

# **Fechas trascendentes de la Cardiología: breve historia de la ecocardiografía: cronología, pioneros y publicaciones clave.-**

Investigadores del Reino Unido, Bélgica y Países Bajos publicaron en *The European Heart Journal: Cardiovascular Imaging*, del 22 de agosto de 2022 una síntesis histórica que dio cuenta de la Historia de la ecocardiografía incluyendo la cronología, los principales impulsores de la técnica y las respectivas publicaciones señeras\*.

En FECHAS TRASCENDENTES DE LA CIENCIA de hoy se transcribirá este artículo que brinda un panorama completo del desarrollo de esta técnica de imagen cardíaca.

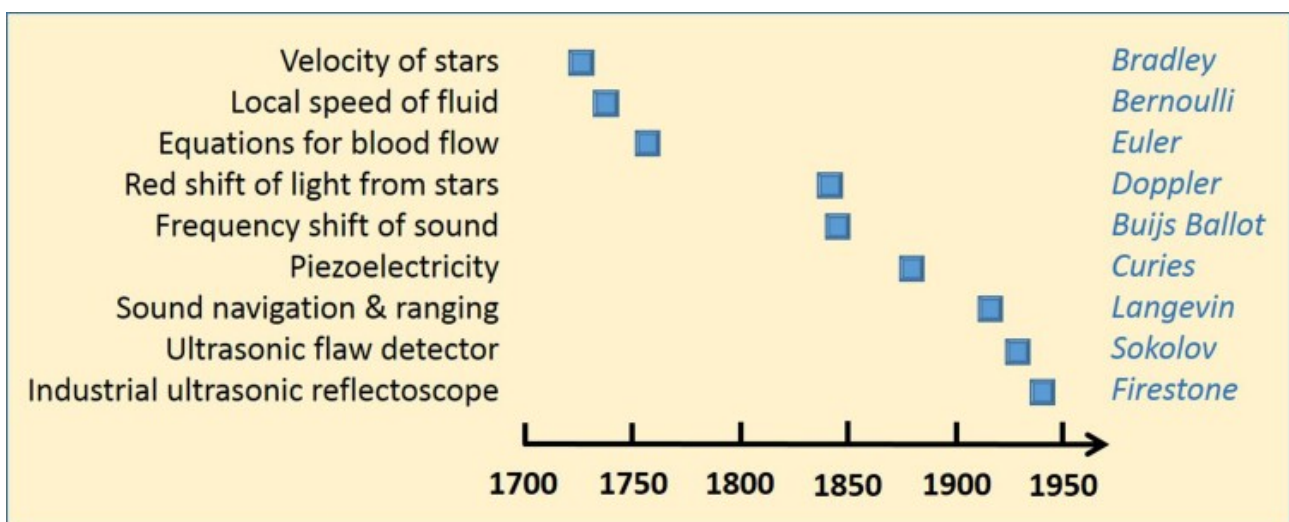
Para introducir el tema los autores señalaron, con un dejo de cierto enfado, que la ecografía es la única modalidad de imagen médica importante por la que nadie ha recibido el Premio Nobel.

Si bien algunos investigadores fueron nominados, en particular Edler y Hertz, pioneros de la imagen cardíaca, es posible que al comité de nominación le haya resultado difícil establecer precedentes, ya

que el desarrollo de la ecografía para la imagen cardiovascular dependió de numerosos conocimientos previos de la física ( *Figura 1* ), avances técnicos iniciales y experimentos clínicos preliminares.

No obstante, se pueden identificar algunos hitos importantes.

Figura 1.



Cronología de los principales descubrimientos de la física que siguen siendo importantes para la práctica ecocardiográfica actual.

La ecocardiografía es ahora una prueba diagnóstica omnipresente y esencial; sin embargo, los primeros estudios exploratorios se realizaron hace menos de 70 años, y la técnica se consolidó en la práctica clínica hace apenas 50 años.

Muchos avances clave aún se recuerdan.

Para comprender por qué y cómo se realizaron los primeros experimentos y se desarrollaron los prototipos, los autores identificaron y revisaron las publicaciones originales, así como los relatos de primera mano de las investigaciones publicadas o descritas por investigadores pioneros.

Presentaron una cronología de los desarrollos más importantes, con referencias cruzadas a las primeras publicaciones clave).

El objetivo de esta perspectiva histórica es proporcionar un resumen autorizado en una sola publicación, a partir del cual es posible identificar circunstancias comunes que pueden contribuir a la innovación exitosa y a la implementación de nuevos métodos de diagnóstico eficaces.

## **Imágenes**

El primer uso exitoso del ultrasonido *reflejado* para examinar el corazón se atribuye a Inge Edler, médico, y Hellmuth Hertz, físico, quienes trabajaban en Lund, Suecia, en 1953.

La pregunta inicial provino de Edler, quien se preguntaba si el radar podría usarse para estudiar el corazón.

Le pidió consejo a Hertz, quien conocía el uso del ultrasonido para la detección no destructiva de defectos en metales.

Hertz dispuso probar en sí mismo un escáner perteneciente a la empresa Tekniska Röntgencentralen, utilizado en el astillero Kockum en la cercana Malmö, y luego él y Edler lo tomaron prestado durante un fin de semana.

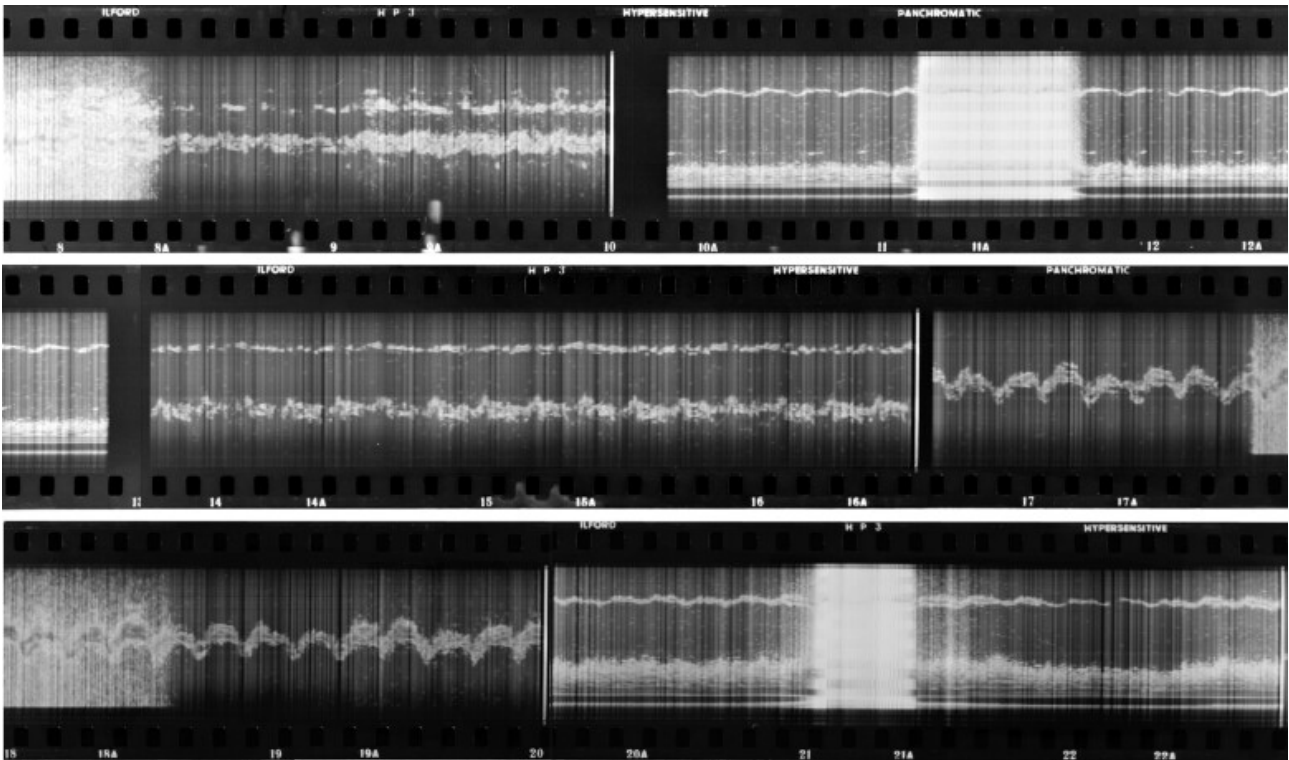
Se convencieron de que el "*reflectoscopio ultrasónico*" podría convertirse en una valiosa herramienta para el diagnóstico de enfermedades cardíacas, y así organizaron el préstamo de una máquina de Siemens.

