

Ecocardiografía tridimensional: Técnica, Aplicaciones clínicas y perspectivas

Nilda Espinola Zavaleta,* Francisco Javier Roldán,* Pedro Yánac Chávez,* Ángel Romero Cárdenas,* Jesús Vargas Barrón*

Resumen

Objetivo: La ecocardiografía tridimensional (3D) representa una nueva era en la cardiología contemporánea. Permite obtener imágenes de las estructuras cardíacas, lo más aproximadas, a su forma de anatomía macroscópica real. Aun cuando la técnica modo M y bidimensional, por más de 30 años ha incrementado notablemente las posibilidades de estudio del corazón, no es suficiente para reconstruir su compleja anatomía tridimensional. Se requiere de un esfuerzo mental extra para realizar la reconstrucción espacial tridimensional de múltiples imágenes en dos dimensiones, especialmente en las cardiopatías congénitas. **Conclusiones:** En la actualidad, la información adicional morfológica y funcional que aporta la técnica 3D en las diversas áreas de la cardiología clínica, quirúrgica y experimental justifican su uso más amplio. En el futuro esta técnica se convertirá en un estudio de anatomía patológica “virtual”.

Palabras clave: Ecocardiografía tridimensional. Adquisición. Reconstrucción.

Key words: Three-dimensional echocardiography. Acquisition. Reconstruction.

Summary

THREE-DIMENSIONAL ECHOCARDIOGRAPHY

Objective: Three-dimensional echocardiography represents a new era in the contemporary cardiology, because depicts the cardiac structures in their realistic forms. This information can not be obtained using a two-dimensional perspective. Although two-dimensional (2D) and M-mode echocardiography has greatly enhanced the ability to visualize the functioning heart for more than 30 years, 3D interpretative mental skills are necessary to compile the 2D slices of the complex 3D anatomy, particularly in congenital heart disease. **Conclusions:** At present, its additional morphological and functional information in surgical decision-making and the increasing number of clinical questions than can be answered justify the clinical use of this technique. In the future it will the study of “virtual” pathologic anatomy.

Introducción

El ultrasonido empleado en el estudio cardiovascular ha progresado en forma vertiginosa desde las imágenes en modo A, derivadas de un haz de ultrasonido delgado, hasta los registros gráficos de modo M, bidimensional y Doppler. De esta manera, la ecocardiografía se ha convertido en una herramienta diagnóstica muy importante de la cardiología contemporánea. Pero el corazón es un órgano complejo tridimensional, que ha sido representado ecocardiográficamente desde el punto de vista anatómico sólo en dos dimen-

siones. Los avances en la tecnología de la computación han permitido el desarrollo de la ecocardiografía tridimensional, que constituye una nueva era en la imagenología cardiovascular.¹⁻⁴ Las primeras imágenes tridimensionales del corazón humano fueron obtenidas en 1974 por Dekker y colaboradores.⁵ Inicialmente, se utilizó para la determinación de los volúmenes ventriculares, con base en múltiples cortes seccionales de imágenes estáticas, que requerían de un trazado manual muy laborioso de los bordes endocárdicos.^{6,7} En la actualidad, la adquisición de las imágenes se ha sim-



* Departamento de Ecocardiografía.

Instituto Nacional de Cardiología “Ignacio Chávez”. (INCICH. Juan Badiano No. 1, 14080 México, D.F.)

Aceptado: 21 de Julio de 2000

plificado como consecuencia del desarrollo del control computarizado de los sistemas de rotación y disparo para la obtención de las imágenes tanto en adultos como en niños.⁸⁻¹⁰

La compresión de los datos y las poderosas estaciones de trabajo computarizadas han automatizado muchos de los pasos y han disminuido el tiempo para el procesamiento pertinente. La obtención de cortes en varios planos para reconstruir una imagen en perspectiva; la segmentación y el proceso de sombreado se han ido refinando gradualmente, de manera que actualmente es posible hacer una reconstrucción dinámica de las patologías cardiovasculares con alta resolución a pesar de la complejidad de éstas.^{11,12} Muchos estudios experimentales y clínicos han demostrado que la aplicación clínica de este método es ya una realidad.^{8,9,13,14}

Aplicaciones clínicas

El mayor avance de la ecocardiografía tridimensional es la reproducción de numerosos y novedosos cortes seccionales en diferentes planos y la representación tridimensional de las estructuras cardíacas. La ecocardiografía tridimensional es de gran valor en las cardiopatías congénitas, ya que permite una mejor evaluación de las anormalidades morfológicas y una mejor comprensión de la compleja relación espacial.^{15,16} En los defectos interatriales e interventriculares permite definir con precisión el tamaño, la forma y su relación con las estructuras adyacentes.¹⁷⁻¹⁹ Es superior al ecocardiograma transesofágico bidimensional en la valoración de los dispositivos utilizados para el cierre de los defectos, especialmente cuando están colocados anormalmente.^{20,21} Es de gran utilidad en el diagnóstico de las membranas atriales y subaórticas. También permite diferenciar la válvula mitral de la tricúspide en la transposición corregida de las grandes arterias.²²⁻²⁴

