

Aplicación clínica de la secuencia de flujo 4D en resonancia magnética cardíaca. Ejemplos prácticos

Clinical application of the 4D flow sequence in cardiac magnetic resonance imaging. Practical examples

Andrea Salas-Mier¹, Laura V. Torres-Araujo^{1,2*}, Moisés Jiménez-Santos^{1,3}, Ana M. Rosas-Vázquez^{1,3}, Jorge A. Silva-Estrada^{1,4}, Edgar García-Cruz⁵ y Julieta Rancati⁶

¹Departamento de Imagen Cardiovascular, Grupo CT Scanner, Centro de Diagnóstico por Imagen, Lomas Altas, Ciudad de México, México; ²Hospitalización, Instituto Nacional de Cardiología Ignacio Chávez, Ciudad de México, México; ³Departamento de Imagenología, Instituto Nacional de Cardiología Ignacio Chávez, Ciudad de México, México; ⁴Cardiología Pediátrica, Instituto Nacional de Pediatría, Ciudad de México, México; ⁵Departamento de Cardiopatías Congénitas del Adulto, Instituto Nacional de Cardiología Ignacio Chávez, Ciudad de México, México; ⁶Cardiología Pediátrica, Hospital de Pediatría Pedro Elizalde, Buenos Aires, Argentina

Resumen

Parte de la complejidad del análisis mediante resonancia magnética cardíaca de los flujos de las cavidades cardíacas y los grandes vasos radica en su variabilidad en el tiempo y sus múltiples direcciones, por lo que el análisis mediante secuencias de contraste de fase en dos dimensiones requiere diversas planeaciones y numerosas adquisiciones, lo que potencialmente aumenta de manera significativa el tiempo del estudio. La secuencia de flujo 4D en resonancia magnética cardíaca es una técnica que permite una valoración integral y precisa de los flujos en una sola adquisición, característica particularmente útil en el estudio de cardiopatías congénitas. Presentamos tres casos de pacientes con cardiopatías congénitas simples y complejas en los que se ilustra la utilidad de esta técnica.

Palabras clave: Resonancia magnética cardíaca. Flujo 4D. Cardiopatía congénita.

Abstract

Part of the complexity of heart and large vessels flows analysis in cardiac magnetic resonance relies in its variability over time and multiple directions, so the analysis using two-dimensional phase contrast sequences requires time for planning and acquiring multiple sequences, which increases significantly the study time. The 4D flow sequence in cardiac magnetic resonance is a technique that allows a comprehensive and precise assessment of these flows in a single free breathing acquisition, characteristic that are particularly useful in the study of congenital heart disease. We present three cases of patients with simple and complex congenital heart diseases, where the usefulness of this technique is illustrated.

Keywords: Cardiac magnetic resonance imaging. 4D flow. Congenital heart disease.

*Correspondencia:

Laura V. Torres-Araujo
E-mail: torresaraujond@gmail.com

Fecha de recepción: 14-10-2024

Fecha de aceptación: 01-03-2025

DOI: 10.24875/ACM.24000189

Disponible en internet: 23-04-2025

Arch Cardiol Mex. 2025;95(3):359-366

www.archivoscardiologia.com

1405-9940 / © 2025 Instituto Nacional de Cardiología Ignacio Chávez. Publicado por Permanyer. Este es un artículo *open access* bajo la licencia CC BY-NC-ND (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Introducción

Las cardiopatías congénitas son anomalías estructurales del corazón que se producen durante el periodo de embriogénesis, que están presentes al momento del nacimiento y pueden cambiar la circulación sanguínea normal en el corazón, ya que afectan las cavidades y válvulas cardíacas, así como los vasos que emergen del corazón¹. Las manifestaciones clínicas dependen de varios factores, incluyendo la complejidad de la cardiopatía².

Mostramos tres ejemplos prácticos en pacientes con diagnóstico de cardiopatía congénita, analizados con resonancia magnética cardíaca (RMC) en secuencia de flujo 4D.

Revisión de la literatura

La RMC es una técnica de imagen no invasiva sumamente útil para el diagnóstico, la evaluación y el seguimiento de pacientes con patología cardíaca, actualmente considerada el estándar de referencia para la evaluación de la función de ambos ventrículos, así como para el análisis no invasivo de cortocircuitos por QP/QS^{3,4}, y con gran nivel de evidencia para el estudio estructural y hemodinámico de las cardiopatías congénitas, las miocardiopatías, la patología vascular (aorta) y las enfermedades del pericardio³.

