

Papel de la ecocardiografía *speckle-tracking* (rastreo de marcas) y la resonancia magnética cardíaca-*feature tracking* en la circulación de Fontan. Diferencias entre los ventrículos derecho e izquierdo

Speckle-tracking echocardiography and MCR-feature tracking in Fontan circulation. Differences between right and left ventricles

Elena Sanz-Pascual^{1*}, Montserrat Bret-Zurita², Jesús Díez-Sebastián³, Luis G. Guereta-Silva¹, Ángel Aroca-Peinado⁴ y Federico Gutiérrez-Larraya-Aguado¹

¹Servicio de Cardiología Infantil; ²Servicio de Radiología Infantil; ³Servicio de Bioestadística; ⁴Servicio de Cirugía Cardíaca. Hospital Universitario La Paz, Madrid, España

Resumen

Introducción: En los pacientes con DCPT, la disfunción ventricular es inevitable, y más temprana en VU derechos. La deformación miocárdica por STE y RMC-FT parece promisoría. **Objetivo:** Analizar la función ventricular mediante STE y RMC-FT en pacientes con DCPT, en comparación con RMC convencional según la morfología del VU y la posible implicación en su diagnóstico temprano. **Método:** Se recogieron medidas del strain longitudinal y circunferencial por STE y RMC-FT, volúmenes ventriculares y FE por RMC en 64 pacientes con DCPT. **Resultados:** La morfología ventricular no se relacionó con disfunción por RMC. Los VU derechos tuvieron valores por STE y RMC-FT disminuidos respecto de los VU izquierdos, con FE similares. Existe correlación entre STE y RMC-FT, no equivalentes, con buena factibilidad y reproducibilidad. **Conclusiones:** La RMC-FT y el STE son técnicas útiles en el diagnóstico temprano y la vigilancia de la función ventricular en VU derechos con FE preservada.

Palabras clave: Fontan. Resonancia magnética cardíaca. Feature tracking. Función ventricular. Speckle-tracking echocardiography. Fracción de expulsión.

Abstract

Introduction: In patients with TCPC, the development of ventricular dysfunction is inevitable and is more precocious in SRVs. Myocardial deformation by STE and CMR-FT is promising. **Objective:** To analyze ventricular function in patients with TCPC using STE and CMR-FT compared with conventional cMRI, depending on SV morphology, to determine their role in early diagnosis of ventricular dysfunction. **Method:** Sixty-four patients with TCPC were included. Longitudinal and circumferential strain by STE and CMR-FT and ventricular volume and EF were obtained. **Results:** Dysfunction analyzed by cMRI showed no association with ventricular morphology. SRVs had lower values in STE and CMR-FT compared with SLVs, with similar EF. While not equivalent, correlation was observed between the STE and the CMR-FT values, demonstrating good feasibility and reproducibility. **Conclusion:** The strain data in CMR-FT and STE could be useful for diagnosis and monitoring of ventricular function and as markers of early SRV dysfunction with preserved EF.

Keywords: Fontan. Cardiac magnetic resonance imaging. Feature tracking. Ventricular function. Speckle tracking echocardiography. Ejection fraction.

Correspondencia:

*Elena Sanz-Pascual

E-mail: elenasanzpascual@gmail.com

Fecha de recepción: 15-01-2021

Fecha de aceptación: 09-06-2021

DOI: 10.24875/RCCAR.21000009

Disponible en internet: 08-11-2022

Rev Colomb Cardiol. 2022;29(4):412-420

www.rccardiologia.com

0120-5633 / © 2021 Sociedad Colombiana de Cardiología y Cirugía Cardiovascular. 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

La circulación de Fontan es una medida quirúrgica paliativa para los pacientes con enfermedades congénitas cardíacas complejas no susceptibles de reparación biventricular, con base en una redirección pasiva del retorno venoso sistémico hacia la circulación pulmonar. La causa de estas cardiopatías es bastante diversa, con cohortes heterogéneas y morfologías ventriculares muy diferentes¹.

A pesar del aumento de la supervivencia a corto y mediano plazos, la disfunción ventricular y el desarrollo de insuficiencia cardíaca son inevitables en la etapa adulta. La valoración funcional precisa es en particular importante para la detección temprana y la toma de decisiones terapéuticas, pero esto se dificulta por la geometría y anatomía ventriculares, además de la ventana acústica subóptima que muestran estos pacientes. Las medidas de ecocardiografía convencional tienen una falta de sensibilidad en la detección temprana de la disfunción con una elevada variabilidad y una escasa correlación con la FE determinada por resonancia magnética cardíaca (RMC), considerada la norma de referencia para el cálculo volumétrico, anatómico y funcional².

Sin embargo, las técnicas de deformación miocárdica por *speckle tracking echocardiography* (STE) y *RMC-feature tracking* (RMC-FT) han surgido como herramientas novedosas para la valoración global y regional de la función ventricular. Son independientes de la morfología y geometría ventricular, así como de las condiciones de precarga y del ángulo de insonación, en el caso de la ecocardiografía^{3,4}, y no suponen una adquisición de imágenes adicionales ni aumento del tiempo de posprocesamiento en la RMC. La técnica de *feature tracking* se basa en el seguimiento de una alteración (*feature*) generada por la heterogeneidad del músculo cardíaco debido al brillo tisular, rugosidad y estructuras anatómicas como las trabeculaciones y los músculos papilares. El software identifica dicho *feature* en un segmento tisular definido en una pequeña ventana y en el siguiente *frame* busca una alteración similar en la escala de grises en los píxeles contiguos y trata de seguirla en los sucesivos *frames* a lo largo de todo el ciclo cardíaco.

En los ventrículos únicos (VU) de morfología derecha se ha descrito una disminución de la tolerancia al ejercicio y la función ventricular, con peor pronóstico y evolución⁵⁻⁷, con valores disminuidos de *strain* con respecto a la población sana⁸⁻¹² y los VU de morfología

izquierda¹³⁻¹⁵. Tampoco queda bien establecida su correlación con la FE calculada por RMC¹⁶.

El objetivo fue analizar la función ventricular mediante STE y RMC-FT en pacientes con derivación cavo-pulmonar total (DCPT) comparada con valores de RMC convencional para determinar posibles diferencias de acuerdo con la morfología del VU y su implicación en el diagnóstico temprano de disfunción ventricular.

