

Impacto de la ecocardiografía tridimensional

Impact of Three-Dimensional Echocardiography

KARIMA ADDETIA, VÍCTOR MOR-AVI, ROBERTO M. LANG

ANTECEDENTES

En la última década, el desarrollo de la ecocardiografía tridimensional (E3D) en tiempo real ha producido un avance notable en las técnicas de imagen cardíaca. Las imágenes 3D aumentan la visualización de las válvulas cardíacas y mejoran la cuantificación del volumen cavitario, la fracción de eyección y la masa ventricular. Estas medidas son más precisas que las que se obtienen mediante técnicas 2D convencionales, porque la E3D elimina errores asociados con el falso acortamiento (*foreshortening*) y la modelización geométrica. Asimismo, ayuda a guiar procesos intervencionistas que incluyen el cierre de defectos septales y fugas paravalvulares, así como la implantación percutánea de dispositivos valvulares aórticos y mitrales.

Las primeras reconstrucciones de imágenes 3D se obtuvieron fuera de línea en los años ochenta utilizando imágenes 2D gatilladas a través de la respiración y el electrocardiograma (ECG). Este era un método rutinario y lento y propenso a presentar artefactos de motilidad. En los años noventa se introdujeron las imágenes volumétricas en tiempo real utilizando transductores con conjuntos de cristales piezoeléctricos capaces de capturar volúmenes piramidales en lugar de secciones transversales en un solo plano (Figura 1, versión *on line*). Sin embargo, la capacidad computacional requerida para analizar datos 3D en tiempo real era insuficiente, con el resultado de imágenes de calidad subóptima que limitaban la técnica a los laboratorios de investigación. Posteriormente, en la década siguiente, se desarrollaron transductores matriciales con mayor número de elementos piezoeléctricos y procesamiento en paralelo, lo que se tradujo en imágenes volumétricas en tiempo real de mejor calidad. (1) Paralelamente, estos evolucionaron al punto de que se pudieran alojar dentro de la punta de un transductor de ecocardiografía transeofágica (ETE).

ECOCARDIOGRAFÍA TRANSTORÁCICA Y TRANSEOFÁGICA 3D

La ecocardiografía transtorácica 3D (ETT) es particularmente útil para cuantificar volúmenes ventriculares izquierdos y derechos. La ETE 3D es más eficaz para

imágenes valvulares y como guía de procedimientos, porque proporciona una resolución espacial mayor que permite una visualización detallada de las válvulas mitral y aórtica, el *septum* interauricular y la orejuela auricular izquierda. También proporciona vistas excelentes de las válvulas bioprotésicas y mecánicas, incluyendo valvas, anillos y soportes.

CÁMARAS CARDÍACAS

El volumen y la fracción de eyección se evalúan mejor utilizando un conjunto de datos de volumen total. Para lograr este objetivo, típicamente se obtiene un conjunto de datos piramidales del volumen total de la estructura de interés, en la cual varios subvolúmenes adquiridos durante ciclos cardíacos consecutivos se “cosen” entre sí para crear un conjunto de datos representativo del ciclo cardíaco (Figura 2).

Ventrículo izquierdo

La E3D permite obtener información exacta de los volúmenes del ventrículo izquierdo (VI) y de la fracción de eyección, así como la forma del VI y el *strain* (deformación) global y regional. La cuantificación de los volúmenes del VI y de la función es esencial para optimizar el momento oportuno de la cirugía en pacientes con enfermedad valvular. Esta información también es útil en la toma de decisiones relacionada con la implantación de un desfibrilador y la terapia de resincronización cardíaca.

Volumen ventricular izquierdo: Numerosos estudios han demostrado que los volúmenes del VI derivados de la ETT 3D son más exactos que los valores 2D cuando se comparan con la resonancia magnética cardíaca (RMC), ya que evitan los supuestos geométricos y minimizan el falso acortamiento. Asimismo, los volúmenes y la fracción de eyección del VI obtenidos a partir de E3D son más reproducibles que las mediciones 2D. Existen tres métodos para cuantificar el volumen y la función del VI a partir del conjunto de datos de E3D (Figura 3):

- **Técnica biplanar guiada por E3D:** Este enfoque se basa en la selección de vistas apicales 2D no deformadas de 4 y 2 cámaras utilizando

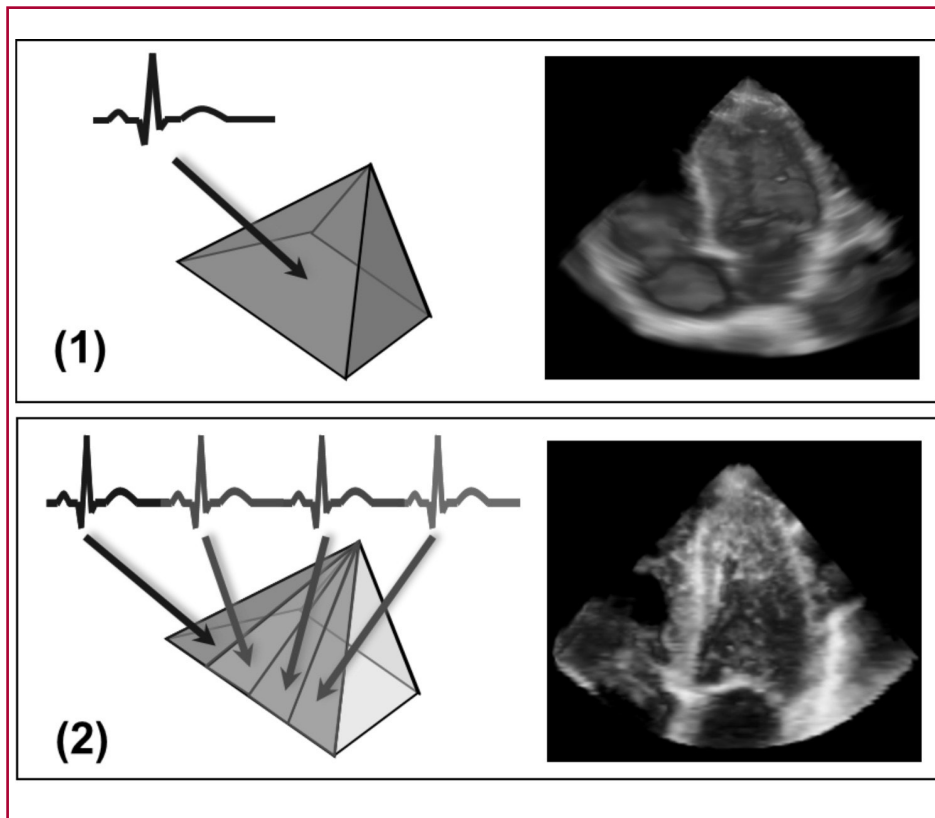


Fig. 2. Dos métodos disponibles en la actualidad para crear una imagen dinámica 3D del corazón latiendo: "cosiendo" subvolúmenes dinámicos escaneados durante ciclos cardíacos consecutivos (1) y disminuyendo el número de fases cardíacas para posibilitar la imagen de todo el corazón en un único ciclo cardíaco (2). El método utilizado en 1 permite la obtención de imágenes a frecuencias de muestreo más altas (mayor resolución temporal), con la desventaja potencial de tener "artefactos de costura" como resultado de los cambios en la posición del corazón respecto del transductor. El método 2 evita los artefactos de motilidad, pero a expensas de menor frecuencia de adquisición intrínseca (menor resolución temporal). (Reproducida con autorización de Mor-Avi V, Lang RM. Transthoracic Three-Dimensional Echocardiography. In: Gillam LD and Otto CM, editors. Advanced Approaches in Echocardiography. Philadelphia: Elsevier; 2012.)

