

Ecocardiografía tridimensional en tiempo real

JULIO A. PANZA

RESUMEN

La ecocardiografía convencional y su representación de las imágenes cardíacas en forma bidimensional sólo brinda una información parcial del funcionamiento cardíaco. El desarrollo de la ecocardiografía tridimensional permite una evaluación más objetiva y cuantitativa de la fisiología cardíaca. La ecocardiografía tridimensional en tiempo real fue desarrollada en la Universidad de Duke y está basada en el diseño de un transductor ultrasónico con disposición en matriz que adquiere, en forma instantánea, la imagen contenida en un volumen tridimensional de forma piramidal. La visualización simultánea de imágenes tomográficas múltiples permite examinar en forma anatómicamente correcta cualquier estructura contenida dentro de la imagen volumétrica. Programas y tecnologías basados en computadoras de alta performance diseñadas para la manipulación gráfica de imágenes tridimensionales permiten el mapeo rápido de la imagen volumétrica y proveen posibilidades que están más allá del ecocardiógrafo mismo. Usando esta metodología es posible visualizar en forma simultánea múltiples planos superpuestos en forma totalmente interactiva y controlada por el observador. La ecocardiografía tridimensional en tiempo real posibilita además un análisis cuantitativo de los volúmenes cardíacos, de masa ventricular e, inclusive, de miocardio con anomalías de contracción y/o perfusión. La reciente incorporación de Doppler color tiene múltiples potencialidades que aún no han sido exploradas. Esta técnica expande así las posibilidades de la cardiología no invasiva y abre nuevas puertas para el diagnóstico y la investigación clínica de las enfermedades cardíacas. *REV ARGENT CARDIOL* 1999; 67: 365-375.

Palabras clave Ultrasonido cardíaco - Ecocardiografía tridimensional - Función ventricular

INTRODUCCION

La evolución de la ecocardiografía, desde sus inicios hacia fines de la década del '60, se ha caracterizado por un desarrollo constante tanto en la calidad de las imágenes (y, por lo tanto, en la información anatómica y funcional) como en el uso de técnicas también basadas en el ultrasonido (como, por ejemplo, el uso de Doppler y la caracterización tisular ultrasónica) que complementan y expanden el estudio ecocardiográfico. Este desarrollo ha tenido una aceleración exponencial en la última década gracias a los avances en el campo de la ingeniería electrónica y la computación. Uno de los paradigmas más importantes dentro de esta evolución se encuentra en el desarrollo de las imágenes destinado a brindar una

representación visual cada vez más fidedigna de la anatomía y el funcionamiento cardíacos (Figura 1).

Dado que el corazón tiene una anatomía compleja en constante movimiento, la fisiología y la fisiopatología cardíacas sólo se pueden comprender si se tiene en cuenta no sólo la disposición de sus estructuras en las tres dimensiones convencionales sino también la cambiante relación espacial de estas estructuras durante el ciclo cardíaco. La ecocardiografía convencional y su representación de las imágenes cardíacas en forma unidimensional (modo M) y bidimensional sólo brindan una información parcial del funcionamiento cardíaco. Desde el inicio mismo de la ecocardiografía, esta desventaja pretende ser subsanada mediante una reconstrucción mental por

Senior Investigator y Jefe de Ecocardiografía - Cardiology Branch - National Heart, Lung, and Blood Institute - National Institutes of Health - Bethesda, Maryland, USA

Trabajo recibido para su publicación: 4/99 Aceptado: 6/99

Dirección para separatas: Dr. Julio A. Panza - Cardiology Branch - National Institutes of Health - Building 10, Room 7B-15, Bethesda, Maryland 20892-1650, USA - Tel.: (301) 496-2634 - Fax: (301) 435-8886 - E-mail: panzaj@nih.gov

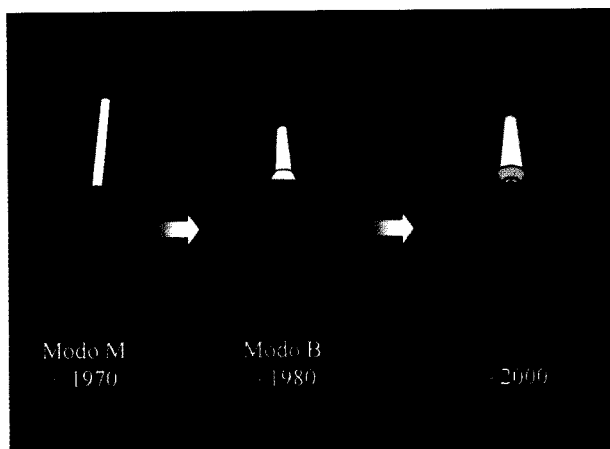


Fig. 1. Evolución de la ecocardiografía en relación con la representación visual de las imágenes cardíacas. En sus inicios, la ecocardiografía sólo proveía una representación unidimensional del corazón (modo M). En un lapso de aproximadamente 10 años fue posible mostrar la anatomía y el funcionamiento cardíacos en forma de imagen tomográfica en movimiento (ecocardiografía bidimensional). Finalmente, 20 años más tarde es posible obtener imágenes volumétricas instantáneas que brindan una representación más fidedigna de la fisiología cardíaca (ecocardiografía tridimensional en tiempo real).

parte del observador basada en la interpretación de imágenes parciales obtenidas en forma secuencial (es decir, no simultáneas). Por ejemplo, la función del ventrículo izquierdo se analiza, rutinariamente, mediante la visualización de una serie de cortes tomográficos obtenidos durante ciclos cardíacos distintos que permiten una apreciación estandarizada (aunque no necesariamente completa) de la motilidad regional. En forma similar, en el caso de anomalías congénitas, la anatomía cardíaca se interpreta mediante el uso de imágenes secuenciales que permiten apreciar las conexiones entre las distintas estructuras cardíacas (cada una de ellas en forma parcial). Aunque este ejercicio de reconstrucción por parte del observador es adecuado en muchos casos, es indudable que esta metodología es subjetiva y tiene importantes limitaciones. Por ejemplo, la cantidad y calidad de imágenes tomográficas obtenidas durante el estudio pueden ser insuficientes para una reconstrucción adecuada; diferentes observadores con distintos grados de experiencia pueden arribar a conclusiones divergentes sobre la anatomía cardíaca tridimensional aun partiendo de la misma colección de imágenes bidimensionales; finalmente, la transmisión de la información es también subjetiva e incompleta.

El advenimiento de la ecocardiografía tridimensional permite una evaluación más objetiva y cuantitativa de la fisiología cardíaca que reduce la subjetividad en el análisis de las imágenes y brinda una representación fidedigna de la anatomía y el funcio-

namiento cardíacos. Existen dos formas totalmente diferentes de ecocardiografía tridimensional: la ecocardiografía tridimensional de reconstrucción y la ecocardiografía tridimensional en tiempo real. La primera, desarrollada desde fines de la década del '80, se basa en la reconstrucción de imágenes bidimensionales convencionales obtenidas en forma secuencial. (1-3) Esta técnica no brinda información simultánea, requiere de computadoras con programas especiales para la reconstrucción y, en consecuencia, no ha tenido gran auge dentro de la práctica cardiológica. La ecocardiografía tridimensional en tiempo real, por el contrario, no requiere ningún tipo de reconstrucción y brinda imágenes verdaderamente volumétricas que permiten apreciar la anatomía y el funcionamiento cardíacos en forma simultánea. (4-6) Esta técnica totalmente novedosa ha alcanzado el plano clínico en el último año y seguramente se convertirá en la forma estándar de realizar el análisis no invasivo de la fisiología y la fisiopatología cardíacas por medio de ultrasonido en el nuevo milenio. Este artículo provee las bases teóricas y prácticas para la comprensión y utilización de esta nueva metodología.