Materiales y métodos

Estudio observacional unicéntrico que incluyó a 64 pacientes con circulación de Fontan en edad pediátrica seguidos en el centro de los autores desde diciembre de 2010 hasta diciembre de 2018. Los criterios de inclusión fueron: estadio intermedio de derivación cavopulmonar parcial (Glenn), derivación cavo-pulmonar total (DCPT) después de los 2.5 años de vida y una edad mínima en el momento del estudio de 3.5 años. Los diagnósticos iniciales incluían cardiopatías congénitas complejas y se consideró la de mayor relevancia para su clasificación en VU de morfología derecha o izquierda¹.

Este estudio recibió aprobación del Comité de Ética e Investigación del hospital y se obtuvo el consentimiento informado de los familiares de todos los pacientes.

Valoración ecocardiográfica

Todos los pacientes fueron objeto de un ecocardiograma transtorácico por un cardiólogo pediátrico experimentado de acuerdo con las recomendaciones de la *American Society of Echocardiography* en niños¹⁷. Se utilizó un ecógrafo *iE33* (Philips Medical Systems, Best, Netherlands), según los protocolos establecidos por este servicio, con un *frame rate* de 60 a 90 *frames/s*. Se ajustaron calidad de imagen y resolución temporal de acuerdo con las técnicas regulares con objeto de optimizar la definición del borde endocárdico. Todas las imágenes se grabaron y almacenaron digitalmente para un análisis posterior fuera de línea con el software *Xcelera*[®] (Philips Medical Systems) y *QLab 10.7* (Philips Medical Systems, Best, Netherlands) para el estudio de STE.

Se obtuvieron valores de *strain* y *strain rate* máximos longitudinales a partir de los planos de dos cámaras y apical (4 cámaras). El *strain* y *strain rate* máximos circunferenciales se calcularon a partir de imágenes en eje corto paraesternal de los músculos papilares, de tal modo que éstos quedaron en la parte trabeculada

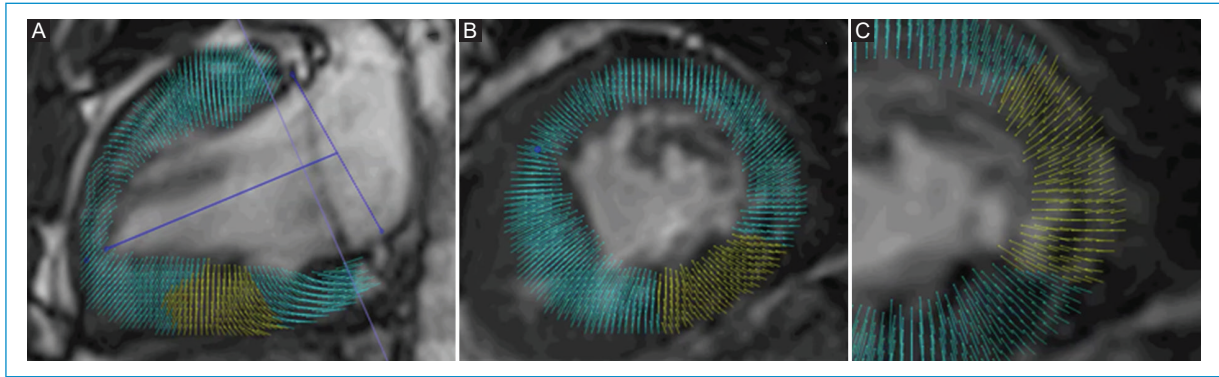


Figura 1. Mapa de vectores a partir de imágenes de 2D RMC – FT. Vectores que indican la dirección de la contracción miocárdica en eje longitudinal. **A:** en eje corto. **B:** en detalle. **C:** en paciente con ventrículo único de morfología izquierda.

incluidos en la cavidad ventricular. El ventrículo accesorio no se incluyó en la cuantificación de volumen ni masa ventricular.

Tras una demarcación manual inicial del endocardio, el sistema implementaba el movimiento de *speckles* a lo largo del ciclo cardíaco y realizaba una segmentación miocárdica y análisis del movimiento ventricular automatizados¹⁸. Con posterioridad se llevó a cabo una comprobación visual del seguimiento durante el ciclo cardíaco con ajuste manual del trazado hasta conseguir que todo el miocardio quedara incluido y existiera un correcto seguimiento de los *speckles* trazados. Se efectuaron tres mediciones en tres ciclos cardíacos diferentes y se calculó la media aritmética para determinar el *strain* longitudinal global (GLS) y circunferencial global (GCS) y sus correspondientes *strain rates* globales.

Valoración por RMC

Se realizó RMC en todos los pacientes con equipos Panorama 1.0T (Philips Medical Systems®) y MAGNETOM® (Skyra Syngo MR E11 (—3T—) Siemens) en un plazo máximo de seis meses anteriores o posteriores a la realización de la ecocardiografía sin existir ningún procedimiento quirúrgico o intervencionista entre ambos estudios. Se excluyó a los pacientes portadores de marcapasos o cualquier dispositivo no compatible con RMC.

Se calcularon los volúmenes telediastólico y telesistólico, masa ventricular, volumen sistólico, gasto cardíaco y FE. Todos estos valores se indexaron por la superficie corporal (BSA). Se definió la disfunción ventricular como una FE < 45%.

El análisis de deformación miocárdica se llevó a cabo mediante el software CVI 42® (Circle Cardiovascular

Imaging, Calgary, Canada) en los ejes corto y longitudinal de cuatro y dos cámaras.

Se delimitaron manualmente los contornos endocárdico y epicárdico en telesístole y telediástole y el software efectuó los trazados a lo largo de todo el ciclo cardíaco de forma automática, con comprobación visual de la exactitud del seguimiento y corrección manual para conseguir un *tracking* adecuado.

Se obtuvieron valores máximos globales de *strain* y *strain rate* longitudinal, circunferencial y radial, FE y volúmenes telesistólico y telediastólico en 2D y 3D. Se calcularon los valores de *strain* regional circunferencial de las porciones basal, media y apical ventriculares, luego de realizar la segmentación miocárdica de acuerdo con los modelos informados en las publicaciones médicas (seis en el plano longitudinal y otros seis en el transversal)^{18,19}.

