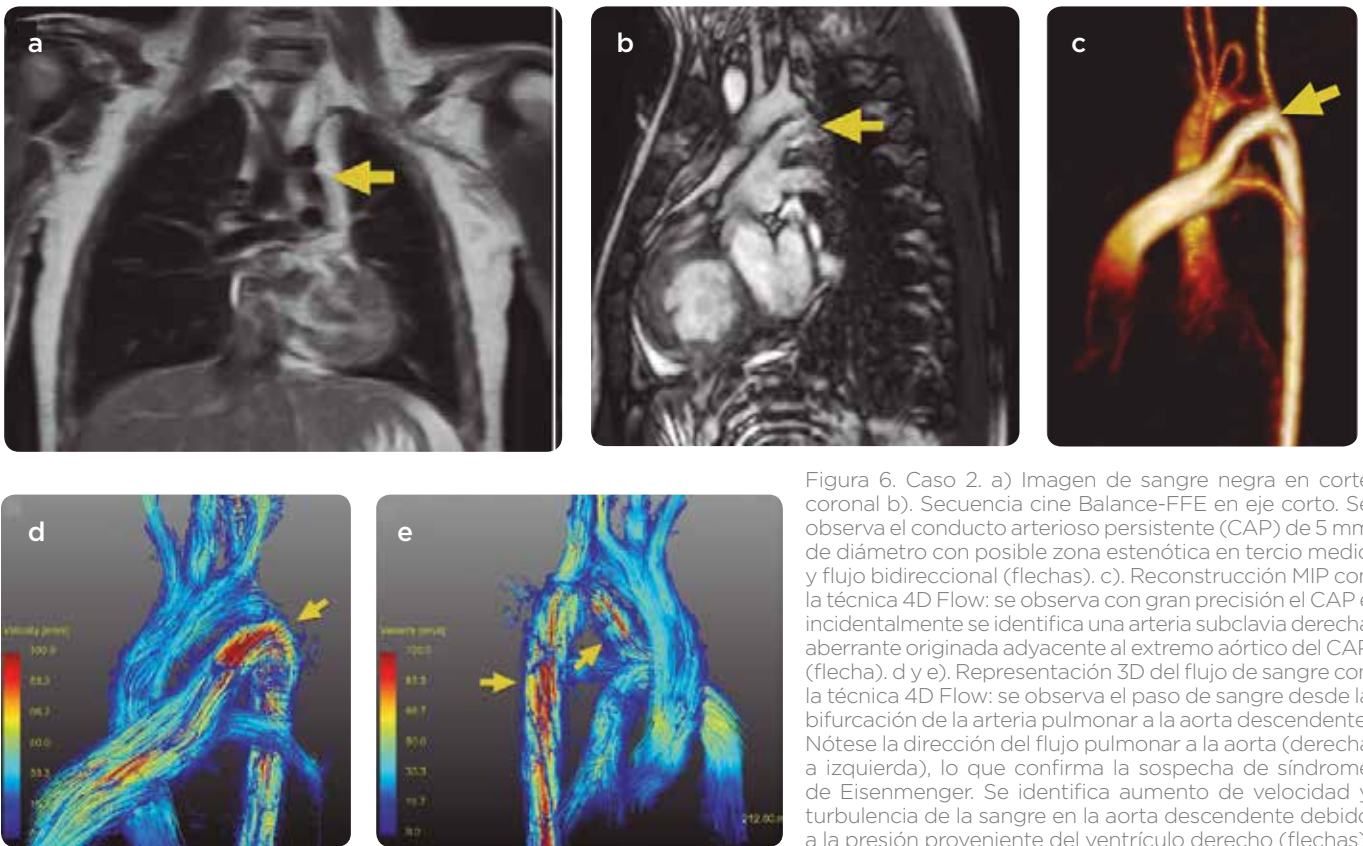


Figura 6. Caso 2. a) Imagen de sangre negra en corte coronal b). Secuencia cine Balance-FFE en eje corto. Se observa el conducto arterioso persistente (CAP) de 5 mm de diámetro con posible zonaestenótica en tercio medio y flujo bidireccional (flechas). c). Reconstrucción MIP con la técnica 4D Flow: se observa con gran precisión el CAP e incidentalmente se identifica una arteria subclavia derecha aberrante originada adyacente al extremo aórtico del CAP (flecha). d y e). Representación 3D del flujo de sangre con la técnica 4D Flow: se observa el paso de sangre desde la bifurcación de la arteria pulmonar a la aorta descendente. Nótese la dirección del flujo pulmonar a la aorta (derecha a izquierda), lo que confirma la sospecha de síndrome de Eisenmenger. Se identifica aumento de velocidad y turbulencia de la sangre en la aorta descendente debido a la presión proveniente del ventrículo derecho (flechas).

