

Ecocardiografía para la monitorización hemodinámica en paciente crítico

Diego Ugalde¹, Jorge Montoya¹, Juan Nicolás Medel¹.

Echocardiography for Hemodynamic Monitoring in Critically Ill Patients

RESUMEN

La ecocardiografía de cuidados críticos se ha convertido en una herramienta central para monitorización y manejo hemodinámico avanzado en pacientes críticos, con utilidad en escenarios diversos en patologías graves. Se basa en integrar evaluación funcional a tiempo real de diferentes aspectos del sistema circulatorio junto a datos clínicos y complementarios para un manejo personalizada de la hemodinamia, sin embargo, requiere la realización e interpretación por un profesional calificado y adecuadamente entrenado. En esta revisión se analizarán generalidades de la ecocardiografía en pacientes críticos, contextos en los que es útil, aspectos evaluados, novedades y aspectos del entrenamiento que requiere.

Palabras clave: Choque; Cuidados Críticos; Ecocardiografía.

ABSTRACT

Critical care echocardiography has become a central tool for advanced hemodynamic monitoring and management in critically ill patients. It is valuable in a wide range of clinical scenarios involving severe illness. This technique integrates real-time functional assessment of various components of the circulatory system with clinical and complementary data to enable personalized hemodynamic management. However, it must be performed and interpreted by a qualified and properly trained professional. In this review, we analyze the general principles of critical care echocardiography, its clinical applications,

¹Unidad de Paciente Crítico. Hospital Clínico Universidad de Chile. Santiago, Chile.

*Correspondencia: Diego Ugalde Castillo / diegougaldecastillo@gmail.com
Dr Carlos Lorca Tobar 999, Independencia. Santiago, Chile.

Financiamiento: El trabajo no recibió financiamiento.

Declaración de conflicto de intereses: Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Recibido: 12 de febrero de 2025.
Aceptado: 14 de mayo de 2025.

key elements to evaluate, recent advances, and relevant aspects of training and education.

Keywords: Critical Care; Echocardiography; Shock.

La monitorización hemodinámica es un aspecto esencial en el manejo en la Unidad de Cuidados Intensivos (UCI) y la ecocardiografía de cuidados críticos (ECC) se ha convertido en una herramienta central^{1,2} gracias a avances como equipos portables y entrenamiento estandarizado. La ECC abarca múltiples técnicas y se incluye dentro del concepto de "point of care ultrasound" (POCUS), que engloba ecografías al costado del paciente para decisiones inmediatas. En cuanto a resultados, la ecocardiografía se ha asociado a menor mortalidad en sepsis³, y mejorar diagnóstico en urgencias⁴.

La ECC obtiene información cualitativa y cuanti-

tativa, integrándose en el concepto de reanimación personalizada⁵ (Figura 1). Se basa en el uso de ultrasonido para obtener imágenes vía transtorácica o transesofágica usando transductores dedicados para obtener visiones en "ventanas" ecográficas y realizar observaciones cualitativas y mediciones. La ECC utiliza herramientas seleccionadas de la ecocardiografía tradicional ajustadas para pacientes graves, enfocada en detectar problemas y potenciales intervenciones, usando los modos bidimensionales (2D), movimiento (M), Doppler color, Doppler pulsado, continuo y tisular. Otras modalidades podrían tener rol a futuro como 3D o deformación ("strain")^{1,6}.