En las enfermedades valvulares como la valvulopatía mitral predice con precisión la morfología de las valvas, comisuras y aparato subvalvular y permite determinar el área valvular mitral con un coeficiente de correlación de 0.98 en relación al tiempo de hemipresión.^{25,26} En la valvuloplastia mitral con catéter balón permite visualizar la apertura de las comisuras, el sitio de ruptura de las valvas y determinar el área valvular por planimetría.²⁷ Es de gran utilidad en la insuficiencia valvular, ya que muestra el origen, la dirección y la relación espacial de la geometría compleja de los flujos regurgitantes, especialmente los asimétricos con efecto

Coanda.²⁸⁻³⁰ En otras aplicaciones permite observar al prolapo valvular mitral o tricuspídeo como una protrusión del lado auricular de la válvula.³¹ El ecocardiograma tridimensional es altamente sensible para el diagnóstico de ruptura de cuerdas tendinosas.³²

También las anormalidades de la válvula aórtica se pueden observar en múltiples proyecciones, especialmente del lado vascular y se pueden hacer cálculos precisos del área valvular aórtica por planimetría con un coeficiente de correlación de 0.88 en relación a la ecuación de continuidad y a la planimetría por ecocardiografía transesofágica bidimensional. En la insuficiencia aórtica ayuda a una mejor determinación de la geometría del flujo regurgitante así como de la severidad de éste.³³⁻³⁵ En relación a la cirugía valvular, proporciona información morfológica adicional de la válvula y complementaria hasta en el 25% de los casos.³⁶ Se pueden analizar las prótesis valvulares y valorar su función con calidad excelente o adecuada en el 81% de los casos.

En la miocardiopatía hipertrófica idiopática, la ecocardiografía tridimensional logra detectar el involucro de la válvula mitral, lo que constituye una indicación para el tratamiento quirúrgico de primera intención.⁹

En la cardiopatía isquémica permite hacer una valoración precisa de los volúmenes,^{37,38} masa^{39,40} y función tanto del ventrículo izquierdo como del ventrículo derecho,^{41,42} sin asumir presunciones geométricas como ocurre con otras técnicas. La correlación que existe entre el eco tridimensional y la resonancia magnética en relación a los volúmenes telediastólico y telesistólico del ventrículo izquierdo es de 0.90 y 0.93, respectivamente. La correlación de los volúmenes ventriculares entre el eco tridimensional y la ventriculografía es mayor con una $r = 0.99$. Existe excelente correlación entre la masa y el grosor parietal del ventrículo izquierdo al compararlo con las medidas anatómicas con un coeficiente de correlación de 0.98 y 0.93, respectivamente.^{37,40}

También se han comparado los volúmenes y la masa ventricular derecha obtenidos por eco tridimensional y resonancia magnética y el coeficiente de correlación entre estas dos técnicas para el volumen telediastólico es de 0.95, para el telesistólico de 0.87 y para la masa ventricular derecha de 0.81.^{41,42}

Es de utilidad en el análisis cualitativo y cuantitativo de las anormalidades de la movilidad parietal regional ventricular⁴³ y en la perfusión

miocárdica con agentes de contraste que cruzan la barrera pulmonar.⁴⁴

En las masas intracardíacas o intravasculares, incluyendo vegetaciones, trombos o placas ateromatosas, permite hacer un análisis cualitativo (sitio de implantación, tamaño y movilidad) y cuantitativo (medidas precisas de las dimensiones y volúmenes).^{9,45} También ayuda a valorar las enfermedades de la aorta como la dilatación, los aneurismas, la disección y la coartación.⁴⁶

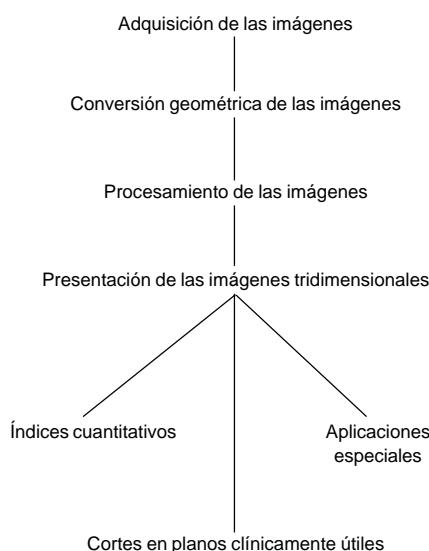


Fig. 1. Pasos para la reconstrucción tridimensional de las imágenes.

