

EVALUACIÓN ECOCARDIOGRÁFICA DEL VENTRÍCULO DERECHO Y PRESIONES PULMONARES

Benigno Valderrábano Salas

*Corazón, corazón oscuro,
corazón, corazón con muros,
corazón que se esconde,
corazón que está dónde,
corazón, corazón en fuga
herido de heridas de amor.*

Silvio Rodríguez

RESUMEN

De manera clásica, el ventrículo derecho había sido considerado de poca relevancia; sólo hasta hace algunos años se le ha comenzado a prestar atención a su valoración, ya que se ha demostrado su importancia como predictor en los desenlaces a largo plazo de la hipertensión pulmonar, insuficiencia cardíaca, valvulopatías cardíacas, enfermedades congénitas cardíacas y miocardiopatías.

La ecocardiografía es la modalidad de elección para valorar al ventrículo derecho en la práctica clínica ya que es una técnica no invasiva, segura, con amplia disponibilidad y de bajo costo; sin embargo, la valoración ecocardiográfica en la práctica clínica diaria requiere un enfoque multiparamétrico. En este capítulo se describen los diferentes parámetros para valorar de forma precisa la geometría y función del ventrículo derecho, así como la valoración no invasiva de las presiones pulmonares muy relacionadas con la función ventricular derecha.

La determinación de las presiones pulmonares de forma no invasiva por ecocardiograma es otra de las grandes utilidades de este método de imagen. El método recomendado por las guías internacionales es la determinación de la velocidad máxima del flujo regurgitante tricúspideo y, junto con otros parámetros ecocardiográficos, determinar la probabilidad de hipertensión pulmonar.

INTRODUCCIÓN

De forma clásica, el ventrículo derecho (VD) se ha considerado de poca relevancia; sólo hasta hace tiempos recientes se ha puesto atención en su valoración como predictor de desenlaces en el largo plazo de diversas cardiopatías, entre ellas la hipertensión pulmonar (HP), insuficiencia cardíaca, valvulopatías cardíacas, enfermedades congénitas cardíacas y miocardiopatías.¹

La ecocardiografía es la modalidad de elección para valorar al VD en la práctica clínica debido a que es una técnica no invasiva, segura, con amplia disponibilidad y de bajo costo.² Sin embargo, la función y geometría del VD pueden resultar difíciles de cuantificar y medir mediante una ecocardiografía convencional debido a la compleja forma del VD y la mala definición endocárdica, el patrón característico de la contracción del miocardio relacionado con la orientación de las fibras musculares y la posición anterior del VD dentro del tórax, que entorpecen su exploración y reducen la calidad de la imagen.³ Por lo tanto, se vuelve necesario un enfoque multiparamétrico en la práctica clínica diaria.

VENTANAS ECOCARDIOGRÁFICAS DE CAVIDADES CARDIACAS DERECHAS

Una evaluación completa del VD por ecocardiografía bidimensional consiste en obtener siete vistas ecocardiográficas estandarizadas descritas por los diferentes lineamientos internacionales (**figuras 1 y 2**):⁴⁻⁶

1. El eje largo paraesternal
2. La vista paraesternal del tracto de entrada del VD
3. El eje corto paraesternal
4. La vista apical de cuatro cámaras (A4C)
5. La vista apical de cuatro cámaras con foco en el VD

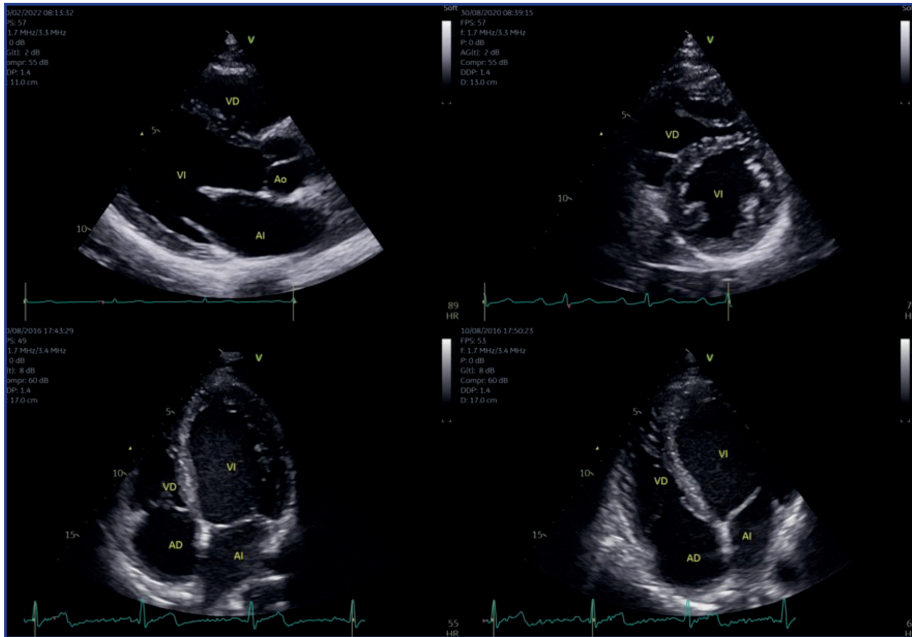


Figura 1. Ventanas ecocardiográficas.
Fuente: archivo personal del autor.

6. La vista de cuatro cámaras subcostal

7. Vista subcostal del eje corto

Debido a la complejidad de la anatomía del VD, cada una de las vistas ecocardiográficas provee información adicional, por lo que es importante procurar obtener todas ellas para valorar esta estructura. En la **Tabla 1** se describe la adquisición y la utilidad práctica de cada una de las vistas.

DIMENSIONES DE CAVIDADES CARDIACAS DERECHAS

AURÍCULA DERECHA

La aurícula derecha (AD) contribuye al llenado del VD, por lo que su valoración es relevante al estudiar la función de esta estructura. La cuantificación de las dimensiones de la AD por ecocardiografía bidimensional incluye la medición del área y el volumen indexado por área de superficie corporal. La medición del área de la AD debe realizarse en sístole ventricular (cuando la AD tiene su mayor volumen; al final de la onda T, si se tiene trazo de electrocar-

Tabla 1. Vistas/planos ecocardiográficos del ventrículo derecho para su valoración y principales utilidades

Vista ecocardiográfica	Adquisición	Mediciones recomendadas
Eje largo paraesternal	Transductor en tercer o cuarto espacio intercostal sobre la línea paraesternal izquierda Marca del transductor hacia el hombro derecho del paciente (9-10 horas de la posición de la carátula del reloj)	Dimensión del tracto de salida proximal del VD (2D, modo M)
Vista paraesternal del tracto de entrada del VD	Una vez en el eje largo paraesternal, se inclina el transductor para dirigirse hacia abajo, apuntando a la cadera derecha del paciente	Observar las valvas posterior y anterior de la tricúspide Si existe buena alineación con el jet de IT puede medirse la velocidad máxima y gradientes de este para calcular la PSAP Valorar el sitio de entrada del seno coronario y vena cava inferior en la parte inferior de la imagen
Eje corto paraesternal	En el eje largo paraesternal, girar 90° en dirección horaria Marca del transductor hacia el hombro izquierdo del paciente (2-3 horas de la posición de la carátula del reloj)	A nivel de grandes vasos: medir los diámetros proximal y distal del tracto de salida del VD. Puede medirse el tronco de la arteria pulmonar y sus ramas. Con Doppler pulsado puede medirse el tiempo de aceleración pulmonar para valorar la presión media de la arteria pulmonar. Con Doppler continuo, pueden cuantificarse las velocidades y gradientes del flujo de insuficiencia pulmonar para valorar la presión media y telediastólica de la arteria pulmonar A nivel de músculos papilares: puede valorarse el aplanamiento del septum interventricular en caso de existir sobrecarga de presión/volumen. Medir índice de excentricidad
Apical de 4 cámaras	Transductor en el 5to espacio intercostal y línea media clavicular o en la región donde se palpe el choque de la punta cardiaco Marca del transductor hacia la izquierda del paciente	Medir diámetros del VD en telediástole Medir área/volumen/diámetros de la AD en telediástole (diástole auricular) Medir TAPSE, onda S' tricuspídea y FAC del VD Valorar valvas de la tricúspide (anterior/septal) Si existe buena alineación con el jet de IT puede medirse la velocidad máxima y gradientes de este para calcular la PSAP Útil para comparar el tamaño del VD con respecto al VI para determinar cualitativamente si existe dilatación de VD