El análisis en 3D se llevó a cabo a partir de la interpolación de los contornos telesistólico y telediastólico obtenidos en los planos longitudinal y eje corto en 2D, hasta crear mapas de vectores de contractilidad (Fig. 1) y modelos volumétricos tridimensionales en movimiento (Fig. 2).

Para la inclusión en el estudio era necesario al menos un correcto *tracking* de cuatro de los seis segmentos en el caso del GLS y el GCS.

Reproducibilidad y factibilidad

La variabilidad intraobservador e interobservador de los parámetros de deformación miocárdica se calculó a partir de 10 estudios seleccionados al azar. Para calcular la variabilidad intraobservador, el mismo observador repitió las mediciones al menos dos semanas

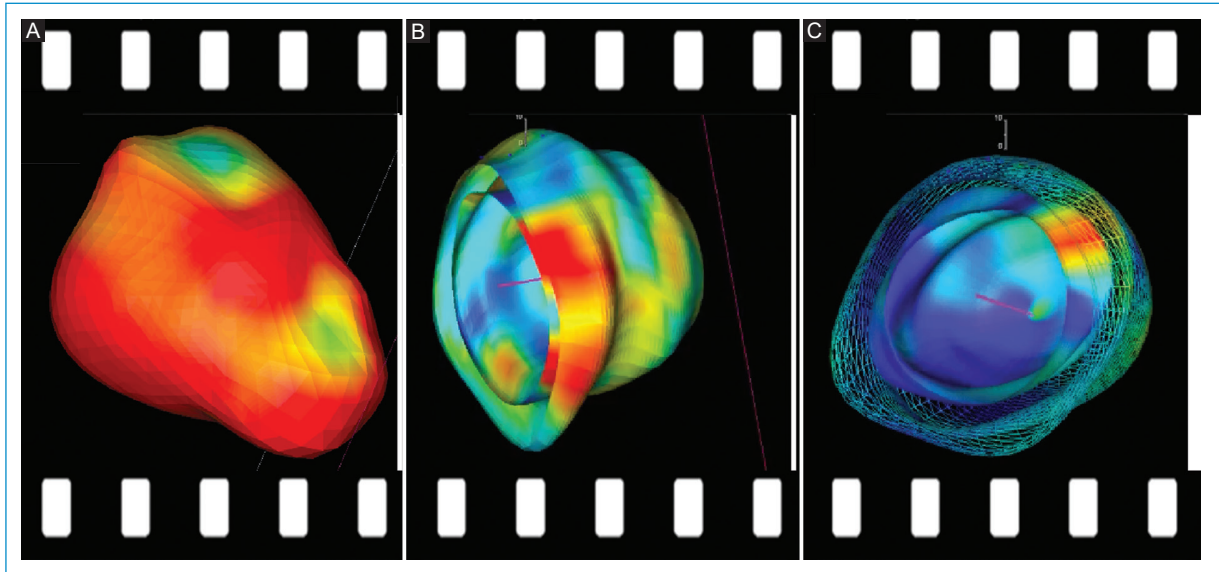


Figura 2. Reconstrucción en 3D por RMC-FT. Paciente con VU de morfología derecha. Reconstrucción a partir de los valores de *strain* longitudinal, circunferencial y radial. **A:** volumen completo en 3D. **B:** modelo por capas opacas de endocardio y epicardio. **C:** modelo por capas con malla epicárdica. Permite apreciar movilidad de endocardio y pericardio por separado.

después para evitar un sesgo de recuerdo. Para la variabilidad interobservador, otro cardiólogo pediátrico experimentado efectuó las mediciones en los mismos 10 estudios de forma anónima e independiente.

Se expresó la reproducibilidad como el coeficiente de correlación intraclase (CCI) con su respectivo intervalo de confianza y se consideró excelente un coeficiente > 0.75 , bueno entre 0.6 y 0.74 y pobre < 0.4 .

Análisis estadístico

El análisis estadístico se llevó a cabo con el sistema SAS 9.4 (SAS Institute Inc. 2013, Cary, NC). Las variables cuantitativas se expresaron como media y desviación estándar entre paréntesis (DE) o bien como su rango. Las variables cualitativas se describieron mediante frecuencias absolutas y frecuencias relativas expresadas en porcentaje. Las comparaciones entre variables cuantitativas continuas y cualitativas se llevaron a cabo fundamentalmente con la U de Mann-Whitney. Para las correlaciones cuantitativas se utilizó el coeficiente de correlación de Pearson. Se consideraron valores estadísticamente significativos con $p < 0.05$.

Resultados

Se incluyó a un total de 67 pacientes con una edad media de 15.5 años (3.9-26.2 años) a los que se realizó una DCPT en edad pediátrica con un tiempo medio de

seguimiento desde la cirugía de 9.7 ± 4.7 años. Se excluyó a tres pacientes portadores de dispositivos no compatibles con RMC. Todos los pacientes tenían una corrección mediante conducto extracardíaco, salvo uno con túnel lateral intraauricular. Ningún paciente mostró dehiscencias en el conducto de Fontan ni en la conexión de Glenn. Los gradientes en aorta ascendente y descendente fueron normales y ningún paciente presentaba disfunción significativa en los planos pulmonar, hepático o renal.

De los 64 pacientes incluidos, 26 (40.6%) presentaban morfología de VU derecho y 38 (59.4%) de VU izquierdo. No se identificaron diferencias significativas entre ambos grupos en las variables demográficas, clínicas o grado funcional de la NYHA (Tabla 1). La ecocardiografía reconoció mayor grado de insuficiencia en las válvulas auriculoventriculares (AV) de VU de morfología derecha ($p < 0.001$), sin ser significativa en el caso de la válvula sistémica ($p = 0.196$).

Análisis volumétrico y funcional por RMC convencional

La FE media global de la muestra fue de $53.8\% \pm 8.8\%$, con $53.4\% \pm 9.6\%$ en VD y $54.2\% \pm 8.4\%$ en VI. Siete pacientes (11.1%) presentaron disfunción ventricular, dos de ellos (7.7%) con VU derecho y 5 (13.5%) con izquierdo. Sin embargo, la morfología ventricular no se relacionó con disfunción ($p = 0.69$) ni con la FE de forma cuantitativa ($p = 0.9$).