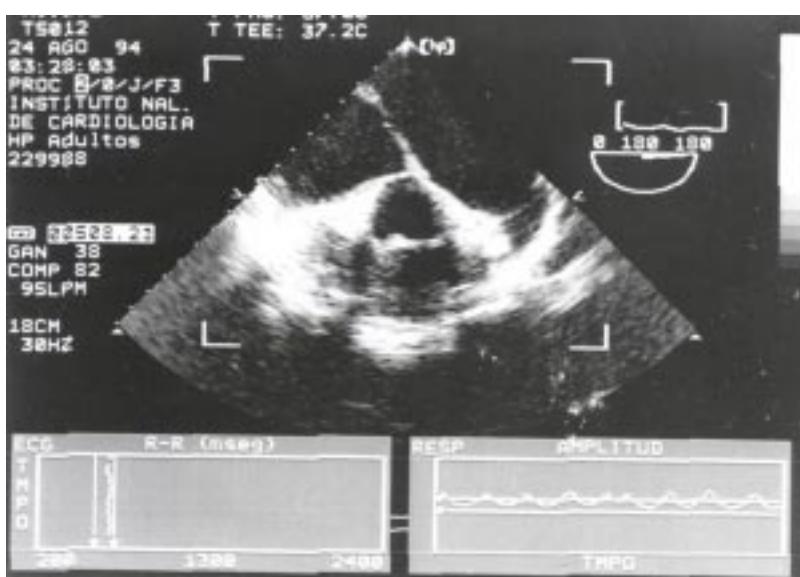


Fig. 2. Adquisición transesofágica rotacional sincronizada con la respiración y la frecuencia cardíaca.

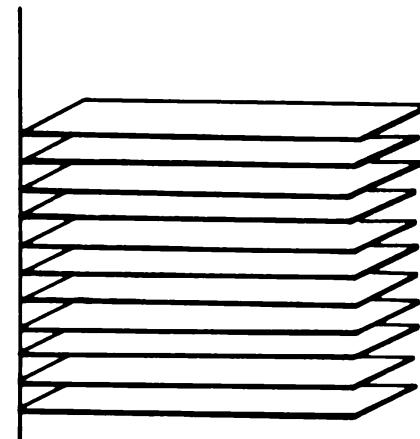


Fig. 3. Adquisición de las imágenes transesofágicas en paralelo.

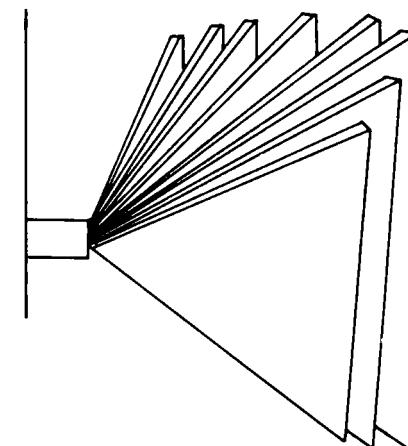


Fig. 4. Escaneo tipo abanico en un eje longitudinal. Las imágenes adquiridas tienen ángulos iguales.

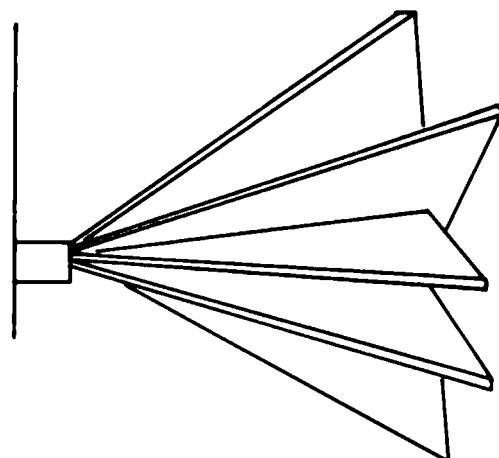


Fig. 5. Adquisición rotacional de las imágenes con transductor transesofágico multiplánar.

Requerimientos para la reconstrucción tridimensional

En la actualidad la adquisición de las imágenes para la reconstrucción tridimensional es fundamen-

talmente secuencial. Los pasos esenciales para una reconstrucción tridimensional son (*Fig. 1*):

1. Adquisición y almacenamiento digital de las imágenes bidimensionales sincronizadas con el electrocardiograma y la respiración (*Fig. 2*), para mantener un registro espacial y temporal de las imágenes. La adquisición de las imágenes bidimensionales se realiza cada 2° ó 3°, hasta completar 180° con un software especial que está integrado en los nuevos equipos de ultrasonido cardíaco; las imágenes son almacenadas en discos ópticos. El paso crucial para una reconstrucción tridimensional adecuada es la adquisición de las imágenes bidimensionales. Hay diferentes métodos para adquirir las imágenes:
 - a) Adquisición randomizada, donde la adquisición de los datos se realiza con el transductor en varias direcciones en una ventana acústica o con varias posiciones del transductor en diferentes ventanas acústicas. Se puede realizar con brazo mecánico o con localizador acústico o electromagnético.
 - b) Adquisición secuencial tomográfica, cuando las imágenes bidimensionales de varias regiones del corazón no se adquieren en forma simultánea, esto es fundamental para relacionar cada imagen con otras en el espacio y el tiempo. Se puede hacer en cortes paralelos de imágenes bidimensionales que son equidistantes, es decir que son iguales en tamaño y distancia (*Fig. 3*) o con rastreo tipo abanico con imágenes que tienen ángulos iguales (*Fig. 4*). Al igual que en los cortes paralelos, en el rastreo tipo abanico el movimiento del transductor se puede operar manualmente o con un motor controlado a través de una computadora. También se utiliza la técnica rotacional, donde el transductor rota alrededor de un punto pivote y se usa idealmente con transductores transtorácicos o transesofágicos multiplanares (*Fig. 5*).^{47,48}
2. Procesamiento de la imágenes y reconstrucción tridimensional, que incluye conversión geométrica de las imágenes adquiridas en datos cúbicos, interpolación y segmentación. Este procedimiento se realiza en forma separada en una estación de trabajo computarizada.
3. Presentación de las imágenes tridimensionales con índices cuantitativos y funciones espe-