<p>Apical de 4 cámaras con foco en el VD</p>	<p>Una vez obtenido un A4C, se gira ligeramente el transductor en sentido antihorario para maximizar el área del VD en esta vista, sin dejar que se pierda de vista el ápex No inclinar el transductor para evitar vista apical de cinco cámaras</p>	<p>Vista recomendadas por las guías ASA/EACVI para medición de áreas y dimensiones del VD</p>
<p>Vista subcostal de 4 cámaras</p>	<p>Transductor en epigastro por debajo de apéndice xifoides Marca del transductor hacia la izquierda del paciente (3 horas de la carátula del reloj). Puede girarse un poco en dirección antihoraria para optimizar la vista de las cuatro cavidades cardiacas</p>	<p>Medir el grosor de la pared libre del VD Útil para valorar el colapso del VD en caso de existir tamponade Al aplicar Doppler color, puede observarse la presencia de comunicación interatrial</p>
<p>Vista subcostal del eje corto</p>	<p>Se obtiene primero una vista subcostal de 4 cámaras y posteriormente se gira el transductor en sentido antihorario 90°</p>	<p>Útil en caso de no existir una buena ventana acústica para valorar el eje corto paraesternal Puede utilizarse para medir todos los parámetros descritos en el eje corto paraesternal</p>

VD: ventrículo derecho; VI: ventrículo izquierdo; IT: insuficiencia tricúspidea; PSAP: presión sistólica arterial pulmonar; TAPSE: desplazamiento del anillo tricúspideo; FAC: fracción de acortamiento; ASA/EACVI: Asociación Americana de Anestesiólogos/Asociación Europea de Imagen Cardiovascular.

Fuente: elaborada por el autor con información de Rudski et al., 2010⁴ y Lang et al., 2015.⁹

diograma) en la vista A4C por planimetría. Se traza el borde endocárdico iniciando desde la implantación de la valva anterior de la tricúspide hasta terminar en el lado contralateral, en donde se implanta la valva septal de la tricúspide (deben excluirse la vena cava inferior, vena cava superior y orejuela derecha). Se considera normal un área <18 cm².^{4,7}

El volumen de la AD se considera una medida más robusta y precisa para determinar su tamaño en comparación con sus dimensiones lineales (áreas y diámetros en su eje mayor y menor), por lo cual es la más recomendada actualmente. Se mide en el A4C por planimetría en telesístole ventricular y se consideran normales los rangos de 25 + 7 ml/m² en hombres y 21 + 6 ml/m² en mujeres. Es la medida más aceptada actualmente por la Sociedad Americana de Ecocardiografía (ASE) y la Asociación Europea de Imagen Cardiovascular (EACVI) (Figura 2).⁴

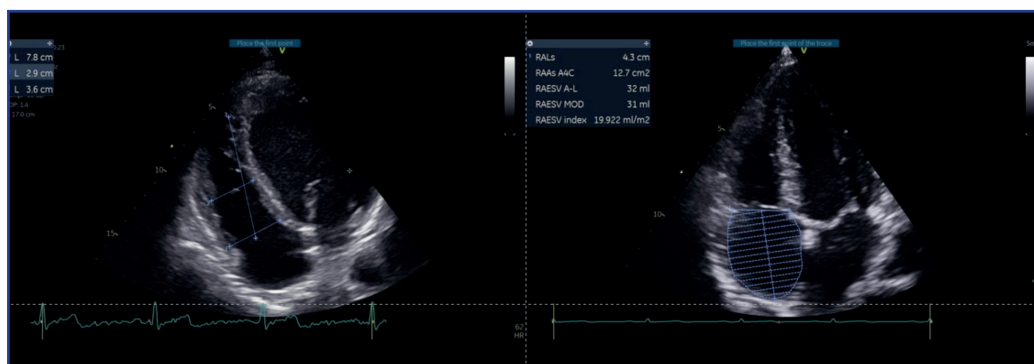


Figura 2. Diámetros de cavidades derechas.

Fuente: archivo personal del autor.

VENTRÍCULO DERECHO

Grosor de la pared del ventrículo derecho

El VD es una estructura anatómica con una pared normalmente delgada. El incremento del grosor de esta pared puede observarse en hipertrofia ventricular derecha, por lo general en el contexto de sobrecarga de presión del VD, enfermedades infiltrativas, miocardiopatías hipertróficas y en pacientes con hipertrofia ventricular izquierda significativa, incluso en ausencia de HP. Este parámetro se mide en telediástole ventricular (al inicio del complejo QRS, si se tiene trazo de electrocardiograma), con modo M o ecocardiografía bidimensional, de preferencia a nivel de la punta de la valva anterior de la tricúspide.⁴ Puede realizarse en la vista paraesternal o en la subcostal cuatro cámaras, siendo esta última la medida con menos variación y que más se correlaciona con la presión sistólica del VD.⁸ El diámetro normal de la pared del VD es ≤ 5 mm. Debe evitarse la medición de las trabéculas del VD y la grasa epicárdica para no sobreestimar las dimensiones del VD (**Figura 3**).

Diámetros del ventrículo derecho

Cualitativamente, el VD en ecocardiografía bidimensional debe parecer no más de dos tercios más pequeño que el tamaño del VI. Si el VD se observa cualitativamente de mayor tamaño que el VI en el A4C o el ápex se observa ocupado por el VD en esta misma vista, significa que el VD se encuentra, al menos moderadamente, dilatado.⁴

Dado que la vista A4C convencional de cuatro cámaras se enfoca en el VI, puede resultar en una variabilidad considerable en la forma en que se secciona el VD y, en consecuencia, las dimensiones y áreas del VD pueden variar ampliamente en el mismo paciente con rotaciones relativamente menores del transductor. Las dimensiones y áreas del VD se estiman mejor utilizando la vista apical cuatro cámaras enfocada en el VD, en la que el vértice del

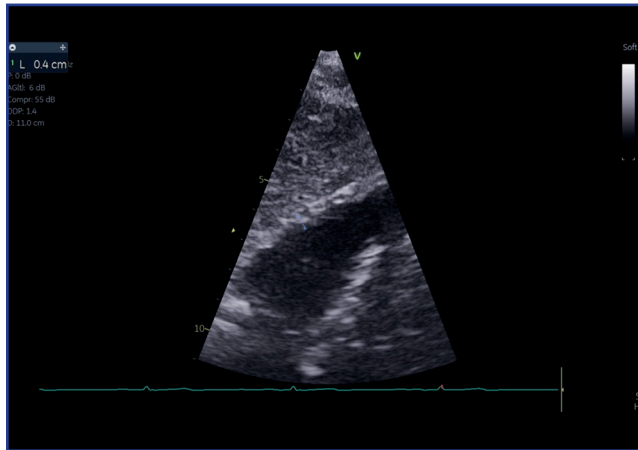


Figura 3. Pared del ventrículo derecho.
Fuente: archivo personal del autor.

VI se encuentra en el centro del sector de exploración, mientras que el diámetro basal más grande se muestra simultáneamente, evitando así el acortamiento del VD.