Hertz ideó un accesorio para registrar la señal de salida de su osciloscopio de rayos catódicos, tras lo cual expusieron el primer rollo de película de una grabación ecocardiográfica en modo M el 29 de octubre de 1953 ( *Figuras 2 y 3* ).

Publicaron su experiencia inicial en las actas de la Real Sociedad Fisiográfica de Lund en 1954.

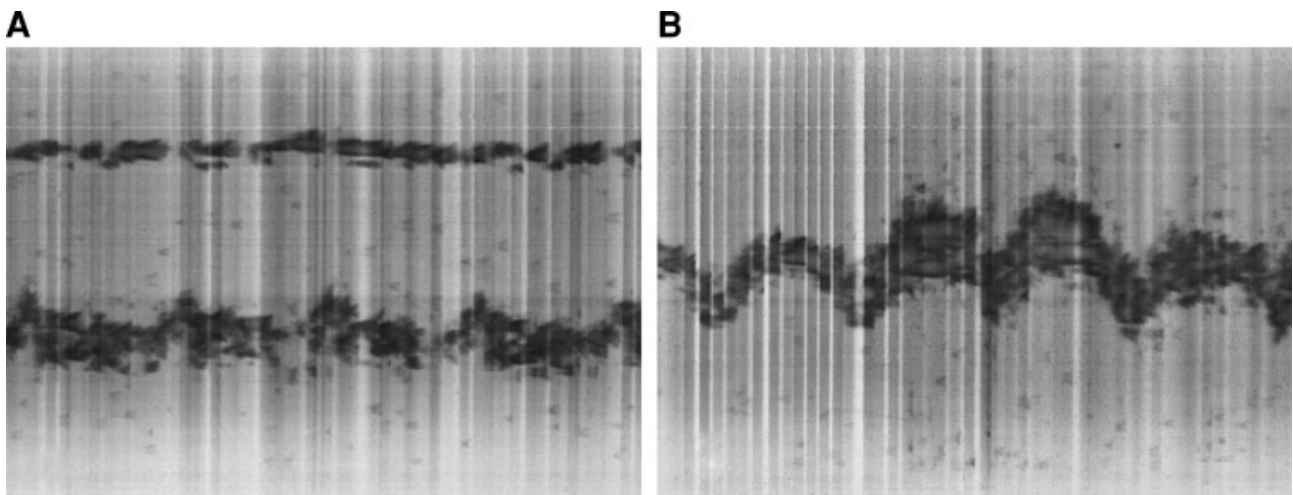
Posteriormente, tanto Edler (comunicación personal) como Hertz recordaron que en ese momento desconocían experimentos previos con ultrasonido para imágenes médicas.

Figura 2.



La primera película fotográfica de ecocardiografía en modo M, tomada por Edler y Hertz en octubre de 1953, fue digitalizada y mostrada como una copia por contacto continuo. (Cortesía del profesor Lars Edler)

Figura 3.



( A ) fotograma 15; y ( B ) fotograma 19A; seleccionados de la película ecocardiográfica en modo M del corazón (mostrada en la Figura 1 ).

Cuando su tesis doctoral se publicó como suplemento de Acta Medica Scandinavica en 1961, Edler citó trabajos anteriores de Dussik, Keidel, Wild y Reid.

Dussik había considerado usar ultrasonido reflejado en lugar de transmitido para obtener imágenes del cerebro, pero no siguió esa opción.

Keidel experimentó con reflexiones para obtener imágenes del corazón, pero sin éxito, quizás debido a la baja frecuencia que estaba usando, por lo que volvió a transmitir ultrasonido a través del tórax.

En otros lugares durante finales de la década de 1940, varios grupos en los EE. UU. estaban estudiando las propiedades del ultrasonido en el tejido, mientras que otros estaban estudiando su potencial terapéutico.

Los experimentos en Boston sugirieron que las intensidades variables de las señales transmitidas observadas por Dussik y Keidel podrían explicarse en gran medida por la absorción y la atenuación.

Ballantine *et al* . en Estados Unidos, también hizo referencia brevemente al ultrasonido reflejado cuando, en 1950, se publicaron los resultados de las investigaciones del cerebro con ultrasonido transmitido.

Poco después, Wild y Neal examinaron tejido cerebral *in vitro* y un nódulo mamario *in vivo* , utilizando ultrasonido reflejado a 15 MHz.

Él y Reid desarrollaron la «*ecografía*» para escanear tejidos; al barrer mecánicamente un único haz ultrasónico sobre la superficie de una muestra, crearon una imagen compuesta.

Howry y Bliss desarrollaron técnicas similares, que también se publicaron en 1952.

En un relato histórico posterior, Edler mencionó que Gohr, en 1940, también propuso el uso del ultrasonido reflejado.

Edler experimentó con imágenes de corazones obtenidos de autopsias, en baños de agua, para poder correlacionar los ecos en modo A con estructuras anatómicas.

Con colegas en Lund exploró el uso de la técnica para posibles aplicaciones clínicas más allá de su interés principal en la evaluación de la enfermedad reumática de la válvula mitral.

Entre los primeros visitantes de su laboratorio se encontraba en 1956 Sven Effert de Düsseldorf (y más tarde de Aquisgrán), quien fue pionero de la ecocardiografía en Alemania a finales de la década de 1950.