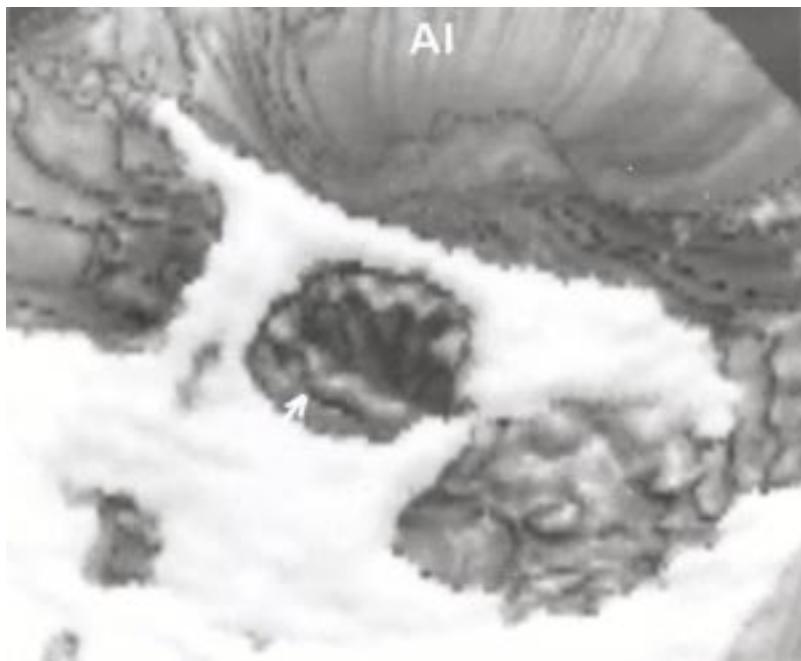


Fig. 6. Reconstrucción tridimensional de una aorta bicúspide en un paciente con síndrome antifosfolípido. Los bordes de ambas valvas están festonados (Flecha). AI = Aurícula izquierda.

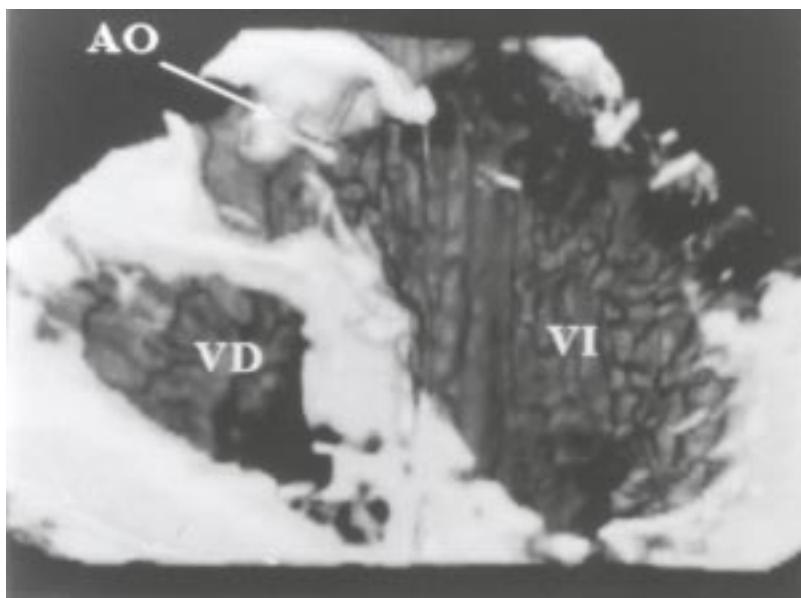


Fig. 7. Imagen tridimensional de ambos ventrículos y de la vía de salida del ventrículo izquierdo. Ao = Aorta, VI = Ventrículo izquierdo, VD = Ventrículo derecho.