El diámetro basal se mide a nivel de la dimensión máxima del tercio basal del VD. El diámetro medio se mide en el tercio medio del VD, a nivel de los músculos papilares del VI. El diámetro longitudinal se mide desde el plano anular tricúspideo hasta el ápex del VD. Se consideran normales un diámetro basal <41 mm, un diámetro medio <35 mm y un diámetro longitudinal <83 mm (**Figura 3**).^{4,9} En la **Tabla 2** se resumen los valores más comunes para cuantificar las dimensiones normales del VD.

VENTRÍCULO DERECHO Y MORFOLOGÍA DEL SEPTUM INTERVENTRICULAR

El VD comparte el espacio pericárdico no distensible con el VI. A medida que el VD se dilata, las cavidades compiten por el espacio y la relación VD/VI se invierte, lo que se conoce como interdependencia ventricular. La dilatación del VD puede observarse con claridad en el eje corto paraesternal. Si hay sobrecarga de volumen o presión del VD, el septum interventricular se aplanan y el VI adquiere una forma de letra “D” (signo de la “D”).

Cuando la sobrecarga es predominantemente de volumen (por ejemplo, cuando hay insuficiencia tricúspidea severa, comunicación interatrial, drenaje anómalo de venas pulmonares, entre otras condiciones), se observa un aplanamiento del septum interventricular

Tabla 2. Valores normales de las dimensiones de las cavidades cardíacas derechas

Parámetro	Rango normal
Diámetro basal del VD	25-41 mm
Diámetro medio del VD	19-35 mm
Diámetro longitudinal del VD	59-83 mm
Espesor o diámetro de la pared del VD	1-5 mm
Diámetro proximal del VD (eje largo paraesternal)	20-30 mm
Diámetro proximal del VD (eje corto paraesternal)	21-35 mm
Diámetro distal del VD (eje corto paraesternal)	17-27 mm
Eje mayor de la AD	≤53 mm
Eje menor de la AD	≤44 mm
Área telediastólica de la AD	≤18 mm
Volumen telediastólico de la AD indexado por ASC	Mujeres, 21±6 ml/m ²
	Hombres, 25±7 ml/m ²

VD: ventrículo derecho; AD: aurícula derecha; ASC: área de superficie corporal.
Fuente: elaborada con información de Rudski et al., 2010⁴ y Lang et al., 2015.⁹

ventricular en diástole, ya que la presión del VD aumenta en esta fase del ciclo cardíaco en relación con la del VI. En el caso de una sobrecarga predominantemente de presión (como en presencia de HP, tromboembolia pulmonar, síndrome de dificultad respiratoria aguda) se observa un aplanamiento septum interventricular con predominio en sístole.⁴

El grado de aplanamiento del septum interventricular puede cuantificarse mediante el índice de excentricidad (IE) del VI, el cual se determina al dividir los diámetros anteroinferior del VI (D2) entre el diámetro septo-lateral del VI (D1) (**Figura 4**). Un IE <1 se considera normal.

VALORACIÓN VOLUMÉTRICA DEL VENTRÍCULO DERECHO

La medición de los volúmenes del VD por ecocardiografía bidimensional subestiman los volúmenes del VD obtenidos por resonancia magnética (este método había sido considerado como el estándar de oro para la cuantificación de los volúmenes del VD) y son inferiores en comparación con los métodos de ecocardiografía 3D, por lo que actualmente no se recomienda su uso ni el cálculo de la fracción de expulsión del VD a partir de estos volúmenes.



Figura 4. Signo de la “D” e índice de excentricidad.
Fuente: archivo personal del autor.

A la fecha, se recomienda la cuantificación de los volúmenes del VD por ecocardiografía 3D sólo en laboratorios de ecocardiografía con experiencia. Se considera normal el volumen telediastólico de 87 ml/m² en hombres y 74 ml/m² en mujeres. Los valores normales del volumen telesistólico en hombres es de 44 ml/m² y en mujeres de 36 ml/m².⁹

FUNCIÓN SISTÓLICA DEL VENTRÍCULO DERECHO

EXCURSIÓN SISTÓLICA DEL PLANO ANULAR TRICÚSPIDEO

La excursión sistólica del plano anular tricúspideo (tricuspid annular plane systolic excursion, TAPSE) Es una medida de la contracción longitudinal del VD. Se evalúa en modo M, colocando en una vista A4C el cursor a través del anillo lateral tricúspideo. Mide la excursión longitudinal del anillo tricúspideo desde el final de la diástole hasta el pico de la sístole. Su utilidad radica en la sencillez con que se realiza, independiente de la calidad de la imagen, su reproducibilidad y la poca variabilidad interobservador.¹⁰ Se ha demostrado que tiene valor pronóstico en una variedad de afecciones que pueden dañar al VD, como insuficiencia cardíaca con fracción de expulsión conservada o reducida e HP.^{11,12} Se considera un valor normal del TAPSE ≥ 17 mm (**Figura 5**).

La principal limitación del TAPSE es asumir que el desplazamiento de un solo segmento del VD representa la función sistólica global de una estructura 3D compleja. Además, se considera un parámetro dependiente del ángulo de insonación del ultrasonido; es dependiente de sobrecarga de volumen (en el contexto de insuficiencia tricúspidea severa puede sobreestimar la función sistólica del VD) y no es un parámetro completamente representativo de la función global del VD después de la cirugía cardíaca.¹³

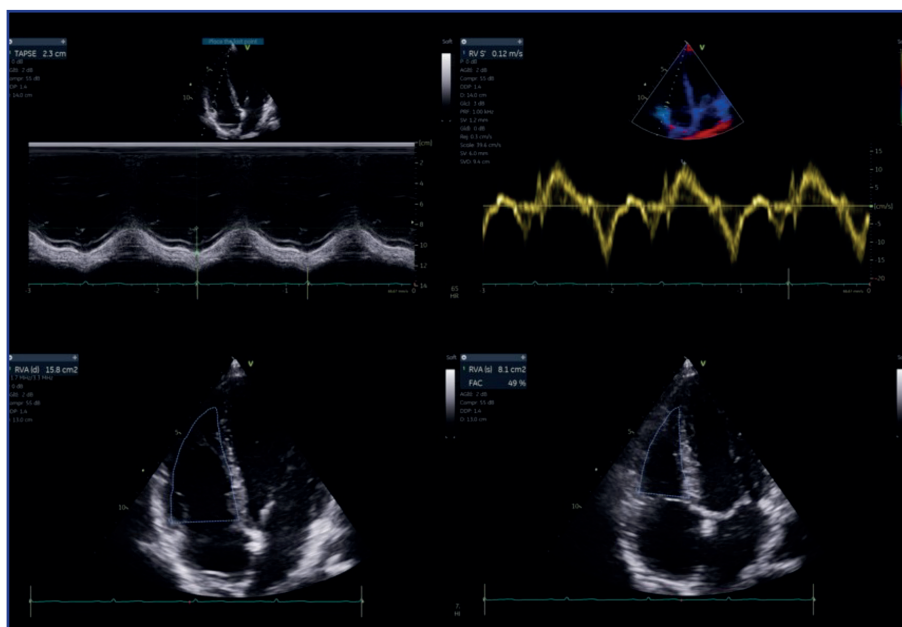


Figura 5. Parámetros de función sistólica del ventrículo derecho.

Fuente: archivo personal del autor.