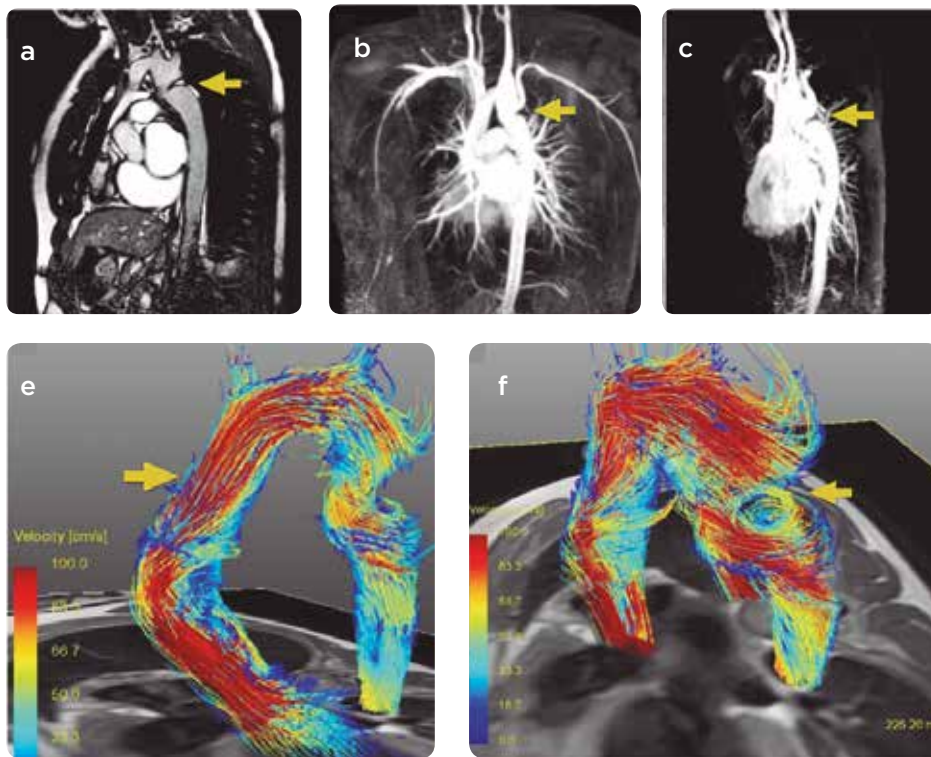


Figura 7. Caso 3. a) Secuencia cine Balance-FFE en un corte parasagital en el eje de la aorta. b y c) Reconstrucciones coronal y sagital de secuencias de angiografía con medio de contraste, en fase arterial sistémica. Se observa coartación significativa de la aorta descendente (flecha), con un diámetro en arco aórtico distal de 27 mm, en coartación de 18 mm y dilatación postestenótica de 26 mm. d y e) Reconstrucciones obtenidas mediante la técnica 4D Flow superpuestas con imágenes anatómicas de sangre negra. Se observa la configuración tortuosa de la aorta ascendente y el flujo sanguíneo turbulento a través de ella. Posteriormente, se demuestra disminución de la velocidad de la sangre en la aorta descendente distal al sitio de coartación y el patrón de flujo helicoidal y tortuoso que se genera luego del paso por la coartación.