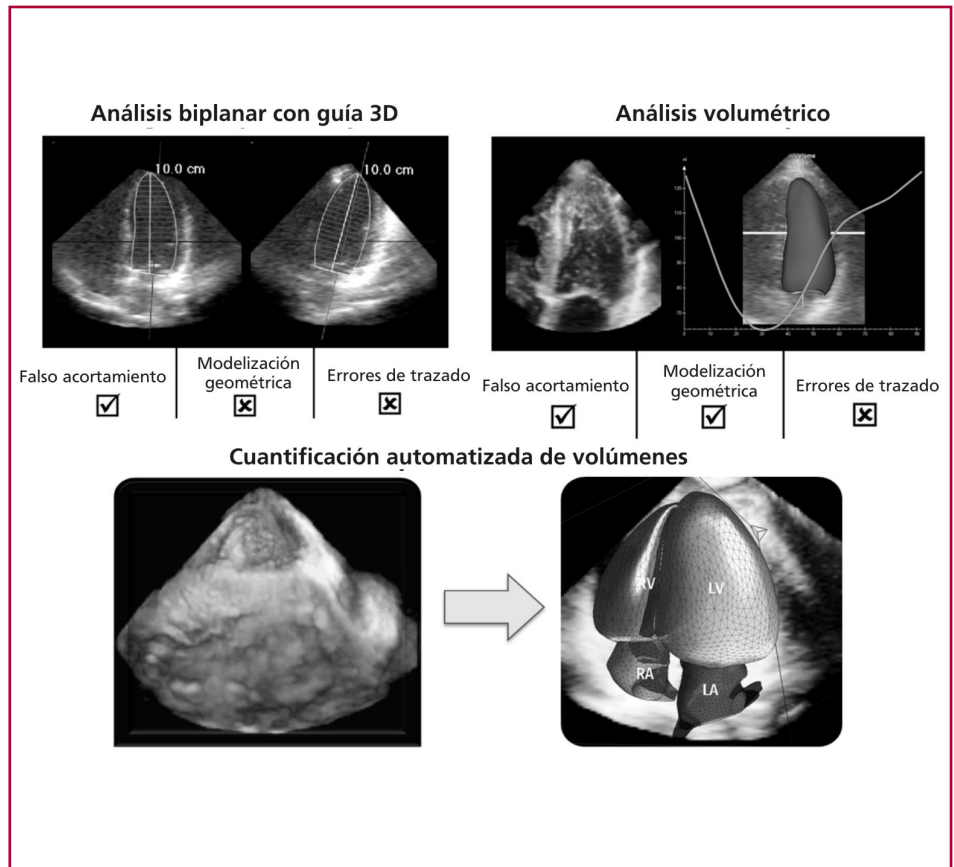
reconstrucción multiplanar a partir de un conjunto de datos piramidales. Luego se emplea el método de discos para calcular los volúmenes del VI. (2) Sin embargo, esta metodología todavía depende de supuestos geométricos para calcular volúmenes y puede ser imprecisa en ventrículos con alteraciones de la motilidad parietal regional.

- **Cuantificación directa del volumen:** Este método está basado en la detección semiautomática de la superficie endocárdica del VI, seguida del cálculo del volumen contenido dentro de esa superficie. Este enfoque no depende de la modelización geométrica y se ha encontrado que es más preciso en presencia de formas ventriculares distorsionadas.
- **Inteligencia anatómica:** Se basa en la identificación y la determinación del modelo cameral en forma totalmente automática, y proporciona información del volumen de todas las cámaras cardíacas en forma simultánea.

Se ha demostrado que los volúmenes medidos utilizando estos métodos están subestimados respecto de los obtenidos con RMC. Esto se debe a que la resolución espacial de la E3D no es suficientemente alta como para que permita diferenciar tejido miocárdico de trabéculas endocárdicas. (3) Asimismo, el verdadero fin de sístole puede no ser capturado con exactitud debido a la baja resolución temporal que produce mediciones inexactas del volumen de fin de sístole y de la fracción de eyección.

Masa ventricular izquierda: La masa ventricular izquierda es un predictor importante de morbilidad y mortalidad, especialmente en pacientes con hipertensión sistémica. Las mediciones de masa ventricular izquierda dependen no solo de la visualización endocárdica, sino también de la epicárdica, lo que implica un desafío aun mayor (Figura 4, versión *on line*). La masa ventricular izquierda se puede medir usando cualquiera de los métodos para medir volúmenes del VI a partir de imágenes de E3D: la técnica biplanar guiada por E3D, (4) el análisis volumétrico (5) y la inteligencia anatómica. Para obtener medidas precisas de masa ventricular izquierda a partir de conjuntos de datos de E3D se deben seguir estrictamente las mismas guías para el trazado endocárdico que para las mediciones de volumen ventricular izquierdo, de modo de evitar la subestimación de la masa ventricular izquierda. Los límites epicárdicos deben ser cuidadosamente identificados en diferentes vistas. Recientemente, mediante la detección volumétrica semiautomática de superficies endocárdicas y epicárdicas, se validó la masa ventricular izquierda utilizando la RMC como patrón de referencia. (6) Se debe señalar que las mediciones de masa ventricular izquierda obtenidas a través de E3D fueron más precisas que las de RMC y más reproducibles que las logradas por medio de técnicas convencionales 2D biplanares.

Fig. 3. Existen tres métodos para cuantificar el volumen ventricular izquierdo a partir de conjuntos de datos 3D. El primero utiliza el análisis biplanar con guía 3D y puede realizarse empleando la regla de Simpson en dos planos ortogonales (generalmente de imágenes de 4 y 2 cámaras). El segundo utiliza la detección semiautomática del límite endocárdico y construye una curva de volumen en función del tiempo (*curva imagen superior derecha*). El tercero emplea un *software* totalmente automático para cuantificar los volúmenes y las fracciones de eyección auriculares y ventriculares izquierdos. Actualmente, este *software* se encuentra en etapa de prueba y validación. El corazón derecho aún no ha sido incluido en el *software*. resuelto; permanece sin resolver. (Reproducida con autorización de Mor-Avi V, Lang RM. Transthoracic Three-Dimensional Echocardiography. In: Gillam LD and Otto CM, editors. Advanced Approaches in Echocardiography. Philadelphia: Elsevier; 2012.)



Deformación miocárdica: Los desarrollos más recientes incluyen mediciones de *strain* 3D, que puede realizarse mediante rastreo de marcadores (*speckle tracking*). (7) La ecocardiografía con rastreo de marcadores es una técnica empleada fuera de línea que sigue el movimiento miocárdico cuadro a cuadro. Esta técnica se ha aplicado ampliamente con anterioridad a imágenes ecocardiográficas 2D permitiendo la evaluación cuantitativa de la deformación ventricular izquierda. La ventaja principal de los índices de deformación sobre la evaluación tradicional de motilidad parietal es que son menos afectados por la traslación cardíaca y son independientes del ángulo de incidencia Doppler. Actualmente, el rastreo de marcadores se puede aplicar a datos obtenidos por medio de E3D, posibilitando la medición de parámetros de deformación en el espacio 3D. Recientemente se ha demostrado que el rastreo de marcadores 2D requiere adquisiciones con una alta resolución temporal (> 60 cuadros/seg) para evitar la pérdida de marcadores debido a su desplazamiento fuera del plano de imagen, mientras que el rastreo de marcadores 3D es menos exigente (> 18 cuadros/seg). (8) Esto ocurre porque con E3D los marcadores permanecen dentro del volumen escaneado independientemente de su dirección durante el ciclo cardíaco.

Ventrículo derecho

Las mediciones de los volúmenes y de la fracción de eyección del ventrículo derecho (VD) tienen valor pronóstico en diversas enfermedades, que incluyen la enfermedad cardíaca congénita derecha, la hipertensión pulmonar y la insuficiencia cardíaca. La estimación de los volúmenes del VD usando modelos geométricos de imágenes 2D ha planteado grandes desafíos debido a la forma de media luna de esta cámara. Existen dos métodos diferentes para cuantificar el volumen y la función ventricular derecha a partir de datos de E3D (Figura 5).