VELOCIDAD SISTÓLICA PICO DEL ANILLO LATERAL TRICÚSPIDEO

La medición por Doppler tisular (*tissue Doppler imaging, TDI*) de la velocidad sistólica pico del anillo lateral tricúspideo también valora la función sistólica longitudinal del VD. Una vez activado el TDI en la máquina de ultrasonido, se utiliza el Doppler pulsado para evaluar la velocidad sistólica del VD a nivel del anillo tricúspide. La velocidad sistólica más alta se mide y se denomina onda S'. El valor normal de la onda S' por TDI es >9.5 cm/s. Tiene las mismas ventajas que el TAPSE, como ser reproducible y fácil de medir; mientras que entre sus limitaciones destacan que es un parámetro ángulo dependiente, no es un parámetro representativo de la función sistólica global del VD después de cirugía cardíaca y asume que el desplazamiento de un solo segmento del VD representa la función sistólica global del VD (**Figura 6**).^{1,13}

FRACCIÓN DE ACORTAMIENTO DE ÁREAS

El cambio de área fraccional se obtiene al trazar manualmente el endocardio del VD tanto en telediástole como en telesístole en una vista A4C o enfocada en el VD, sin incluir las trabeculaciones de la pared. Se calcula con la fórmula: $FAC = \left[\frac{\text{área telediastólica del VD} - \text{área telesistólica del VD}}{\text{área telediastólica del VD}} \right] \times 100$. La fracción de acortamiento

de áreas (FAC) estima la función sistólica global del VD ya que refleja tanto el componente longitudinal, como el radial de la contracción del VD.¹

La FAC se correlaciona bien con la fracción de expulsión del VD obtenida con resonancia magnética cardíaca, considerándose normal una cifra >35%. Su principal limitación es el requisito de una buena definición endocárdica, a menudo difícil, particularmente en el caso de una pared del VD muy trabeculada.² Otra limitación de la FAC es ignorar la contribución del TSVD a la función sistólica global del VD (**Figura 6**).

ÍNDICE DE RENDIMIENTO MIOCÁRDICO O ÍNDICE DE TEI

El índice de rendimiento miocárdico del VD por Doppler tisular es un índice de la función global del mismo. Se calcula con la siguiente formula: $[(\text{tiempo de relajación isovolumétrica} + \text{tiempo de contracción isovolumétrica}) / \text{tiempo de expulsión}]$ o $[(\text{tiempo desde el cierre de la válvula tricúspide hasta el tiempo de apertura} - \text{tiempo de expulsión}) / \text{tiempo de expulsión}]$. Se considera un valor normal un índice de rendimiento miocárdico del VD >0.54 si se calcula por Doppler tisular.⁴

Este parámetro no se ve afectado significativamente por la frecuencia cardíaca; se evita la limitación de la geometría compleja del VD y pueden obtenerse todos los datos para calcularlo en un solo latido. Puede ser falsamente bajo en condiciones asociadas con presiones de la AD elevadas, en donde se acorta el tiempo de relajación isovolumétrica.¹⁰

FRACCIÓN DE EXPULSIÓN POR ECOCARDIOGRAFÍA 3D Y STRAIN LONGITUDINAL DEL VENTRÍCULO DERECHO

La fracción de expulsión del VD (FEVD) por ecocardiografía 3D es un parámetro de función sistólica global y, a diferencia de la FAC, sí incluye la contribución del TSVD a la función global del VD. Se ha demostrado que la FEVD 3D se correlaciona bien con la FEVD medida por resonancia magnética cardíaca. Se considera normal una cifra >45%.

La FEVD tiene valor clínico después de cirugía cardíaca cuando los índices de función longitudinal del VD habituales como el TAPSE y la onda S' se encuentran generalmente reducidos y no representan más la función del VD. Las limitaciones de este parámetro son la necesidad de experiencia para su adquisición y análisis, tener un *software* especializado para su cuantificación, dependencia de sus valores con respecto a la carga hemodinámica del VD y su afectación en caso de existir ventanas acústicas deficientes o arritmias.

El *strain* longitudinal y el *strain rate* son parámetros útiles para la estimación de la función sistólica global y regional del VD. El primero se calcula como el porcentaje de acortamiento sistólico de la pared libre del VD, medida de base a ápice, mientras que el segundo se refiere a la velocidad de ese acortamiento. El *strain* longitudinal del VD está menos influenciado por el movimiento general del corazón, pero depende de las condiciones de carga

del VD. Se calcula en una vista A4C enfocada en VD. El valor normal de la deformación global longitudinal de la pared lateral del VD es de <20%.⁹

Tanto la fracción de expulsión por ecocardiografía 3D como el *strain* longitudinal del VD se consideran parámetros avanzados en la evaluación de la función del VD y deben quedar restringidos a laboratorios de ecocardiografía con experiencia.

FUNCIÓN DIASTÓLICA DEL VENTRÍCULO DERECHO

Por lo general, la función diastólica del VD ha sido poco estudiada; sin embargo, debe valorarse como dato de daño subclínico cuando se sospecha de afección miocárdica del VD o como marcador pronóstico en caso de falla. Los datos para estadificar la disfunción diastólica en el VD son los mismos que en cavidades izquierdas; una relación E/A tricúspidea <0.8 sugiere un trastorno de la relajación, en tanto que una relación E/A tricúspidea 0.8-2.1 con una relación E/e' tricúspidea >6 o un flujo venoso hepático de predominio diastólico sugiere llenado pseudonormal y, por último, una relación E/A >2.1 con un tiempo de desaceleración <120 ms sugiere un llenado restrictivo.⁴

VALORACIÓN HEMODINÁMICA NO INVASIVA DE CAVIDADES CARDIACAS DERECHAS Y PRESIONES PULMONARES

PRESIÓN SISTÓLICA DE LA ARTERIA PULMONAR

En >75% de la población adulta normal se encuentra cierto grado de regurgitación tricúspidea (RT), por lo que en una gran mayoría de pacientes puede estimarse la PSAP a partir de la velocidad máxima del flujo regurgitante tricúspideo.¹⁴ Primero con ayuda del modo Doppler color se identifica un jet de RT, generalmente en el eje apical de cuatro cámaras (aunque debe buscarse en todos los planos ecocardiográficos posibles). Se coloca la muestra volumen lo más alineado posible al jet regurgitante tricúspideo, se activa el modo Doppler continuo y se mide la velocidad máxima del espectro Doppler del flujo (**Figura 6**).

En ausencia de obstrucción a nivel de la válvula pulmonar o el TSVD, la PSAP es igual a la presión sistólica del ventrículo derecho (PSVD). La PSVD o PSAP se obtiene al usar la velocidad máxima del jet de RT mediante la fórmula Bernoulli simplificada: $PSVD = 4 (VRT)^2 + \text{presión de AD}$; en donde VRT es la velocidad máxima jet de RT (m/s) y la presión de AD se estima mediante el diámetro de la vena cava inferior (VCI) y sus cambios respirofásicos, tal como se describe más adelante.^{4,15}

El valor normal en reposo de la PSAP se define usualmente como <35 mmHg, asumiendo que la presión de la AD es de 3 a 5 mmHg.⁴ Por lo general, este valor aumenta con la edad y la ganancia de peso. Puede encontrarse PSAP de hasta 40 mmHg en personas >50 años y en personas obesas con índices de masa corporal (IMC) >30 kg/m², a pesar de no contar con HP por cateterismo cardiaco derecho.¹⁶

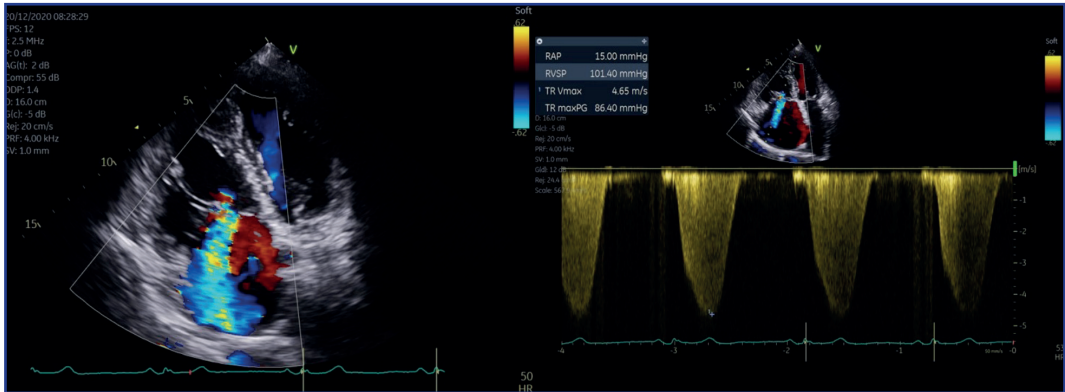


Figura 6. Gradiente de regurgitación tricúspideas.