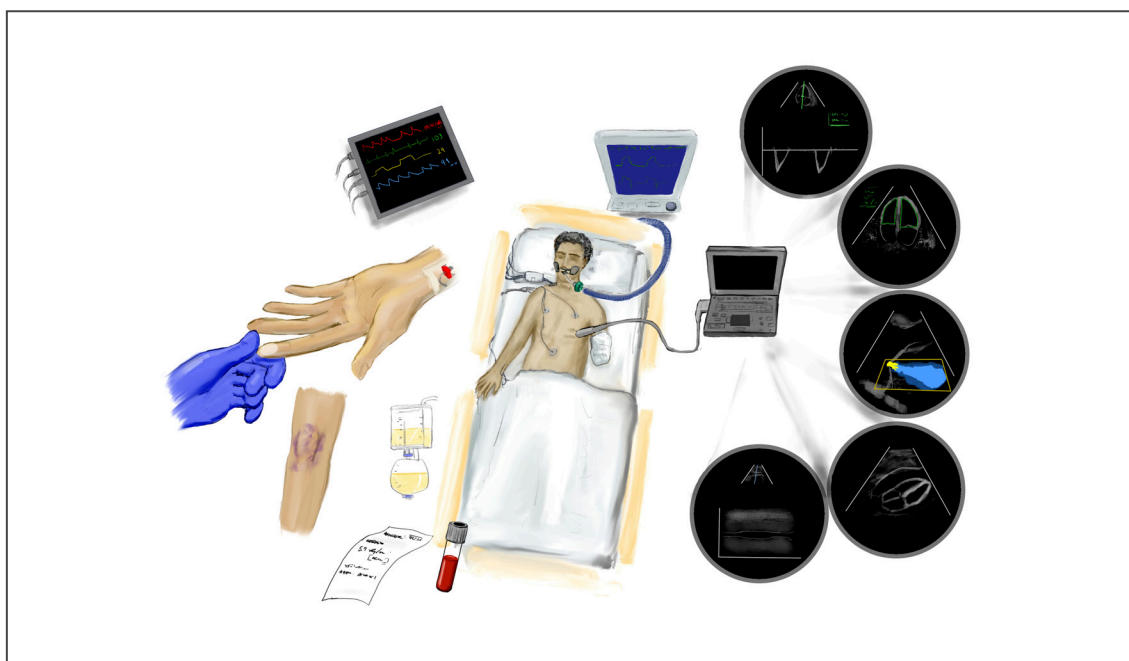


Figura 1: Monitorización hemodinámica integrada. Rol de la ecografía en la reanimación personalizada, integrada con datos clínicos, de laboratorio, ventilatorios y signos vitales.

Metodología

Revisión narrativa en la que se revisarán aspectos del uso de ECC y sus utilidades en contextos relevantes, elementos de evaluación de ventrículo izquierdo (VI), ventrículo derecho (VD), pericardio, válvulas y venas; nociones de pruebas dinámicas, novedades y generalidades de entrenamiento en ECC basada en bibliografía relevante que incluya estudios primarios, bibliografía secundaria y guías de sociedades internacionales según los temas a tratar. La estrategia de búsqueda en PubMed y TRICC se realizó por secciones temáticas, por ejemplo ((echocardiography[title] OR "cardiac ultrasound"[title]) AND (critically ill OR critical care) AND (diastolic function OR diastole)), para evaluación diastólica, y búsquedas secundarias según hallazgos o necesidad. Se incluyeron además referencias consideradas esenciales por los autores y finalmente durante la edición se limitó el número al máximo en el medio de publicación.

Utilidades y escenarios de la ecocardiografía crítica

La mayor ventaja de la ECC es su tiempo de respuesta y disponibilidad, por lo que se destaca en situaciones hemodinámicas agudas que requieren diagnóstico y decisión rápida (Tabla 1).

Shock

Entendiendo shock como un estado grave de falla circulatoria aguda con inadecuada utilización de oxígeno por los tejidos, la ECC es la primera línea para diagnosticar sus mecanismos dado su acceso a evaluar bomba cardíaca y vasos centrales².

Los 4 mecanismos esenciales son hipovolemia, falla de bomba, obstrucción y vasodilatación, que participan interrelacionados en proporciones diferentes, cuyo diagnóstico y tratamiento son evaluables con ECC⁶ además permite identificar causas específicas como taponamiento cardíaco o infarto al miocardio que requieren resolución etiológica urgente.

Tabla 1. Escenarios de utilidad para la ecocardiografía en cuidados críticos.

Escenarios	Utilidades centrales
Shock	Diagnóstico de mecanismos principales o participantes, ajuste de terapias, control de efectividad de intervenciones de forma seriada.
Paro cardiorrespiratorio	Diagnóstico de causas potenciales y optimización de maniobras de compresión torácica. Guía procedimientos en caso necesario.
Destete del ventilador	Riesgo de fracaso y medidas anticipatorias, evaluar causas en caso de fracaso, complementar con ecografía pulmonar y diafragmática.
Trauma	Evaluar taponamiento, derrame y disecciones; búsqueda de lesiones en otros territorios
Falla respiratoria	Identificar rol de patologías cardíacas como causa o contribuyentes, como valvulopatías o insuficiencia cardíaca, ampliar con ecografía pulmonar para derrame, condensaciones, por ejemplo.