En general, sin embargo, Edler consideró que los colegas médicos eran reacios a aplicar sus resultados.

El desarrollo se aceleró después de que Edler presentara una película científica sobre su trabajo en el congreso de la Sociedad Europea de Cardiología en Roma en 1960, y después de que él y Hertz asistieran a un simposio organizado por la Universidad de Illinois en Urbana, EE. UU., en 1962.

El método fue adoptado y la investigación clínica continuó en EE. UU. por Harvey Feigenbaum (desde 1963) y otros.

El primer artículo publicado en EE. UU. sobre imágenes de ultrasonido cardíaco fue el de Wild y Reid en 1957, cuando informaron sobre imágenes

de corazones extirpados, y Joyner y Reid publicaron un estudio inicial sobre la enfermedad de la válvula mitral en 1963.

Edler y Hertz habían llamado a su técnica "*cardiografía por ultrasonido*" (o UCG, para distinguirla del ECG), pero el nombre "*ecocardiografía*" fue propuesto por Segal en 1966 y adoptado por el Instituto Americano de Ultrasonido en Medicina.

Feigenbaum escribió el primer libro de texto sobre «Ecocardiografía», publicado en 1972.

Él y Richard Popp compararon las mediciones ecocardiográficas con los volúmenes ventriculares izquierdos estimados mediante angiografía.

A principios de la década de 1970 se realizaron muchos otros estudios para validar las mediciones en modo M, incluyendo uno de Popp que demostró la importancia de utilizar posiciones estándar del transductor.

## **Ecocardiografía bidimensional**

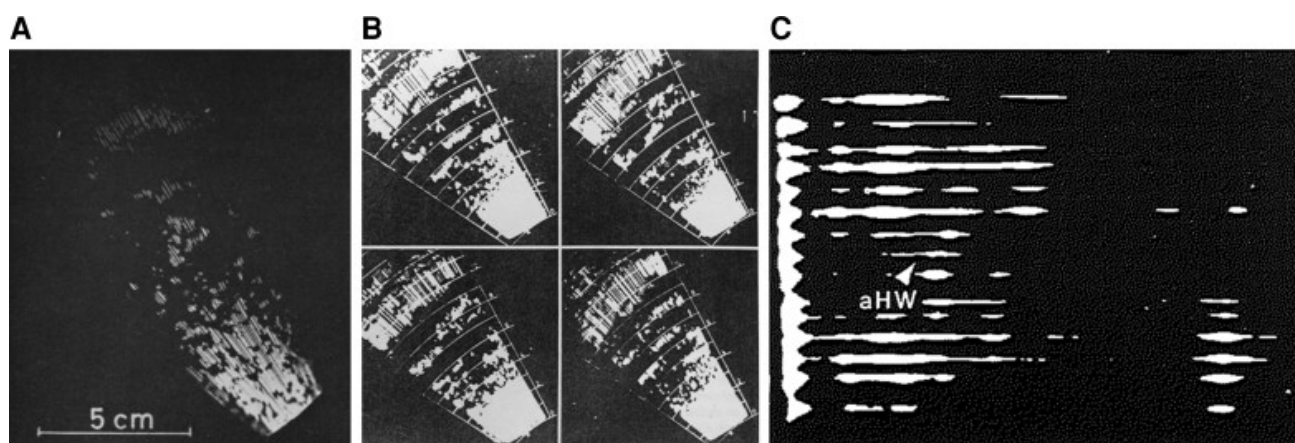
Hertz propuso la ecocardiografía transversal o bidimensional (2D) antes de que se dispusiera de la tecnología adecuada, utilizando un sistema de espejos giratorios ( *Figuras 4A y 4B* ).

Utilizando este sistema, en 1967 Åsberg informó que producía secuencias de imágenes cardíacas 2D que permitían seguir el movimiento cardíaco.

Además, a mediados de la década de 1960, investigadores en Japón desarrollaron un prototipo de escáner mecánico de sector que podía producir una silueta 2D estática del corazón en cualquier momento del ciclo cardíaco.

Ese sistema fue utilizado por Teichholz *et al.* en 1974 para comparar imágenes ecocardiográficas 2D con ventriculografía izquierda biplanar, para estimar volúmenes y validar su método de estimación de la fracción de eyección a partir de las dimensiones telediastólica y telesistólica, reconociendo también sus limitaciones.

Figura 4.



Imágenes bidimensionales tempranas del corazón y la válvula mitral, de ( A ) Hertz 1964 y ( B ) Hertz 1967, ambas obtenidas con un sistema de espejos y grabadas en película de 16 mm a 7 fotogramas por segundo; y ( C ) de Roelandt (1980; página 33) grabada alrededor de 1971 y descrita como 'Fotograma de parada de la primera imagen ultrasónica bidimensional obtenida de un paciente con derrame pericárdico severo; aHW = pared anterior del corazón'. En esta visualización, el transductor está a lo largo del lado izquierdo de la imagen, y el espacio sin eco a la izquierda de la flecha se interpretó como líquido pericárdico delante del corazón.

El primer escáner electrónico de matriz de fase fue construido por Jan Somer en 1968, y otros nuevos transductores se desarrollaron en varios centros a principios de la década de 1970.

Una matriz lineal fue fabricada en el Thoraxcentre de Rotterdam en 1971 por Nicolaas (Klaas) Bom y Charles Lancée y utilizada en estudios clínicos iniciales por Jos Roelandt y Frank Kloster ( *Figura 4C* ).

Un escáner de sector mecánico fue producido por Jim Griffith y Walter Henry, y un prototipo de escáner de matriz de fase fue construido por Thurstone y Von Ramm y evaluado clínicamente por Joe Kisslo.

Otro escáner de sector mecánico fue desarrollado casi al mismo tiempo, inicialmente a partir de un

cepillo de dientes eléctrico modificado, por Eggleton con Feigenbaum.

Estos escáneres se emplearon a principios de la década de 1970 para identificar anomalías regionales del movimiento de la pared durante la isquemia miocárdica espontánea e inducida y después de un infarto de miocardio.

La isquemia inducible fue diagnosticada mediante ecocardiografía en modo M por varios investigadores durante la década de 1970 y luego la ecocardiografía de esfuerzo con imágenes transversales se informó por primera vez en 1979.

Otros desarrollaron la técnica utilizando ángulos de sector más amplios en 1981.

La ecocardiografía de esfuerzo farmacológica con dipiridamol fue propuesta por Eugenio Picano y Alessandro Distanto en 1985 y la ecocardiografía de esfuerzo con dobutamina por Luc Piérard y colegas en 1986.

### **Ecocardiografía tridimensional**

El objetivo de obtener imágenes tridimensionales (3D) del corazón se había considerado durante mucho tiempo antes de que los avances

tecnológicos y computacionales lo convirtieran en una posibilidad realista.

Por ejemplo, en 1974, Dekker *et al.* registraron la posición de una sonda acoplada a un brazo mecánico para reconstruir una imagen 3D tras adquirir múltiples cortes transversales 2D.