En RMC, el contraste de fase en imágenes bidimensionales (2D) es la técnica más utilizada para la cuantificación de los flujos cardiovasculares⁵. En la actualidad, la técnica de flujo en cuarta dimensión, a diferencia de las técnicas convencionales bidimensionales, posibilita la valoración hemodinámica de los flujos arteriales y venosos en cualquiera de las tres dimensiones del espacio mediante reconstrucción multiplanar del volumen tridimensional adquirido⁶. Esto es de gran utilidad, pues aporta una gran ventaja en la medición y la visualización de los flujos añadido a la secuencia de flujo 4D, representada por el tiempo a lo largo del ciclo cardíaco, lo que permite una visualización extraordinaria de los flujos en color⁷. Incluso, al ser una técnica adquirida en respiración libre, permite una evaluación hemodinámica fisiológica que hace posible examinar al paciente en sus condiciones basales. Además, la planificación es más simple, ya que se adquiere un volumen tridimensional, disminuyendo el margen de error al momento de la adquisición de la imagen.

La RMC de contraste de fase en 2D se utiliza para medir el flujo pulmonar total en relación con el flujo

aórtico total y para medir el flujo anterógrado pulmonar en relación con la cantidad de sangre (ml) expulsada por latido por el ventrículo izquierdo hacia la aorta o por el ventrículo derecho hacia la arteria pulmonar. Proporciona mapas de velocidad con 2D en cortes de imágenes colocados individualmente. Por lo general, se utiliza la codificación de velocidad unidireccional («a través del plano») a lo largo de la dirección predominante del flujo sanguíneo para cuantificar el flujo sanguíneo en el corazón, lo que brinda la ventaja de permitir ver los flujos lentos o rápidos, efectos de saturación mínimos y dirección del flujo.

Para entender la física detrás de la secuencia de flujo 4D es necesario comprender cómo se generan los mapas de velocidad en una secuencia de flujos 2D convencional, ya que ambas utilizan el mismo principio. En el caso de la secuencia de flujo 4D se utiliza una referencia y luego tres adquisiciones consecutivas aplicando los gradientes bipolares en las tres direcciones (x , y , z) del espacio.

La técnica con secuencia de flujo 4D hace referencia a la adquisición retrospectiva de imágenes de resonancia magnética mediante la secuencia angiográfica con contraste de fase, en la cual se obtienen datos de la velocidad del flujo sanguíneo en tres direcciones, en un espacio tridimensional, durante el ciclo cardíaco. Su principal aplicación con las imágenes obtenidas es evaluar de manera cuantitativa la dinámica regional y global del flujo sanguíneo, y obtener parámetros hemodinámicos, como velocidades, flujos y volúmenes; además, permite analizar cualitativamente la evolución temporal de los complejos patrones de flujo sanguíneo. Estas características hacen que la técnica tenga muchas aplicaciones en la práctica clínica¹.

Aunque en la actualidad la técnica de contraste de fase 2D es considerada el método de referencia para el análisis del flujo sanguíneo, la secuencia de flujo 4D, incluso sin contraste, puede llegar a ser suficiente en el análisis de cardiopatías congénitas como las aquí descritas, en las que es indispensable el cálculo de variables de flujo a través de varios vasos, ya que agrega información sobre la circulación anormal del flujo vascular¹.

Las diferencias, las ventajas y las desventajas de la secuencia de contraste de fase 2D y la secuencia de flujo 4D se explican en la [tabla 1](#)⁸.

La secuencia de flujo 4D brinda información hemodinámica de manera detallada y completa como ninguna otra técnica en la actualidad.

En el ejemplo 1 se muestra el estudio de un paciente con comunicación interauricular *ostium secundum* que

Tabla 1. Diferencias, ventajas y desventajas de la secuencia con contraste de fase 2D y la secuencia de flujo 4D

Contraste de fase 2D	Flujo 4D
<ul style="list-style-type: none"> – Analiza el flujo laminar en una sola dirección en un solo punto concreto, dependiendo de donde se posicione el localizador – Es un método útil para elegir el VENC (<i>velocity encoding</i>, cm/s): el valor máximo de velocidad de flujo que se da en el entorno a estudiar, para eliminar el artefacto por <i>aliasing</i> – El tiempo de adquisición es mayor, ya que la secuencia dura unos 2 min por estructura vascular que se va a analizar en un solo punto de corte 	<ul style="list-style-type: none"> – Analiza y mide el flujo turbulento en cualquier parte del volumen de adquisición de forma retrospectiva – Brinda un análisis cualitativo y cuantitativo de forma retrospectiva del flujo multidirección en un volumen de datos – El tiempo de adquisición es menor, ya que dura unos 8-10 min y aporta información de todas las estructuras vasculares adquiridas