### 3. Aplicaciones clínicas

Aunque la técnica de contraste de fase 2D es actualmente considerada el estándar de oro para el estudio del flujo sanguíneo, la planeación de esta secuencia se considera altamente operador-dependiente debido a que la exactitud de los datos hemodinámicos varía cuando el plano de adquisición y la estructura de interés no son perpendiculares. La adquisición de la secuencia 2D requiere menor tiempo que la técnica 4D Flow; sin embargo, esta última ofrece una mayor capacidad de análisis cualitativo y cuantitativo (13). La técnica 4D Flow permite obtener representación tridimensional de los patrones de flujo sanguíneo en cada fase del ciclo cardíaco. Adicionalmente, permite estimar parámetros de flujo y velocidad de sangre, biomarcadores hemodinámicos, como la tensión de cizallamiento en las paredes de los vasos sanguíneos y gradientes de presión, sin la necesidad de utilizar medios de contraste intravenosos (14). Otra gran ventaja de esta técnica es la capacidad de análisis multiplanar retrospectivo que se realiza en el posproceso de las imágenes, luego de que el paciente es retirado del equipo, lo que permite cuantificar el flujo de sangre en cualquier plano arbitrario y en cualquier angulación, sin la necesidad de adquirir nuevas imágenes (15).

La técnica 4D Flow puede ser particularmente útil en cardiopatías congénitas en las que es necesario el cálculo de variables de flujo a través de múltiples vasos. Adicionalmente, se han informado aplicaciones en estenosis vasculares, lesiones valvulares y coartaciones aórticas, que demuestran el potencial de la técnica para revelar información importante sobre la dinámica espacio-temporal de los flujos cardiovasculares turbulentos (16,17).

Varios autores han documentado en estudios previos las múltiples aplicaciones clínicas de la técnica 4D Flow en el área de RM cardiovascular. Hope y colaboradores (18) encontraron que el riesgo de formación de un

aneurisma en pacientes con aorta bivalva se puede estratificar mediante la cuantificación de las fuerzas de cizallamiento obtenidas con 4D Flow. Esto permite realizar, con una mayor objetividad, el diagnóstico y las posibles intervenciones en la aorta ascendente de estos pacientes. Además, con la técnica 4D Flow es posible cuantificar el flujo anormal y la carga hemodinámica, por lo que se puede definir el riesgo de patología vascular incluyendo la posibilidad de presentar un aneurisma o una disección antes de que se presenten manifestaciones clínicas (18).

Otros ejemplos mencionan la utilidad de 4D Flow en el estudio de la circulación pulmonar, en escenarios clínicos como la tetralogía de Fallot (19) o en pacientes con cortocircuitos de izquierda a derecha con riesgo de hipertensión pulmonar. Adicionalmente, es posible evaluar el estado posquirúrgico del paciente, analizar los patrones de flujo luego de la intervención y evaluar la eficiencia de las diferentes anastomosis cavopulmonares (20).

En cuanto a la evaluación de la circulación portal y de las arterias renales, Markl y colaboradores (6) han descrito el potencial de la técnica 4D Flow para cuantificar el flujo sanguíneo en pacientes con hipertensión portal y en la planeación o monitorización de individuos con trasplante renal. De igual manera, la técnica 4D Flow permite valorar los patrones de flujo, de velocidad y de fuerzas de cizallamiento en aneurismas, en malformaciones arteriovenosas, en los bulbos carotídeos y en otros territorios extra e intracraneales, como el sifón carotídeo, difíciles de cuantificar por ecografía Doppler (21-24).

### 4. Limitaciones

Las principales limitaciones actuales de 4D Flow incluyen la resolución espacial, la resolución temporal y el tiempo total de adquisición.

sición. Esta última es la principal limitación para la implementación de la técnica en la práctica clínica. De 5 a 15 min según la región anatómica, duración que también depende de las frecuencias respiratoria y cardíaca del paciente (adquisición retrospectiva). Por otro lado, el tiempo de la secuencia se incrementa notablemente cuando se requiere una mayor resolución espacial o temporal (25). Sin embargo, se han propuesto métodos de aceleración en la adquisición de las imágenes que incluyen, según el equipo de RM, formación de imágenes en paralelo (*parallel imaging*), estrategias de muestreo que realizan correlaciones en el dominio espacio-temporal y adquisiciones radiales del espacio k (26-28).