Tabla 1. Características generales de la población de estudio

| Variable | Total (n = 64) | VD (n = 26) | VI (n = 38) | p |
|---------------------------------|----------------|-------------|-------------|-------|
| Género (masculino) | 39 (60.9%) | 15 (57.7%) | 24 (63.2%) | 0.795 |
| Edad al estudio (años) | 15.6 (5.6) | 16.4 (4.7) | 15 (6.1) | 0.516 |
| Edad DCPT (años) | 5.8 (2.4) | 6.2 (2.5) | 5.7 (2.4) | 0.274 |
| BSA (m ²) | 1.4 (0.4) | 1.5 (0.3) | 1.4 (0.4) | 0.978 |
| FC reposo (lpm) | 81 (19) | 81 (16) | 82 (21) | 0.956 |
| Sat basal de O ₂ (%) | 93 (4) | 94 (5) | 92 (4) | 0.823 |
| TAS (mmHg) | 111 (12) | 113 (11) | 110 (13) | 0.349 |
| TAD (mmHg) | 64 (10) | 62 (9) | 64 (11) | 0.691 |
| Morfología de VU | 64 (100%) | 26 (40.6%) | 38 (59.4%) | |
| Tipo de cardiopatía | | | | |
| HLHS | 12 (18.9%) | | | |
| Atresia tricúspide | 22 (34.4%) | | | |
| Atresia/estenosis pulmonar | 7 (10.9%) | | | |
| DORV | 7 (10.9%) | | | |
| DILV | 7 (10.9%) | | | |
| Canal AV disbalanceado | 5 (7.8%) | 4 (6.2%) | 1 (1.6%) | |
| Otros | 4 (6.2%) | 3 (4.6%) | 1 (1.6%) | |
| Fenestración Fontan | 17 (26.6%) | 9 (52.9%) | 8 (47.1%) | 0.641 |

Datos expresados como media (DE). DCPT: derivación cavopulmonar total; BSA: superficie corporal; VI: ventrículo izquierdo; VD: ventrículo derecho; VU: ventrículo único; TAS: tensión arterial sistólica; TAD: tensión arterial diastólica; FC: frecuencia cardíaca; HLHS: hipoplasia de cavidades izquierdas; DORV: ventrículo derecho de doble salida; DILV: ventrículo izquierdo de doble entrada; AV: auriculoventricular.

Tabla 2. Datos funcionales y volumétricos de RMC convencional totales y distribuidos de acuerdo con la morfología ventricular

| Variables | Total (n = 64) | VD (n = 26) | VI (n = 38) | p |
|-------------------------------|----------------|-------------|-------------|-------|
| VTd VU (ml/m ²) | 89.1 ± 28.1 | 97.1 ± 27.1 | 83.5 ± 27.8 | 0.051 |
| VTs VU (ml/m ²) | 41.3 ± 17.9 | 45 ± 19.2 | 38.7 ± 16.7 | 0.163 |
| FE VU (%) | 53.8 ± 8.8 | 53.4 ± 9.6 | 54.2 ± 8.4 | 0.900 |
| IC (l/min/m ²) | 3.7 ± 1.2 | 3.9 ± 1.1 | 3.6 ± 1.3 | 0.289 |
| IS (l/latido/m ²) | 4.8 ± 1.5 | 5.25 ± 1.5 | 4.53 ± 1.5 | 0.071 |
| R VAo (%) | 1.6 ± 2.7 | 1.78 ± 2.2 | 1.47 ± 3 | 0.108 |

Datos expresados como media ± DE. FE: fracción de expulsión; IC: índice cardíaco; IS: índice sistólico; R VAo: regurgitación de válvula aórtica; VD: ventrículo derecho; VI: ventrículo izquierdo; VTd: volumen telediastólico; VTs: volumen telesistólico; VU: ventrículo único.

No se identificó una relación en el análisis de volúmenes telediastólicos y telesistólicos entre ambos grupos, aunque sí una ligera tendencia a un mayor volumen telediastólico en aquéllos con morfología derecha (97.1 ±

27.1 ml/m²) respecto de la izquierda (83.5 ± 27.8 ml/m²) cercana a la significación estadística (p = 0.051). Tampoco hubo diferencias en el grado de regurgitación aórtica ni en los índices cardíaco y sistólico (Tabla 2). Sin embargo, los VU derechos sí mostraron mayor insuficiencia de la válvula AV objetivada por RMC (p = 0.026).

Análisis de deformación miocárdica por STE

Los valores de *strain* y *strain rate* totales fueron inferiores a los de la población sana y todos ellos fueron menores en VU de morfología derecha, aunque tan sólo el GLS tuvo significación estadística (-17.2% ± 2.7% vs. -19.6% ± 3.5%; p = 0.005) (Tabla 3).

Se reconoció una vinculación significativa entre todos los valores totales de *strain* y *strain rate* y la presencia de disfunción. Al analizar la FE de forma cuantitativa, el GCS mostró una correlación más marcada (r = -0.406), con valores menores que el GLS (Tabla 4).

Análisis funcional por RMC-FT

Los volúmenes telesistólico y telediastólico obtenidos por RMC-FT fueron significativamente mayores en los

Tabla 3. Parámetros de deformación miocárdica por STE. Valores totales y de acuerdo con la morfología del ventrículo único

| Variables | Total (n = 64) | VD (n = 26) | VI (n = 38) | p |
|------------------------|----------------|-------------|-------------|-------|
| GLS (%) | -18.6 ± 3.4 | -17.2 ± 2.7 | -19.6 ± 3.5 | 0.005 |
| GCS (%) | -16.1 ± 4.3 | -15.3 ± 4.7 | -16.6 ± 4.1 | 0.121 |
| GLR (s ⁻¹) | 1.14 ± 0.3 | 1.1 ± 0.3 | 1.15 ± 0.3 | 0.608 |
| GCR (s ⁻¹) | 1.17 ± 0.4 | 1.13 ± 0.4 | 1.19 ± 0.4 | 0.500 |

Datos expresados como media ± DE. GLS: *strain* longitudinal global; GCS: *strain* circunferencial global; GLR: *strain rate* longitudinal global; GCR: *strain rate* circunferencial global; VD: ventrículo derecho; VI: ventrículo izquierdo.

VU de morfología derecha: VTd de VI: 75.91 ± 34.05 ml/m² y de VD: 90.52 ± 28.72 ml/m² (p = 0.009) y VTs de VI: 39.92 ± 19.45 ml/m² y de VD: 51.1 ± 18.57 ml/m² (p = 0.004).