- **Suma de discos o método de discos:** Mediante este método, el operador traza el contorno del borde endocárdico del VD en fin de sístole y fin de diástole, a partir de un conjunto de vistas en eje corto que abarca el VD desde la base al ápex. Luego, el *software* calcula los volúmenes de fin de sístole y de fin de diástole sumando los subvolúmenes de los distintos cortes.
- **Cuantificación directa del volumen:** Este método está basado en la detección semiautomática de la superficie endocárdica del VD, seguida del cálculo del volumen contenido dentro de esta superficie. El operador trabaja fuera de línea con cuadros (*frames*)

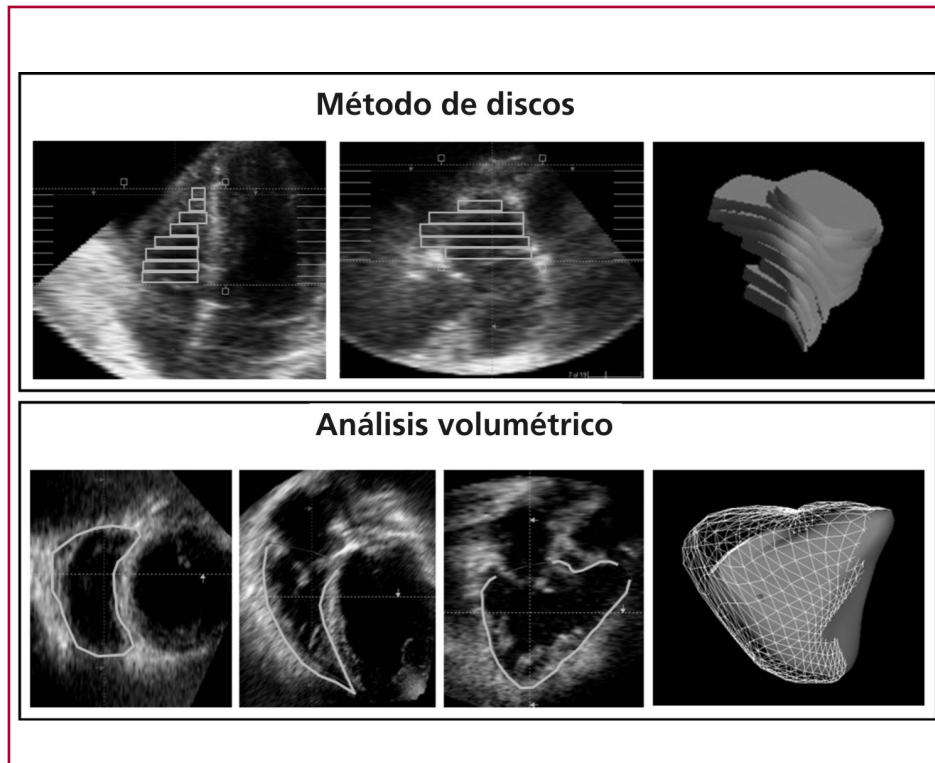


Fig. 5. Existen dos métodos para cuantificar el volumen del ventrículo derecho (VD) a partir de conjuntos de datos 3D. El primero utiliza la técnica de discos apilando múltiples trazados de los límites del VD en numerosas vistas en eje corto que abarcan el ventrículo desde la base al ápex (*imagen superior*). Esto se realiza para imágenes de fin de sístole y de fin de diástole con el fin de calcular la fracción de eyección del VD. El segundo emplea la detección semiautomática de la superficie endocárdica del VD (desde límites del VD señalados manualmente en tres vistas ortogonales) y calcula el volumen del VD comprendido dentro de la superficie detectada (*imagen inferior*). La superficie es trazada automáticamente a lo largo del ciclo cardíaco, posibilitando la obtención de los volúmenes de fin de sístole y fin de diástole para el cálculo de la fracción de eyección.

de fin de diástole y fin de sístole en vistas sagital, de 4 cámaras y coronal a partir de conjuntos de datos de volumen total de E3D. Este método se ha validado utilizando modelos *in vitro* e *in vivo* con el empleo de RMC como patrón de referencia. (9) El uso clínico habitual de la E3D para esta aplicación es limitado debido a la necesidad de datos transtóricos de excelente calidad.

Aurícula izquierda

El agrandamiento de la aurícula izquierda (AI) es un marcador a largo plazo de elevación de la presión auricular izquierda. Se asocia con una incidencia mayor de fibrilación auricular, accidente cerebrovascular isquémico y mala evolución cardiovascular, que incluye aumento del riesgo global de mortalidad luego de un infarto de miocardio e incremento de la tasa de eventos en pacientes con disfunción ventricular izquierda grave.

El volumen de la AI está parcialmente caracterizado por métodos 2D basados en supuestos geométricos. La adquisición de datos auriculares izquierdos para la medición del volumen y función puede hacerse a partir de vistas apicales de 4 cámaras de ETT o vistas transgástricas de ETE. De manera similar al VI, los límites de la AI pueden identificarse en el espacio 3D y reconstruirse sus superficies endocárdicas. Recientemente, las mediciones del volumen de la AI usando E3D se han validado por RMC, el estándar de referencia actual, y han demostrado que son superiores a las mediciones 2D (Figura 6). (10) Las mediciones de volumen se prefieren a las dimensiones lineales porque permiten una

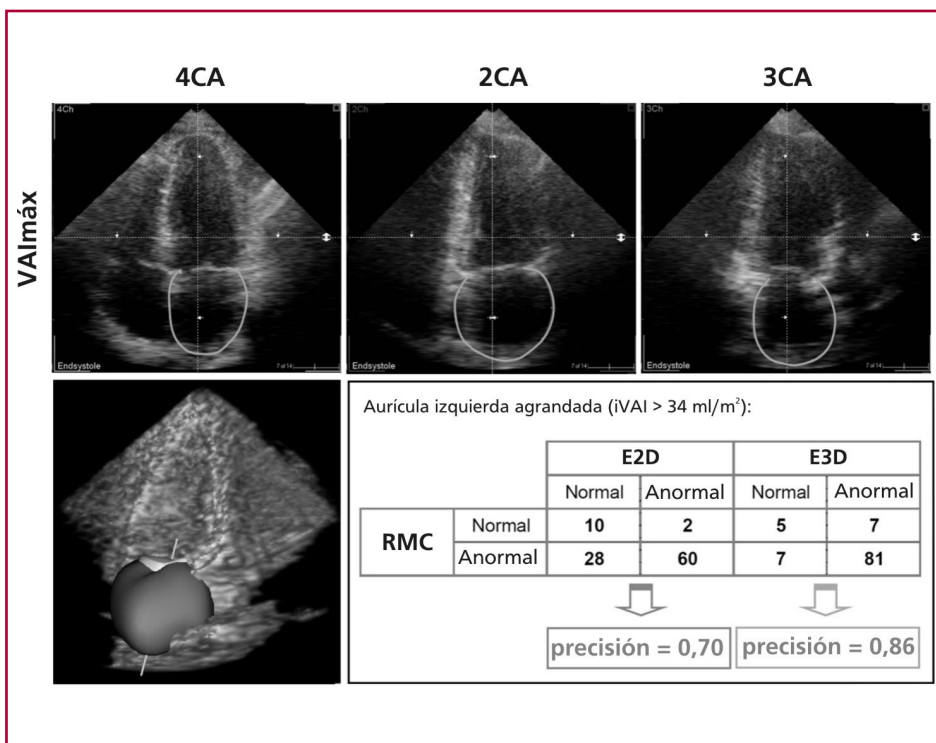
evaluación más exacta de la remodelación asimétrica de la AI. Tanto el método de área-longitud como el método biplanar de discos dependen de la elección del sitio y la dirección del eje menor auricular izquierdo y de la capacidad de visualizar con claridad los límites de la AI. Debido a su independencia de postulados geométricos, la E3D es ideal para la medición de volúmenes auriculares izquierdos. A pesar de que existe una clara evidencia del valor pronóstico del agrandamiento auricular izquierdo medido por ecocardiografía 2D, no existen en la actualidad datos comparables para volúmenes derivados de E3D.

El rápido desarrollo de la electrofisiología cardíaca ha renovado el interés en la anatomía de las cavidades auriculares y de sus estructuras diana. A pesar de que habitualmente se utiliza fluoroscopia para localizar puntos de referencia anatómicos durante los procedimientos electrofisiológicos, esta técnica está limitada por su proyección 2D de estructuras complejas 3D, y aunque la tomografía computarizada multicorte se emplea cada vez más frecuentemente para resolver este problema, está asociada con radiación ionizante. Por lo tanto, esta es un área en la cual podremos ver muchas más aplicaciones de la E3D en el futuro.