es el más frecuente (70% de todas las comunicaciones interauriculares). Se presenta en la zona central del tabique auricular, lo que tiene como consecuencia de forma inicial un cortocircuito izquierda-derecha, también conocido como «derivación», a través de la comunicación interauricular, lo que condiciona una sobrecarga de volumen en las cavidades cardíacas derechas e hiperflujo pulmonar, pudiendo cursar con hipertensión pulmonar, arritmias auriculares e insuficiencia cardíaca^{9,10}. En este caso, en las secuencias de flujo 4D fue posible ubicarnos directamente sobre el defecto interauricular de forma perpendicular sobre el flujo de comunicación interauricular, permitiendo analizar su localización y morfología a nivel del septo interauricular, llevar a cabo las mediciones necesarias (diámetros y área) en la fase del ciclo cardíaco y, ciertamente, la medición directa del flujo (Fig. 1). Así mismo, mediante *software* de análisis avanzado fue ejecutable la activación de vectores y uso de *streamlines* y *pathlines* que nos permitieron identificar claramente de forma visual la dirección del flujo, tan importante en este tipo de patología cardíaca. Al mismo tiempo, la secuencia de flujo 4D nos permitió la cuantificación del Qp:Qs, el flujo sistémico (Qs) y el flujo pulmonar (Qp) en cualquier nivel deseado; de esta forma es posible una excelente valoración interna de las diversas mediciones que llevan a una mayor congruencia del análisis y los posteriores resultados (Fig. 2).

En el ejemplo 2, la cirugía de conexión cavopulmonar total o cirugía de Fontan es una técnica quirúrgica empleada como tratamiento en pacientes con cardiopatías congénitas con fisiología univentricular, entre ellas la atresia tricuspídea y la hipoplasia de cavidades izquierdas¹¹. Esta técnica consiste en la derivación del flujo venoso sistémico a los pulmones sin pasar por las cavidades cardíacas derechas, mediante la conexión de la vena cava superior y la vena cava inferior con la arteria pulmonar¹². Las complicaciones derivadas de esta cirugía se producen principalmente por la reducción del gasto cardíaco y el incremento de la presión venosa central. Dentro de ellas destacan la estenosis o trombosis del conducto Fontan, el TEP, entre otras¹³. Es fundamental poder analizar correctamente el circuito de Fontan y las complicaciones derivadas, como la presencia de flujo colateral. Algunos estudios indican que la presencia de flujo colateral puede influir significativamente en el estado clínico de los pacientes con fisiología de ventrículo único, ya que el flujo colateral pulmonar sistémico genera una carga de volumen en la vena pulmonar periférica, lo que puede provocar dilatación y disfunción ventricular, regurgitación de la válvula auriculoventricular y síntomas de insuficiencia cardíaca¹⁴. El flujo colateral pulmonar sistémico se calcula del siguiente modo: (flujo de las venas pulmonares izquierdas + flujo de las venas pulmonares derechas) – (flujo de la arteria pulmonar derecha + flujo de la arteria pulmonar izquierda); todos ellos evaluados mediante una secuencia activada por gatillo electrocardiográfico con mapeo de velocidad de eco de gradiente¹⁵.

En este caso se realizó una reconstrucción en secuencia de flujo 4D coronal fusionada de la conexión cavopulmonar total y en secuencia de flujo 4D en respiración libre (Fig. 3), cubriendo el área de interés entre el túnel de Fontan (por encima de la entrada de las venas hepáticas), la vena cava superior (por debajo de la vena braquiocefálica) y las arterias pulmonares derecha e izquierda hasta los niveles de las ramas segmentarias, permitiéndonos evaluar la permeabilidad del tubo de Fontan y calcular el Qp/Qs (Fig. 4), donde se determinó la permeabilidad del mismo y la ausencia de circulación colateral aortopulmonar.

El ejemplo 3 es un paciente con tetralogía de Fallot corregida durante la infancia, portador de una válvula protésica pulmonar. Los avances en las técnicas quirúrgicas y los cuidados perioperatorios han dado como resultado una tasa de supervivencia de más del 90% hasta 20 años después de la reparación quirúrgica en pacientes con tetralogía de Fallot¹⁶. En estos