Principios básicos de la técnica

La ecocardiografía tridimensional en tiempo real fue desarrollada en la Universidad de Duke y está basada en el diseño de un transductor ultrasónico con una disposición (o arreglo) en matriz que adquiere imágenes de un volumen tridimensional en forma electrónica (4-6) (Figura 2). A diferencia de la ecocardiografía bidimensional, en la cual los cristales piezoeléctricos están alineados en una sola fila

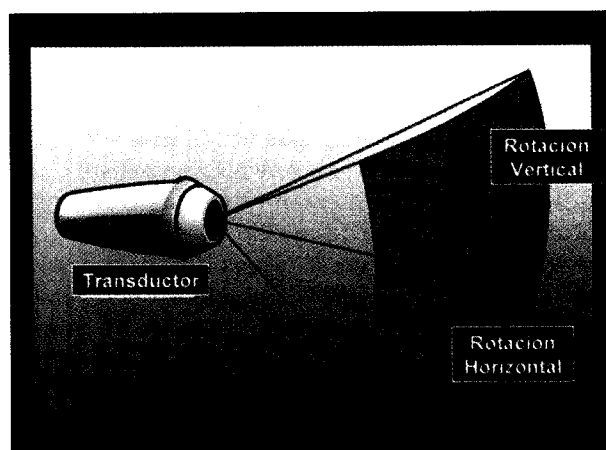


Fig. 2. Representación esquemática de la información obtenida mediante un transductor volumétrico. El ecógrafo permite la visualización en tiempo real de las estructuras contenidas dentro de una pirámide tridimensional cuyo ángulo superior parte del transductor y cuya profundidad está determinada por el operador.

de elementos, en un transductor con arreglo en matriz, los cristales están dispuestos en forma de grilla bidimensional. Por lo tanto, mientras que la imagen tomográfica obtenida con un transductor bidimensional es plana (es decir, carece de profundidad), el transductor en matriz permite la adquisición de un volumen tridimensional en forma piramidal (Figura 3).

Esto se logra usando 512 cristales dispuestos en grilla en la cual cada elemento ocupa un cuadrado de aproximadamente 300 μM de lado. (4-6) La mitad de estos elementos (256) se utiliza solamente para la transmisión de ultrasonido y la otra mitad es usada exclusivamente para la recepción. Además, cada uno de los cristales usados para la recepción gira en forma ultrarrápida para obtener 16 líneas de información por cada pulso de ultrasonido transmitido (Figura 4). Cada línea de información es procesada en forma separada y simultánea por el aparato de ecocardiografía usando una tecnología conocida como procesamiento paralelo. Dado que cada uno de los 256 cristales produce 16 líneas de información, se obtiene un total de 4.096 líneas dentro de la pirámide volumétrica (como comparación, la imagen bidimensional tiene un total de 128 líneas). Esta pirámide volumétrica tiene un ángulo superior de 64° (menor que el ángulo de 90° de la imagen ecocardiográfica bidimensional convencional). La resolución temporal varía de acuerdo con la profundidad máxima de la pirámide determinada por el observador: por ejemplo, a una profundidad mayor de

13 cm la resolución es de 22 volúmenes por segundo, pero a una profundidad mayor de 20 cm la resolución temporal cae a 14 volúmenes por segundo. La resolución espacial es de 2 mm a una distancia de 7 centímetros del transductor de 2,5 MHz. El transductor de 3,5 MHz (también disponible) tiene una resolución aun mayor. La apertura circular simétrica de la matriz de elementos determina que la resolución sea la misma en cualquier dimensión dentro del volumen piramidal.

Adquisición y almacenamiento de imágenes

En forma similar al examen ecocardiográfico convencional, la adquisición de imágenes volumétricas puede realizarse desde cualquiera de las ventanas ultrasónicas, dependiendo de la estructura a estudiar. Por ejemplo, para obtener una evaluación global de la función ventricular izquierda, es preferible obtener una imagen desde la ventana apical que comprenda la totalidad del ventrículo. Por el contrario, si la estructura a estudiar está localizada en la base del corazón, es preferible obtener imágenes desde la ventana paraesternal porque la mayor proximidad del transductor aumenta la resolución de las imágenes. Es importante señalar que el proceso de adquisición es mucho más rápido que con la ecocardiografía bidimensional porque el operador no necesita mover físicamente el transductor para obtener información de diferentes cortes tomográfi-

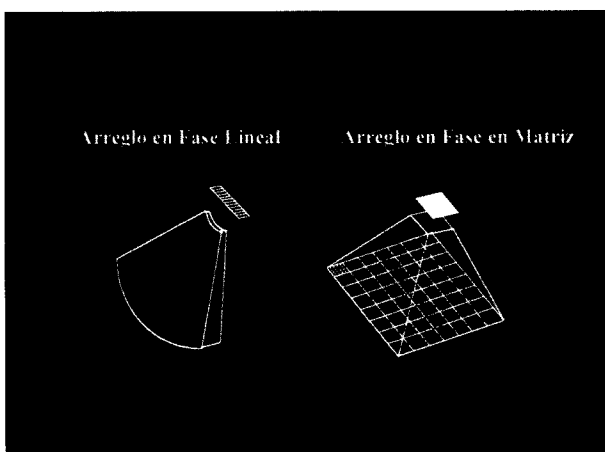


Fig. 3. Representación esquemática de la disposición de los cristales en un transductor de ecocardiografía bidimensional (izquierda) y en un transductor para ecocardiografía tridimensional en tiempo real (derecha). El transductor convencional, con arreglo en fase lineal, presenta una disposición de elementos en una sola fila, lo cual brinda una imagen plana (sin profundidad). Por el contrario, el transductor con arreglo en matriz presenta una disposición de los cristales en grilla, lo cual posibilita obtener una imagen piramidal en tres dimensiones.

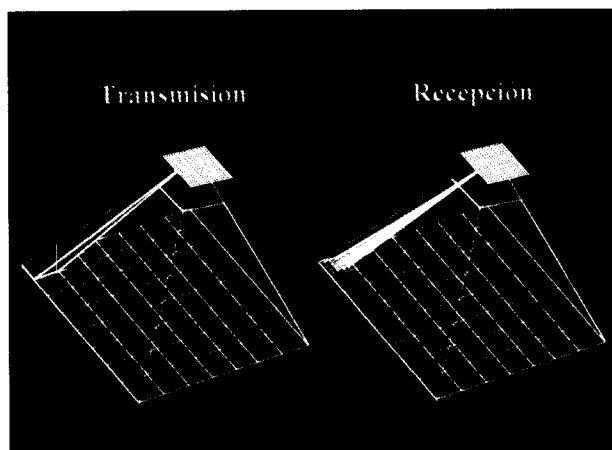


Fig. 4. Representación esquemática del funcionamiento de un transductor en matriz. La mitad de los cristales (256), dispuestos en grilla, son utilizados para la transmisión. La otra mitad, también dispuestos en grilla, son usados exclusivamente para la recepción del ultrasonido reflejado por las estructuras contenidas dentro de la pirámide volumétrica. Cada uno de los cristales usados para la recepción gira en forma ultrarrápida para generar 16 líneas de información (representadas en amarillo en la imagen de la derecha) por cada pulso de ultrasonido transmitido (mostrado en verde en la imagen de la izquierda). Como consecuencia, el transductor genera un total de 4.096 líneas de información.

cos. Así, en una imagen obtenida desde la ventana paraesternal, tanto el eje largo como los distintos niveles de eje corto convencionales se encuentran comprendidos dentro de la imagen volumétrica y son adquiridos en forma simultánea sin necesidad de mover el transductor.