VÁLVULAS CARDÍACAS

La E3D ha posibilitado la visualización en tiempo real de la morfología patológica de la anatomía valvular y subvalvular a partir de un conjunto de datos volumétricos único, sin necesidad de reconstrucción fuera de

Fig. 6. Luego de trazar manualmente la cavidad de la aurícula izquierda en fin de sístole y fin de diástole en tres vistas apicales obtenidas del conjunto de datos de E3D (*imagen superior*), se reconstruye la superficie endocárdica auricular izquierda en tres dimensiones, posibilitando la medición directa del volumen de la aurícula izquierda VAI (*imagen inferior izquierda*). El volumen medido concuerda más con los volúmenes obtenidos por RMC, mejorando el diagnóstico del agrandamiento auricular izquierdo en comparación con la E2D (*imagen inferior derecha*). (Modificada con autorización de Mor-Avi V, Yodwut C, Jenkins C, Kühl H, Nesser HJ, Marwick TH, et al. Real-time 3D echocardiographic quantification of left atrial volume: multicenter study for validation with CMR. J Am Coll Cardiol Imaging 2012;5:769-77.)



línea, suponiendo un valor agregado en la evaluación de la anatomía valvular, la planificación quirúrgica, como guía durante los procedimientos y en la evaluación posprocedimiento de la enfermedad valvular. Esto es especialmente cierto en el caso de imágenes de ETE 3D. Se prefiere el modo *zoom* en la evaluación de las válvulas, ya que provee la más alta resolución espacial y temporal, especialmente cuando se realiza sobre 4 latidos. En la Figura 7 (versión *on line*) se muestra cómo el conjunto de datos de E3D se puede recortar para obtener vistas óptimas de las cuatro válvulas cardíacas. Nótese que la válvula tricúspide se visualiza mejor desde una orientación transtorácica, mientras que el resto de las válvulas se ven mejor con ETE.

Válvula mitral

La imagen de la válvula mitral (VM) se puede obtener mediante ETT 3D o ETE 3D. La E3D mejora la medición y la evaluación de una cantidad de parámetros de la VM, que incluyen la forma y la dinámica del anillo mitral, (11-14) las valvas, la línea de coaptación, como también la geometría subvalvular y las relaciones intervalvulares. La E3D es capaz de proporcionar la caracterización volumétrica del aparato mitral y la evaluación de las relaciones espaciales entre sus componentes anatómicos, aportando información valiosa acerca de los mecanismos fisiopatológicos relacionados con la enfermedad isquémica y degenerativa. (15-17)

Junto con la mejor calidad de imagen se ha desarrollado un *software* comercial para proporcionar un método de cuantificación objetiva de los cambios de la

VM. Utilizando conjuntos de datos de E3D, se pueden delinear el anillo mitral y las valvas para crear un modelo 3D de la VM (Figura 8, imagen izquierda). A partir de estos modelos, es posible realizar mediciones volumétricas de diversos parámetros geométricos del anillo mitral y las valvas (Figura 8, imágenes central y derecha). Estas dimensiones han provisto información sobre los efectos de diversas patologías mitrales y pueden ser útiles para guiar los procedimientos de reparación. (18-21)

Enfermedad degenerativa de la válvula mitral: La visualización por E3D del aparato mitral a través de la vista de 2 cámaras a nivel transgástrico permite visualizar la patología del músculo papilar, incluyendo fibrosis, necrosis o rotura de las cuerdas. La ETE es especialmente útil en el diagnóstico de enfermedad degenerativa de la VM. La precisión diagnóstica de la ETE 3D se cotejó con la ETE 2D en un gran número de pacientes sometidos a reparación de prolapso mitral, en los cuales los hallazgos ecocardiográficos se compararon con los hallazgos quirúrgicos. La ETE 3D identificó correctamente el prolapso en el 92% de los pacientes *versus* el 78% con ETE 2D. (22-25). La altura y el volumen de la protrusión medidos por E3D fueron los predictores más importantes de presencia de enfermedad degenerativa de la VM. (22) Las dimensiones del anillo mitral obtenidas bajo guía de E3D han demostrado ser precisas y reproducibles en comparación con mediciones intraquirúrgicas directas. (26) Aunque la determinación del tamaño del anillo de anuloplastia mitral es controversial, la medición exacta

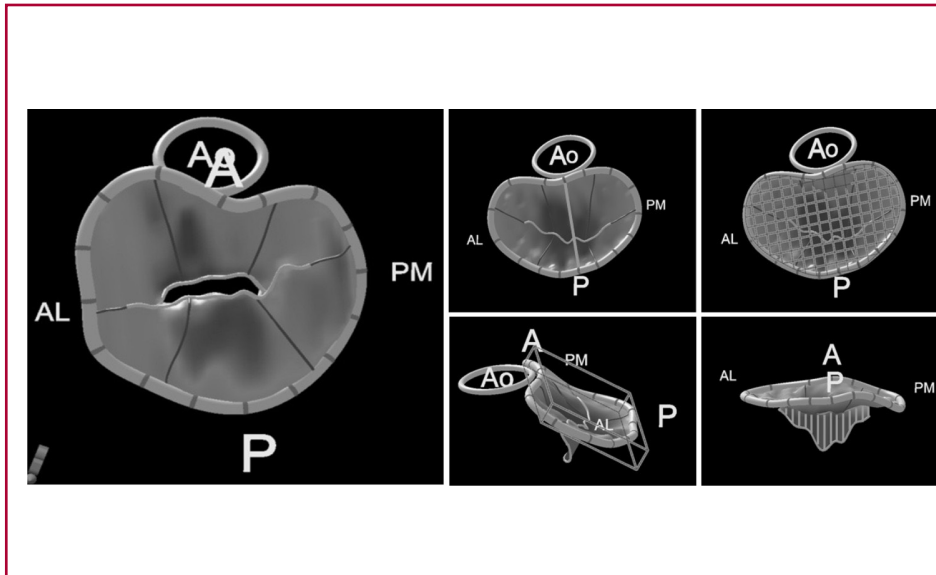


Fig. 8. Mapa topográfico color de la válvula mitral con segmento P2 prolapsado y segmento P3 elevado (*imagen a la izquierda*). El defecto en la línea de coaptación ocurre al final de la sístole y corresponde al área anatómica del orificio regurgitante en este paciente. Se puede medir una cantidad de parámetros geométricos de la válvula mitral, incluyendo el diámetro anteroposterior (*imagen superior central*), la altura del anillo (*imagen inferior central*), el área de la superficie (*imagen superior a la derecha*), la altura de la línea de coaptación (*imagen inferior derecha*) entre otros. A: Anterolateral. Ao: Aorta. P: Posterior. PM: Posteromedial.

mediante E3D puede potencialmente ayudar a evitar el movimiento anterior sistólico de la válvula mitral (MAS) después de la cirugía. (27, 28) La propensión al desarrollo de MAS luego de la reparación de la VM depende en parte del grado de los ángulos aortomitral y aortoseptal, la presencia de exceso de tejido y el desplazamiento de la línea de coaptación mitral hacia la valva posterior, todo lo cual puede ser bien caracterizado por E3D. (27-30) Al cuantificar la longitud de las valvas anterior y posterior, el área de la superficie y el volumen de la protrusión antes y después de la cirugía, el análisis de E3D ayuda a identificar a los pacientes con mayor riesgo de desarrollar MAS.

Regurgitación mitral: Las técnicas de imagen tridimensional han demostrado que el orificio regurgitante no es circular (31) y que su forma varía entre las distintas enfermedades de la VM. Se ha verificado, por ejemplo, que la regurgitación mitral funcional tiene un orificio regurgitante más semejante a una forma de media luna, mientras que las alteraciones degenerativas de la VM tienden a poseer una forma más elíptica o circular. (32, 33) La evaluación 3D de la regurgitación mitral (RM) posibilita una descripción más completa del área del orificio regurgitante efectivo (AORE) a través del área de la vena contracta, el área de superficie de isovelocidad proximal (PISA: *proximal isovolumic surface area*) y el área anatómica del orificio regurgitante (AAOR).