Fuente: archivo personal del autor.

Una desventaja de este método es la presencia de un espectro Doppler del flujo regurgitante tricúspideas de muy mala calidad para su adecuado trazado, sobre todo en pacientes con enfermedad pulmonar. Por lo anterior, se desaconseja medir la velocidad máxima del flujo regurgitante tricúspideas en la ausencia de un buen espectro Doppler. Otra causa de infraestimación de la PSAP es la presencia de insuficiencia tricúspideas severa en la que se produce una eculización temprana de las presiones entre AD y VD.¹⁷

Es frecuente que se sobreestime o se subestime la PSAP obtenida por ecocardiografía. En 48 a 51% de los pacientes se ha observado una diferencia de ± 10 mmHg entre la PSAP obtenida por ecocardiografía y la obtenida por cateterismo cardiaco derecho, especialmente en pacientes con PSAP elevada. Una razón importante para sobreestimar la PSAP es la valoración incorrecta de la presión de la AD, lo que ocurre en la mitad de los casos.¹⁸

PRESIÓN DIASTÓLICA DE LA ARTERIA PULMONAR

Para determinar la presión diastólica de la arteria pulmonar también puede aplicarse la fórmula de Bernoulli al jet de regurgitación pulmonar (RP). Primero, con ayuda del Doppler color se identifica un jet de RP en el eje corto paraesternal a nivel de grandes vasos con foco en el TSVD y la válvula pulmonar. Se coloca la muestra volumen lo más alineado posible al jet regurgitante pulmonar, se activa el modo Doppler continuo y se mide la velocidad diastólica tardía del espectro Doppler del flujo regurgitante pulmonar. La presión diastólica de la arteria pulmonar se determina con la fórmula $PDAP = 4 (VRP)^2 +$ presión de AD; en donde VRP es la velocidad diastólica tardía del jet de RP (m/s) y la presión de AD se obtiene con la valoración de los cambios respirofásicos de la vena cava inferior a través de la ventana subcostal.^{4,17}

PRESIÓN MEDIA DE LA ARTERIA PULMONAR

El análisis del espectro Doppler del TSVD sirve para determinar si existe HP. Por lo regular, este espectro Doppler tiene una morfología parabólica, pero en pacientes con HP se registra un rápido ascenso a la velocidad máxima o pico del flujo pulmonar, lo que causa acortamiento en el tiempo de aceleración pulmonar (TAcP).^{15,17,19}

Primero se obtiene el eje corto paraesternal a nivel de grandes vasos con foco en el TSVD y la válvula pulmonar. Se coloca la muestra volumen proximal a la válvula pulmonar y lo más alineado posible al TSVD y se activa el modo Doppler pulsado para obtener el espectro Doppler del TSVD. Por último, se mide el TAcP desde el inicio del flujo hasta su velocidad máxima.

Se considera normal un TAcP >130 ms, mientras que un TAcP <100 ms es altamente sugestivo de HP. Este método es más preciso en casos en los que la frecuencia cardíaca se encuentra entre 60-100 lpm. Con el valor obtenido también puede determinarse la presión arterial pulmonar media (PAPm) mediante las fórmulas descritas por Chemla y Dabestani. Si el TAcP es <120 ms, se utiliza la fórmula $90 - (0.62 \times \text{TAcP})$; si el TAcP es >120 ms, se utiliza la fórmula $79 - (0.45 \times \text{TAcP})$.^{4,17}

Por otra parte, de la misma forma que se determinó la PDAP a partir de la velocidad diastólica tardía de RP, puede determinarse la PAPm a partir de la velocidad diastólica temprana de RP con la fórmula de Bernoulli con la fórmula $\text{PAPm} = 4 (\text{VDTRP})^2 + \text{presión de AD}$; en donde VDTRP es la velocidad diastólica temprana del jet de RP (m/s) (**Figura 7**).

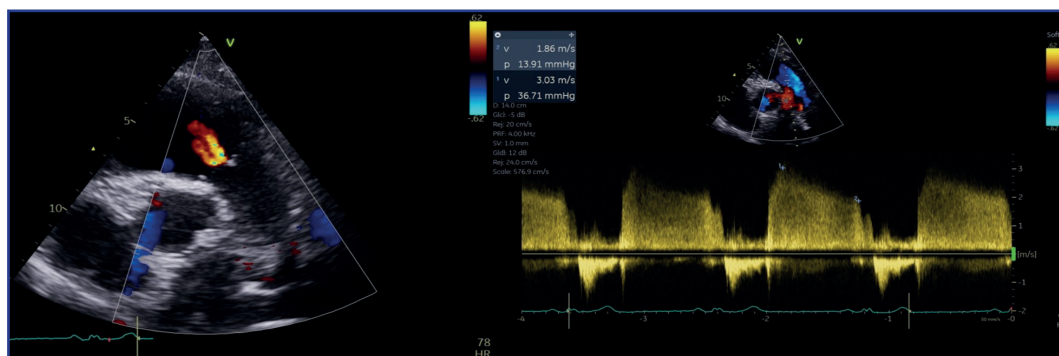


Figura 7. Obtención de la presión arterial pulmonar media a partir del jet de insuficiencia pulmonar.

Fuente: archivo personal del autor.

Otra fórmula validada para determinar la PAPm es la descrita por Chemla y colaboradores: $\text{PAPm} = 0.61(\text{PSAP}) + 2$. De acuerdo con esta fórmula, tener una PAPm >25 mmHg confiere un odd ratio (OD) de 5.91 para la presencia de HP.²⁰

RESISTENCIAS VASCULARES PULMONARES

El aumento de las resistencias vasculares pulmonares (RVP) en un paciente con HP sugiere una etiología precapilar; es decir, afección en la vasculatura pulmonar. La fórmula más utilizada para determinar de forma no invasiva este parámetro es la propuesta por Abbas y colaboradores: $RVP = (\text{velocidad máxima de RT [cm/s]} / \text{VTI TSVD [cm]}) \times 10 + 0.16$. Con esta fórmula se obtienen las RVP en unidades Woods, el valor normal es <0.15 . Un valor >3 unidades Woods sugiere una HP significativa.^{4,17} Sin embargo, la fórmula descrita no es tan confiable en caso de elevación significativa de RVP, como observaron Abbas y colaboradores, por lo que desarrollaron un algoritmo basado en el cociente velocidad máxima de RT ($V_{\text{max RT}}$) VTITSVD (**Figura 8**).²¹