Es importante mencionar que 4D Flow es una técnica de alta complejidad (13), lo cual, sumado a la falta de protocolos estandarizados para la adquisición de las imágenes, metodologías de procesamiento de las imágenes e informes estructurados que incluyan tanto información cuantitativa como cualitativa, hacen que esta técnica pueda ser implementada, por el momento, en centros de RM con experiencia en técnicas de imágenes avanzadas y que cuenten con un grupo interdisciplinario de profesionales.

Es importante mencionar que la técnica de 4D Flow no está incluida dentro del Plan Obligatorio de Salud en Colombia, por lo tanto, las instituciones que decidan incluirlo dentro de su portafolio de servicios, tendrán que asumir el costo de la técnica como valor agregado al examen por el que fue remitido el paciente .

## 5. Conclusión

La técnica 4D Flow permite la adecuada evaluación cualitativa del flujo sanguíneo en diferentes patologías cardíacas y entender mejor el comportamiento del flujo de sangre en las cardiopatías congénitas, por lo que se ha convertido en una herramienta con un gran potencial clínico en estudios de RM cardiovascular al proporcionar información de los patrones de flujo sanguíneo y cuantificación de las variables hemodinámicas.

## Referencias

- Driessen MM, Breur JM, Budde RP, van Oorschot JW, van Kimmenade RR, Sieswerda GT, et al. Advances in cardiac magnetic resonance imaging of congenital heart disease. *Pediatr Radiol*. 2015;45(1):5-19.
- Subirana MT, Oliver JM, Sáez JM, Zunzunegui JL. Cardiología pediátrica y cardiopatías congénitas: del feto al adulto. *Rev Esp Cardiol*. 2012;65(1 Suppl):50-8.
- De Roos A, Higgins CB. Cardiac radiology: Centenary review. *Radiology*. 2014;273(2 Suppl):S142-59.
- Bolen MA, Setser RM, Gabriel RS, Renapurkar RD, Tandon Y, Lieber ML, et al. Effect of protocol choice on phase contrast cardiac magnetic resonance flow measurement in the ascending aorta: breath-hold and non-breath-hold. *Int J Cardiovasc Imaging*. 2013;29(1):113-20.
- Wheaton AJ, Miyazaki M. Non-contrast enhanced MR angiography: physical principles. *J Magn Reson Imaging*. 2012;36(2):286-304.
- Markl M, Frydrychowicz A, Kozerke S, Hope M, Wieben O. 4D flow MRI. *J Magn Reson Imaging*. 2012;36(5):1015-36.
- Markl M, Kilner PJ, Ebberts T. Comprehensive 4D velocity mapping of the heart and great vessels by cardiovascular magnetic resonance. *J Cardiovasc Magn Reson*. 2011;13:7.
- Pinochet N, Bächler P, Tejos C, Crelier G, Parra R, Allendes JM, et al. 4D FLOW: una nueva herramienta de diagnóstico para cardiopatías congénitas. *Rev. Chil. Radiol*. 2011;17:134-40.
- Uribe S, Beerbaum P, Sørensen TS, Rasmussen A, Razavi R, Schaeffter T. Four-dimensional (4D) flow of the whole heart and great vessels using real-time respiratory self-gating. *Magn Reson Med*. 2009;62:984-92.
- Markl M, Bammer R, Alley MT, Elkins CJ, Draney MT, Barnett A, et al. Generalized reconstruction of phase contrast MRI: analysis and correction of the effect of gradient field distortions. *Magn Reson Med*. 2003;50:791-801.
- Napel S, Lee DH, Frayne R, Rutt BK. Visualizing three-dimensional flow with simulated streamlines and three-dimensional phase-contrast MR imaging. *J Magn Reson Imaging*. 1992;2(2):143-53.