Otros localizaron la posición y orientación de la sonda mediante tecnología de descarga de chispa, o bien rotaron mecánicamente el plano de imagen desde una posición estable de la sonda.

Todos estos sistemas originales requerían sistemas de referencia externos o internos para determinar la posición del transductor en el espacio 3D con respecto al corazón.

La adquisición debía sincronizarse con el ECG y podía tardar varios minutos en completar un conjunto de datos de imagen que abarcara todo el corazón.

El primer sistema para imágenes ecocardiográficas 3D reales fue desarrollado por Von Ramm *et al.* de la Universidad de Duke, Carolina del Norte, a principios de la década de 1990, utilizando una matriz dispersa.

Su máquina era muy grande y, a pesar del procesamiento paralelo, su velocidad de fotogramas era de aproximadamente 8/s.

El primer sistema 3D en tiempo real disponible comercialmente que utilizaba tecnología de matriz de fase fue lanzado por Volumetrics en 1996.

Las velocidades de volumen seguían siendo lentas y para crear una imagen de todo el corazón era necesario unir varios subvolúmenes sincronizados con el ECG, adquiridos con el transductor inmóvil mientras el paciente contenía la respiración.

Los rápidos avances en microelectrónica y el desarrollo de transductores de matriz monocristalina de banda ancha (1-5 MHz) propiciaron el desarrollo de pequeños transductores para imágenes 3D con sensibilidad superior y buena resolución espacial y temporal, descritos clínicamente por Sugeng con Roberto Lang en 2003.

La obtención de imágenes 3D transtorácicas dinámicas en tiempo real a altas velocidades de fotogramas fue posible a partir de principios de la década de 2000, utilizando una matriz con 3000 elementos.

Las imágenes de flujo de color se superponen a la visualización 3D del tejido en tiempo real.

Más recientemente, se han aplicado técnicas de posprocesamiento desarrolladas por la industria del cine de dibujos animados para producir imágenes "*fotorrealistas*" en tiempo real.

Estas pueden iluminarse mediante una fuente de luz móvil (hipotética) para resaltar diversas características anatómicas, y las estructuras pueden mostrarse como semitransparentes.

### **Ecocardiografía transesofágica**

En 1972, Olson y Shelton monitorizaron los cambios en el diámetro del arco aórtico en perros utilizando un cristal de ultrasonido unido a una sonda esofágica, y en 1974 Duck *et al.* informaron su experiencia clínica inicial del uso de una nueva sonda ultrasónica transesofágica para registrar el flujo sanguíneo aórtico.

La posibilidad de imágenes en modo M desde el esófago fue demostrada por Frazin *et al.* en 1976, utilizando un solo cristal que el paciente tenía que tragar.

Unos años más tarde, en Nueva York, Masayuki Matsumoto *et al.* monitorizaron la función ventricular

izquierda durante la cirugía cardíaca mediante ecocardiografía transesofágica en modo M, utilizando un sistema de fabricación propia.

Matsumoto recibió entonces una beca para pasar 1 año en el Departamento de Cardiología del Hospital Universitario Hamburgo Eppendorf, donde trabajaba Peter Hanrath.

Aunque la calidad de las imágenes era buena, la desventaja del método en modo M era que el médico no podía controlar la posición del transductor.

Para solucionar este problema, Hanrath contactó con Olympus (en aquel entonces el fabricante líder mundial de endoscopios flexibles) en Hamburgo, y lograron instalar un transductor monoelemento disponible comercialmente en el eje de un endoscopio flexible al que se le habían retirado las fibras ópticas.

Sus resultados se publicaron en 1981 y 1982 .

Trabajando de forma independiente en Japón, en 1977 Hisanaga *et al.* desarrollaron un escáner mecánico rotatorio para imágenes transversales del corazón desde un abordaje transesofágico, y

también una sonda Doppler pulsada transesofágica.

Después de los estudios iniciales en modo M en Hamburgo, Hanrath buscó una empresa de ultrasonido que pudiera miniaturizar un transductor de matriz de fase hasta tal punto que pudiera integrarse en un endoscopio.

En 1981, conoció al ingeniero Jacques Souquet en Advanced Technology Laboratories (ATL) en Seattle, y unos 6 meses después, le entregaron un transductor de este tipo compuesto por 36 cristales, que luego fue incorporado a un endoscopio por Olympus.

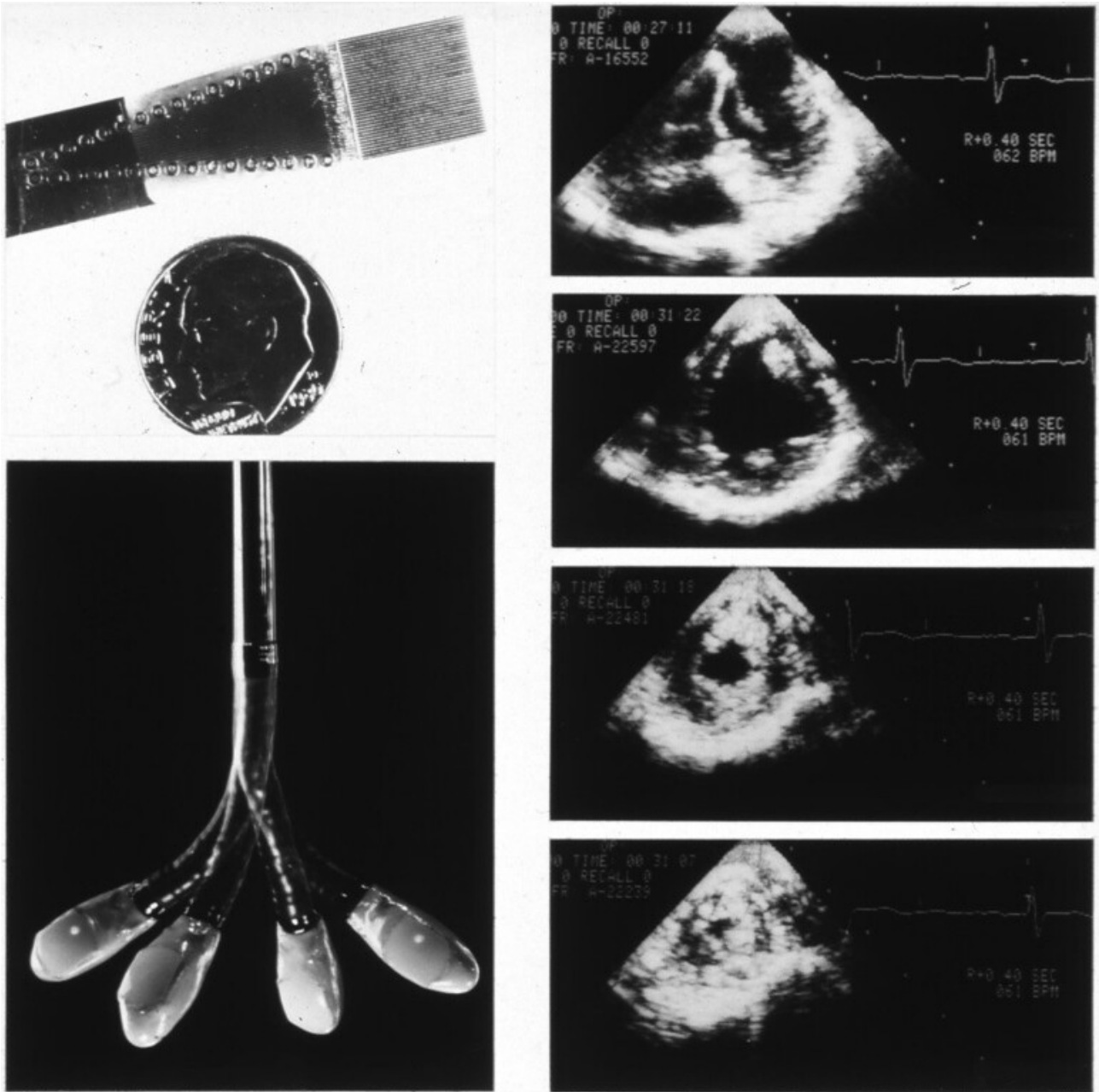
Los primeros estudios clínicos resultantes de imágenes transesofágicas monoplanares ( *Figura 5* ) se publicaron en 1982.