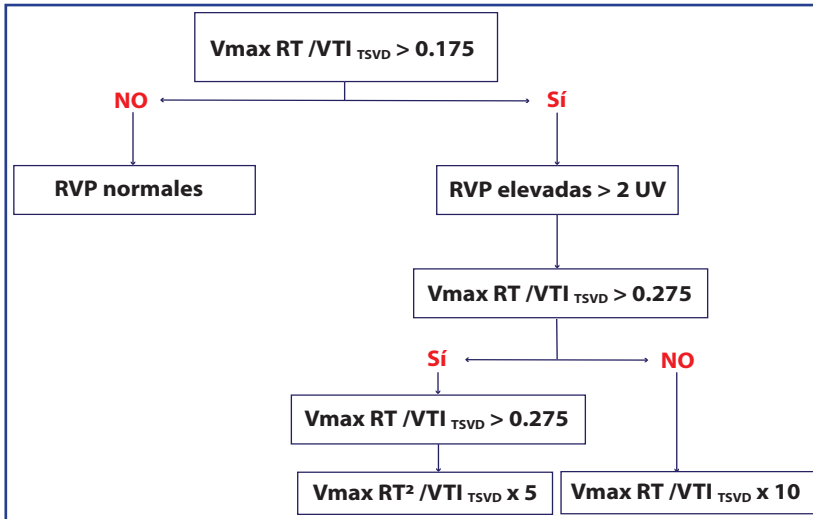


Figura 8. Algoritmo propuesto para valorar las resistencias vasculares pulmonares. RVP: resistencias vasculares pulmonares; $V_{\text{max RT}}$: velocidad máxima de regurgitación tricúspideas; VTITSVD : integral velocidad tiempo del tracto de salida del ventrículo derecho; UW: unidades Woods.

Fuente: tomado y modificado de Abbas et al., 2013.²¹

Una forma rápida y cualitativa de valorar la presencia de aumento en las RVP es observar la morfología del espectro Doppler del TSVD. Un dato ecocardiográfico que puede sugerir HP severa es la presencia de una “muesca” mesosistólica en el espectro Doppler del TSVD. Este fenómeno sucede en presencia de incremento de la RVP y cuando existe una baja compliancia arterial pulmonar.¹⁵ Además, la presencia de muesca sistólica pulmonar se asocia con HP precapilar relacionada con enfermedad vascular pulmonar, mientras que su

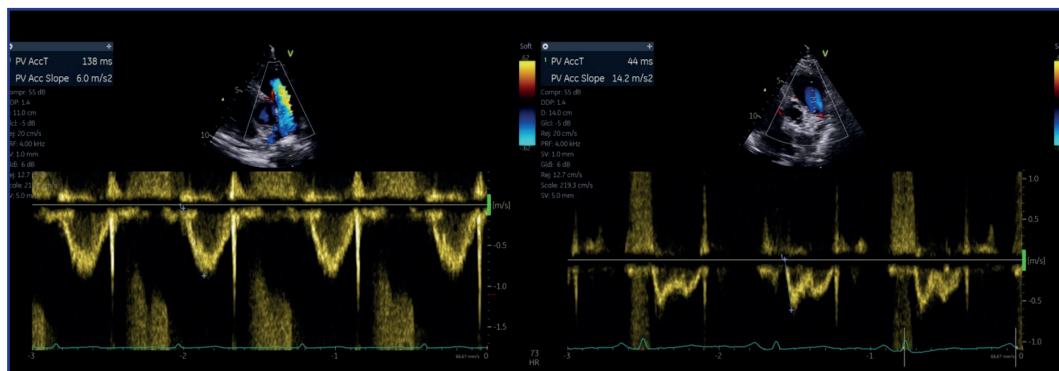


Figura 9. Tiempo de aceleración y notch mesosistólico.

Fuente: archivo personal del autor.

Tabla 3. Fórmulas útiles en la valoración hemodinámica de cavidades derechas

Parámetro	Fórmula
PASP (PSVD)	$4(V_{\max} IT)^2 + PAD$
PDAP	$4(VTD IP)^2 + PAD$
PAPm	$4(VDT IP)^2 + PAD$ $0.6 (PSAP) + 2$ $2/3 PDAP + 1/3 PSAP$ En caso de TAcP <120 ms: $90 - (0.62 \times TAcP)$ En caso de TAcP ≥ 120 ms: $75 - (0.49 \times TAcP)$
RVP	$V_{\max} IT / IVT_{TSVD} \times 10 + 0.16$ (si se sospecha >6 UW utilizar mejor el algoritmo de la Figura 9)

PSVD: presión sistólica del ventrículo derecho; PSAP: presión sistólica de la arteria pulmonar; PAD: presión de aurícula derecha; $V_{\max} IT$: velocidad máxima del flujo de insuficiencia tricúspidea; VTD IP: velocidad telediastólica del flujo de insuficiencia pulmonar; VDT IP: velocidad diastólica temprana del flujo de insuficiencia pulmonar; TAcP: tiempo de aceleración pulmonar; RVP: resistencia vasculares pulmonares; WU: unidades Wood; IVT_{TSVD} : integral velocidad tiempo del tracto de salida del ventrículo derecho.

Fuente: elaboración del autor.

ausencia se relaciona con HP secundaria a enfermedad cardiaca (**Figura 9**).²² En la **Tabla 3** se muestran las principales fórmulas para estimar las presiones pulmonares de forma no invasiva por ecocardiografía.

PRESIÓN DE AURÍCULA DERECHA

La determinación precisa de la presión de la aurícula derecha (PAD) es muy importante, ya que se utiliza en la fórmula de Bernoulli para la estimación no invasiva de la PSAP. Existen varios métodos para estimar la PAD por ecocardiografía; sin embargo, el más utilizado es la estimación a partir del diámetro y el colapso inspiratorio de la vena cava inferior (VCI), ya que la PAD se correlaciona directamente con la presión venosa central. En pacientes con respiración espontánea, a medida que aumenta la PAD, se transmite a la VCI, lo que reduce el colapso con la inspiración y produce una dilatación de la VCI.

Para estimar la PAD, primero debe visualizarse la vena cava inferior (VCI) en la ventana subcostal con el paciente en decúbito supino (en la posición en decúbito lateral izquierda se infraestima el diámetro máximo de la VCI). El diámetro de la VCI se mide al final de la expiración a 1-2 cm de la unión con la aurícula derecha y totalmente perpendicular al eje longitudinal de la VCI.^{4,9} Posteriormente, se mide el diámetro al final de un pequeño “sniff” o inspiración no forzada, siempre teniendo cuidado que el cambio en el diámetro de la VCI no sea un falso colapso secundario al desplazamiento del plano ecocardiográfico. Finalmente, se determina el índice de colapsabilidad con la fórmula $([VCI_{\text{max}} - VCI_{\text{min}}] / VCI_{\text{max}})$.^{4,9,23} El índice de colapsabilidad tiene una correlación con la PAD invasiva muy variable en diferentes estudios ($r = 0.57-0.76$) (**Figura 10**).



Figura 10. Colapso de vena cava normal.

Fuente: archivo personal del autor.

Se han propuesto varios algoritmos para estimar la PAD de acuerdo con su diámetro máximo espiratorio y su colapso inspiratorio; las guías para la evaluación de las cavidades derechas de la ASE sugieren el esquema descrito en la **Tabla 4**.^{4,9}

Es importante tomar en cuenta que existen escenarios clínicos en los que puede darse una VCI >2.1 cm en presencia de PAD normal, como por ejemplo en atletas de alto rendimiento, pacientes con área de superficie corporal elevada, ventilación mecánica y presencia de remanentes embrionarios en la VCI como una red de Chiari.²³

Tabla 4. Esquema propuesto por las guías ASE 2010/ASE 2015 para estimación de la presión de aurícula derecha

Colapso inspiratorio VCI	Diámetro de la VCI	
	≤2.1 cm	>2.1 cm
>50%	PAD=3 mmHg (PAD normal)	PAD= 8 mmHg (PAD intermedia)*
<50%	PAD= 8 mmHg (PAD intermedia)*	PAD= 15 mmHg (PAD alta)

*En casos de PAD intermedia, puede reclasificarse como PAD alta si presenta al menos alguno de los siguientes índices secundarios de elevación de las presiones de AD: patrón de llenado restrictivo (relación E/A tricúspidea <2.1 y tiempo de desaceleración <120 ms); relación tricúspidea E/e' >6; predominio del flujo diastólico del flujo venoso hepático. En caso de que no exista ninguno de los índices secundarios antes descritos, la PAD puede reclasificarse como una PAD normal (3 mmHg). ASE: Sociedad Americana de Ecocardiografía; VCI: vena cava inferior; PAD: presión de la aurícula derecha.