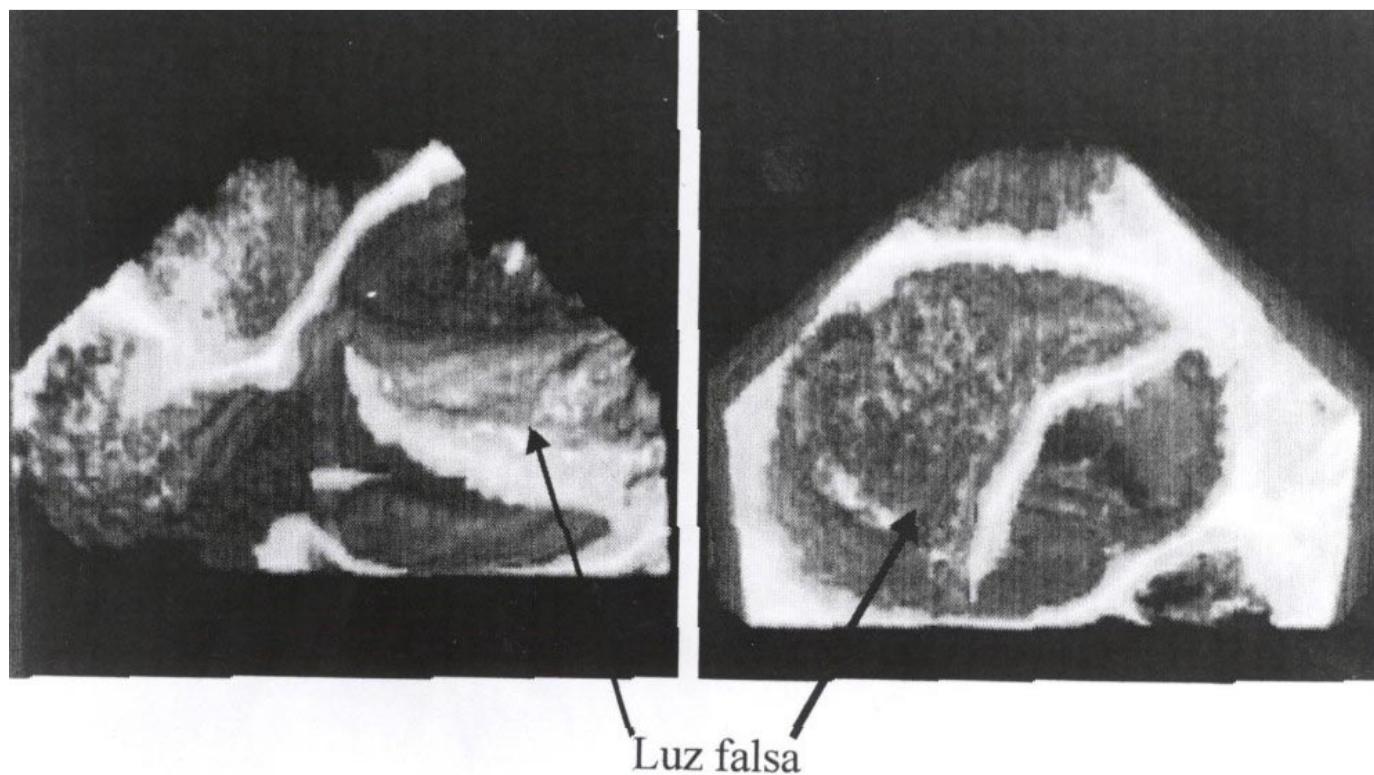


Fig. 8. Imágenes tridimensionales de disección de la aorta ascendente. Con las flechas se señala la luz falsa con efecto de contraste espontáneo en su interior.

ciales. Hay 2 maneras de presentar las imágenes: de superficie, creando imágenes tridimensionales con apariencia sólida y de volumen, obteniendo imágenes que pueden tener apariencia sólida o transparente. Esto depende del nivel de opacificación, sombreado (escala de grises, distancia, gradiente y textura) y luminosidad, lo que permite ver la cavidad ventricular a través del miocardio (*Figs. 6, 7 y 8*). Hay 2 formas de reconstrucción tridimensional “on line” -en tiempo real y “off line” -primero se adquieren las imágenes y luego se reconstruyen. La técnica que nosotros utilizamos es “off line”.

Impacto clínico

Esta técnica permite obtener imágenes tridimensionales de la anatomía cardíaca normal y patológica en proyecciones nunca antes vistas, así como datos cuantitativos más precisos que los actuales.^{8,9,14}

Limitaciones

Es un procedimiento que consume tiempo y requiere de personal entrenado en la adquisición

y reconstrucción de imágenes tridimensionales. La curva de aprendizaje es relativamente lenta. Es una técnica extremadamente sensible a las ganancias y movimientos durante la adquisición, factores que pueden limitar una adecuada reconstrucción tridimensional.⁸ Además, la resolución se deteriora con la profundidad. Por el momento esta técnica es utilizada solamente en protocolos de investigación y no en la práctica clínica habitual.

Futuro al final del milenio

Se pretende realizar una adquisición ultrarrápida y ya existen equipos que permiten obtener imágenes volumétricas en tiempo real. Se pretende desarrollar la cardiotomía electrónica y hacer modelos del corazón y de las estructuras cardíacas, que incluyen la masa ventricular disfuncionante, la movilidad parietal y la perfusión miocárdica en tiempo real. También se ha iniciado la investigación^{9,49-53} de nuevos métodos como la realidad virtual y la holografía -“modelos de corazón en la mano”.