A esto le siguió poco después el desarrollo de un transductor biplanar.

También se estaban produciendo nuevos acontecimientos en Japón.

Figura 5.

Imágenes y sonda transesofágica monoplanea temprana (cortesía del profesor Peter Hanrath).



Souquet y Hanrath concibieron la idea de un transductor de matriz de fase rotatorio para endoscopio, lo que en aquel entonces representaba un desafío constructivo.

Presentaron una solicitud conjunta de subvención al Ministerio Federal de Investigación y Tecnología de

Alemania en 1982, pero fue rechazada con el argumento de que los impuestos alemanes no podían destinarse a apoyar la industria estadounidense.

En 1989, Hanrath se reunió con ingenieros de Hewlett Packard en Boston, quienes se mostraron capaces y dispuestos a desarrollar una sonda multiplanar rotatoria; sin embargo, primero fue necesario emprender acciones legales para revocar una patente que Souquet había reclamado.

Posteriormente, en 1991, Hewlett Packard entregó a Hanrath (que para entonces se encontraba en Aquisgrán) un prototipo de sonda multiplanar (u "omniplanar"), y su experiencia clínica inicial se publicó poco después.

En el mismo año (1992), el grupo de Rotterdam publicó sus primeros resultados clínicos con otra sonda transesofágica multiplano, que también habían desarrollado con Hewlett Packard, denominada «Varioplane».

Una sonda transesofágica pediátrica de un solo plano de 5,0 MHz fue desarrollada por la empresa Oldelft en 1989, en colaboración con ingenieros del Thoraxcentre en Rotterdam.

Una serie de informes clínicos correlativos confirmaron el valor clínico adicional de la imagen transesofágica en cardiopatías congénitas.

Posteriormente, se desarrollaron sondas transesofágicas pediátricas biplanares y luego multiplanares de matriz dirigida.

En adultos, el primer informe clínico de imagen transesofágica 3D en tiempo real utilizando un transductor de matriz se publicó en 2008.

Ahora, las imágenes transesofágicas 3D de alta calidad se pueden fusionar en tiempo real con imágenes fluoroscópicas para guiar intervenciones estructurales cardíacas mediante la visualización de catéteres, contraste, estructuras tisulares y flujo sanguíneo, todo espacialmente sincronizado y superpuesto.

## **Ecografía Doppler**

Existe una larga historia del desarrollo de métodos ultrasónicos para registrar y visualizar el flujo sanguíneo y medir su velocidad con el fin de obtener estimaciones de los gradientes de presión intracardíaca.

Si bien se utiliza el nombre de Christian Doppler, su presentación original en Praga en 1842 fue un

desarrollo teórico de un estudio anterior sobre el movimiento de estrellas distantes realizado por James Bradley, sin observaciones experimentales nuevas u originales.

Un cambio en la frecuencia de las ondas sonoras a medida que se transmiten desde un objetivo en movimiento o hacia un observador en movimiento fue demostrado por primera vez unos años más tarde en los Países Bajos por Christophorus Buijs Ballot, quien hizo pasar un tren junto a músicos estacionarios que tocaban una nota constante en una trompa.

Había sido escéptico y trataba de refutar la hipótesis de Doppler, pero de hecho la confirmó.

Las aplicaciones de imágenes cardiovasculares ahora estiman las velocidades mediante autocorrelación para evaluar el desfase, en lugar de calcular el desplazamiento Doppler en frecuencia o longitud de onda, pero la atribución epónima persiste.

La ecocardiografía Doppler fue desarrollada durante la década de 1950 en Japón por Shigeo Satomura, cuyas primeras investigaciones de 1952 se centraron en medir el movimiento cardíaco en lugar del flujo sanguíneo.

En 1956, Yoshida, junto con Satomura, informó que se podían obtener señales de ultrasonido Doppler del corazón humano debido al movimiento de las válvulas cardíacas y el flujo sanguíneo.

Otros investigadores japoneses correlacionaron el desfase observado con la velocidad del objetivo y relacionaron la amplitud de la señal con el número de glóbulos rojos como reflectores.

En 1966, y de forma independiente, tanto Kato en Japón como Robert Rushmer en los EE. UU. informaron que habían desarrollado medidores de flujo sanguíneo direccionales.

Francis McLeod también informó en 1967 sobre un prototipo de aparato para la evaluación continua del flujo, y Daniel Kalmanson en París en 1968, junto con el ingeniero Gérard Toutain, sobre otro.

Estas máquinas registraban señales Doppler direccionales, lo que significaba que era posible distinguir el flujo sanguíneo hacia o desde el transductor, por ejemplo, en la vena yugular de pacientes con cardiopatía derecha.

Casi al mismo tiempo, Light estaba utilizando Doppler desde un abordaje supraesternal para registrar el flujo sanguíneo aórtico.

Más significativamente, el Doppler pulsado o con compuerta de rango estaba siendo desarrollado independientemente por tres grupos: Peter Wells en Bristol y Paul Peronneau en París, ambos publicados en 1969, y Donald Baker en Seattle, publicado en 1970.

Posteriormente, el avance clave fue el desarrollo de un escáner dúplex por Frank Barber en 1974, de modo que las imágenes y el flujo pudieran registrarse utilizando un solo sistema de ultrasonido.

Griffith y Henry publicaron detalles de otro sistema combinado en 1978.

Hasta entonces, el flujo sanguíneo en el corazón y los vasos solo podía evaluarse semicuantitativamente.

La primera persona en demostrar (en 1976) que las mediciones Doppler de las velocidades del flujo intracardíaco podían utilizarse para estimar los gradientes de presión fue Jarle Holen, quien había

trabajado como ingeniero aerodinámico en la fábrica de Boeing en Seattle antes de estudiar medicina.