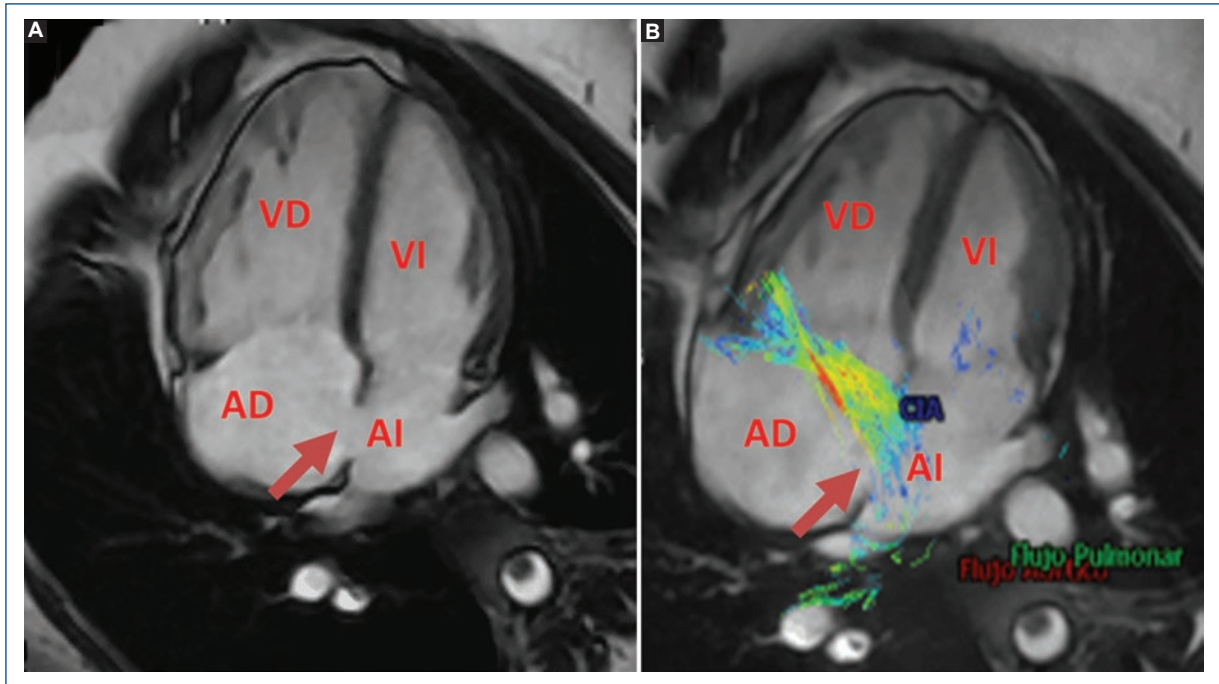


Figura 1. Ejemplo 3: paciente de 16 años con diagnóstico de Tetralogía de Fallot, portador de prótesis valvular pulmonar. Enviado para la valoración de la válvula protésica y búsqueda de cortos circuitos residuales. **A:** secuencias de contraste de fase 2D a nivel de la válvula aórtica / unión sino tubular (ROI rojo). **B:** secuencias de contraste de fase 2D, adquisición proximal a la válvula protésica pulmonar (ROI azul). **C:** tabla de cuantificación de Qp/Qs, que muestra la curva de flujo aórtico y pulmonar obtenida en la estación de trabajo.

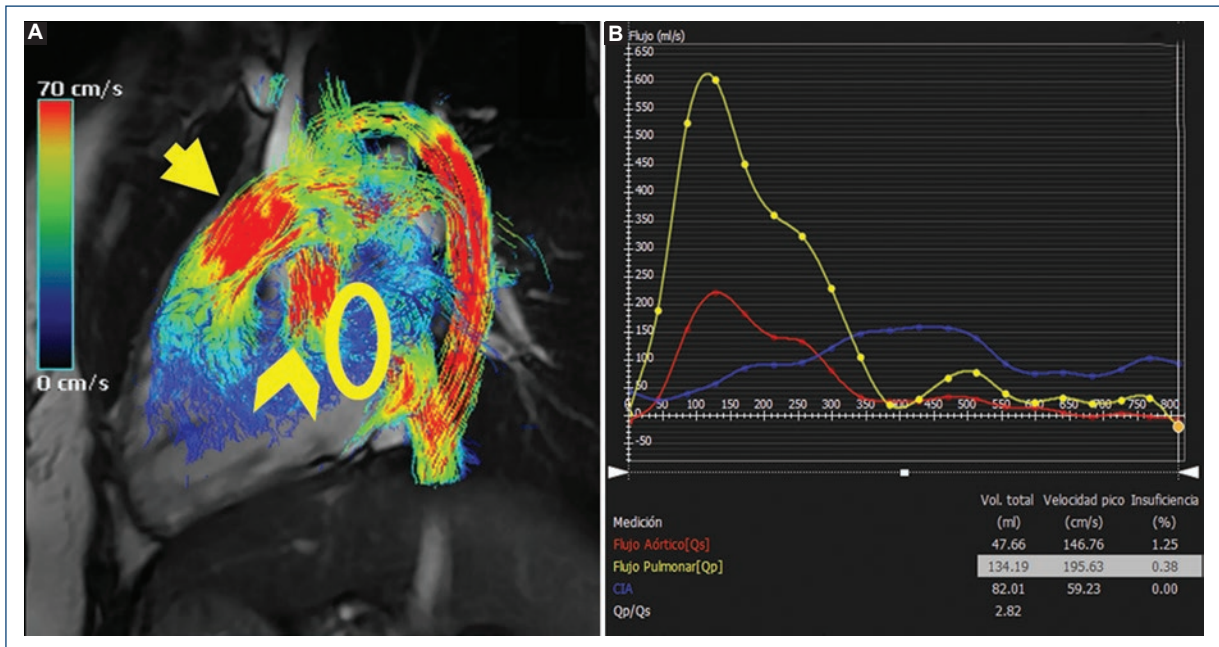


Figura 2. A: resonancia magnética cardiaca en secuencia de flujo 4D identificando el flujo aórtico (punta de flecha), el flujo pulmonar (flecha) y la comunicación interauricular (círculo). **B:** tabla de cuantificación de flujo de Qp/Qs, a nivel aórtico, pulmonar y en la comunicación interauricular.