Referencias

1. BELOHLAVEK M, FOLEY DA, GERBER TC: *Three- and four-dimensional cardiovascular ultrasound imaging: A new era for echocardiography*. Mayo Clin Proc 1993; 68: 221-240.
2. PANDIAN NG, NANDA NC, SCHWARTZ SL: *Three-dimensional and four-dimensional transesophageal echocardiographic imaging of the heart and aorta in humans using a computed tomographic imaging probe*. Echocardiography 1993; 9: 677-687.
3. WOLLSCHLAGER H: *Transesophageal echo computer tomography: A new method for dynamic three-dimensional imaging of the heart*. In Computers in Cardiology 1989. IEEE Computer Society 1990: 39.
4. MATSUMOTO M, MATSUO H, KITABATAKE A, INOUE M, HAMANAKA Y: *Three-dimensional echocardiographic images at desired planes by a computerized system*. Ultrasound Med Biol 1977; 3: 163-178.
5. DEKKER DL, PIZZI RL, DONG E JR: *A system for ultrasonically imaging the human heart in three dimensions*. Comput Biomed Res 1974; 7: 544-553.
6. ARIET M, GEISER EA, LUPKIEWICZ SM: *Evaluation of a three-dimensional reconstruction to compute left ventricle volume and mass*. Am J Cardiol 1984; 54: 415-420.
7. SAPIN PM, SCHROEDER KD, SMITH MD: *Three-dimensional echocardiographic measurement of left ventricular volume in vitro: Comparison with two-dimensional echocardiography and cineventriculography*. JACC 1993; 22: 1530-1537.
8. PANDIAN NG, ROELANDT J, NANDA N, SUGENG L, CAO QL, AZEVEDO J, ET AL: *Dynamic three-dimensional echocardiography: Methods and Clinical Potential*. Echocardiography 1994; 11: 237-259.
9. ROELANDT J: *Three-dimensional echocardiography the future today!* Acta Cardiol 1998; 53(6): 323-336.
10. PANDIAN N, VOGEL M, CAO QL, BLUHLMAYER K, AZEVEDO J, PAI R, ET AL: *Dynamic multidimensional visualization of acquired and congenital abnormalities of the aortic valve, aortic root and related structures in children and adults: Direct depiction of the pathomorphology by transthoracic and transesophageal 3-dimensional echocardiography (Abstract)*. JACC February 1994; 10A. (Special issue).
11. NANDA NC, PINHEIRO L, SANYAL R: *Multiplane transesophageal echocardiographic imaging and three-dimensional reconstruction*. Echocardiography 1992; 9: 667-676.
12. PANDIAN NG, CAO QL, ERBEL R, FLACHSKAMP F, MARX G, NANDA N, ET AL: *A comprehensive approach for image segmentation, cutting planes and display projections in three-dimensional echocardiography: Suggested guidelines for clinically useful projections based on multicenter experience in 300 adult and pediatric patients (Abstract)*. JACC February 1994; 9A. (Special issue).
13. ESAKOF D, DELOID G, PANDIAN N, CAO QL, GORDON M, SCHWARTZ S, ET AL: *Trajectory technique in three-dimensional echocardiography: A method to aid in 3-dimensional localization of cardiac lesions and direct an approach with potential implications in planning interventional and surgical procedures for cardiac lesions (Abstract)*. JACC February 1994; 30A. (Special issue).
14. SINCLAIR B, SAHN DJ: *Three-dimensional reconstruction in echocardiography. Current and future applications in congenital heart disease*. Cardiol Rev 1996; 4(3): 129-137.
15. FULTON DR, MARX GR, PANDIAN NG: *Dynamic three-dimensional echocardiographic imaging of congenital heart defects in infants and children by computer controlled tomographic parallel slicing using a single integrated ultrasound instrument*. Echocardiography 1994; 11: 155-164.
16. SALUSTRI A, SPITAELS S, MCGHIE J, VLETTER W, ROELANDT JRTC: *Transthoracic three-dimensional echocardiography in adult patients with congenital heart disease*. JACC 1995; 26: 759-767.
17. MARX G, FULTON DR, PANDIAN NG, VOGEL M, CAO QL, LUDOMIRSKI A, ET AL: *Delineation of site, relative size and dynamic geometry of atrial septal defects by real-time three-dimensional echocardiography*. JACC 1995; 25: 482-490.
18. FRANKE A, KÜHL HP, RULANDS D, JANSEN C, ERENA C, GRABITZ RG, ET AL: *Quantitative analysis of the morphology of secundum-type atrial septal defects and their dynamic change*

using transesophageal three-dimensional echocardiography. *Circulation* 1997; 96 (Suppl. II): II 323-327.