El ecocardiógrafo permite la captura de hasta 6 segundos consecutivos de adquisición, lo cual es generalmente innecesario. En nuestro laboratorio, la práctica habitual es capturar 1,5 o 3 segundos (de acuerdo con la frecuencia cardíaca del paciente) y luego acortar la adquisición guiándose por la derivación electrocardiográfica para comprender solamente un ciclo cardíaco. Una vez completada la adquisición, las imágenes son almacenadas permanentemente en discos ópticos para su posterior visualización. Es importante señalar que las imágenes obtenidas pueden ser examinadas de la misma forma tanto durante como después de la adquisición.

Visualización de imágenes

La adquisición de imágenes volumétricas en tiempo real genera el dilema práctico de cómo visualizar las estructuras en movimiento contenidas dentro de cada volumen. Necesariamente, la imagen que se presenta a los ojos del observador para su interpretación tiene que ser sólo una parte de toda la información contenida en la pirámide volumétrica. Esto se explica mejor si uno tiene en cuenta el caso de un observador situado en el centro de

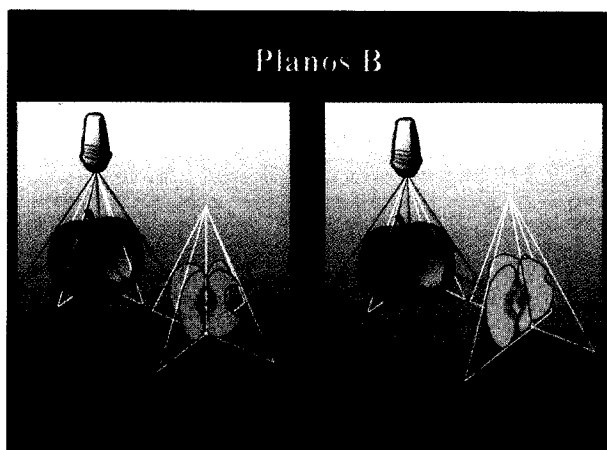


Fig. 5. Representación esquemática de los cortes de sección correspondientes al plano B. Este plano se extiende desde la cúspide hacia la base de la pirámide. El ecógrafo permite la visualización simultánea de dos planos B que, en su posición inicial, se entrecruzan en el centro de la base de la pirámide (panel de la izquierda). Cada uno de estos planos puede deslizarse a través de la base de la pirámide, como lo indican las flechas. En el panel de la derecha, uno de los planos B ha sido deslizado de forma tal que el corte tomográfico correspondiente no pasa por el centro del objeto contenido dentro de la pirámide (nótese el cambio en el defecto de superficie de la manzana).

una habitación: en cualquier momento dado, solamente puede apreciar aquello que está frente a sus ojos; para tener información acerca de lo que está a sus espaldas, el observador debe girar o desplazarse para cambiar su posición espacial en relación con el resto de la habitación. En otras palabras, a pesar de que la estructura tridimensional de la habitación y sus contenidos está disponible para ser examinada, solamente una parte de ésta puede ser apreciada en un momento determinado desde una posición fija. El mismo principio se aplica para la visualización de una imagen ecocardiográfica tridimensional: sólo una parte (o partes) del volumen total puede ser visualizada al mismo tiempo. Por lo tanto, al examinar una imagen volumétrica hay que tener siempre en cuenta que la información anatómica y funcional disponible siempre es mayor que la visible, independientemente del modo de visualización.

En general, el ojo y el cerebro humanos aprecian con mayor facilidad imágenes tomográficas (bidimensionales). La disponibilidad de información ecocardiográfica volumétrica permite la visualización simultánea de múltiples imágenes bidimensionales pertenecientes a la misma estructura tridimensional. A diferencia de la visualización simultánea de imágenes correspondientes a diferentes ciclos cardíacos y obtenidas en forma secuencial con un ecocardió-

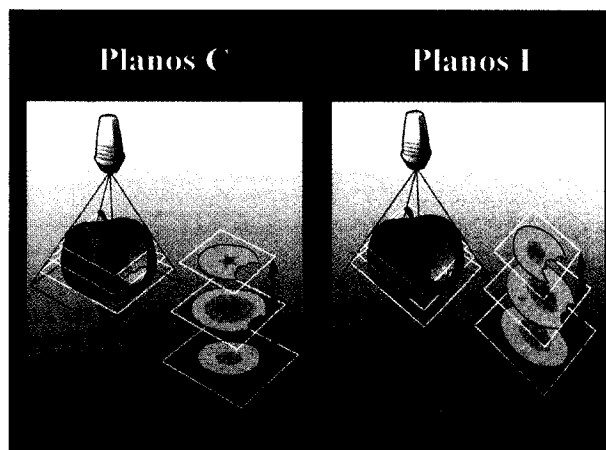


Fig. 6. Representación esquemática de los planos C e I (paneles de la izquierda y de la derecha, respectivamente). El plano C se extiende en forma perpendicular al eje largo de la pirámide y en forma paralela a su base. El ecógrafo permite la visualización simultánea de dos o tres planos C. La posición relativa de cada plano C con respecto al eje largo de la pirámide y la distancia entre cada uno de estos planos pueden ser libremente modificadas como lo indican las flechas. El plano I se obtiene inclinando el plano C (panel de la derecha). Como se aprecia en la figura, el plano I no es perpendicular al eje largo de la pirámide ni paralelo a su base y, por lo tanto, muestra una imagen distinta de la representada por el plano C. Al igual que los planos C, los diferentes planos I son paralelos entre sí y su ubicación dentro de la pirámide puede ser modificada como lo indican las flechas.

grafo bidimensional convencional, las imágenes visualizadas en un ecocardiógrafo tridimensional corresponden al mismo ciclo cardíaco y, lo que es aun más importante, pueden ser modificadas durante o inclusive después de la adquisición para reflejar cualquier plano tomográfico dentro del volumen adquirido.

El ecocardiógrafo tridimensional permite la visualización simultánea de 4 o 5 (a elección del observador) imágenes tomográficas correspondientes al mismo volumen. Para entender mejor la información contenida en cada imagen y la posición relativa de una imagen con respecto a las otras, es necesario considerar tres planos fundamentales: B, C e I.

El *plano B* se extiende desde la cúspide hasta la base de la pirámide y, por lo tanto, comprende la profundidad de la imagen volumétrica (Figura 5). El ecocardiógrafo permite la visualización simultánea de dos planos B que son ortogonales (en sentido vertical) entre sí. Por ejemplo, en una imagen obtenida desde la ventana apical, si un plano muestra la imagen de 4 cámaras, el otro muestra la imagen de 2 cámaras. En la posición inicial, estos planos se entrecruzan en el centro de la base de la pirámide. El observador puede deslizar uno o ambos planos hacia los lados de la pirámide para obtener distintos cortes tomográficos; como referencia, el punto de intersección de ambos planos está permanentemente indicado en la base de cada imagen tomográfica visualizada.