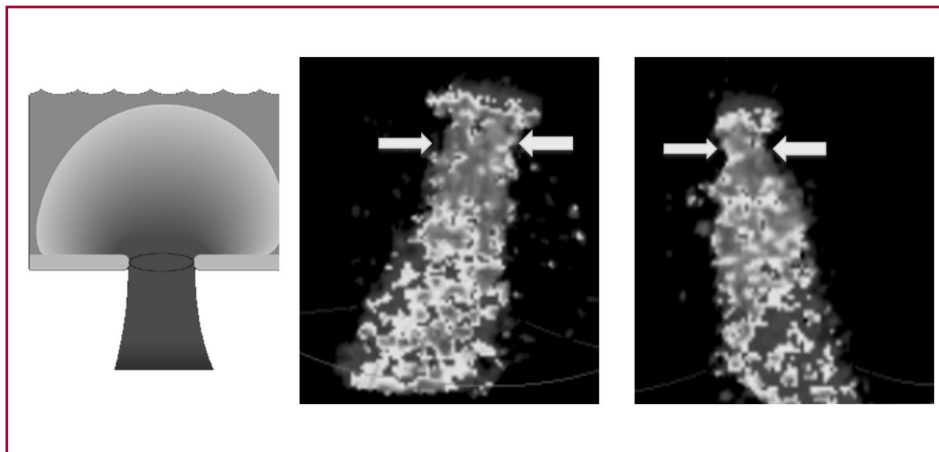
Los métodos 2D para cuantificar el AORE requieren dos suposiciones: 1) la zona de convergencia es hemisférica, y 2) el orificio regurgitante es circular y está situado centralmente (Figura 9). Las mediciones basadas en E3D han demostrado que estas suposiciones son a menudo inexactas y, como resultado, el AORE es subestimado, especialmente en el caso de chorros regurgitantes excéntricos. Hoy es posible el trazado directo de planos radiales de la zona PISA y

la reconstrucción del área de superficie total a partir de conjuntos de datos de E3D, evitando la necesidad de postulados geométricos. Se demostró que el área de la vena contracta derivada de E3D se correlaciona mejor con el AORE obtenido mediante Doppler que con el diámetro 2D de la vena contracta. En numerosos estudios se han comparado las mediciones del área de la vena contracta por E3D con diversos parámetros cuantitativos 2D, hallando regularmente una mejor precisión y reproducibilidad con mediciones de E3D. (34-36) El *software* disponible en la actualidad permite el trazado directo de la zona de convergencia PISA en múltiples imágenes de planos radiales con reconstrucción del área de superficie total, evitando suposiciones geométricas. (37, 38)

Un método novedoso para cuantificar la RM por E3D es el trazado del AAOR mediante visualización volumétrica *en-face* del orificio de la VM. La ventaja potencial del AAOR es que mide directamente el verdadero orificio anatómico en tres dimensiones, tomando en cuenta la compleja geometría no planar de este orificio. (39, 40) Las mediciones del AAOR demostraron buena correlación con el AORE obtenido a través de PISA 2D en pacientes que presentaban orificios con chorros centrales y regurgitación única. Sin embargo, en pacientes con orificios múltiples o chorros excéntricos, se vio que el AAOR era considerablemente más grande, enfatizando la necesidad de mediciones del AAOR 3D. (39)

Las principales desventajas actuales del flujo color por E3D incluyen: 1) disponibilidad limitada y el hecho de que esta nueva tecnología requiere habilidades específicas que aún no están ampliamente disponibles, 2) la adquisición del volumen total por Doppler color requiere numerosos ciclos cardíacos, lo cual puede ser problemático en pacientes con arritmias, 3) actualmente, la cuantificación en línea de la zona de

Fig. 9. El Doppler color 3D se puede usar para visualizar el chorro de regurgitación mitral. Nótese que la zona PISA es hemielíptica más que esférica y que la vena contracta no es circular. La porción más angosta del chorro de la vena contracta se ve claramente y puede medirse. (Reproducida con autorización de Freed BF, et al. Mitral Valve: Normal Aspects. In: Lang RM, Sherman SK, Shirali G, Mor-Avi V, editors. Comprehensive Atlas of 3D Echocardiography. Philadelphia: Wolters Kluwer; 2012.)



convergencia del flujo, de la vena contracta o del AAOR debe realizarse manualmente, requiriéndose métodos semiautomáticos de evaluación para que el análisis de datos sea más eficiente, amigable y menos subjetivo, 4) la resolución temporal más baja del Doppler color podría afectar la selección adecuada de la región con mayor convergencia de flujo, 5) actualmente no existen guías que asistan en la cuantificación 3D de la RM, ni tampoco hay un estándar de referencia validado para comparar los hallazgos 2D y 3D. A pesar de estos obstáculos, la E3D puede convertirse en una herramienta valiosa de evaluación de la RM en el futuro.

Estenosis mitral: El espectro de lesiones en la estenosis mitral (EM) incluye la fusión comisural, el engrosamiento de las valvas y la fusión de las cuerdas, lo cual conduce a restricción de las valvas, especialmente durante la sístole. La E3D tiene muchas ventajas sobre la E2D para el examen de la anatomía de la válvula en la EM. (41) Mediante la E3D y su capacidad de visualizar la VM tanto desde la perspectiva auricular como ventricular izquierda, la evaluación morfológica de la VM es potencialmente más precisa.

Para definir la mejor estrategia terapéutica, se requieren mediciones exactas del área del orificio de la VM. Los métodos utilizados actualmente para medir el área del orificio mitral, como la planimetría 2D, el tiempo de hemipresión y la convergencia del flujo están fuertemente influidos por variables hemodinámicas, la hipertrofia ventricular izquierda y la enfermedad valvular asociada. Se piensa que las mediciones directas del área del orificio de la VM son más rigurosas. Hasta el presente esto se ha llevado a cabo utilizando planimetría 2D del área del orificio de la VM, la cual está limitada por la orientación del plano de medición. La E3D permite la visualización de la anatomía de la VM en cualquier plano y orientación que se desee, mejorando la capacidad del operador de obtener una planimetría *en-face* exacta del área de la VM (Figura 10, versión *on line*). Estas mediciones de E3D tienen una buena correlación con las mediciones obtenidas por métodos invasivos empleando la fórmula de Gorlin. (42-44)

Válvula aórtica

La raíz aórtica está compuesta por la válvula aórtica con sus tres valvas semilunares, que forman parte del seno de Valsalva y los triángulos fibrosos intervalvares. Alrededor de los dos tercios del perímetro de la parte inferior de la raíz aórtica está conectado con el *septum*, mientras que el resto está vinculado a la válvula mitral a través de una continuidad fibrosa, también conocida como cortina aortomitral. La definición quirúrgica del anillo aórtico se refiere a la estructura con forma de corona demarcada por las articulaciones de las valvas de la válvula aórtica, mientras que la definición por imagen se refiere al anillo virtual o proyectado que une los tres puntos de inserción más basales de las valvas. Hoy en día se admite que el anillo aórtico no es circular, sino más bien elíptico. (45). El área del anillo aórtico normal en el adulto utilizando planimetría por E3D es de $4,0 \pm 0,8 \text{ cm}^2$. (46)

A través de una vista en eje largo con ETT o ETE se puede obtener la imagen de la válvula aórtica de un conjunto de datos piramidales de volumen total de la raíz aórtica, a partir de la cual se puede realizar la planimetría. Este plano de corte puede ser desplazado al tracto de salida del VI (TSVI), el seno de Valsalva o la unión sinotubular para obtener áreas de sección transversal. Los planos de recorte también pueden colocarse en forma perpendicular o paralela al anillo aórtico en la evaluación de la anatomía supraválvular y subválvular para estenosis seriada (Figura 11, versión en línea). Las mediciones de la raíz aórtica por E3D muestran buena correlación con medidas obtenidas por tomografía computarizada (TC) y RMN. (45-53) Asimismo, comparadas con las mediciones de E2D, las medidas obtenidas por medio de E3D han probado que son más reproducibles. (54)

Frente a la E2D, la E3D ha identificado con exactitud la morfología anormal de las valvas aórticas, especialmente de las válvulas bicúspide y cuadrícúspide. (55-59) La E3D también ha demostrado que es útil en la evaluación de los tumores de las valvas, como las excrescencias de Lambl y los fibroelastomas

papilares de la válvula aórtica. (60-62) La E3D también proporciona información sobre la relación espacial con las estructuras circundantes como el TSVI y el anillo mitral (Figura 12, versión *on line*).