19. KARDON RE, CAO QL, MASANI N, SUGENG L, SUPRAN S, WARNER KG, ET AL: *New insights and observations in three-dimensional echocardiographic visualization of ventricular septal defects. Experimental and clinical studies.* *Circulation* 1998; 98: 1307-1314.
20. HELLENBRANDT WE, FAHEY JT, MCGOWAN FX, WEITIN GG, KLEINMAN CS: *Transesophageal echocardiographic guidance of transcatheter closure of atrial septal defect.* *Am J Cardiol* 1990; 66: 207-213.
21. MAGNI G, HIJAZI ZM, PANDIAN NG, DELABAYS A, SUGENG L, LASKARI C, ET AL: *Two-and three-dimensional transesophageal echocardiography in patient selection and assessment of atrial septal defect closure by the new DAS-Angel wing device. Initial clinical experience.* *Circulation* 1997; 96: 1722-1728.
22. TANTENGCO MV, BATES JR, RYAN T, CALDWELL RL, DARRAGH R, ENSING GJ: *Dynamic three-dimensional echocardiographic reconstruction of congenital cardiac septation defects.* *Pediatr Cardiol* 1997; 18: 184-190.
23. GE S, WARNER JG, FOWLE KM, KON ND, BROOKER RF, NAMEIR AM, ET AL: *Morphology and dynamic change of discrete subaortic stenosis can be imaged and quantified with three-dimensional transesophageal echocardiography.* *J Am Soc Echocardiogr* 1997; 10: 713-716.
24. SAMAL AK, NANDA NC, THAKUR AC, AGGARWAL R, JAMIL F, KAPUR G, ET AL: *Three-dimensional echocardiographic reconstruction of atrial membranes.* *Echocardiography* 1998; 15: 605-610.
25. SALUSTRI A, BECKER AE, HERWERDEN L, VLETTER WB, TEN CATE FJ, ROELANDT JRTC: *Three-dimensional echocardiography of normal and pathologic mitral valve: A comparison with two-dimensional transesophageal echocardiography.* *JACC* 1996; 27: 1502-1510.
26. CHEN Q, NOSIR YFM, VLETTER WB, KINT PP, SALUSTRI A, ROELANDT JRTC: *Accurate assessment of mitral valve area in patients with mitral stenosis by three-dimensional echocardiography.* *J Am Soc Echocardiogr* 1997; 10: 133-140.
27. APPLEBAUM RM, KASLIWAL RR, KANOJIA A, SETH A, BHANDARI S, TREHAN N, ET AL: *Utility o three-dimensional echocardiography during ballon mitral valvuloplasty.* *JACC* 1998; 32: 1405-1409.
28. DE SIMONE R, GLOMBITZA G, VAHL CF, ALBERS J, MEINZER HP, HAGL S: *Three-dimensional color flow Doppler: A new approach for quantitative assessment of mitral regurgitant jets.* *J Am Soc Echocardiogr* 1999; 12: 173-185.
29. ACAR P, JONES M, SHIOTA T, MASANI N, DELABAYS A, YAMADA Y, ET AL: *Quantitative assessment of chronic aortic regurgitation with 3-dimensional echocardiographic reconstruction: Comparison with electromagnetic flowmeter measurements.* *J Am Soc Echocardiogr* 1999; 12: 138-148.
30. LI Z, WANG X, XIE M, NANDA NC, HSIUNG MC: *Dynamic three-dimensional reconstruction of abnormal intracardiac blood flow.* *Echocardiography* 1997; 14: 375-381.
31. HOZUMI T, YOSHIKAWA J, YOSHIDA K, AKASAKA T, TAKAGI T, YAMAMURO A: *Assessment of flail mitral leaflets by dynamic three-dimensional echocardiographic imaging.* *Am J Cardiol* 1996; 79: 223-225.
32. MALHOTRA S, NANDA NC, McELDERRY HT, THAKUR AC, COSTA F: *Transesophageal three-dimensional echocardiography in papillary muscle rupture.* *Echocardiography* 1998; 15: 603-604.
33. KASPRZAK JD, SALUSTRI A, ROELANDT JRTC, TEN CATE FJ: *Three-dimensional echocardiography of the aortic valve: Feasibility, clinical potential, and limitations.* *Echocardiography* 1998; 15: 127-138.
34. SUGENG L, CAO QL, DELABAYS A, ESAKOF D, MARX G, VANNAN M, ET AL: *Three-dimensional echocardiographic evaluation of aortic disorders with rotational multiplanar imaging: experimental and clinical studies.* *J Am Soc Echocardiogr* 1997; 10: 120-132.
35. MENZEL T, MOHR-KAHALY S, KOELSCH B, KUPFERWASSER I, KOPP H, SPIECKER M, ET AL: *Quantitative assessment of aortic stenosis by three-dimensional echocardiography.* *J Am Soc Echocardiogr* 1997; 10: 215-223.
36. ABRAHAM TP, WARNER JG, KON ND, LANTZ PE, FOWLE KM, BROOKER RF, ET AL: *Feasibility, accuracy and incremental value of intraoperative three-dimensional transesophageal echocardiography in valve surgery.* *Am J Cardiol* 1997; 80: 1577-1582.
37. KUPFERWASSER I, MOHR-KAHALY S, STÄHR P, RUPPRECHT HJ, NIXDORFF U, FENSTER M, ET AL:

Transthoracic three-dimensional echocardiographic volumetry of distorted left ventricles using rotational scanning. J Am Soc Echocardiogr 1997; 10: 840-852.