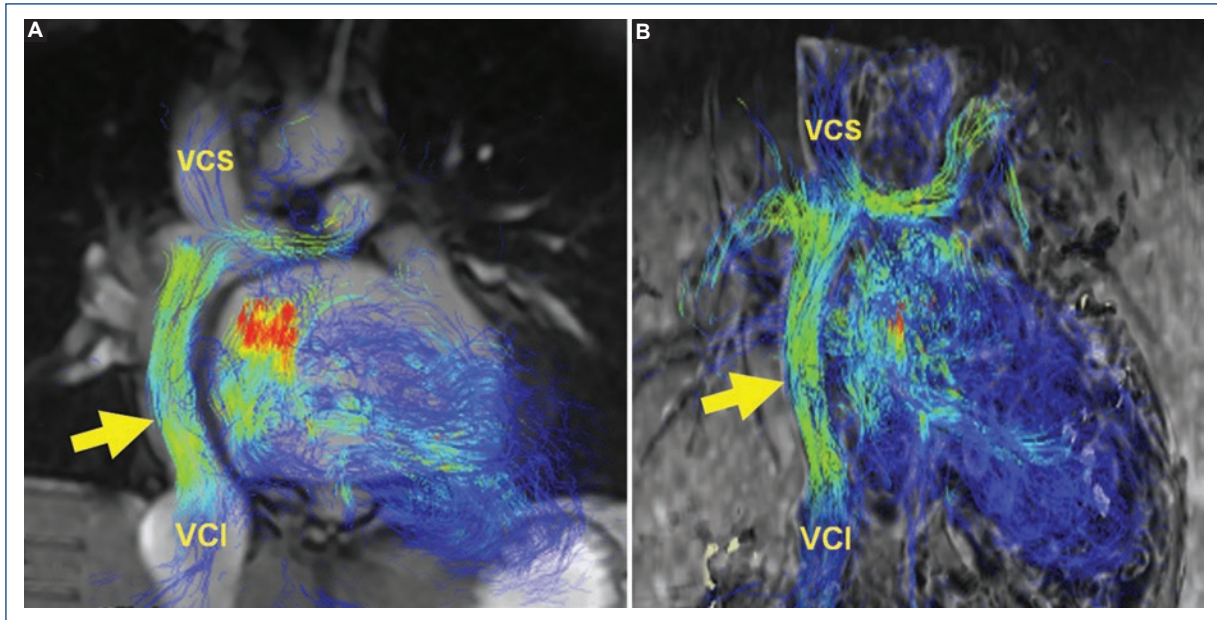


Figura 3. Ejemplo 2: paciente de 14 años con diagnóstico de atresia tricuspídea con cirugía de Fontan, enviado a resonancia magnética cardiaca (RMC) para análisis de la permeabilidad del mismo y valoración de colaterales. **A:** RMC en secuencia de flujo 4D con análisis de líneas de corriente y cine del conducto. **B:** RMC en secuencia de flujo 4D con análisis de líneas de corriente aisladas. La flecha señala un tubo extracardiaco. VCI: vena cava inferior; VCS: vena cava superior.