El *plano C* intersecta la imagen volumétrica en forma paralela a la base de la pirámide y, por lo tanto, es ortogonal (en sentido horizontal) a cualquiera de los planos B (Figura 6). El ecocardiógrafo permite la visualización de 2 o 3 planos C a elección del observador (mostrados en forma plana o en pers-

pectiva, respectivamente) (Figuras 7 y 8). Por ejemplo, en una imagen volumétrica adquirida desde la ventana apical, cada plano C representa una imagen en eje corto del ventrículo izquierdo (Figuras 7 y 8). El observador puede deslizar cada plano C desde la cúspide hacia la base de la pirámide y, además, aumentar o disminuir la distancia entre cada uno de los planos C. En una imagen apical, el observador puede posicionar un plano C próximo al ápice del ventrículo izquierdo, otro en la región medioventricular, y el tercero en la base del ventrículo para tener una apreciación simultánea de la función regional a distintos niveles anatómicos (Figura 8). La posición relativa de los planos C con respecto a cada uno de los planos B es fácilmente apreciada a través de líneas horizontales trazadas electrónicamente (y que pueden ser omitidas de la visualización) sobre la imagen de los planos B (Figuras 7 y 8).

El *plano I* se obtiene mediante la inclinación del plano C y, por lo tanto, no es paralelo a la base de la pirámide ni ortogonal al plano B (Figura 6). Este plano es útil para obtener cortes tomográficos anatómicamente correctos. Por ejemplo, en una imagen apical en la cual el eje mayor del ventrículo izquierdo es oblicuo, es necesario recurrir a un plano I (inclinado) para obtener una imagen en eje corto que sea ortogonal al eje largo ventricular (Figura 8). De este modo, la disponibilidad de planos inclinados permite examinar en forma anatómicamente correcta cualquier estructura contenida dentro de la imagen volumétrica.

Como se mencionó anteriormente, la cantidad de información adquirida por el ecocardiógrafo tridimensional plantea problemas fundamentales con respecto a la óptima visualización de las imágenes con un propósito diagnóstico. Existe, por lo tanto,

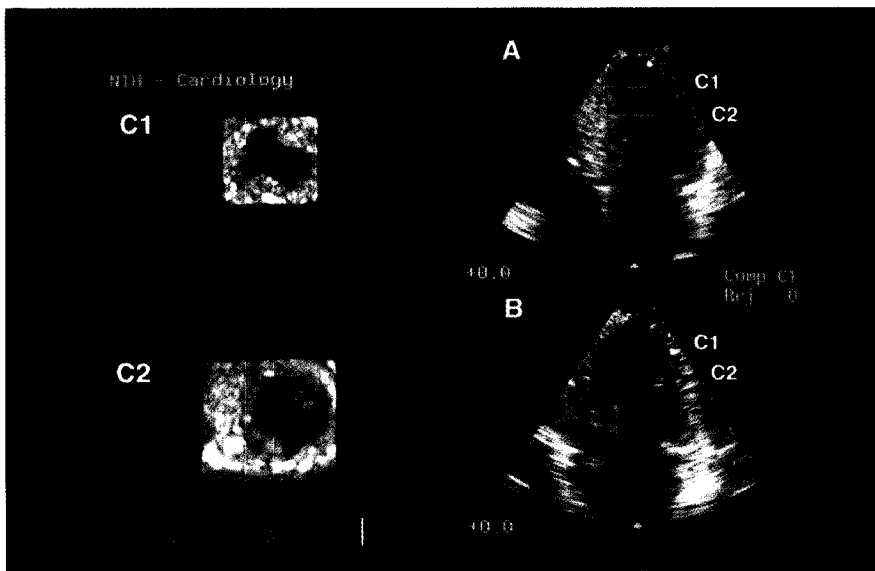


Fig. 7. Fotografía tomada directamente del monitor de un ecógrafo tridimensional en tiempo real. La imagen volumétrica de fin de diástole corresponde a un paciente con miocardiopatía hipertrófica. El monitor muestra, en este caso, cuatro imágenes tomográficas simultáneas. Los paneles de la derecha muestran imágenes similares a las imágenes de 4 cámaras (A) y 2 cámaras (B) que pueden ser obtenidas en forma secuencial con un ecógrafo bidimensional. Las imágenes de la izquierda muestran dos cortes transversales planos (C1 y C2) obtenidos a diferentes niveles de las imágenes longitudinales mostradas a la derecha. La correspondencia entre las imágenes longitudinales y transversales está representada por las líneas verdes (en el panel A) y rojas (en el panel B) que aparecen en las imágenes longitudinales y que representan el nivel de corte de cada imagen transversal. Nótese que, en este ejemplo, las imágenes transversales son perpendiculares al eje mayor de las imágenes longitudinales.

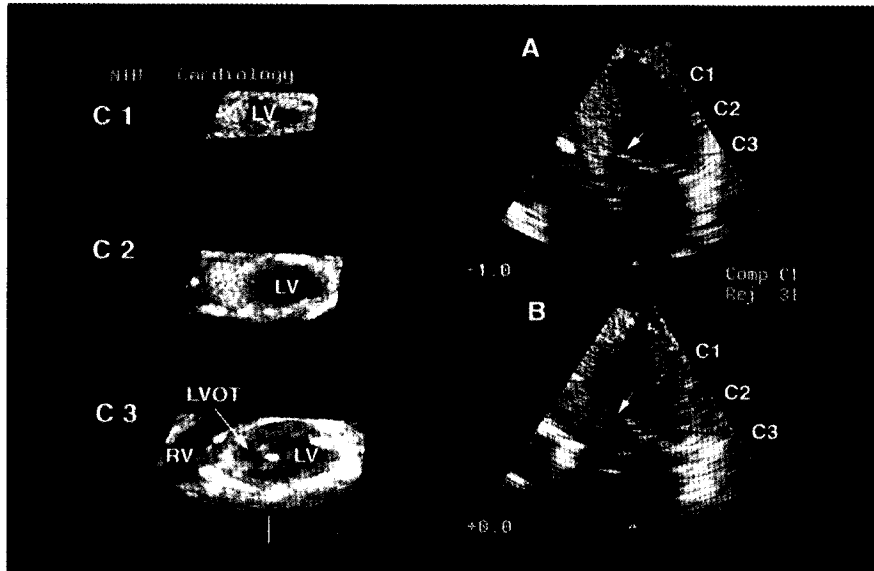


Fig. 8. Imagen sistólica correspondiente al mismo paciente mostrado en la Figura 5. El formato de esta representación tiene dos diferencias fundamentales con la figura anterior. En primer lugar, se muestran tres cortes transversales en perspectiva (C1, C2 y C3). Además, los cortes transversales han sido inclinados para que sean verdaderamente perpendiculares al eje largo del ventrículo izquierdo, como lo muestran las líneas verdes (panel A) y rojas (panel B) mostradas en las imágenes longitudinales. Esta imagen permite observar simultáneamente el movimiento anterior sistólico de la válvula mitral en las imágenes longitudinales (flechas blancas en los paneles A y B) y el área del tracto de salida del ventrículo izquierdo (LVOT) mostrado en el corte transversal correspondiente (flecha amarilla en C3).

un gran interés en el desarrollo de programas de computación que permitan navegar en forma virtualmente ilimitada la imagen volumétrica. Con esta finalidad, nuestro laboratorio está trabajando intensamente en colaboración con la Universidad de Duke y con ingenieros del Centro de Información Tecnológica del National Institutes of Health para el desarrollo y perfeccionamiento de programas y tecnologías basados en computadoras de alta performance (Silicon Graphics, Inc.) especialmente diseñadas para la manipulación gráfica de imágenes tridimensionales. Las imágenes que son adquiridas con el ecocardiógrafo tridimensional son transferidas mediante discos ópticos a estas computadoras para su inmediata (o, si se prefiere, diferida) visualización y análisis. La arquitectura especializada de

estos sistemas de computación permite el mapeo rápido de la información contenida en la imagen volumétrica y su proyección en el espacio visual, lo cual a su vez provee posibilidades que están más allá del ecocardiógrafo mismo. Usando esta metodología, es posible visualizar en forma simultánea múltiples planos superpuestos (Figura 9). La rapidez de los sistemas gráficos que operan dentro de la computadora permite la manipulación virtual de la imagen con la ayuda del *mouse* y el deslizamiento de un plano en relación con el otro, así como también la rotación y focalización en cualquier región de la imagen (Figura 10). Esta forma de visualización permite, en forma totalmente interactiva y controlada por el observador, un examen ilimitado en tiempo real de las estructuras contenidas dentro de