La FE por esta misma técnica también fue menor en los VD (43.7% ± 8.1% vs. 48.1% ± 6.2%; p = 0.051) sin alcanzar la significación estadística. Se observó un nexo significativo entre la FE calculada por RMC-FT y la disfunción por RMC convencional (p < 0.001) de forma global y por morfología ventricular, con coeficiente de correlación de r = 0.699 en el análisis cuantitativo.

Los valores de *strain* y *strain rate* en 2D y 3D se hallaban por debajo de los considerados normales, pero muy similares entre sí (Tabla 5). Al analizarlos de acuerdo con la morfología del VU, todos los parámetros de *strain* y *strain rate* en 2D y 3D fueron significativamente menores en los VU derechos, con excepción del

Tabla 4. Resultados de *strain* y *strain rate* por STE clasificados de acuerdo con la presencia o ausencia de disfunción

| Variables | Disfunción | FEVU(p) | r | p |
|-----------|---------------|---------------|--------|-------|
| GLS | -16.03 ± 3.94 | -19.03 ± 3.16 | -0.354 | 0.013 |
| GCS | -12.75 ± 2 | -16.66 ± 4.2 | -0.406 | 0.021 |
| GLR | 0.89 ± 0.2 | 1.17 ± 0.33 | 0.237 | 0.02 |
| GCR | 0.89 ± 0.23 | 1.22 ± 0.37 | 0.374 | 0.039 |

Datos expresados como media ± DE y su significación estadística (p). Coeficientes de correlación (r) entre los parámetros de deformación miocárdica y la FE calculada por RMC convencional. GLS: *strain* longitudinal global; GCS: *strain* circunferencial global; GLR: *strain rate* longitudinal global; GCR: *strain rate* circunferencial global; FEVU(p): fracción de expulsión de ventrículo único preservada.

GRS en 3D (Tabla 6). También se ha encontrado una correlación significativa entre el *strain* y *strain rate* totales y por morfología por STE y sus homólogos por RMC-FT, con valores mayores de STE que de RMC-FT (Tabla 7).

En el análisis circunferencial regional se registró un gradiente basal-apical creciente significativo, tanto en los valores totales como en los ventrículos de ambas morfologías. Además, los VU de morfología derecha tuvieron cifras significativamente menores para cada uno de los segmentos en 2D y 3D en relación con los de morfología izquierda (Tabla 5).

Reproducibilidad y factibilidad

En un 64.3% de los ecocardiogramas, uno o dos segmentos no pudieron interpretarse de modo adecuado por ventana subóptima, en particular localizados en

Tabla 5. Resultados de *strain* y *strain rate* globales y regionales por RMC-FT en 2D y 3D. Valores totales y de acuerdo con la morfología del ventrículo único

| | Total (n = 64) | | Izquierdo (n = 38) | | Derecho (n = 26) | |
|------------------------|----------------|---------------|--------------------|---------------|------------------|---------------|
| | 2D | 3D | 2D | 3D | 2D | 3D |
| Globales | | | | | | |
| GLS (%) | -14.04 ± 2.15 | -12.27 ± 3.77 | -14.5 ± 2.23 | -13.04 ± 2.24 | -13.38 ± 1.87 | -11.27 ± 4.98 |
| GCS (%) | -13.8 ± 2.61 | -13.98 ± 3.1 | -14.5 ± 2.7 | -15.08 ± 3.43 | -12.79 ± 2.15 | -12.57 ± 1.87 |
| GRS (%) | 20.95 ± 5.17 | 24.61 ± 10.7 | 22.33 ± 5.39 | 26.64 ± 11.9 | 18.91 ± 4.14 | 22.12 ± 8.39 |
| GLR (s ⁻¹) | 0.8 ± 0.19 | 0.76 ± 0.21 | 0.84 ± 0.18 | 0.82 ± 0.23 | 0.75 ± 0.19 | 0.68 ± 0.15 |
| GCR (s ⁻¹) | 0.76 ± 0.17 | 0.76 ± 0.28 | 0.8 ± 0.16 | 0.82 ± 0.33 | 0.7 ± 0.16 | 0.7 ± 0.18 |
| GRR (s ⁻¹) | 1.05 ± 0.32 | 1.74 ± 0.87 | 1.16 ± 0.34 | 1.94 ± 0.88 | 0.89 ± 0.22 | 1.14 ± 0.8 |
| Regionales | | | | | | |
| Basal (%) | -11.83 ± 3.37 | -12.33 ± 3.25 | -12.89 ± 3.18 | -13.53 ± 3.37 | -10.38 ± 3.13 | -10.79 ± 2.36 |
| Medio (%) | -13.97 ± 2.98 | -14.47 ± 3.36 | -14.9 ± 2.99 | -15.73 ± 3.55 | -12.71 ± 2.52 | -12.86 ± 2.29 |
| Apical (%) | -16.6 ± 3.05 | -16 ± 3.91 | -17.06 ± 3.37 | -16.93 ± 4.13 | -15.99 ± 2.5 | -14.8 ± 3.32 |

Datos expresados como media ± DE. 2D: dos dimensiones; 3D: 3 dimensiones; GLS: *strain* longitudinal global; GCS: *strain* circunferencial global; GRS: *strain* radial global; GLR: *strain rate* longitudinal global; GCR: *strain rate* circunferencial global; GRR: *strain rate* radial global.

Tabla 6. Relación entre parámetros de deformación miocárdica por RMC-FT en 2D y 3D globales y regionales y la morfología de VU

| | 2D | 3D |
|------------------------|-----------|-----------|
| Globales | | |
| GLS (%) | p = 0.026 | p = 0.044 |
| GCS (%) | p = 0.006 | p = 0.002 |
| GRS (%) | p = 0.004 | p = 0.093 |
| GLR (s ⁻¹) | p = 0.043 | p = 0.009 |
| GCR (s ⁻¹) | p = 0.032 | p = 0.003 |
| GRR (s ⁻¹) | p = 0.002 | p = 0.047 |
| Regionales | | |
| Inicial (%) | p = 0.005 | p = 0.002 |
| Medio (%) | p = 0.003 | p = 0.001 |
| Apical (%) | p = 0.042 | p = 0.035 |

P: significación estadística; GLS: *strain* longitudinal global; GCS: *strain* circunferencial global; GRS: *strain* radial global; GLR: *strain rate* longitudinal global; GCR: *strain rate* circunferencial global; GRR: *strain rate* radial global.

la región basal septal. En el caso de la RMC no fue necesario excluir ningún segmento por limitación en la calidad de imagen.