Fuente: elaborada por el autor con información de Rudski et al., 2010⁴ y Lang et al., 2015.⁹

Los patrones de flujo de la vena hepática también son útiles para brindar información complementaria sobre la PAD. Normalmente, con presiones de AD bajas o normales, existe un predominio sistólico en el flujo de la vena hepática, de modo que la velocidad de la onda sistólica hepática (Vs) es mayor que la velocidad de la onda diastólica (Vd). Con presiones de AD elevadas, este predominio sistólico se pierde, de modo que Vs disminuye sustancialmente y el cociente Vs/Vd es <1.^{4,23}

Otros datos ecocardiográficos sugestivos de incremento en la PAD son: relación E/e' tricúspidea >6; predominio del flujo diastólico en el espectro Doppler de la vena cava superior y vena yugular; abombamiento del septum interatrial hacia la aurícula izquierda y dilatación de la AD.²³

ESQUEMA PARA ESTIMACIÓN DE LA PROBABILIDAD DE HIPERTENSIÓN PULMONAR

Como ya se describió, una razón importante para sobreestimar la PSAP es la evaluación incorrecta de la presión de la AD. Por lo tanto, las últimas guías de HP de la Sociedad Europea de Cardiología (ESC) de 2015 proponen el uso de la velocidad máxima de la regurgitación tricúspidea ($V_{\max RT}$) como la variable principal para determinar la probabilidad de HP. También se propone la valoración de otros parámetros ecocardiográficos que apoyen el diagnóstico de HP (**tablas 5a, 5b**).²⁴

Tabla 5a. Esquema propuesto por la ESC para determinar por electrocardiograma la probabilidad de hipertensión pulmonar

$V_{\max RT}$	Presencia de otros "signos ecocardiográficos de HP"*	Probabilidad ecocardiográfica de HP
≤ 2.8 o no medible	No	Baja
≤ 2.8 o no medible	Sí	Intermedia
2.9-3.4	No	
2.9-3.4	Sí	Alta
> 3.4	20-30 mm	

*Ver Tabla 5b.

ESC: Sociedad Europea de Cardiología; $V_{\max RT}$: velocidad máxima del flujo de regurgitación tricúspidea; HP: hipertensión pulmonar.

Fuente: elaboración del autor.

Tabla 5b. Signos ecocardiográficos sugestivos para valorar la probabilidad de hipertensión pulmonar

A: ventrículos*	B: arteria pulmonar*	C: VCI y AD*
Cociente diámetros basales VD/VI > 1	TAcP < 105 ms y/o notch mesosistólico	VCI > 21 mm con colapso inspiratorio $< 50\%$ con un "sniff" o $< 20\%$ con inspiración no forzada
Aplanamiento del septum interventricular (IE del VI > 1.1 en sístole o diástole)	Velocidad diastólica temprana del flujo de regurgitación pulmonar > 2.2 m/s	Área de la AD (telediastólica) > 18 cm ²
	Diámetro de la AP > 25 mm	

*Deben estar presentes signos ecocardiográficos de al menos dos categorías diferentes (A/B/C) de la lista para alterar el nivel de probabilidad ecocardiográfica de hipertensión pulmonar.

VCI: vena cava inferior; AD: aurícula derecha; VD: ventrículo derecho; VI: ventrículo izquierdo; TAcP: tiempo de aceleración pulmonar; IE: índice de excentricidad; AP: arteria pulmonar.

Fuente: elaboración del autor.

Tabla 6. Hallazgos ecocardiográficos sugestivos de HP precapilar y postcapilar

HP precapilar	HP postcapilar
VD>VI	VI>VDI
Ápex en A4C formado por VD	Ápex en A4C formado por VI
IE < 1	IE > 1
AD dilatada	AI dilatada
Abombamiento del septum interatrial hacia AI	Abombamiento del septum interatrial hacia AD
Notch mesosistólico	Es raro encontrar notch meso sistólico
RVP > 3 UW	RVP < 0.15
Hiperatrofia VD	Hiperatrofia VI
E/A mitral < 1	E/A > 1
Onda e' lateral normal	Onda e' lateral reducida
E/e' < 8	E/e' > 14

ASC: apical cuatro cámaras; AD: aurícula derecha; AI: aurícula izquierda; IE: índice de excentricidad; RVP: resistencias vasculares pulmonares; VD: ventrículo derecho; VI: ventrículo izquierdo; TSVD: tracto de salida del VD; UW: unidades Woods.

Fuente: tomada y modificada de Hockstein et al., 2021.²⁹

DETERMINACIÓN DE LA PRESIÓN DE LA AURÍCULA DERECHA Y DE LA PRESIÓN SISTÓLICA DE LA ARTERIA PULMONAR EN PACIENTES CON VENTILACIÓN MECÁNICA

Jue y colaboradores describieron el uso del diámetro espiratorio de la VCI en pacientes con ventilación mecánica para determinar la PAD. Un diámetro espiratorio de la VCI en pacientes con ventilación mecánica <12 mm predice una PAD <10 mmHg. Por arriba de dicho valor, el diámetro de la VCI no puede predecir si la PAD está elevada o baja.²⁵

Por su parte, Nagueh y colaboradores señalaron que una relación E/e' tricúspidea >6 se relaciona con una PAD >10 mmHg en pacientes ventilados²⁶ y describieron otro método con la fracción de llenado sistólico de la vena hepática, el cual es el cociente entre la integral velocidad tiempo (VTI) de la onda S hepática y la suma de las VTI tanto sistólica como diastólica de la vena hepática (Vs VTI/ [Vs VTI + Vd VTI]). Si el resultado es <55%, este método predice en pacientes ventilados una PAD >8 mmHg.²⁷

Recientemente, Mercado y colaboradores valoraron varios métodos para estimar la PSAP en pacientes críticos y ventilados. De acuerdo con su estudio, el método más efectivo para determinar la PSAP en pacientes con ventilación mecánica es sumar el valor de la presión venosa central (PVC) medida de forma invasiva al gradiente de la RT obtenido por ecocardiograma.²⁸

DATOS ECOCARDIOGRÁFICOS ORIENTATIVOS PARA DIFERENCIAR UNA HIPERTENSIÓN PULMONAR PRECAPILAR DE UNA POSTCAPILAR

Además de la estimación de la probabilidad de HP, el ecocardiograma puede ayudar a orientar el perfil hemodinámico de la HP, así como en el contexto clínico orientar al diagnóstico de una tromboembolia pulmonar (recordando que, por lo general, el ecocardiograma no es el estudio de elección para diagnosticar tromboembolia pulmonar debido a su bajo valor predictivo). En las **tablas 6 y 7** se describen, respectivamente, los diferentes parámetros ecocardiográficos que ayudan a diferenciar una HP precapilar de una postcapilar y los datos ecocardiográficos sugestivos de una tromboembolia pulmonar aguda.

Tabla 7. Hallazgos ecocardiográficos sugestivos de TEP

Hallazgo	LR (+)
Trombo de cavidades derechas	5.0
Signo de McConnell	7.3
Movimiento paradójico del septum interventricular	5.2
Hipocinesia de la pared libre del VD	4.2
Diámetro telediastólico VD (dilatación)	4.0
Patrón de "sobrecarga" del VD	3.1

LR: *likelihood ratio*; TEP: tromboembolia pulmonar; VD: ventrículo derecho.