Estenosis aórtica: La forma del orificio de la válvula aórtica durante la sístole puede ser estrellada, circular, triangular o una forma intermedia entre estas tres variantes. La E3D ha mejorado la precisión y la reproducibilidad de la cuantificación de la gravedad de la estenosis aórtica a través de 1) mediciones rigurosas del área del TSVI, 2) el uso de la medición volumétrica directa del volumen latido y 3) la planimetría directa del área de la válvula aórtica (AVA). (55, 56, 63-70)

Uno de los métodos más comúnmente usados para la determinación no invasiva del AVA es la ecuación de continuidad, que asume que el área del TSVI es circular. Sin embargo, el análisis de imágenes de E3D ha demostrado que la sección transversal del TSVI es elíptica. Al inferir una forma circular, se puede subestimar el AVA. Se ha probado que la precisión del AVA calculada mediante la ecuación de continuidad mejora utilizando el área planimétrica del TSVI medida a partir de E3D. (57-59, 71) Otro procedimiento para mejorar la evaluación de gravedad de la estenosis aórtica se basa en mediciones volumétricas directas del volumen latido. (72-75) Este método evita la necesidad de medir el TSVI, que constituye una debilidad importante de la ecuación de continuidad. La E3D ha mostrado una mayor exactitud en la determinación del AVA en comparación con la ecuación de continuidad y los métodos 2D. Con este método, el AVA se calcula dividiendo el volumen latido derivado de imágenes 3D por la integral tiempo-velocidad del Doppler de la VA. El AVA definido mediante el volumen latido por E3D fue considerablemente más preciso respecto de áreas derivadas de E2D. Un método alternativo para evaluar el AVA es la planimetría directa a partir de conjunto de datos de E3D. (48-51) Se ha comprobado que se puede medir el AVA por planimetría a través de ETT 3D en el 92% de los pacientes, con valores que se correlacionan bien con planimetría por ETE 2D, los valores de continuidad derivados de ETT y la medición invasiva de AVA. (49, 50, 61)

Regurgitación aórtica: La E3D se ha utilizado para mejorar la cuantificación de la regurgitación aórtica. De manera similar a la regurgitación mitral, la vena contracta sustituye al AORE, y por lo tanto es un buen indicador de regurgitación aórtica grave. Sin embargo, la cuantificación de la vena contracta empleando imágenes de Doppler color 2D está basada en supuestos geométricos frecuentemente erróneos, ya que la forma de los orificios regurgitantes puede variar. Los métodos tridimensionales, que reconstruyen la región de la vena contracta permitiendo la medición del área de sección transversal, han demostrado que son más exactos. (53, 76, 77) Otros métodos de E3D para mejorar la evaluación de la regurgitación aórtica aún deben validarse mejor (Tabla 1).

Válvula tricúspide

La utilidad de la E3D en la evaluación de la enfermedad de la válvula tricúspide (VT) recién se está comenzando a explorar. El área normal del anillo tricúspideo es de aproximadamente 8-12 cm² y alrededor de un 20% mayor que el área correspondiente del anillo mitral. Mediante E3D, se ha visto que el anillo tricúspideo no es plano, sino con forma de silla de montar elíptica. (65-67) Su forma no planar es menor que la de la VM, con un ángulo más amplio de 170°. (78) Un estudio reciente encontró que las mediciones de E3D del anillo tricúspideo son comparables a las obtenidas mediante imágenes de RMC, (79) lo cual puede tener implicaciones importantes en la planificación de la cirugía de la VT.

La adquisición de imágenes de la VT se realiza mejor con ETT que con ETE debido a que la VT es una estructura anterior. La ETT 3D de la VT es posible en el 90-95% de los pacientes. (80, 81) La adquisición de imágenes de ETT 3D para la visualización de la VT puede hacerse con vistas de 4 cámaras apicales y del flujo de entrada al VD en eje largo paraesternal. Mediante el modo *zoom* en la vista apical o de flujo de entrada del VD se puede visualizar la VT, ya sea desde la perspectiva de la AD o de la AI (Figura 13, versión *on line*).

Regurgitación tricúspidea: La E3D ha mejorado la comprensión de la morfología de las valvas y de los mecanismos fisiopatológicos que subyacen en la regurgitación tricúspidea. Es factible cuantificar la regurgitación tricúspidea empleando E3D Doppler color, y las mediciones 3D de la vena contracta han demostrado buena correlación con métodos 2D. (82-84) Mediante E3D se pueden obtener planos paralelos al orificio tricúspideo y apreciar la vena contracta en su totalidad. De manera similar a los estudios de la vena contracta en la regurgitación mitral, esto ha llevado a reconocer que la vena contracta en la regurgitación tricúspidea no es circular, sino elíptica. (84)

La E3D de la VT ha proporcionado una visión mecánica de la regurgitación tricúspidea en pacientes con hipertensión pulmonar, enfermedad cardíaca congénita y con cables de dispositivos implantados. (85, 86) En el caso de la anomalía de Ebstein, la E3D permite la visualización de la morfología de la valva tricúspidea, así como el nivel de inserción y coaptación de las valvas, la anatomía debajo de las cuerdas tendinosas y la cuantificación del chorro regurgitante, de utilidad en la planificación quirúrgica. (56, 87-89) En la RT secundaria o funcional, el uso de la E3D ha proporcionado información acerca de los cambios en el anillo tricúspideo. A medida que la RT avanza, el anillo se torna más dilatado, plano y circular. (65, 66) La forma resultante del anillo circular tricúspideo se debe a un mayor agrandamiento de las dimensiones anteroposteriores en comparación con las dimensiones mediolaterales. El anillo también se aplana, tirando de sus puntos bajos hacia afuera de los músculos papilares,

Tabla 1. Indicaciones de ecocardiografía 3D

Características	Recomendada en la práctica clínica	Áreas de investigación activa	No estudiado
Evaluación del ventrículo izquierdo			
Volumen	X		
Forma		X	
Fracción de eyección	X		
Disincronía		X	
Masa		X	
Evaluación del ventrículo derecho			
Volumen		X	
Forma			X
Fracción de eyección		X	
Evaluación de la aurícula izquierda			
Volumen		X	
Evaluación de la aurícula derecha			
Volumen			X
Evaluación de la válvula mitral			
Anatomía	X		
Estenosis	X		
Regurgitación		X	
Evaluación de la válvula tricúspide			
Anatomía			X
Estenosis			X
Regurgitación			X
Evaluación de la válvula pulmonar			
Anatomía			X
Estenosis			X
Regurgitación			X
Evaluación de la válvula aórtica			
Anatomía		X	
Estenosis		X	
Regurgitación			X
Endocarditis infecciosa			X
Válvulas protésicas		X	
Guía de procedimientos percutáneos	X		

Modificada de Lang RM, Badano LP, Tsang W, EAE/ASE recommendations for image acquisition and display using three-dimensional echocardiography. *J Am Soc Echocardiogr* 2012;25:3-46.

umentando la fijación. La E3D también ha mejorado nuestra evaluación de la RT en presencia de cables de marcapasos. La frecuencia de éxito en la identificación de la posición de los cables cuando atraviesan la VT fue de solo el 17% con ETT 2D *versus* el 90-94% con ETT 3D (85) (Figura 14). La E3D también puede tener un papel importante en la RT traumática. (90-92) Debido a su posición anterior inmediatamente por debajo del esternón, la VT es la más comúnmente dañada en el traumatismo de tórax directo.