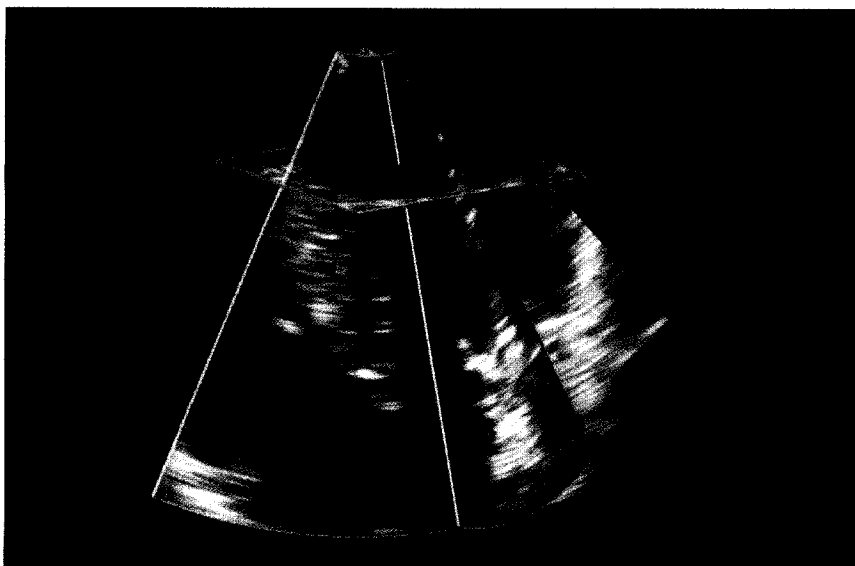


Fig. 9. Visualización de la imagen cardíaca tridimensional en forma de múltiples planos superpuestos. En la imagen se muestran dos planos en eje largo que corresponden a los planos B descritos anteriormente. Uno de ellos está comprendido por las líneas rojas y amarilla y el otro por la línea verde. Además, se observa un plano transversal (comprendido en el cuadrado marcado por el perímetro celeste) que puede ser deslizado desde la cúspide hacia la base de la pirámide e inclinado para brindar una apreciación detallada en eje corto de cualquier segmento del ventrículo izquierdo.

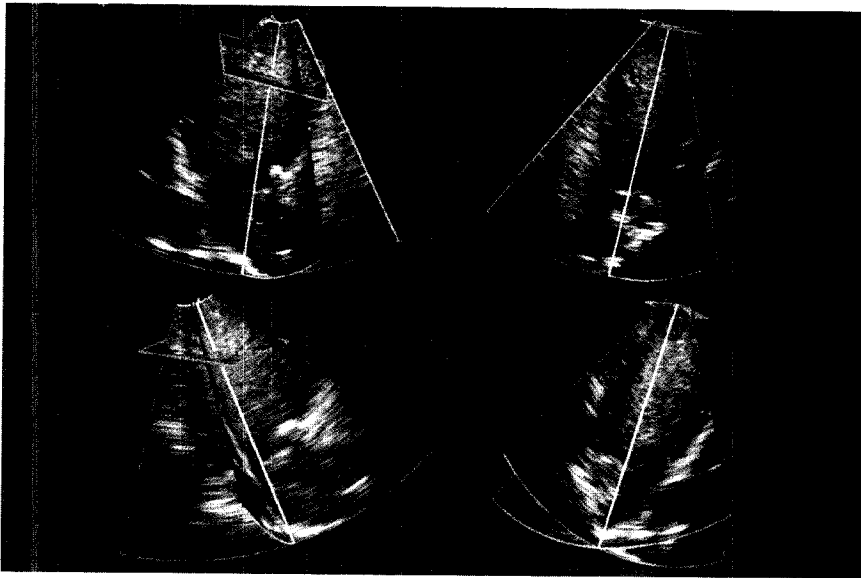


Fig. 10. Serie de imágenes con múltiples planos superpuestos (cada una de ellas similar a la mostrada en la figura anterior) que ilustran la libertad con la cual el observador puede girar e inclinar la imagen tridimensional para una visualización completa. En este caso, las imágenes fueron adquiridas durante la inyección de medio de contraste ultrasónico por vía endovenosa para mejorar la definición de los bordes endocárdicos. Como se puede apreciar, la rotación de la imagen permite un examen detallado de cualquier región del ventrículo izquierdo. La línea blanca central marca el entrecruzamiento de los planos longitudinales.

la imagen volumétrica. El propósito es crear formas más sofisticadas de visualización de imágenes tridimensionales que puedan luego ser adecuadas a las posibilidades del ecocardiógrafo. El objetivo final es optimizar las posibilidades diagnósticas de la ecocardiografía tridimensional en tiempo real. Por ejemplo, la visualización de múltiples planos superpuestos permite el análisis detallado de cualquier región del ventrículo izquierdo, lo cual facilitaría el análisis de la motilidad regional y, por ende, la interpretación del ecocardiograma con estrés.

Análisis de imágenes

Además de las ventajas relacionadas con la adquisición y visualización de las imágenes ya discutidas, la ecocardiografía tridimensional en tiempo

real tiene una ventaja aun mayor: La posibilidad de realizar un análisis cuantitativo verdaderamente tridimensional de la anatomía y el funcionamiento cardíacos. Esto constituye quizás el avance más significativo que ofrece esta técnica dentro del examen clínico no invasivo.

La ecocardiografía actual es considerada como el método más útil para la evaluación del paciente con enfermedad del corazón por la cantidad de información que brinda, sin exponer al paciente a ningún tipo de riesgo, y a un costo relativamente bajo. Sin embargo, la limitación más importante de la ecocardiografía convencional es la falta de una cuantificación confiable y reproducible. Por ejemplo, a pesar de que la ecocardiografía bidimensional supuestamente permite el cálculo de volúmenes ventricu-

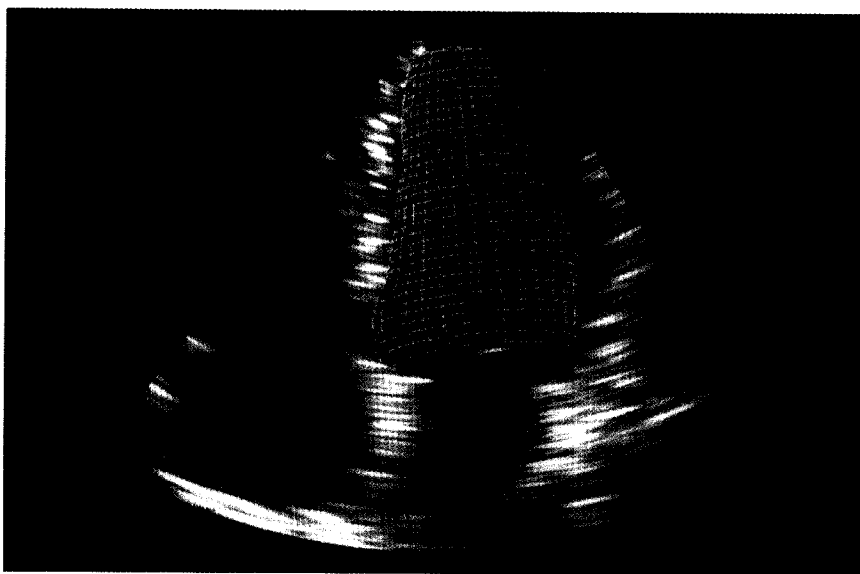


Fig. 11. Ejemplo de medición del volumen ventricular izquierdo usando una imagen tridimensional en tiempo real. La imagen ha sido transportada electrónicamente desde el ecógrafo a una computadora de alta performance que permite el manejo de imágenes tridimensionales. El programa es interactivo, de modo tal que, después que el observador identifica tres parámetros fácilmente reconocibles (el ápice, la base y una de las paredes laterales del ventrículo izquierdo), la computadora traza automáticamente en forma tridimensional un modelo que representa la cavidad ventricular. El observador puede luego examinar detalladamente la imagen y modificar el trazado, si es necesario, hasta lograr un ajuste perfecto entre el modelo y el endocardio. El volumen ventricular es calculado por la computadora en forma instantánea. Usualmente, el proceso lleva de tres a cinco minutos.