Se trasladó de Rochester, en el estado de Nueva York, donde había trabajado en el departamento de radiología con Gramiak, a Oslo para realizar su investigación doctoral.

Al principio, el departamento universitario no disponía de un ecógrafo, por lo que se modificó un monitor fetal para obtener señales Doppler.

Posteriormente, midió la velocidad del flujo a través de la válvula mitral en pacientes con estenosis y calculó los gradientes mediante la aplicación de la fórmula de Gorlin; los resultados se correlacionaron bien con las mediciones invasivas.

Algunos años más tarde, en un experimento *in vitro*, confirmó la precisión de los nuevos métodos comparándolos con presiones medidas directamente.

De forma independiente, y desde aproximadamente 1974, Bjørn Angelsen en la Universidad Técnica Noruega en Trondheim desarrolló un sistema Doppler combinado de onda pulsada y continua y propuso que los gradientes podrían estimarse

utilizando una simplificación de la ecuación de Bernoulli.

Liv Hatle recibió un sistema construido por Kjell Kristoffersen del grupo de Angelsen, y su primer estudio clínico fue presentado por Brubakk en el Congreso Europeo de Cardiología en Ámsterdam en 1976; fue recibido con cierta incredulidad, pero el artículo de Holen salió poco después, confirmando los resultados.

Publicaciones seminales siguieron desde 1978 sobre la cuantificación de la estenosis mitral, la estenosis aórtica, la insuficiencia tricuspídea, y la presión sistólica del ventrículo derecho.

Investigadores en Japón propusieron que las velocidades de flujo mitral y tricuspídeo podrían usarse para estimar el llenado diastólico y la función del ventrículo izquierdo y derecho.

El mapeo de flujo de color fue posible tras el desarrollo de un sistema Doppler pulsado multigate, descrito por primera vez a finales de la década de 1970 por el ingeniero Marco Brandestini, del grupo de Don Baker en la Universidad de Washington en Seattle.

Su prototipo inicial superponía el flujo de color a la ecocardiografía en modo M, pero pronto se desarrolló un sistema de flujo de color en una pantalla 2D.

El primer sistema disponible comercialmente fue desarrollado en la empresa Aloka en Japón por el ingeniero Chihiro Kasai *y colaboradores*, a partir de 1982 y en colaboración con Ryozo Omoto, quienes informaron su experiencia clínica inicial en 1984.

Ese mismo año, Rolf Jenni utilizó un sistema Doppler multigate Dasonics para revelar diferentes patrones de flujo a través de la aorta humana.

### **Imágenes de velocidad miocárdica**

La prueba de concepto para registrar una señal Doppler del miocardio provino de Isaaz en 1989, después de intentos anteriores con técnicas relacionadas pero diferentes por Yoshida y Kostis.

El avance clave fue el desarrollo de un método por McDicken y Sutherland que adaptó los algoritmos Doppler color para el flujo en una máquina ecocardiográfica estándar preferentemente para mostrar las señales de alta amplitud y baja velocidad del miocardio.

Esto pronto fue integrado en sistemas de imágenes disponibles comercialmente por la compañía Acuson (como 'imágenes miocárdicas Doppler') durante la década de 1990.

Se propuso un método para el posprocesamiento de la información Doppler color para derivar mapas de otras características de la función miocárdica regional, y luego se demostraron métodos para medir la deformación local del miocardio como tasa de deformación o deformación.

La ecografía Doppler miocárdica se introdujo en la cardiología pediátrica a partir de 2002.

El seguimiento del patrón de moteado (*speckle tracking*) de las reflexiones de ultrasonido, para obtener imágenes independientes del ángulo del flujo sanguíneo y el movimiento tisular, se sugirió en 1991 pero no era factible para su implementación en ese momento debido a la insuficiente capacidad de computación.

La primera solución práctica que estuvo disponible comercialmente fue desarrollada por la compañía General Electric en Israel por el ingeniero Peter Lysyansky con colegas clínicos, en 2004.

Aunque ahora se aplica ampliamente, la técnica tiene una resolución temporal insuficiente para resolver completamente las tasas de deformación miocárdica regional.

## **Ecocardiografía en cardiopatías congénitas**

Tras la introducción de la ecocardiografía en modo M de baja frecuencia (2,5 MHz) en la cardiología de adultos a finales de la década de 1960, se utilizó en frecuencias de imagen más altas (5,0 y 7,5 MHz) para estudiar la estructura y función cardíacas en niños con lesiones cardíacas congénitas o adquiridas.

Si bien la anatomía de las cavidades cardíacas y las conexiones vasculares en la mayoría de los adultos es predecible, la geometría de las malformaciones congénitas complejas supuso un gran desafío para la técnica en modo M.

A pesar de esta advertencia, se publicaron estudios diagnósticos tempranos en 1967 y 1971.

En ese momento, la morfología de las lesiones cardíacas congénitas complejas era poco conocida, pero se describieron ciertos patrones en los trazados en modo M que podían sugerir malformaciones estructurales subyacentes, como la transposición de las grandes arterias.

No obstante, las limitaciones de la técnica en modo M para describir lesiones espacialmente complejas se hicieron rápidamente evidentes.

El trabajo pionero sobre morfología cardíaca realizado por los Van Praagh en la década de 1960 y por el grupo de Anderson en la década de 1970 fue crucial para comprender y definir las malformaciones cardíacas congénitas complejas.

A principios de la década de 1990, una serie de estudios correlacionaron los hallazgos ecocardiográficos con la morfología, gracias a la introducción de sistemas de imagen 2D mecánicos y de matriz de fase de 5,0 y 7,5 MHz y al desarrollo e integración de modalidades de ultrasonido Doppler.

En conjunto, estos avances llevaron a la aceptación del ultrasonido cardíaco como una modalidad integral y precisa para diagnosticar cardiopatías congénitas complejas.

La ecografía sectorial 2D pediátrica se desarrolló de forma independiente y paralela a las modalidades Doppler pulsadas y de onda continua a finales de la década de 1970.

Al principio, los sistemas más exitosos fueron los escáneres sectoriales rotacionales mecánicos desarrollados por ATL, que generaban imágenes a frecuencias de 3,5 a 7,0 MHz.

Paralelamente, Bjørn Angelsen y Kjell Kristoffersen desarrollaron su sistema Doppler pulsado y de onda continua sin generación de imágenes (que denominaron flujómetro Doppler de eco pulsado o PEDOF).

Fue probado clínicamente por Hatle y sus colegas en Trondheim en 1976 y aplicado al primer estudio hemodinámico no invasivo de defectos del tabique ventricular.

En 1982, se introdujo el escáner dúplex Irex 111B, que por primera vez combinó la ecografía sectorial 2D con las modalidades Doppler pulsadas y de onda continua.

La ecografía Doppler color (CFM) clínicamente eficaz se integró en los ecógrafos pediátricos a mediados de la década de 1980, aunque mediante dos enfoques distintos.