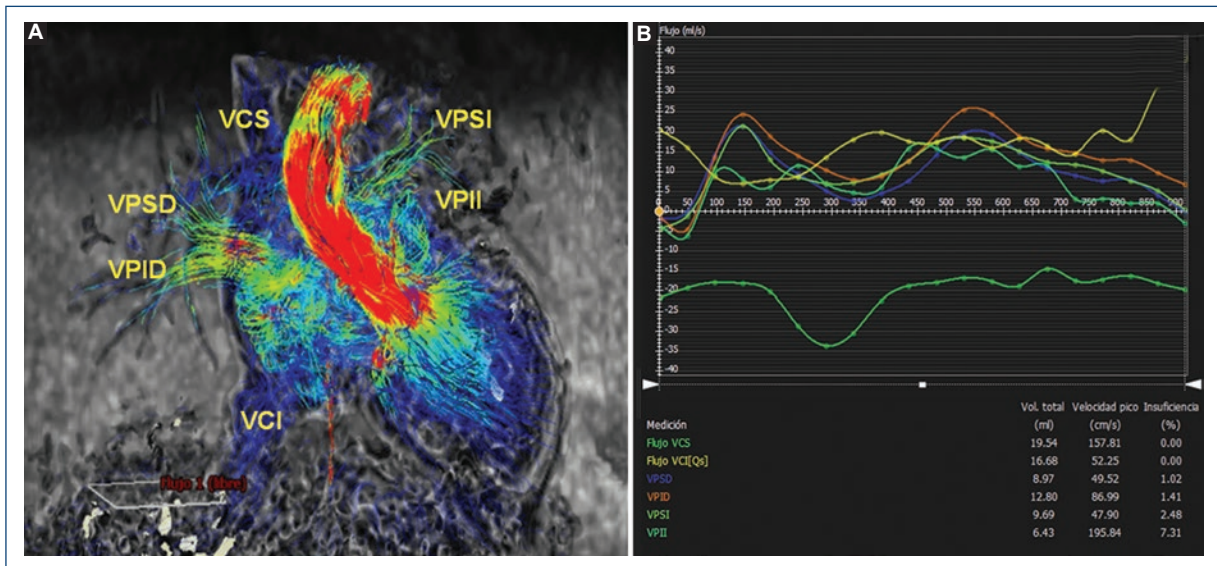


Figura 4. A: resonancia magnética cardiaca en secuencia de flujo 4D con líneas de corriente. **B:** tabla de cuantificación Q_p/Q_s para valorar la presencia de colaterales. VCI: vena cava inferior; VCS: vena cava superior; VPID: vena pulmonar inferior derecha; VPIL: vena pulmonar inferior izquierda; VPSD: vena pulmonar superior derecha; VPSI: vena pulmonar superior izquierda.

pacientes se vigilan la insuficiencia pulmonar y la función del ventrículo derecho, así como la estenosis de ramas pulmonares, ya que es una complicación en estos casos. Aunque la RMC convencional (2D) es el

método de referencia clínica para medir la insuficiencia pulmonar, la RMC en secuencia de flujo 4D proporciona un análisis más completo¹⁷. Se realizó un corte axial a nivel de la aorta y pulmonar (Fig. 5) con su respectiva

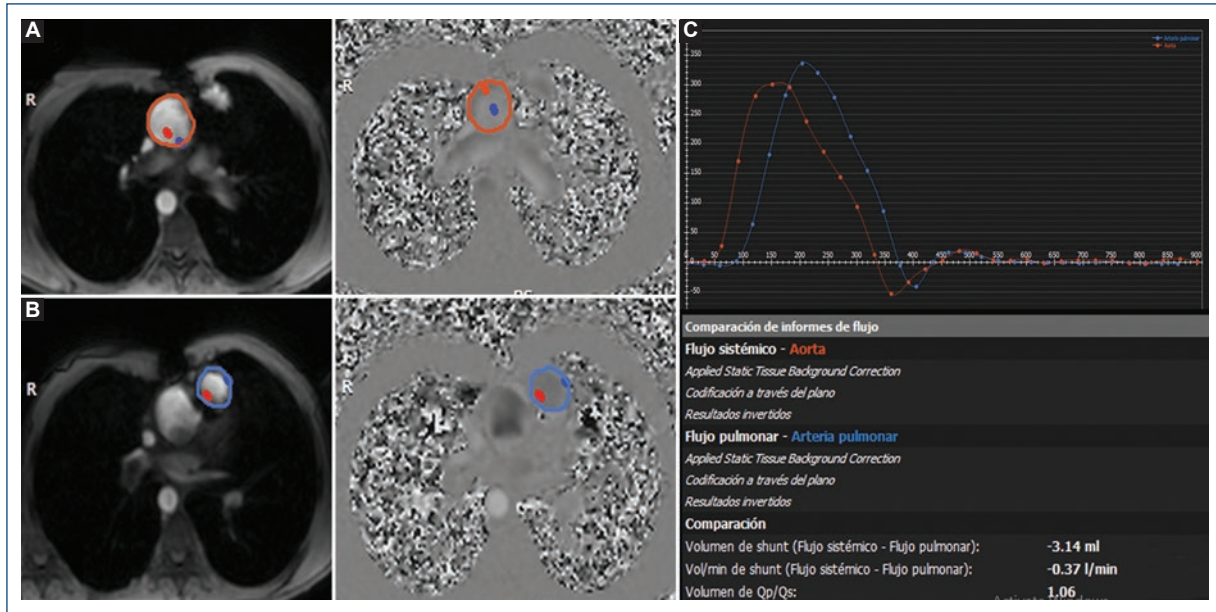


Figura 5. Ejemplo 3: paciente de 18 años con diagnóstico de tetralogía de Fallot corregida, portador de prótesis de válvula pulmonar, enviado para la valoración de la válvula protésica y cortocircuitos residuales. **A:** secuencias de contraste de fase 2D programadas sobre la aorta (ROI roja). **B:** secuencias de contraste de fase 2D programadas sobre la arteria pulmonar (ROI azul). **C:** tabla de cuantificación de Qp/Qs, que muestra la curva de flujo aórtico y pulmonar obtenida en la estación de trabajo con secuencia de contraste de fase (Q-Flow).