lares, el método ecocardiográfico más usado para la evaluación y el seguimiento de pacientes con insuficiencia valvular aórtica o mitral es la medición unidimensional del diámetro ventricular obtenida con el ecocardiograma modo M, una técnica desarrollada hace ya un cuarto de siglo. Esto se debe a que el cálculo del volumen ventricular con la ecocardiografía es engorroso, frecuentemente inexacto, y no reproducible. Además, este cálculo asume ciertas características geométricas del ventrículo izquierdo que no necesariamente se cumplen en todos los casos y que, paradójicamente, hacen que este cálculo se vuelva más inexacto cuando más se lo necesita como, por ejemplo, en el caso de anomalías regionales del ventrículo izquierdo que ocurren en pacientes con infarto de miocardio previo o con miocardiopatía hipertrófica.

Los cálculos convencionales más sencillos uni y bidimensionales (longitud y área, respectivamente) pueden ser fácilmente realizados sobre cualquier imagen obtenida con el ecocardiógrafo tridimensional. Esto, de por sí, constituye ya una ventaja. Por ejemplo, en el caso de pacientes con estenosis mitral, no es necesario que el operador realice una identificación adecuada del área valvular mínima durante la realización del estudio (como ocurre con la ecocardiografía bidimensional). El observador puede, después que las imágenes bidimensionales han sido adquiridas, realizar un "barrido" de la válvula mitral en la ubicación temporal y espacial correctas para así encontrar y trazar la apertura mínima de la válvula afectada. (7)

Indudablemente, la mayor ventaja reside en la posibilidad de evaluar cuantitativamente volúmenes cardíacos en forma fidedigna, por ser ésta una

medición eminentemente tridimensional. En este sentido, el ecocardiógrafo permite la medición de volúmenes a través de dos métodos diferentes: la superposición de discos ortogonales al eje mayor y la superposición de imágenes bidimensionales en abanico que comprenden la totalidad del volumen que se desea medir. Estas técnicas están siendo validadas para la medición de volumen ventricular izquierdo y derecho. En nuestro laboratorio estamos trabajando con un programa interactivo inicialmente desarrollado en la Universidad de Duke y basado en computadoras de alta performance gráfica (Silicon Graphics, Inc.) que permite la medición de volúmenes en forma rápida (cada medición lleva de 3 a 5 minutos) (Figura 11). Trabajos preliminares en modelos animales y en pacientes han demostrado la exactitud de esta técnica. (8, 9) Basados en el mismo principio, y en colaboración con ingenieros del Centro de Información Tecnológica del National Institutes of Health, hemos desarrollado programas interactivos similares que demostraron en estudios preliminares ser eficaces para la medición cuantitativa de masa ventricular (10) (Figura 12) e, inclusive, de miocardio con anomalías de contracción y/o perfusión (11) (Figura 13).

Doppler tridimensional

El desarrollo más reciente dentro de la ecocardiografía tridimensional en tiempo real ha sido la incorporación de Doppler color. Este avance, agregado al ecocardiógrafo recién en marzo de 1999, tiene múltiples potencialidades que aún no han sido totalmente exploradas.

La mejor forma conceptual de entender el Doppler color tridimensional es considerar la presencia de

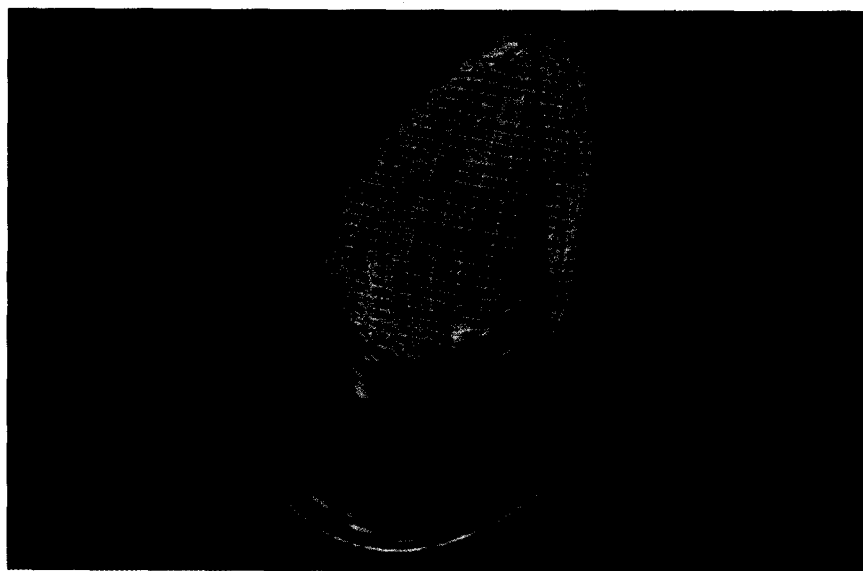


Fig. 12. Ilustración del modelo generado por la computadora de alta performance gráfica que se usa para calcular la masa miocárdica del ventrículo izquierdo. Usando una modificación del programa utilizado para medir el volumen ventricular (ver figura anterior), la computadora (en forma interactiva con el observador) genera un modelo tridimensional del endocardio (en amarillo) y del epicardio (en verde). La diferencia entre estos dos volúmenes, por lo tanto, corresponde a la masa miocárdica que es calculada automáticamente por la computadora.

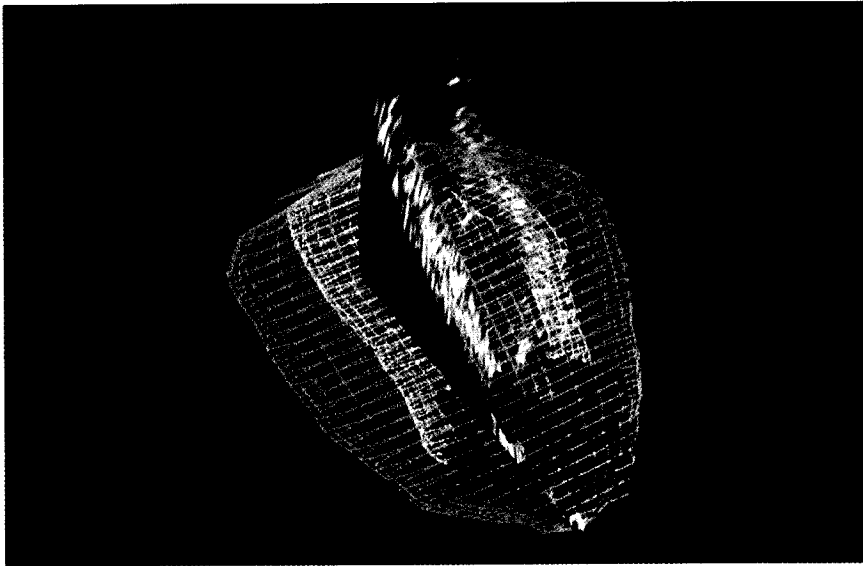


Fig. 13. Ilustración del modelo usado por la computadora de alta performance gráfica para calcular la magnitud de regiones del ventrículo izquierdo con anomalías de motilidad. Luego de calcular la masa miocárdica total del ventrículo como se indica en la figura anterior, el observador puede trazar, usando el mouse de la computadora, el endocardio del segmento con anomalías de contracción. Partiendo de este trazado, la computadora genera una representación gráfica del defecto de contracción (área en rojo) y calcula el volumen tridimensional del área anormal en términos absoluto y relativo a la masa miocárdica total.