- Wigström L, Ebberts T, Fryrenius A, Karlsson M, Engvall J, Wranne B, et al. Particle trace visualization of intracardiac flow using time-resolved 3D phase contrast MRI. *Magn Reson Med*. 1999;41(4):793-9.
- Dyverfeldt P, Bissell M, Barker AJ, Bolger AF, Carlhäll CJ, Ebberts T, et al. 4D flow cardiovascular magnetic resonance consensus statement. *J Cardiovasc Magn Reson*. 2015;17:72.
- Ansari SA, Schnell S, Carroll T, Vakil P, Hurley MC, Wu C, et al. Intracranial 4D Flow MRI: Toward individualized assessment of arteriovenous malformation hemodynamics and treatment-induced changes. *AJNR Am J Neuroradiol*. 2013;34:1922-8.
- Manka R, Binter C, Kozerke S. Hurricane aorta. *Lancet*. 2014;384(9960):2141.
- Hope MD, Wrenn SJ, Dyverfeldt P. Clinical applications of aortic 4D Flow imaging. *Curr Cardiovasc Imaging Rep*. 2013;6(2):128-39.
- Hope MD, Meadows AK, Hope TA, Ordovas KG, Saloner D, Reddy GP, et al. Clinical evaluation of aortic coarctation with 4D Flow MR imaging. *J Magn Reson Imaging*. 2010;31(3):711-8.
- Hope MD, Hope TA, Crook SE, Ordovas KG, Urbana TH, Alley MT, et al. 4D flow CMR in assessment of valve-related ascending aortic disease. *JACC Cardiovasc Imaging*. 2011;4:781-7.
- Geiger J, Markl M, Jung B, Grohmann J, Stiller B, Langer M, et al. 4D-MR flow analysis in patients after repair for tetralogy of Fallot. *Eur Radiol*. 2011;21(8):1651-7.
- Stadlbauer A, van der Riet W, Crelier G, Salomonowitz E. Accelerated time-resolved three-dimensional MR velocity mapping of blood flow patterns in the aorta using SENSE and k-t BLAST. *Eur J Radiol*. 2010;75(1):e15-21.
- Roldán-Alzate A, Frydrychowicz A, Niespodzany E, Landgraf BR, Johnson KM, Wieben O, et al. In vivo validation of 4D flow MRI for assessing the hemodynamics of portal hypertension. *J Magn Reson Imaging*. 2013;37(5):1100-8.
- Hope MD, Purcell DD, Hope TA, von Morze C, Vigneron DB, Alley MT, et al. Complete intracranial arterial and venous blood flow evaluation with 4D flow MR imaging. *AJNR Am J Neuroradiol*. 2009;30(2):362-6.
- Frydrychowicz A, François CJ, Turski PA. Four-dimensional phase contrast magnetic resonance angiography: potential clinical applications. *Eur J Radiol*. 2011;80(1):24-35.
- Schmitter S, Jagadeesan BD, Grande AW, Sein J, Ugurbil K, Van de Moortele P. 4D flow measurements in the superior cerebellar artery at 7 Tesla: feasibility and potential for applications in patients with trigeminal neuralgia. *J Cardiovasc Magn Reson*. 2013;15(Suppl 1):W21.
- Stankovic Z, Allen BD, García J, Jarvis KB, Markl M. 4D flow imaging with MRI. *Cardiovasc Diagn Ther*. 2014;4(2):173-92.
- Thunberg P, Karlsson M, Wigström L. Accuracy and reproducibility in phase contrast imaging using SENSE. *Magn Reson Med*. 2003;50(5):1061-8.
- Baltes C, Kozerke S, Hansen MS, Pruessmann KP, Tsao J, Boesiger P. Accelerating cine phase-contrast flow measurements using k-t BLAST and k-t SENSE. *Magn Reson Med*. 2005;54(6):1430-8.
- Pedersen H, Kozerke S, Ringgaard S, Nehrke K, Kim WY. k-t PCA: temporarily constrained k-t BLAST reconstruction using principal component analysis. *Magn Reson Med*. 2009;62(3):706-16.

## Correspondencia

Julián Alberto Pineda Zapata  
Carrera 81 # 30A-99  
Medellín, Colombia  
julian.pineda@iatm.com.co

Recibido para evaluación: 20 de junio de 2017  
Aceptado para publicación: 11 de abril de 2018