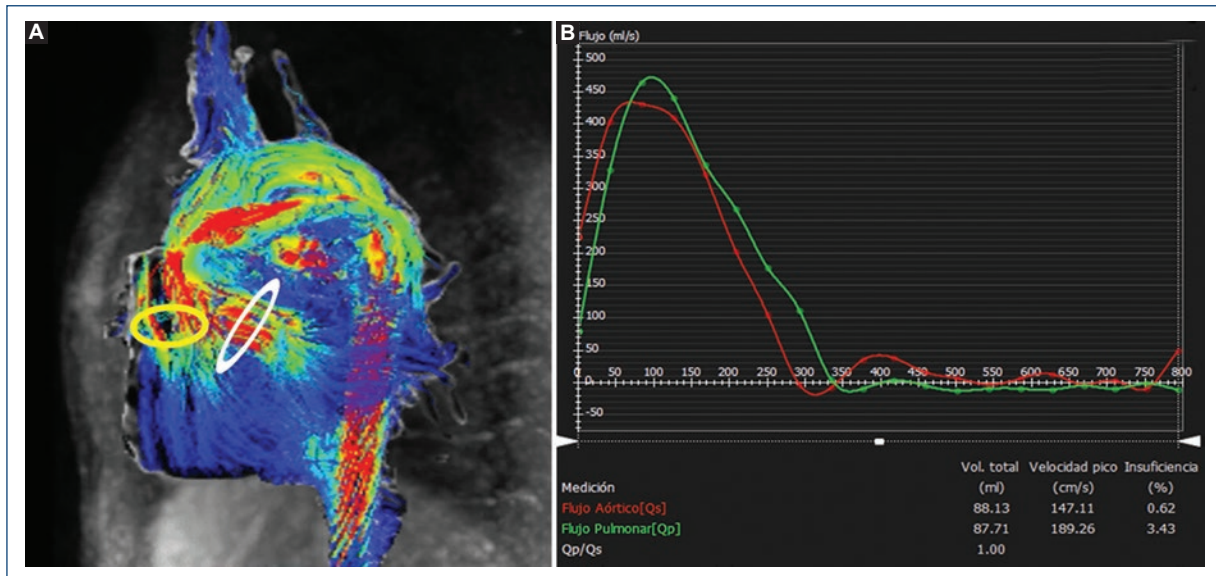


Figura 6. **A:** resonancia magnética cardiaca en secuencia de flujo 4D que muestra el flujo pulmonar (círculo amarillo) y el flujo aórtico (círculo blanco). **B:** tabla de cuantificación Qp/Qs basada en 4D.

secuencia de contraste de fase para obtener las curvas de flujo y calcular el Qp/Qs, donde se evidencia la ausencia de cortocircuito; así mismo, se realizó RMC en secuencia de flujo 4D brindándonos toda la información

a partir de una adquisición (Fig. 6), con medición del flujo pulmonar de forma independiente en cada rama pulmonar, evidenciando el flujo diferencial normal a ambos pulmones. Así mismo, se corrobora este dato

con el análisis mediante *pathlines* y *streamlines* que evidencian la ausencia de estenosis.

Conclusión

Como podemos analizar en estos ejemplos, la secuencia de flujo 4D no es simplemente una técnica novedosa que permite la evaluación de los flujos en las tres dimensiones del espacio más una cuarta representada por el tiempo en el ciclo cardiaco; es una secuencia que hace posible un exhaustivo análisis cuantitativo y además tiene la gran ventaja de la valoración cualitativa visual con un gran campo de análisis a través de un único volumen completo del corazón y los grandes vasos. Esto es difícil de observar con otros métodos de imagen por la limitación del campo visual en la ecografía, y ayudaría de forma complementaria, ya que en una secuencia de 8-10 minutos aproximadamente brinda información de todos los patrones de flujo y ayuda a determinar la hemodinamia cardiovascular, que sería un complemento no invasivo, a diferencia del cateterismo cardiaco.

En la aplicación clínica en las diferentes cardiopatías congénitas, tener una evaluación por imágenes aporta información clave a los médicos para el abordaje diagnóstico y la planificación quirúrgica.

Gracias a los avances tecnológicos en cirugía cardiovascular y cardiología pediátrica, los pacientes con cardiopatías congénitas complejas viven hasta la edad adulta. Sin embargo, algunos desarrollan complicaciones graves y la evaluación por estudios de imagen es fundamental para su seguimiento y atención.

La técnica de RMC en secuencia de flujo 4D permite una evaluación integral no invasiva de la hemodinámica cardiovascular en el corazón y los grandes vasos, brinda una evaluación sistémica del flujo sanguíneo en varios vasos a partir de una sola adquisición y permite el análisis retrospectivo de cualquier región de interés dentro del campo de visión de imagen adquirido; característica única en la imagen por RMC.

Esta técnica de RMC en secuencia de flujo 4D se está desarrollando e investigando en la actualidad, prometiendo avances relevantes para la comprensión de la hemodinamia cardiovascular, ya que representa un gran avance para el entendimiento de la dinámica de los flujos cardiovasculares en pacientes con cardiopatías congénitas, lo que podría ser un gran desarrollo para implementar como abordaje terapéutico en la práctica clínica.

Financiamiento

La presente investigación no ha recibido ninguna beca específica de agencias de los sectores públicos, comercial o con ánimo de lucro.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Consideraciones éticas

Protección de personas y animales. Los autores declaran que para esta investigación no se han realizado experimentos en seres humanos ni en animales.

Confidencialidad, consentimiento informado y aprobación ética. Los autores han seguido los protocolos de confidencialidad de su institución, han obtenido el consentimiento informado de los pacientes, y cuentan con la aprobación del Comité de Ética. Se han seguido las recomendaciones de las guías SAGER, según la naturaleza del estudio.