Fuente: tomada y modificada de Dabbouseh et al., 2019.³⁰

CONCLUSIONES

Desde hace algunos años se ha comenzado a prestar mayor atención a la valoración del ventrículo derecho como predictor en los desenlaces a largo plazo de la HP, insuficiencia cardíaca, valvulopatías cardíacas, enfermedades congénitas y miocardiopatías. La ecocardiografía es la modalidad de elección para valorar al ventrículo derecho en la práctica

clínica diaria; sin embargo, requiere un enfoque multiparamétrico para valorar de forma precisa su geometría y función, así como para evaluar de forma no invasiva las presiones pulmonares estrechamente relacionadas con la función ventricular derecha.

FUENTES CONSULTADAS

1. Alsoos F, Khaddam A. Echocardiographic evaluation methods for right ventricular function. *J Echocardiogr.* 2015;13(2):43-51.
2. Jurcut R, Giusca S, La Gerche A et al. The echocardiographic assessment of the right ventricle: what to do in 2010? *Eur J Echocardiogr.* 2010;11(2):81-96.
3. Mertens LL, Friedberg MK. Imaging the right ventricle – current state of the art. *Nat Rev Cardiol.* 2010;7(10):551-563.
4. Rudski LG, Lai WW, Afilalo J et al. Guidelines for the echocardiographic assessment of the right heart in adults: a report from the American Society of Echocardiography endorsed by the European Association of Echocardiography, a registered branch of the European Society of Cardiology, and the Canadian Society of Echocardiography. *J Am Soc Echocardiogr.* 2010;23(7):685-713.
5. Mitchell C, Rahko PS, Blauwet LA et al. Guidelines for performing a comprehensive transthoracic echocardiographic examination in adults: recommendations from the American Society of Echocardiography. *J Am Soc Echocardiogr.* 2019;32(1):1-64.
6. Zaidi A, Knight DS, Augustine DX et al. Echocardiographic assessment of the right heart in adults: a practical guideline from the British Society of Echocardiography. *Echo Res Pract.* 2020;7(1):G19-G41.
7. Galatas C, Graspsa J, Rudski LG. Chapter 32. The right atrium. En Lang RM, Goldstein SA, Kronzon I et al. *ASE's comprehensive Echocardiography.* 3a edición. Filadelfia: Elsevier, 2022.
8. Matsukubo H, Matsuura T, Endo N et al. Echocardiographic measurement of right ventricular wall thickness. A new application of subxiphoid echocardiography. *Circulation.* 1977;56(2):278-284.
9. Lang RM, Badano LP, Mor-Avi V et al. Recommendations for cardiac chamber quantification by echocardiography in adults: an update from the American Society of Echocardiography and the European Association of Cardiovascular Imaging. *J Am Soc Echocardiogr.* 2015;28(1):1-39.e14
10. Jones N, Burns AT, Prior DL. Echocardiographic assessment of the right ventricle-state of the art. *Heart Lung Circ.* 2019;28(9):1339-1350.
11. Bosch L, Lam CSP, Gong L et al. Right ventricular dysfunction in left-sided heart failure with preserved versus reduced ejection fraction. *Eur J Heart Fail.* 2017;19(12):1664-1671.
12. Mazurek JA, Vaidya A, Mathai SC et al. Follow-up tricuspid annular plane systolic excursion predicts survival in pulmonary arterial hypertension. *Pulm Circ.* 2017;7(2):361-371.
13. Islam S, Khasan B, Keane M. Chapter 29. Imaging the right heart: limitations and technical considerations. En Lang RM, Goldstein SA, Kronzon I et al. *ASE's comprehensive Echocardiography.* 3a edición. Filadelfia: Elsevier, 2022.
14. Bossone E, D'Andrea A, D'Alto M et al. Echocardiography in pulmonary arterial hypertension: from diagnosis to prognosis. *J Am Soc Echocardiogr.* 2013;26(1):1-14.
15. Karas MG, Kizer JR. Echocardiographic assessment of the right ventricle and associated hemodynamics. *Prog Cardiovasc Dis.* 2012;55(2):144-160.
16. McQuillan BM, Picard MH, Leavitt M, Weyman AE. Clinical correlates and reference intervals for pulmonary artery systolic pressure among echocardiographically normal subjects. *Circulation.* 2001;104(23):2797-2802.
17. Parasuraman S, Walker S, Loudon BL et al. Assessment of pulmonary artery pressure by echocardiography-A comprehensive review. *Int J Cardiol Heart Vasc.* 2016;12:45-51.
18. Ahmed M, Dweik RA, Tonelli AR. What is the best approach to a high systolic pulmonary artery pressure on echocardiography? *Cleve Clin J Med.* 2016;83(4):256-260.
19. Milan A, Magnino C, Veglio F. Echocardiographic indexes for the non-invasive evaluation of pulmonary hemodynamics. *J Am Soc Echocardiogr.* 2010;23(3):225-239.
20. Hellenkamp K, Unsöld B, Mushemi-Blake S, Shah AM et al. Echocardiographic estimation of mean pulmonary artery pressure: a comparison of different approaches to assign the likelihood of pulmonary hypertension. *J Am Soc Echocardiogr.* 2018;31(1):89-98.
21. Abbas AE, Franey LM, Marwick T et al. Noninvasive assessment of pulmonary vascular resistance by Doppler echocardiography. *J Am Soc Echocardiogr.* 2013;26(10):1170-1177.
22. Arkles JS, Opatowsky AR, Ojeda J et al. Shape of the right ventricular Doppler envelope predicts hemodynamics and right heart function in pulmonary hypertension. *Am J Respir Crit Care Med.* 2011;183(2):268-276.
23. Beigel R, Cercek B, Luo H, Siegel RJ. Noninvasive evaluation of right atrial pressure. *J Am Soc Echocardiogr.* 2013;26(9):1033-1042.
24. Humbert M, Kovac G, Hoepfer M, et al. 2022 ESC/ERS Guidelines for the diagnosis and treatment of pulmonary

hypertension: The Joint Task Force for the Diagnosis and Treatment of Pulmonary Hypertension of the European Society of Cardiology (ESC) and the European Respiratory Society (ERS): Endorsed by: International Society for Heart and Lung Transplantation (ISHLT) and the European Reference Network on rare respiratory disease (ERN-LUNG). *Eur Heart J*. 2022; 43 (1):3618-3731.

25. Jue J, Chung W, Schiller NB. Does inferior vena cava size predict right atrial pressures in patients receiving mechanical ventilation? *J Am Soc Echocardiogr*. 1992;5(6):613-619.

26. Nageh MF, Kopelen HA, Zoghbi WA et al. Estimation of mean right atrial pressure using tissue Doppler imaging. *Am J Cardiol*. 1999;84(12):1448-1451.

27. Nagueh SF, Kopelen HA, Zoghbi WA. Relation of mean right atrial pressure to echocardiographic and Doppler parameters of right atrial and right ventricular function. *Circulation*. 1996;93(6):1160-1169.

28. Mercado P, Maizel J, Beyls C et al. Reassessment of the accuracy of cardiac Doppler pulmonary artery pressure measurements in ventilated ICU patients: a simultaneous Doppler-catheterization study. *Crit Care Med*. 2019;47(1):41-48.

29. Hockstein MA, Haycock K, Wiepking M et al. Trans-thoracic right heart echocardiography for the intensivist. *J Intensive Care Med*. 2021;36(9):1098-1109.

30. Dabbouseh NM, Patel JJ, Bergl PA. Role of echocardiography in managing acute pulmonary embolism. *Heart*. 2019;105(23):1785-1792.