La variabilidad intraobservador e interobservador analizada para el GLS por STE fue de buena a excelente, con CCI de 0.62 (IC, 0.13-0.87) y de 0.77 (IC, 0.38-0.93), respectivamente. En el caso de la RMC-FT, el GLS tuvo un CCI de 0.58 (IC, 0.10-0.86) intraobservador y de 0.83 (IC, 0.52-0.95) interobservador.

Discusión

Este estudio demuestra que los valores de *strain* y *strain rate* por STE y RMC-FT, tanto globales como regionales, están disminuidos en los pacientes con

circulación univentricular tras la intervención de Fontan con respecto a la población sana. Este descenso es más acusado en el caso de los VU de morfología derecha. La hipótesis de que los ventrículos sistémicos de morfología derecha poseen una peor adaptación a la sobrecarga de volumen y presión se ha demostrado en cardiopatías como la transposición de grandes arterias²⁰. Sin embargo, es más confuso en el caso de los VU, en los que hay series sin diferencias pronósticas entre ambas morfologías y otras en las que un VU derecho se relaciona con una FE disminuida y un aumento de la morbimortalidad^{5-7,13,21-24}. Esto podría explicarse por la heterogeneidad de las cohortes en cuanto al tipo de cardiopatía, técnica quirúrgica y tiempo de evolución desde la intervención.

La disfunción por RMC convencional y la FE de forma cuantitativa no se relacionaron con la morfología ventricular en esta muestra (p = 0.690 y p = 0.9, respectivamente), aunque sí parece existir una tendencia a los valores menores en VU derechos, con resultados similares en el cálculo de FE por RMC-FT (p = 0.191).

La hipertrofia compensadora de los VD podría mantener valores de FE similares a los de VI a expensas de un cociente masa/volumen alterado que sí reflejaría una alteración de la contractilidad y los parámetros de deformación miocárdica²⁵.

La insuficiencia de la válvula AV fue más frecuente y de mayor grado por ecocardiografía (p < 0.001) y RMC (p = 0.026) junto con unos volúmenes telesistólicos y telediastólicos por RMC-FT significativamente mayores (p = 0.009 y p = 0.004) en VU derechos. Estos hallazgos parecen ser parte del mecanismo adaptativo a la

Tabla 7. Correlación entre parámetros de deformación miocárdica por STE y RMC-FT en dos (2D) y tres dimensiones (3D)

| Variables | GLS | GCS | GLR | GCR |
|-----------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 2D GLS | r = 0.523 /p < 0.001 | p = 0.073 | p = 0.006 | p = 0.021 |
| 2D GCS | p < 0.001 | r = 0.475 /p < 0.001 | p = 0.036 | p < 0.001 |
| 2D GLR | p < 0.001 | p < 0.001 | r = 0.412 /p = 0.001 | p = 0.001 |
| 2D GCR | p < 0.001 | p = 0.001 | p = 0.011 | r = 0.457 /p < 0.001 |
| 3D GLS | r = 0.342 /p = 0.009 | p = 0.130 | p = 0.457 | p = 0.111 |
| 3D GCS | p = 0.003 | r = 0.381 /p = 0.006 | p = 0.013 | p = 0.005 |
| 3D GLR | p = 0.004 | p = 0.018 | r = 0.383 /p = 0.003 | p = 0.002 |
| 3D GCR | p = 0.005 | p = 0.005 | p = 0.013 | r = 0.430 /p = 0.002 |

Datos expresados para cada variable como coeficiente de correlación (r) y su significación estadística (p). GLS: *strain* longitudinal global; GCS: *strain* circunferencial global; GLR: *strain rate* longitudinal global; GCR: *strain rate* circunferencial global.

sobrecarga de presión y volumen y se consideran factores de riesgo de morbilidad^{26,27}.

Los resultados notificados en las publicaciones médicas de STE en función de la morfología ventricular son controvertidos. Por un lado, estudios como el de Ríos, et al.¹⁵ demuestran valores significativamente menores de GLS y GCS en VU derechos en una cohorte de 100 pacientes con DCPT; Kaneko, et al.¹³ presentan una disminución de GLS pero no de GCS en estos mismos VU (−16.6% en VD vs. −20.5% en VI; $p = 0.01$). En cambio, autores como Petko, et al.¹⁴ no objetivaron diferencias significativas de GLS entre VU derechos e izquierdos (−17.9 ± 3.2% vs. −18.5 ± 3.5%, respectivamente).

Este estudio mostró valores muy similares a los publicados en ambas morfologías, con cifras de GCS menores que GLS. Aunque todos los parámetros de *strain* y *strain rate* fueron menores en los VU de morfología derecha, sólo el GLS mostró un nexo significativo, en consonancia con lo ya descrito.

Además, es importante señalar que los valores de GLS de VI estaban muy cercanos a los considerados como normales en la población sana (−19.58 ± 3.5%)^{9,10,12}. Este mismo hecho también lo señalaron López, et al.¹¹ en su estudio comparativo de VU de morfología izquierda con pacientes sanos (GLS, −18.7% vs. −18.2%, respectivamente). Sin embargo, Singh, et al.⁸ obtuvieron valores de *strain* globales y regionales disminuidos en pacientes con VU de morfología izquierda en comparación con pacientes sanos (GLS, −17.7 ± 1.5% vs. −14.2 ± 3.3%; y GCS, −20.5 ± 1.8% vs. −17.5 ± 4.4% en sanos y con VU, respectivamente). Es probable que el tiempo de evolución sea un factor determinante, con una primera etapa posquirúrgica con valores disminuidos y una normalización posterior a medida que el VU desarrolla mecanismos adaptativos. Este proceso puede ser distinto en ambas morfologías, de tal modo que la diferente disposición de las fibras miocárdicas (sobre todo longitudinales en VD y circunferenciales en VI) modifique, a través de su hipertrofia, la contractilidad longitudinal o circunferencial. Los valores disminuidos de GLS en VU derechos hacen pensar en mecanismos compensatorios insuficientes y una adaptación subóptima como ventriculo sistémico tras la DCPT.