38. KURODA T, KINTER TM, SEWARD JB, YANAGI H, GREENLEAF JF: *Accuracy of three-dimensional volume measurement using biplane transesophageal echocardiographic probe: In vitro experiment. J Am Soc Echocardiogr 1991; 4: 475-484.*

39. GOPAL AS, SCHENELLBAECHER MJ, SHEN Z, BOXT LM, KATZ J, KING DL: *Freehand three-dimensional echocardiography for determination of left ventricular volume and mass in patients with abnormal ventricles: Comparison with magnetic resonance imaging. J Am Soc Echocardiogr 1997; 10: 853-861.*

40. KÜHL HP, FRANKE A, FRIELINGSDORF J, FLASKAMP C, KREBS W, FLACHSKAMPF, ET AL: *Determination of left ventricular mass and circumferential wall thickness by three-dimensional reconstruction: In vitro validation of a new method that uses a multiplane transesophageal transducer. J Am Soc Echocardiogr 1997; 10: 107-119.*

41. JIANG L, VAZQUEZ DE PRADA JA, HANDSCHUMACHER MD, GUERRERO JL, VLAHAKES GJ, KING ME, ET AL: *Three-dimensional echocardiography: In vivo validation for right ventricular free wall mass as an index of hypertrophy. JACC 1994; 23: 1715-1722.*

42. SADANIANTZ A, BURTT D, NANDA NC, LI Z: *Three-dimensional echocardiography of right heart pathology. Echocardiography 1998; 15: 795-806.*

43. COLLINS M, HSIEH A, OHAZAMA CJ, OTA T, STETTEN G, DONOVAN CL, ET AL: *Assessment of regional wall motion abnormalities with real-time 3-dimensional echocardiography. J Am Soc Echocardiogr 1999; 12: 7-14.*

44. AIAZIAN AA, ATAOULIAKHANOVA D, VLETTER W, VARCHENKO N, GANKIN K, TEN CATE FJ, ET AL: *Three-dimensional myocardial perfusion maps by contrast echocardiography. J Am Soc Echocardiogr 1997; 14: 349-355.*

45. BUCK T, GÖRGE G, HUNOLD P, ERBEL R: *Three-dimensional imaging in aortic disease by lighthouse transesophageal echocardiogra-*

phy using intravascular ultrasound catheters. Comparison to three-dimensional transesophageal echocardiography and three-dimensional intra-aortic ultrasound imaging. J Am Soc Echocardiogr 1998; 11: 243-258.

46. NANDA NC, KHATRI GK, SAMAL AK, EL-RAHMAN SMABD; THAKUR AC, JAMIL F, ET AL: *Three-dimensional echocardiographic assessment of aortic dissection. Echocardiography 1998; 15: 745-754.*

47. LEOTTA DF, MUNT B, BOLSON EL, KRAFT C, MARTIN RW, OTTO CM, ET AL: *Quantitative three-dimensional echocardiography by rapid imaging from multiple transthoracic windows: In vitro validation and initial in vivo studies. J Am Soc Echocardiogr 1997; 10: 830-839.*

48. ROELANDT JRTC, TEN CATE FJ, VLETTER WB, TAAMS MA, BEKKERING L, DJOA KK, ET AL: *Ultrasonic dynamic three-dimensional visualization of the heart with a multiplane transesophageal imaging transducer. J Am Soc Echocardiogr 1994; 7: 217-229.*

49. BRUINING N, BERLAGE T, GRUNST G, ALKAR HJ, MUMM B, ANGELSEN B, ET AL: *CardiAssist: developing a support platform for 3D Ultrasound. Computers in Cardiology. Indianapolis, IEEE Computer Society Press. 1997: 557-560.*

50. VANNAN M, PANDIAN NG, DALTON MN, SCHWARTZ S, MUMM B, CAO QL: *Volumetric holography of cardiac defects in humans. Echocardiography 1998; 15: 233-238.*

51. SHEIKH KH, SMITH SW, VON RAMM OT, KISSLO J: *Real-time, three dimensional echocardiography: feasibility and initial use. Echocardiography 1991; 8: 119-125.*

52. TAKUMA S, ZWAS DR, FARD A, WU H, CHAUDHRY H, DI TULLIO MR, ET AL: *Real-time, 3-dimensional echocardiography acquires all standard 2-dimensional images from 2 volume sets: A clinical demonstration in 45 patients. J Am Soc Echocardiogr 1999; 12: 1-6.*

53. DELABAYS A, CAO QL, YAO J, MAGNI G, KANOJIA A, ACAR P, ET AL: *Contrast-three dimensional echocardiography in acute myocardial infarction: 3-D reconstruction of perfusion defects yields accurate estimate of infarct mass and extent. JACC 1996; 27 (Suppl A): 63A.*