Estenosis tricúspide: La ventaja principal de la E3D se origina en su capacidad de dar imágenes simultáneas de las tres valvas de la VT desde una perspectiva auricular o ventricular derecha. De cada valva se pue-

den evaluar el espesor, la motilidad, la calcificación y su relación con otras valvas. La vista *en-face* disponible en la E3D también posibilita una planimetría precisa del área de la VT, que se correlaciona bien con los gradientes de presión transtricúspideos. (93)

Válvula pulmonar

La válvula pulmonar (VP) se encuentra dentro de la raíz de la arteria pulmonar, que está compuesta por las valvas valvulares, los senos de Valsalva, los triángulos entre las valvas y, separadamente, el infundíbulo muscular distal del VD. (94) En un estudio se encontró que la morfología de la VP era discernible en el 60% de los pacientes analizados consecutivamente utilizando ETT

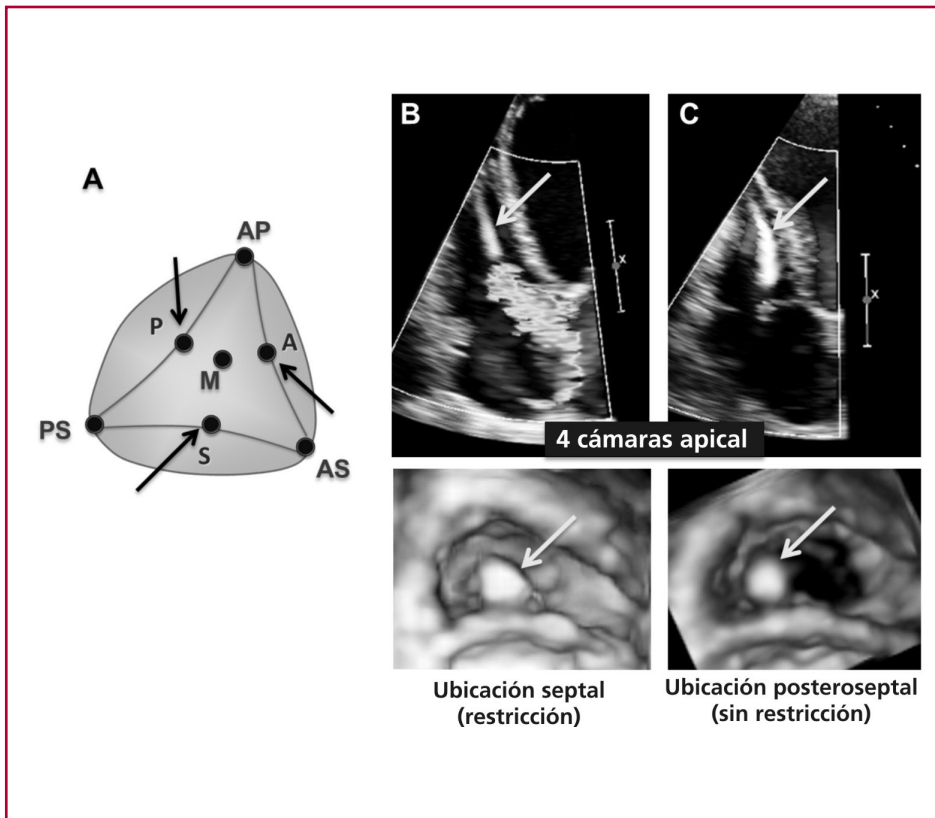


Fig. 14. A. Posible ubicación de cables de dispositivo al cruzar las valvas de la válvula tricúspide. Los cables del dispositivo colocados contra una valva (flechas) impiden su motilidad, mientras que los que están situados en una comisura (AP: comisura anteroposterior, AS: comisura anteroseptal, PS: comisura posteroseptal) o en el centro de la válvula (posición media o "M") no están asociados con restricción de la valva. **B.** Las imágenes superior e inferior ilustran un cable de dispositivo que provoca limitación de la valva septal (imagen inferior 3D tomada desde la perspectiva del ventrículo derecho) con el resultado de regurgitación tricúspide grave (imagen superior). **C.** Las imágenes superior e inferior muestran un cable de dispositivo en la comisura posteroseptal sin restricción de la valva (imagen inferior 3D tomada desde la perspectiva del ventrículo derecho) con signos de regurgitación tricúspide (imagen superior).

3D. (95) Actualmente no existen evidencias suficientes que apoyen el uso de rutina de la ETT o la ETE 3D en la evaluación de las válvulas pulmonares (Tabla 1).

Válvulas protésicas

Los estudios de imágenes de E3D son adecuados para la evaluación clínica de válvulas protésicas mitrales, aórticas y tricúspideas, y anillos anulares, y en muchas circunstancias son superiores a las imágenes de E2D. (96, 97) En la mayoría de los casos, la E3D es capaz de delinear claramente los múltiples componentes tanto de las válvulas mecánicas como protésicas y evitar los desafíos de la sombra acústica. Esto se observó en un estudio en el cual 40 pacientes con válvulas protésicas que funcionaban normalmente, o que habían sido sometidos a reparación de la VM, se examinaron con E3D para comprobar la calidad de imagen frente a la E2D. (96) Este estudio demostró que en válvulas mitrales mecánicas y bioprotésicas normales, los anillos, valvas y soportes se podían visualizar claramente con E3D tanto desde la perspectiva auricular como ventricular izquierda (Figura 15, versión *on line*). Por el contrario, con E2D, el artefacto de sombreado desde la prótesis impide visualizar la válvula desde el VI. Para los pacientes que han sido sometidos a reparación valvular, el anillo de anuloplastia y la valva anterior se pueden visualizar de manera óptima en el 100% y el 60% de los casos, respectivamente. (96, 98) La valva posterior solo se pudo apreciar inmejorablemente en el 40% de los pacientes.

La E3D es particularmente útil cuando existe sospecha clínica de endocarditis infecciosa en pacientes con válvulas protésicas mitrales. (97) Debido a su capacidad para manipular y recortar imágenes en múltiples planos, la E3D provee una evaluación anatómica detallada de toda la válvula, lo cual disminuye la probabilidad de no detectar pequeñas vegetaciones y posibilita una mejor diferenciación entre vegetación y material de sutura. La vista *en-face* de la válvula protésica es especialmente útil en la evaluación de endocarditis, ya que permite identificar la dehiscencia valvular y las fugas paravalvulares asociadas. Sin embargo, debe notarse que debido a las limitaciones de la frecuencia de adquisición en la E3D, la E2D continúa siendo superior para la identificación de pequeñas vegetaciones móviles.

En la dehiscencia de la VM protésica, la E3D proporciona información agregada respecto del tamaño del área de dehiscencia y sobre la relación entre la dehiscencia, el chorro de regurgitación paravalvular y las estructuras cardíacas adyacentes. (99) (Figura 16, versión *on line*). Con la ayuda de la E3D se ha observado que la mayoría de los tipos de dehiscencia de la VM están localizadas posteriormente y/o lateralmente, (100) ya que podría carecerse de una sutura adecuada en esta área debido a la ubicación del anillo posterior en el campo quirúrgico alejado y su relación con la arteria circunfleja izquierda.

En general, las valvas de las válvulas aórticas mecánicas y bioprotésicas se visualizan mal. No obstante,

el anillo protésico en general se ve bien tanto desde la perspectiva del TSVI como aórtica. De manera similar, las valvas de la válvula protésica habitualmente se visualizan mal, pero el anillo se observa adecuadamente.

Uso de la ecocardiografía 3D como guía de procedimientos intervencionistas

Tradicionalmente se utiliza la fluoroscopia para guiar los procedimientos que emplean cateterización. Este tipo de imagen tiene una resolución de contraste limitada para diferenciar entre tejidos blandos y conlleva una exposición significativa a la radiación. La E3D es de gran ayuda para guiar intervenciones intracardíacas, especialmente el cierre de defectos septales auriculares (Figura 17, versión *on line*), la colocación de los nuevos dispositivos de oclusión de la orejuela auricular izquierda, la valvuloplastia mitral percutánea con balón, el implante valvular aórtico transcáteter (IVAT), así como la guía y cierre de fugas paravalvulares.

Valvuloplastia mitral con balón: La valvuloplastia mitral percutánea con balón (VMPB) se efectúa comúnmente en pacientes con estenosis mitral significativa y anatomía adecuada. Tradicionalmente, se realiza solo con guía fluoroscópica; no obstante, la orientación usando puntos de referencia anatómicos radiográficos a menudo es desafiante, aun para los cardiólogos intervencionistas experimentados. Las técnicas de imagen 3D permiten una excelente visualización de la válvula y los catéteres comprendidos en la valvuloplastia con balón. (101) Utilizando la E3D, el *septum* interauricular generalmente se ve desde la aurícula derecha con la vena cava superior y la vena cava inferior en posición de las 12 y las 6 horas del reloj. Esta vista muestra el catéter a medida que se introduce en la aurícula derecha y, por lo tanto, ayuda a posicionar el catéter en el sitio de la comunicación septal interauricular. La E3D puede luego emplearse para optimizar la posición del balón entre los bordes libres de la valva para asegurar que el corte comisural sea controlado. Las vistas posprocedimiento desde las perspectivas de la AI y el VI permiten una inspección minuciosa de las comisuras para evaluar una separación exitosa y cualquier desgarro de las valvas que pudiera haber ocurrido. Además, la E3D proporciona una cuantificación adecuada de cualquier RM relacionada con el procedimiento.