Este análisis por RMC-FT reflejó un descenso de los valores globales y regionales de *strain* y *strain rate* en 2D y 3D respecto de la población sana^{28,29} que fue significativamente más marcado en el caso de VU derechos.

Se han encontrado pocos trabajos que comparen valores de *strain* por RMC-FT en pacientes con Fontan^{30,31} y menos aún si se considera la morfología ventricular. Ishizaki, et al.³² han analizado en fecha

reciente la relación de efectos adversos con GLS en 2D en ventrículos de ambas morfologías, con obtención de valores muy similares a éstos (−14.3% ± 4.5% en VI y −13.1% ± 5.4% en VD).

Por otro lado, Ravesh, et al.³⁰ observaron la misma correlación entre el *strain* por STE y RMC-FT de este estudio, con valores menores por RMC-FT, sin ser equivalentes entre sí. El gradiente basal-apical creciente observado en este análisis regional se mantuvo en ambas morfologías con valores significativamente menores en VU derechos. También Hu, et al.³¹ describieron hallazgos similares y los relacionaron con la alteración del *loop* cardíaco y la ausencia de fibras helicoidales en estos pacientes³³⁻³⁵.

Conclusiones

Los VU derechos presentaron valores globales y regionales de *strain* y *strain rate* por STE y RMC-FT disminuidos respecto de la población sana y de VU de morfología izquierda a pesar de mantener FE similares. Por lo tanto, puede afirmarse que el GLS por STE y el GLS y GCS por RMC-FT podrían ser marcadores tempranos de disfunción en VU derechos que tengan FE conservada por RMC.

Los parámetros de deformación miocárdica (STE y RMC-FT) deben considerarse como un método diagnóstico factible y reproducible en pacientes con DCPT y utilizarse de forma complementaria en el diagnóstico y vigilancia de la función ventricular.

Financiamiento

Los autores declaran no haber recibido financiamiento para este estudio.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses alguno.

Responsabilidades 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 de los datos. Los autores declaran que han seguido los protocolos de su centro de trabajo sobre la publicación de datos de pacientes.

Derecho a la privacidad y consentimiento informado. Los autores declaran que en este artículo no aparecen datos de pacientes.