Vingmed (1986) y ATL basaron su CFM en ecógrafos sectoriales mecánicos rotacionales, mientras que Aloka (1987) introdujo ecógrafos de

matriz de fase de alta frecuencia que generaban imágenes a 5,0 y 7,5 MHz.

A principios de la década de 1990, las mejoras en los materiales cerámicos de los transductores permitieron montar más cristales, creando una matriz bidimensional controlada electrónicamente.

Gracias a los nuevos monitores digitales y a los ecógrafos digitales controlados por software, se podían adquirir datos a alta frecuencia del transductor y visualizarlos con alta resolución temporal y espacial.

Estos avances, junto con consideraciones comerciales, llevaron a la desaparición de los ecógrafos sectoriales mecánicos.

Las mejoras en las sondas matriciales pediátricas, la transferencia de datos del bus de sondas, la velocidad de procesamiento de la máquina y las pantallas digitales permitieron la introducción de la ecocardiografía transtorácica y transesofágica 3D en tiempo real en la práctica pediátrica a partir de mediados de la década de 2000.

## **Ecocardiografía fetal**

El examen ecográfico del corazón fetal se describió por primera vez en 1966, utilizando ecocardiografía

en modo M, pero no se consolidó hasta que los ecógrafos pediátricos 2D totalmente integrados estuvieron disponibles a partir de finales de la década de 1970.

A partir de 1980, Lindsey Allan publicó una serie de informes innovadores sobre el diagnóstico intrauterino de cardiopatías congénitas, utilizando tanto ecógrafos mecánicos como de sector de matriz de fase.

Una vez superados los temores iniciales sobre la seguridad del feto, esto condujo a la amplia aceptación de la ecocardiografía fetal transabdominal y transvaginal.

Se han incorporado nuevas modalidades de ultrasonido, incluyendo la evaluación de los flujos intracardíacos, la deformación miocárdica y la imagen 3D.

La ecocardiografía fetal se ha establecido como una disciplina esencial compartida con los obstetras.

### **Ecografía intravascular**

En 1956, Tomasz Cieszyński construyó un catéter ultrasónico con el objetivo de aplicarlo a investigaciones intracardíacas, pero su artículo

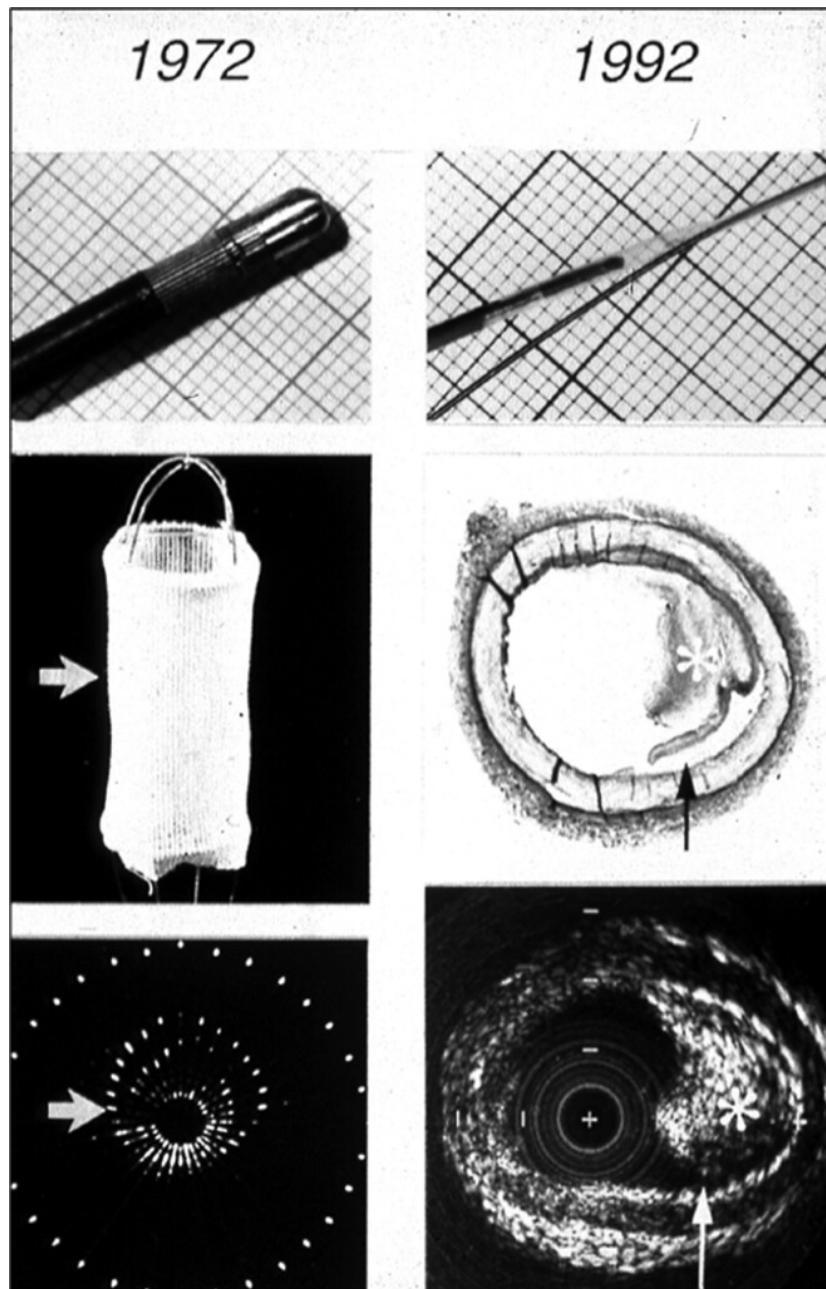
inicial solo informaba estudios experimentales ( *in vitro* y en animales).

El grupo de Dean Franklin en la Universidad de Washington, Seattle, describió un flujómetro ultrasónico invasivo en 1959, pero este se sujetaba alrededor de la aorta en lugar de ser intravascular y también se evaluó en experimentos con animales.

*Ryozo Omoto et al.* realizaron más estudios en Japón, mientras que, de forma independiente en Rotterdam a principios de la década de 1970, *Bom et al.* desarrollaron su primer transductor de matriz de fase intravascular, con 32 elementos ( *Figura 6* ).

Kalmanson registró señales intracardíacas del corazón derecho e izquierdo en 1979 y 1980, utilizando Doppler direccional.

Figura 6.



Izquierda: Imagen de ultrasonido intravascular (IVUS) de 5,6 MHz con matriz de fase de 32 elementos de una cesta (1972). Derecha: Imagen de IVUS rotatoria de 30 MHz de un solo elemento de una arteria con placa aterosclerótica (asterisco y flecha) (1992). De Bom N, Lancée CT, Rijsterborgh H, ten Hoff H, Roelandt JRTC. De la idea a la aplicación clínica. *En* Ultrasonido intravascular, Roelandt, Gussenhoven, Bom Eds. Kluwer Academic Publishers, 1993.