Reemplazo valvular aórtico percutáneo: El reemplazo valvular aórtico percutáneo está ganando popularidad rápidamente, ya que es la opción menos invasiva y más efectiva de reemplazo valvular en pacientes seleccionados. Además de la fluoroscopia, la ETE 2D y 3D posibilitan evaluaciones precisas y reproducibles de las dimensiones del TSVI y del anillo aórtico, que son importantes para la selección del tamaño de la válvula protésica. Esto se debe a que un dispositivo subdimensionado puede producir fuga paravalvular o aun desprendimiento o embolización

de la prótesis, mientras que uno sobredimensionado puede dar por resultado una lesión o la rotura del anillo aórtico. La E3D también puede medir la distancia desde el anillo y el borde libre de las valvas hasta los *ostia* coronarios, lo cual es crucial para la colocación óptima de las válvulas protésicas sin interferir con la circulación coronaria.

Durante el procedimiento, la ETE 3D ayuda a guiar el catéter y la válvula protésica a una posición óptima. La orientación espacial exacta del dispositivo es crítica, ya que la válvula y el catéter deben estar alineados coaxialmente en el TSVI. Si se progresa el dispositivo demasiado adentro de la aorta puede conducir a oclusión de los *ostia* coronarios, mientras que la retracción hacia el TSVI puede interferir con la motilidad de la valva anterior mitral y producir RM. (102) La ETE 3D posprocedimiento es útil para evaluar los resultados e identificar complicaciones potenciales, que incluyen regurgitación paravalvular y transvalvular, nuevos trastornos de la motilidad parietal, regurgitación mitral, daño del anillo aórtico, disección aórtica, derrame pericárdico y taponamiento cardíaco.

Fugas paravalvulares: Se estima que el 10-15% de las válvulas protésicas aórticas o mitrales tienen algún grado de regurgitación paravalvular. El papel de la ETE 3D en la detección y la evaluación de la regurgitación paravalvular aórtica o mitral es: 1) evaluar el tamaño y la localización de la regurgitación paravalvular; 2) servir como guía durante los procedimientos de cierre percutáneos y 3) la evaluación posprocedimiento. El diagnóstico de regurgitación paravalvular se realiza en primer término por medio de ecografía: La vista *en-face* de la válvula mitral/aórtica por E3D mejora la identificación de sitios de dehiscencia, y simultáneamente proporciona información de su localización, forma, tamaño y número. (96, 103) Una vez que estos sitios se han identificado, las imágenes multiplanares se pueden usar para cuantificar las dimensiones del área de dehiscencia (Figura 18), mientras que las imágenes color 3D confirman la presencia de flujo sanguíneo paravalvular. Si se elige el método de reparación percutáneo, la ETE 3D desempeña un papel importante en la planificación y como guía del procedimiento. La mayor ventaja de la técnica de E3D es su capacidad de visualizar la longitud total de los catéteres intracardíacos, así como los balones o dispositivos unidos a los catéteres y su posición en relación con las estructuras cardíacas adyacentes. (104, 105) La E3D también posibilita la evaluación continua del funcionamiento de la prótesis antes del procedimiento y durante y después de él. Por otra parte, luego del procedimiento, la E3D puede evaluar la ubicación del dispositivo de oclusión. Finalmente, se pueden comprobar las complicaciones derivadas del procedimiento, como la aparición de nuevos sitios de fuga paravalvulares causados por estiramiento de la línea de sutura durante la expansión del dispositivo.

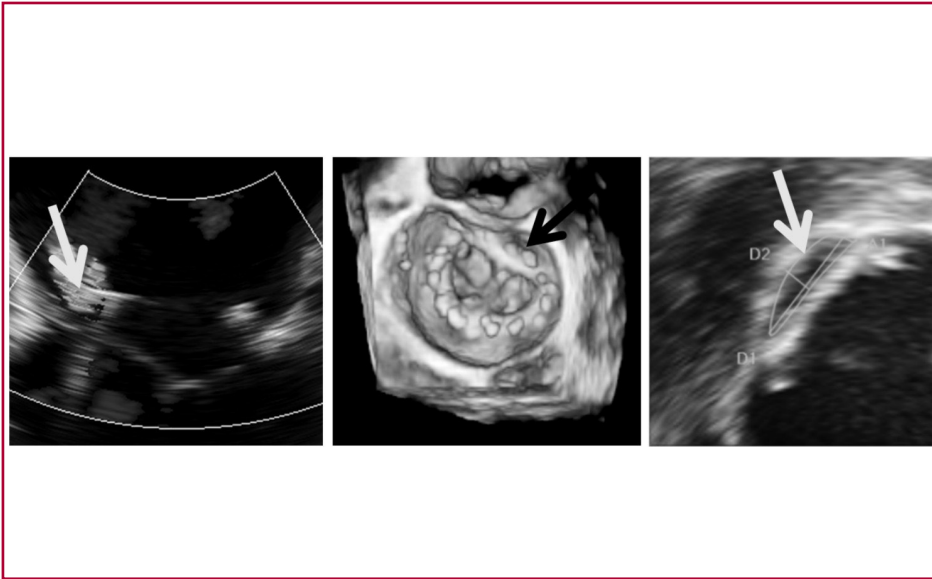


Fig. 18. Estudio en un paciente con fuga paravalvular en el borde del anillo de anuloplastia mitral colocada recientemente: imagen de ETE 2D Doppler color (*imagen izquierda, arriba*). En la *imagen izquierda, abajo*, se ve el orificio al lado del anillo de anuloplastia. El análisis paramétrico fuera de línea del conjunto de datos 3D (*imágenes a la derecha*) permite medir las dimensiones de la fuga paravalvular. En este caso, la fuga fue muy pequeña y probablemente no justificara los síntomas de insuficiencia cardíaca congestiva del paciente. Se decidió reparar la fuga mediante un procedimiento percutáneo ya que no era probable que mejorara en el futuro.

RESUMEN

En la última década, la ecocardiografía tridimensional ha experimentado una enorme evolución tecnológica. El primer hito importante fue el desarrollo de los transductores transtorácicos matriciales, que reemplazaron la reconstrucción 3D tediosa y lenta a partir de la adquisición consecutiva de imágenes en múltiples planos, y dieron como resultado conjuntos de datos de volumen casi en tiempo real. Otro hito importante más reciente fue el desarrollo de transductores de muestreo completo para ETE 3D en tiempo real, que en los últimos cinco años se han utilizado ampliamente en la clínica. Una ventaja importante de esta tecnología incluye una excelente calidad de imagen independientemente del tipo de vida del paciente, facilidad de uso e imágenes visualmente impactantes, fáciles de interpretar, que proporcionan información clínica novedosa. Además, la rápida aparición de procedimientos percutáneos para el tratamiento de enfermedades estructurales del corazón, como la reparación de la válvula mitral o el cierre de fugas perivalvulares, demuestra que el éxito de estos procedimientos depende mucho de la guía por ETE 3D. En

la Tabla 1 se detallan las áreas de investigación activa y las áreas que aún no se han explorado.

Anticipamos que, en el futuro, una mayor miniaturización de los transductores de ETE 3D podría permitir que esta tecnología se expanda a pequeños pacientes pediátricos, lo cual tendría un gran impacto sobre los resultados de reparaciones intracardíacas complejas. Es más, la optimización de imágenes 3D con contraste haría que esta tecnología fuera útil en pacientes “técnicamente” difíciles y también en las pruebas de eco estrés 3D. El desarrollo de transductores vasculares 3D con frecuencias de captura de imágenes más altas mejoraría las capacidades actuales de diagnosticar la enfermedad arteriosclerótica carotídea, ya que posibilitaría una evaluación más sencilla de la carga de la enfermedad. Todos estos desarrollos futuros fortalecerán las bases de la E3D incrementando y expandiendo más su utilidad clínica en nuevos territorios.

Declaración de conflicto de intereses

Los autores declaran que no poseen conflicto de intereses.

BIBLIOGRAFÍA

Véase en la edición web.