Bibliografía

1. van der Bom T, Zomer AC, Zwinderman AH, Meijboom FJ, Bouma BJ, Mulder BJM. The changing epidemiology of congenital heart disease. *Nat Rev Cardiol.* 2011;8(1):50-60. doi:10.1038/nrcardio.2010.166
2. Margossian R, Schwartz ML, Prakash A. Comparison of echocardiographic and cardiac magnetic resonance imaging measurements of functional single ventricular volumes, mass, and ejection fraction (from the pediatric Heart Network Multicenter Fontan Cross-Sectional Study). *Am J Cardiol.* 2009;104(3):419-28. doi:10.1016/j.amjcard.2009.03.058
3. Koopman LP, Slorach C, Hui W. Comparison between different speckle tracking and color tissue Doppler techniques to measure global and regional myocardial deformation in children. *J Am Soc Echocardiogr.* 2010;23(9):919-928. doi:10.1016/j.echo.2010.06.014
4. Schlangen J, Petko C, Hansen JH. Two-dimensional global longitudinal strain rate is a preload independent index of systemic right ventricular contractility in hypoplastic left heart syndrome patients after Fontan operation. *Circ Cardiovasc Imaging.* 2014;7(6):880-886. doi:10.1161/CIRCIMAGING.114.002110
5. Ohuchi H, Miyazaki A, Wakisaka Y. Systemic ventricular morphology-associated increased QRS duration compromises the ventricular mechanical-electrical and energetic properties long-term after the Fontan operation. *Int J Cardiol.* 2009;133(3):371-80. doi:10.1016/j.ijcard.2008.01.013
6. Anderson PAW, Sleeper LA, Mahony L. Contemporary outcomes after the Fontan procedure: a Pediatric Heart Network multicenter study. *J Am Coll Cardiol.* 2008;52(2):85-98. doi:10.1016/j.jacc.2008.01.074
7. McGuirk SP, Winlaw DS, Langley SM. The impact of ventricular morphology on midterm outcome following completion total cavopulmonary connection. *Eur J Cardiothorac Surg.* 2003;24(1):37-46. doi:10.1016/s1010-7940(03)00186-6
8. Singh GK, Cupps B, Pasque M, Woodard PK, Holland MR, Ludomirsky A. Accuracy and reproducibility of strain by speckle tracking in pediatric subjects with normal heart and single ventricular physiology: a two-dimensional speckle-tracking echocardiography and magnetic resonance imaging correlative study. *J Am Soc Echocardiogr.* 2010;23(11):1143-52. doi:10.1016/j.echo.2010.08.010
9. Levy PT, Machevsky A, Sanchez AA. Reference ranges of left ventricular strain measures by two-dimensional speckle-tracking echocardiography in children: a systematic review and meta-analysis. *J Am Soc Echocardiogr.* 2016;29(3):209-25.e6. doi:10.1016/j.echo.2015.11.016
10. Levy PT, Sanchez-Mejia AA, Machevsky A, Fowler S, Holland MR, Singh GK. Normal ranges of right ventricular systolic and diastolic strain measures in children: a systematic review and meta-analysis. *J Am Soc Echocardiogr.* 2014;27(5):549-60, e3. doi:10.1016/j.echo.2014.01.015
11. López C, Mertens L, Dragulescu A. Strain and rotational mechanics in children with single left ventricles after Fontan. *J Am Soc Echocardiogr.* 2018;31(12):1297-306. doi:10.1016/j.echo.2018.09.004
12. Adar A, Ghelani SJ, Sleeper LA. Normal values for left ventricular strain and synchrony in children based on speckle tracking echocardiography. *Am J Cardiol.* 2019;123(9):1546-1554. doi:10.1016/j.amjcard.2019.01.044
13. Kaneko S, Khoo NS, Smallhorn JF, Tham EB. Single right ventricles have impaired systolic and diastolic function compared to those of left ventricular morphology. *J Am Soc Echocardiogr.* 2012;25(11):1222-30. doi:10.1016/j.echo.2012.08.005
14. Petko C, Hansen JH, Scheewe J, Rickers C, Kramer H-H. Comparison of longitudinal myocardial deformation and dyssynchrony in children with left and right ventricular morphology after the Fontan operation using two-dimensional speckle tracking. *Congenit Heart Dis.* 2012;7(1):16-23. doi:10.1111/j.1747-0803.2011.00607.x
15. Rios R, Ginde S, Saudek D, Loomba RS, Stelter J, Frommelt P. Quantitative echocardiographic measures in the assessment of single ventricle function post-Fontan: Incorporation into routine clinical practice. *Echocardiography.* 2017;34(1):108-15. doi:10.1111/echo.13408
16. Koopman LP, Geerdink LM, Bossers SSM. Longitudinal myocardial deformation does not predict single ventricle ejection fraction assessed by cardiac magnetic resonance imaging in children with a total cavopulmonary connection. *Pediatr Cardiol.* 2018;39(2):283-93. doi:10.1007/s00246-017-1753-z
17. Lai WW, Geva T, Shirali GS. Guidelines and standards for performance of a pediatric echocardiogram: a report from the Task Force of the Pediatric Council of the American Society of Echocardiography. *J Am Soc Echocardiogr.* 2006;19(12):1413-1430. doi:10.1016/j.echo.2006.09.001
18. Cerqueira MD, Weissman NJ, Dilsizian V. Standardized myocardial segmentation and nomenclature for tomographic imaging of the heart. A statement for healthcare professionals from the Cardiac Imaging Committee of the Council on Clinical Cardiology of the American Heart Association. *Circulation.* 2002;105(4):539-42.
19. Kilner PJ, Geva T, Kaemmerer H, Trindade PT, Schwitter J, Webb GD. Recommendations for cardiovascular magnetic resonance in adults with congenital heart disease from the respective working groups of the European Society of Cardiology. *Eur Heart J.* 2010;31(7):794-805. doi:10.1093/eurheartj/ehp586
20. Tutarel O, Orwat S, Radke RM. Assessment of myocardial function using MRI-based feature tracking in adults after atrial repair of transposition of the great arteries: reference values and clinical utility. *Int J Cardiol.* 2016;220:246-50. doi:10.1016/j.ijcard.2016.06.108
21. Tweddell JS, Nersesian M, Mussatto KA. Fontan palliation in the modern era: factors impacting mortality and morbidity. *Ann Thorac Surg.* 2009;88(4):1291-99. doi:10.1016/j.athoracsur.2009.05.076
22. Ohuchi H, Yasuda K, Hasegawa S. Influence of ventricular morphology on aerobic exercise capacity in patients after the Fontan operation. *J Am Coll Cardiol.* 2001;37(7):1967-74. doi:10.1016/s0735-1097(01)01266-9
23. Kotani Y, Kasahara S, Fujii Y. Clinical outcome of the Fontan operation in patients with impaired ventricular function. *Eur J Cardiothorac Surg.* 2009;36(4):683-687. doi:10.1016/j.ejcts.2009.04.042
24. Julsrud PR, Weigel TJ, Van Son JA. Influence of ventricular morphology on outcome after the Fontan procedure. *Am J Cardiol.* 2000;86(3):319-23. doi:10.1016/s0002-9149(00)00922-x
25. Piran S, Veldtman G, Siu S, Webb GD, Liu PP. Heart failure and ventricular dysfunction in patients with single or systemic right ventricles. *Circulation.* 2002;105(10):1189-94.
26. Menon SC, Dearani JA, Cetta F. Long-term outcome after atrioventricular valve surgery following modified Fontan operation. *Cardiol Young.* 2011;21(1):83-8. doi:10.1017/S1047951110001538
27. Hosein RBM, Clarke A, McGuirk SP. Factors influencing early and late outcome following the Fontan procedure in the current era. The "Two Commandments"? *Eur J Cardiothorac Surg.* 2007;31(3):344-352; discussion 353. doi:10.1016/j.ejcts.2006.11.043
28. Liu B, Sinha A, Moody W, Leyva F, Edwards N, Steeds R. 111 new normal ranges and superior reproducibility of 3d myocardial strain on cardiovascular magnetic resonance-feature tracking. *Heart.* 2017;103(Suppl 5):A82-A83. doi:10.1136/heartjnl-2017-311726.110
29. Shang Q, Patel S, Steinmetz M. Myocardial deformation assessed by longitudinal strain: chamber specific normative data for CMR-feature tracking from the German competence network for congenital heart defects. *Eur Radiol.* 2018;28(3):1257-66. doi:10.1007/s00330-017-5034-2
30. Salehi Ravesh M, Rickers C, Bannert FJ. Longitudinal deformation of the right ventricle in hypoplastic left heart syndrome: a comparative study of 2D-feature tracking magnetic resonance imaging and 2D-speckle tracking echocardiography. *Pediatr Cardiol.* 2018;39(6):1265-75. doi:10.1007/s00246-018-1892-x
31. Hu L, Sun A, Guo C. Assessment of global and regional strain left ventricular in patients with preserved ejection fraction after Fontan operation using a tissue tracking technique. *Int J Cardiovasc Imaging.* Published online August 18, 2018. doi:10.1007/s10554-018-1440-z
32. Ishizaki U, Nagao M, Shiina Y. Global strain and dyssynchrony of the single ventricle predict adverse cardiac events after the Fontan procedure: analysis using feature-tracking cine magnetic resonance imaging. *J Cardiol.* Published online September 3, 2018. doi:10.1016/j.jjcc.2018.07.005
33. Hu L, Wang Q, Gregory BP. Quantitative comparison of two-dimensional and three-dimensional strain measurement using MRI feature tracking in repair Fontan patients and normal child volunteers. *BMC Med Imaging.* 2020;20(1):8. doi:10.1186/s12880-020-0413-6
34. André F, Robbers-Visser D, Helling-Bakki A. Quantification of myocardial deformation in children by cardiovascular magnetic resonance feature tracking: determination of reference values for left ventricular strain and strain rate. *J Cardiovasc Magn Reson.* 2016;19(1):8. doi:10.1186/s12968-016-0310-x
35. Taylor RJ, Moody WE, Umar F. Myocardial strain measurement with feature-tracking cardiovascular magnetic resonance: normal values. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging.* 2015;16(8):871-81. doi:10.1093/ehjci/jev006