una pirámide con información de velocidad de flujo contenida dentro de la imagen anatómica tridimensional. El tamaño de la pirámide de Doppler color es determinado por el operador y la información puede ser examinada en la misma forma descripta anteriormente para la imagen ecográfica. De esta forma, el patrón de velocidad de flujo intracardiaco proporcionado puede ser visualizado en múltiples planos que el observador puede modificar fácil y rápidamente tanto durante como después de la adquisición de las imágenes (Figura 14).

Desde el punto de vista cualitativo, el Doppler color tridimensional permite una evaluación más completa de los distintos patrones de flujo intracar-

díacos normales y anormales. Por ejemplo, en un paciente con insuficiencia mitral, la anatomía del chorro de regurgitación puede apreciarse más fácilmente si se consideran en forma simultánea dos vistas ortogonales como, por ejemplo, una imagen de 4 cámaras al mismo tiempo que una imagen en eje corto a nivel del plano valvular mitral. Además, como se describió anteriormente, la imagen en eje corto (correspondiente al plano C) puede deslizarse a voluntad del operador a lo largo de la imagen en 4 cámaras (plano B) e inclusive inclinarse (plano I) para obtener imágenes perfectamente ortogonales. De este modo, se puede examinar en forma más completa la dirección y severidad de la regurgitación.

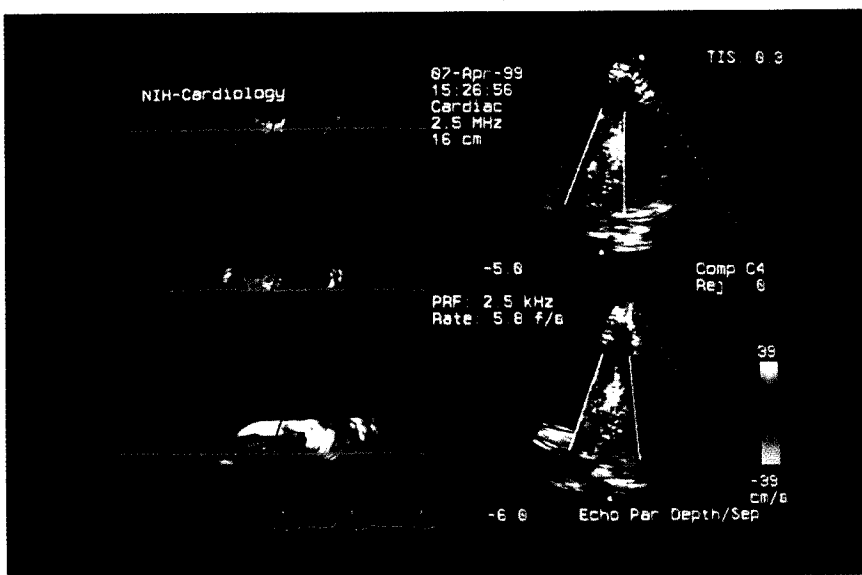


Fig. 14. Ejemplo de Doppler color tridimensional en un paciente con insuficiencia aórtica. La disposición de las múltiples imágenes tomográficas es igual a la descripta anteriormente. Las imágenes de la derecha (planos B) muestran el flujo anormal en relación con la cavidad total del ventrículo izquierdo, mientras que los cortes transversales de la izquierda (planos C) muestran la regurgitación en relación con el área del tracto de salida del ventrículo izquierdo.

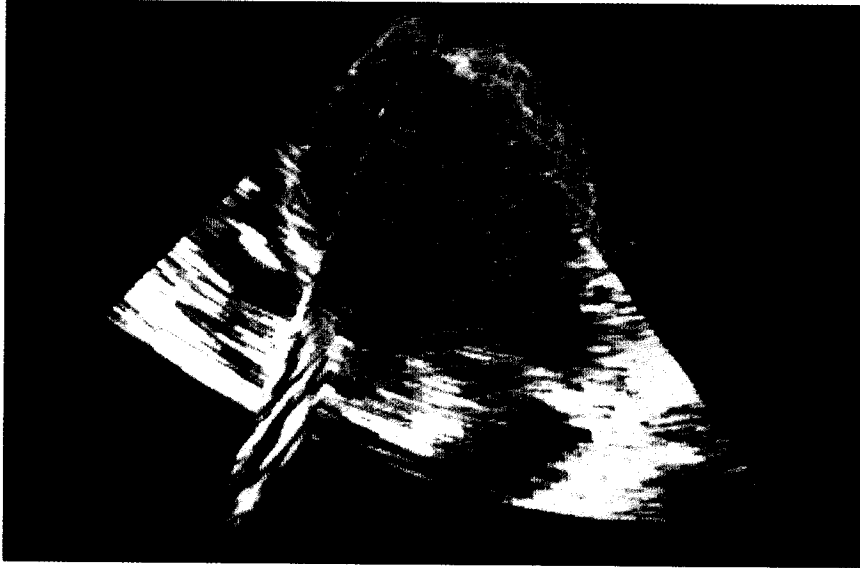


Fig. 15. Ilustración de una imagen tridimensional del ventrículo izquierdo usando un programa especialmente diseñado para la detección automática de bordes endocárdicos. Los anillos celestes representan distintos cortes transversales del ventrículo izquierdo desde el ápice hasta la base. Estos anillos son trazados automáticamente por la computadora usando un programa especialmente diseñado para la detección de bordes partiendo de formas tridimensionales básicas aplicadas a la geometría del ventrículo izquierdo. (Cortesía: Dr. George Stetten, Universidad de Duke.)

Esto puede tener importancia significativa en la cirugía de reconstrucción valvular, ya que brindaría al cirujano información preoperatoria sobre cómo abordar mejor la estructura valvular de acuerdo con el patrón tridimensional de la regurgitación. En pacientes con insuficiencia aórtica, el Doppler color tridimensional permite apreciar la magnitud de la regurgitación simultáneamente en sentido transversal (es decir, en relación con el área del tracto de salida del ventrículo izquierdo) y en sentido longitudinal (es decir, en relación con el eje mayor del ventrículo izquierdo) (Figura 14). Esto podría aumentar la reproducibilidad de la evaluación de esta anomalía valvular. Otra ventaja potencial del Doppler tridimensional es la evaluación cualitativa de los *shunts* intracardiácos. Con la ecocardiografía bidimensional, estas anomalías congénitas son examinadas en una sucesión de planos, en general poco estandarizados, obtenidos en forma secuencial. La ecocardiografía tridimensional en tiempo real con Doppler color permite la adquisición de imágenes para un examen completo del corazón en un solo ciclo cardíaco; el observador, *a posteriori*, puede examinar la imagen volumétrica con el correspondiente patrón de flujo independientemente de la forma en que fue realizado el estudio. Esto, a su vez, facilitaría la evaluación no invasiva anatómica y funcional de anomalías congénitas complejas.