Después del entusiasmo inicial, el interés en la ecografía intravascular (IVUS) se estancó hasta mediados de la década de 1980 cuando el impulso clínico fue proporcionado por el desarrollo de las intervenciones coronarias percutáneas y por el reconocimiento de que la imagen de sombra de rayos X del lumen proporcionaba información demasiado limitada para desarrollar de forma segura la angioplastia con balón, la aterectomía, la erosión por chispa y otras técnicas.

Por esa razón, la IVUS se desarrolló aún más.

Bom *et al.* crearon un catéter combinado de IVUS/ erosión por chispa y demostraron su viabilidad *in vitro* en 1988.

Más tarde, se desarrolló como un sistema de IVUS independiente.

En 1989 Paul Yock introdujo un sistema clínico rotatorio de IVUS, inicialmente para la obtención de imágenes de arterias periféricas y luego para la obtención de imágenes intracoronarias.

Su aplicación clínica se confirmó para evaluar la aterectomía y la ablación láser.

Tobis *et al.* evaluaron la angioplastia con balón *in vitro* , utilizando IVUS.

Además, en 1989, Hodgson introdujo un sistema clínico de imágenes intracoronarias de matriz de fase, basado en la patente de 1972 de Bom y Lancée.

El análisis de retrodispersión y las lecciones aprendidas del análisis de imágenes obtenidas *in vitro* han desempeñado un papel fundamental en la interpretación de las imágenes de IVUS.

Li *et al.* desarrollaron una detección semiautomática del lumen que se aplicó para evaluar los efectos a largo plazo de varias estrategias de colocación de stents y para comparar la eficacia de las estatinas.

Han surgido varias estrategias para la identificación de tejidos, pero ninguna se ha implementado aún en la práctica clínica rutinaria.

Más recientemente, se han desarrollado varios catéteres de "combinación de sonido y luz", incluido un catéter IVUS NIRS (espectroscopia de infrarrojo cercano) de InfraredX en colaboración con van der Steen y Serruys.

## **Conclusiones**

Aunque se intentó localizar y citar el mayor número posible de primeras publicaciones, cualquier ejercicio retrospectivo de este tipo conlleva el riesgo de atribuciones inapropiadas o errores por omisión.

Para minimizarlos, se consultaron las publicaciones originales y revisado sus listas de referencias, y, cuando ha sido posible, se confirmaron los detalles con colegas de mayor experiencia.

También se revisaron relatos históricos publicados por los investigadores principales, que se han citado para que puedan consultarse y obtener información más completa.

La Federación Europea de Sociedades de Ultrasonido en Medicina y Biología ha revisado recientemente desarrollos paralelos en las aplicaciones del ultrasonido en otros campos clínicos, y existen otros relatos de primera mano sobre aspectos específicos de la historia de la ecocardiografía.

Este esfuerzo ha reforzado la idea de que a menudo es muy difícil establecer precedentes científicos.

Los avances clínicos en ecocardiografía han dependido completamente de los avances

tecnológicos, y cuando el clima intelectual era propicio y se disponía de herramientas prácticas, muchos ingenieros y clínicos abordaron desafíos similares.

En los inicios de la ecografía, hubo frecuentes ocasiones en las que los investigadores intentaban resolver los mismos problemas, pero la comunicación era menos sencilla que ahora y las publicaciones menos accesibles, por lo que trabajaban de forma independiente.

Como hemos resumido, muchas de las personas más destacadas asociadas con desarrollos específicos no fueron las primeras en su campo.

Si esto influyó en la decisión de no otorgar el Premio Nobel de Medicina a Edler y Hertz, podría quedar claro una vez que las deliberaciones del comité estén disponibles para su revisión por parte de los historiadores tras el habitual embargo de 50 años.

Una segunda conclusión obvia es que los avances más importantes han surgido de la estrecha colaboración entre ingenieros y científicos clínicos, por lo que es necesario garantizar el desarrollo y la dotación de recursos adecuados de dichos entornos.

Si bien algunos investigadores pueden estar fuertemente motivados por la competencia, y las carreras profesionales ahora pueden estar determinadas por indicadores de productividad académica, en opinión de los autores, las innovaciones más exitosas se han producido cuando colegas de diferentes disciplinas y centros han trabajado juntos, preferiblemente con un intercambio de ideas abierto y generoso.

Desde una perspectiva histórica, lo que puede resultar más interesante para los investigadores actuales no es qué se hizo ni quién lo hizo, sino cómo se desarrollaron las ideas e hipótesis y de dónde surgieron los conceptos originales, algo que rara vez se documenta para la posteridad.

Los autores se centraron en describir la historia de los avances tecnológicos en lugar de las aplicaciones clínicas, ya que habría sido una tarea casi imposible.

Por razones prácticas, también, solo se han resumido brevemente los primeros pasos en IVUS, que evolucionó a partir de la imagen cardíaca pero que ahora se ha convertido en una subespecialidad intervencionista, y no se ha revisado la ecografía vascular ni el desarrollo de sistemas portátiles.

La ecocardiografía aún depende del operador, pero esto disminuirá a medida que se desarrollen e implementen métodos de aprendizaje automático para adquirir, optimizar, identificar y medir imágenes con mayor precisión y reproducibilidad.

Una transferencia y procesamiento de datos más rápidos mejorarían la calidad de la imagen 3D y la adquisición de flujo hasta tal punto que podría convertirse en práctica estándar, con todas las imágenes y mediciones 2D, de deformación y de flujo derivadas durante el posprocesamiento, junto con la medición automatizada de la mayoría de los parámetros.

Si bien los avances en software e inteligencia artificial pueden transformar la práctica clínica, es demasiado pronto para incluirlos en una visión general histórica.

Del mismo modo, en opinión de los autores, la utilidad clínica de los recientes avances tecnológicos, como la obtención de imágenes a alta velocidad o ultrarrápidas, la caracterización de tejidos mediante elastografía y la obtención de imágenes de la dinámica de fluidos, aún es incierta.

De cara al futuro, podría ser particularmente útil establecer algún mecanismo para que los profesionales clínicos expertos lleguen a un consenso sobre las necesidades genuinas no satisfechas, ya que esto siempre ha sido difícil y propenso a la experiencia, los intereses y los sesgos individuales.

Como escribió Henry Light en 1992, lo que se utilizará podría implicar «*renunciar a lo deseable en última instancia en favor de lo sólidamente medible y eminentemente útil*», lo que implica la necesidad de evaluaciones más epidemiológicas y basadas en resultados.

Y, con suerte, el diálogo entre clínicos e ingenieros podrá superar el problema identificado por Hertz en 1973, según el cual «*...diferentes médicos tenían opiniones muy distintas sobre la importancia relativa de posibles características adicionales y no se podía dar una respuesta clara a los ingenieros de diseño en la industria*».

\* Fraser AG, Monaghan MJ, van der Steen AFW, Sutherland GR. A concise history of echocardiography: timeline, pioneers, and landmark publications. Eur Heart J Cardiovasc Imaging. 2022 Aug 22;23(9):1130-1143. doi: 10.1093/ehjci/jeac111. PMID: 35762885; PMCID: PMC9365309.