Declaración sobre el uso de inteligencia artificial. Los autores declaran que no utilizaron algún tipo de inteligencia artificial generativa para la redacción de este manuscrito.

Referencias

- Baumgartner H, De Backer J, Babu-Narayan S V, Budts W, Chessa M, Diller GP, et al. 2020 ESC Guidelines for the management of adult congenital heart disease: the Task Force for the management of adult congenital heart disease of the European Society of Cardiology (ESC). Endorsed by: Association for European Paediatric and Congenital Cardiology (AEPC), International Society for Adult Congenital Heart Disease (ISACHD). *Eur Heart J*. 2021;42:563-645.
- Sun RR, Liu M, Lu L, Zheng Y, Zhang P. Congenital heart disease: causes, diagnosis, symptoms, and treatments. *Cell Biochem Biophys*. 2015;72:857-60.
- Bissell MM, Raimondi F, Ait Ali L, Allen BD, Barker AJ, Bolger A, et al. 4D Flow cardiovascular magnetic resonance consensus statement: 2023 update. *J Cardiovasc Magn Reson*. 2023;25:40.
- Hernández C, Zudaire B, Castaño S, Azcárate P, Villanueva A, Bastarríka G. Basic principles of cardiovascular magnetic resonance (CMR): sequences, acquisition planes and study protocol. *An Sist Sanit Navar*. 2007;30:405-18.
- Underwood SR, Firmin DN, Klipstein RH, Rees RS, Longmore DB. Magnetic resonance velocity mapping: clinical application of a new technique. *Br Heart J*. 1987;57:404.
- Urmeneta Ulloa J, Rivas Oyarzabal J, Cabrera JA, Álvarez Vázquez A, Forteza Gil A, Martínez de Vega V. Cardiac magnetic resonance with 4D-flow in pre- and postcorrection assessment of partial anomalous pulmonary venous drainage. *Rev Esp Cardiol*. 2021;74:1112-4.
- Rizk J. 4D flow MRI applications in congenital heart disease. *Eur Radiol*. 2021;31:1160-74.
- Listo E, Martini N, Salvadori S, Valenti E, Stagnaro N, Trocchio G, et al. Comparison of 2D and 4D flow MRI measurements for hemodynamic evaluation of the Fontan palliation. *Congenit Heart Dis*. 2024; 18:627-38.
- Urmeneta Ulloa J, Álvarez Vázquez A, Martínez de Vega V, Cabrera JA. Evaluation of cardiac shunts with 4D flow cardiac magnetic resonance: intra- and interobserver variability. *J Magn Reson Imaging*. 2020; 52:1055-63.

10. Moersdorf R, Treutlein M, Kroeger JR, Ruijsink B, Wong J, Maintz D, et al. Precision, reproducibility and applicability of an undersampled multi-vec 4D flow MRI sequence for the assessment of cardiac hemodynamics. *Magn Reson Imaging*. 2019;61:73-82.
11. She HL, Roest AAW, Calkoen EE, van den Boogaard PJ, van der Geest RJ, Hazekamp MG, et al. Comparative evaluation of flow quantification across the atrioventricular valve in patients with functional univentricular heart after Fontan's surgery and healthy controls: measurement by 4D flow magnetic resonance imaging and streamline visualization. *Congenit Heart Dis*. 2017;12:40-8.
12. Frydrychowicz A, Arnold R, Harloff A, Schlensak C, Hennig J, Langer M, et al. In vivo 3-dimensional flow connectivity mapping after extracardiac total cavopulmonary connection. *Circulation*. 2008;118:e16-7.
13. Rijnberg FM, Westenberg JJM, van Assen HC, Juffermans JF, Kroft LJM, van den Boogaard PJ, et al. 4D flow cardiovascular magnetic resonance derived energetics in the Fontan circulation correlate with exercise capacity and CMR-derived liver fibrosis/congestion. *J Cardiovasc Magn Reson*. 2022;24:21.
14. Geva T. Quantification of systemic-to-pulmonary artery collateral flow: challenges and opportunities. *Circ Cardiovasc Imaging*. 2012;5:175-7.
15. Ait Ali L, Cadoni A, Rossi G, Keilberg P, Passino C, Festa P. Effective cardiac index and systemic-pulmonary collaterals evaluated by cardiac magnetic resonance late after Fontan palliation. *Am J Cardiol*. 2017;119:2069-72.
16. Warmerdam EG, Neijzen RL, Voskuil M, Leiner T, Grotenhuis HB. Four-dimensional flow CMR in tetralogy of Fallot: current perspectives. *Br J Radiol*. 2022;95:20210298.
17. Isorni MA, Martins D, Ben Moussa N, Monnot S, Boddaert N, Bonnet D, et al. 4D flow MRI versus conventional 2D for measuring pulmonary flow after tetralogy of Fallot repair. *Int J Cardiol*. 2020;300:132-6.