Desde el punto de vista cuantitativo, la evaluación tridimensional en tiempo real de anormalidades de flujos intracardiácos puede proporcionar ventajas considerables. La aplicación cuantitativa más inmediata está relacionada con la cuantificación de la magnitud del volumen de regurgitación tanto mitral como aórtica. Esto constituiría una ventaja

importante sobre la ecocardiografía bidimensional, ya que ésta tiene importantes limitaciones con respecto a la determinación de la severidad de la insuficiencia valvular. El valor relativo del Doppler color tridimensional para este propósito aún no ha sido determinado. En nuestro laboratorio hemos iniciado recientemente estudios prospectivos, en modelos animales, de insuficiencia mitral, insuficiencia aórtica e insuficiencia pulmonar para determinar la utilidad y las desventajas de este método.

Conclusiones y proyecciones

La ecocardiografía tridimensional en tiempo real es una técnica novedosa basada en la adquisición instantánea de imágenes volumétricas. Esto permite realizar una evaluación completa de la anatomía y el funcionamiento cardíacos en un solo latido. Esta técnica expande así las posibilidades de la cardiología no invasiva. En primer lugar, permite un examen ultrasónico del corazón menos dependiente del operador y, por lo tanto, más reproducible. Además, brinda por primera vez la posibilidad de cuantificar la función ventricular en forma verdaderamente tridimensional sin tener que asumir una geometría preestablecida de dichas cámaras cardíacas. Es importante enfatizar que ésta es una técnica en constante desarrollo y que tiene, por el momento, ciertas limitaciones importantes. La principal de éstas es una resolución menor que la de la ecocardiografía bidimensional. Esta limitación puede afectar la identificación correcta del endocardio (y, por lo tanto, de la motilidad parietal) en ciertos pacientes. En estos casos, medios de contraste ultrasónico administrados por vía endovenosa facilitan la identificación del endocardio (Figura 10). Estudios realizados en nues-

tro laboratorio demostraron que esta intervención incrementa la exactitud de las mediciones de volumen obtenidas a partir de las imágenes tridimensionales. (12) Otras limitaciones, como la presencia de un ángulo de examinación menor que el usado por la ecocardiografía bidimensional convencional y la falta de segunda armónica, probablemente sean subsanadas en el futuro inmediato.

Innovaciones más sofisticadas están actualmente en investigación. Entre éstas, quizá la más importante sea la detección automática de bordes endocárdicos porque permitiría el cálculo instantáneo de los volúmenes y de la función cardíacos (13) (Figura 15). Específicamente, un análisis automático de la información tridimensional que sea exacto y confiable posibilitaría la investigación clínica de innumerables intervenciones que afectan la función ventricular. Otro campo aún no explorado es la posibilidad de usar esta técnica en conjunción con sustancias de contraste para medir perfusión miocárdica en forma tridimensional.

En conclusión, la ecocardiografía tridimensional en tiempo real abre nuevas puertas para el diagnóstico y la investigación clínica de las enfermedades del corazón. Los constantes avances de esta técnica prometen convertirla en el método de elección para la evaluación no invasiva de los pacientes cardíacos en el nuevo milenio.

SUMMARY

REAL-TIME THREE-DIMENSIONAL ECHOCARDIOGRAPHY

Conventional echocardiography and its representation of the heart in a two-dimensional format only provide partial information about cardiac function. The development of three-dimensional echocardiography permits a more objective and quantitative assessment of cardiac physiology. Real-time three-dimensional echocardiography was developed at Duke University and is based on the design of an ultrasound transducer with a matrix array that instantaneously acquires the image contained in a three-dimensional pyramidal volume. The simultaneous visualization of multiple tomographic images allows the anatomically correct examination of any structure contained within the volumetric image. Software and technologies based on high performance computers designed for graphic handling of three-dimensional images permit the rapid mapping of the volumetric image and provide possibilities beyond those of the echograph. Using this methodology, it is possible to simultaneously visualize multiple superimposed planes in a completely interactive manner control-

led by the operator. Real-time three-dimensional echocardiography also allows a quantitative assessment of cardiac volumes, ventricular mass, and even myocardium with contraction and/or perfusion abnormalities. The recent addition of color flow Doppler offers other possibilities not yet explored. This technique thus expands the abilities of non-invasive cardiology and opens new doors for the diagnosis and clinical investigation of cardiac disease.

Key words Cardiac ultrasound - Three-dimensional echocardiography - Ventricular function

BIBLIOGRAFIA

1. King DL, King DL Jr, Shao MY. Three-dimensional spatial registration and interactive display of position and orientation of real time ultrasound images. *Ultrasound Med* 1990; 9: 525-532.
2. Handschumacher MD, Lethor JP, Siu SC y col. A new integrated system for three-dimensional echocardiographic reconstruction: development and validation for ventricular volume with application in human subjects. *J Am Coll Cardiol* 1992; 21: 743-753.
3. Pandian NG, Roelandt J, Nanda NC y col. Dynamic three-dimensional echocardiography: Methods and clinical potential. *Echocardiography* 1994; 11: 237-259.
4. von Ramm OT, Smith SW. Real-time volumetric ultrasound imaging system. *J Digit Imaging* 1990; 3: 261-266.
5. Smith SW, Pavy HG Jr, von Ramm OT. High-speed ultrasound volumetric imaging system. I: Transducer design and beam steering. *IEEE Trans Ultrasonics Ferroelectrics Frequency Control* 1991; 38: 100-108.
6. von Ramm OT, Smith SW, Pavy HG Jr. High-speed ultrasound volumetric imaging system. II: Parallel processing and image display. *IEEE Trans Ultrasonics Ferroelectrics Frequency Control* 1991; 38: 109-115.
7. Rosenhek R, Binder T, Porenta G, Maurer G, Baumgartner H. Improved assessment of mitral valve stenosis by transthoracic real-time 3D echocardiography (abstract). *J Am Coll Cardiol* 1999; 33: 404A.
8. Schmidt MA, Ohazama CJ, Laurienzo JM y col. Real-time three-dimensional (3D) echocardiography accurately predicts left ventricular volume (abstract). *J Am Soc Echocardiogr* 1998; 11: 518.
9. Schmidt MA, Agyeman KO, Laurienzo JM y col. Left ventricular volume measurements in humans using real-time three-dimensional echocardiography: comparison with magnetic resonance imaging (abstract). *Circulation* 1998; 98: I-701.
10. Schmidt MA, Laurienzo JM, Brennenman CL y col. Accuracy of left ventricular mass measurements using real-time three-dimensional echocardiography (abstract). *Circulation* 1998; 98: I-153.
11. Camarano G, Jones M, Freidlin RZ y col. Real-time three-dimensional myocardial contrast echocardiography for the quantitative assessment of left ventricular perfusion defects (abstract). *J Am Soc Echocardiogr* 1999 (en prensa).
12. Sachdev V, Agyeman KO, Laurienzo JM y col. Left ventricular volume measurements in cardiac patients using contrast enhanced real-time three-dimensional echocardiography: feasibility and accuracy compared with magnetic resonance imaging (abstract). *J Am Coll Cardiol* 1999; 33: 486A.
13. Stetten G, Irvine T, Ritscher D y col. Improved accuracy for a semi-automated method for computing right ventricle cavity volumes from real time three-dimensional (3D) echo: comparison studies to ultrasonic crystals in an open-chest animal model (abstract). *J Am Coll Cardiol* 1999; 33: 486A.