Paro cardiorrespiratorio (PCR)

Durante PCR y cuidados posteriores, la ECC puede detectar causas de tratamiento específico como taponamiento cardíaco, isquemia, tromboembolismo pulmonar, neumotórax e hipovolemia extrema⁷. Puede usarse para optimizar maniobras en cuanto a calidad de masaje y posición de manos⁸ siempre con la consideración absoluta de no entorpecer maniobras ni prolongar revisiones de pulso⁹.

Destete de ventilación mecánica

La disfunción cardíaca y sobrecarga de fluidos pueden asociarse al fracaso del destete, existiendo asociación entre marcadores de función diastólica y fracaso del destete, además es factible usar el ecógrafo para detectar edema pulmonar, facilitando ajustes terapéuticos en un enfoque integrado conjunto incluyendo ecografía pulmonar y diafragmática¹⁰.

Trauma

La ECC puede detectar derrame pericárdico, taponamiento, rotura de cavidades o válvulas y guiar una eventual punción pericárdica. Por vía esofágica se agrega mejor rendimiento diagnóstico para lesiones de grandes vasos¹¹.

La ecocardiografía además permite el manejo del shock y combinar con ecografía de otros sistemas (tórax-abdomen-cerebro) según el nivel de entrenamiento del operador¹².

Disnea y falla respiratoria

La ECC combinada con ecografía pulmonar y venosa, buscando signos de tromboembolismo pulmonar, pérdida de tejido aireado y trombos, respectivamente, orienta a etiología y existen esquemas de buen rendimiento diagnóstico¹³. El ultrasonido pulmonar, a veces enseñado junto a ECC, aporta información en seguimiento o ajustes en falla respiratoria¹⁴.

Aspectos centrales a evaluar en la ECC

Para permitir sus utilidades, la ECC implica una evaluación sistemática de varios aspectos (Tabla 2), llevando a una interpretación integrada.

Evaluación de función sistólica izquierda

La evaluación de la función sistólica izquierda es parte fundamental de la ecocardiografía convencional¹⁵ y permite en pacientes críticos descifrar cuadros de shocks complejos y anticiparse a eventos de riesgo como cirugías mayores^{2,6}.

La contractilidad de VI puede evaluarse

Tabla 2. Aspectos centrales en la evaluación ecocardiográfica de cuidados críticos ordenados por estructura.

Estructura	Aspectos a evaluar
Ventrículo izquierdo	Función sistólica global, contractilidad segmentaria, marcadores diastólicos según tipo de ventilación en cada caso
Ventrículo derecho	Dilatación, función sistólica, septum paradójico
Válvulas	Signos de insuficiencias o estenosis valvulares, gradiente tricuspídeo
Pericardio	Presencia de derrame y signos de taponamiento.
Venas	Variación respiratoria, según tipo de ventilación en cada caso.

cualitativa y cuantitativamente, siendo los más habituales la fracción de eyección (FEVI), la integral velocidad tiempo (IVT) del tracto de salida del ventrículo izquierdo (TSVI) y otras en estudio.

La observación cualitativa por operador experto es rápida y tiene buena correlación con índices cuantitativos¹⁶. La FEVI es la proporción, del volumen telediastólico que es expulsado en sístole. Se mide en visiones apicales usando la técnica de suma de discos en 2 y 4 cámaras (Simpson), delineando endocardio usando herramientas incorporadas del ecógrafo¹⁵. Su valor normal es 54-74% en mujeres y 52-72% en hombres¹⁷ y puede cambiar dinámicamente según otras variables hemodinámicas, medio interno, fármacos y tono simpático. En shock séptico, recientemente se ha esclarecido una relación en "U", con un aumento relativo de mortalidad en pacientes con FEVI anormalmente baja o alta¹⁸.

El valor de IVT ("VTI" en inglés) del TSVI se obtiene midiendo el área bajo la curva de Doppler pulsado en la eyección del ventrículo izquierdo¹⁵, su valor es informativo en sí, siendo normal entre 17-23 cm, es una medida precisa altamente reproducible. Si bien permite calcular el gasto cardíaco¹⁹, este valor ya no se considera relevante para modificar la conducta en un manejo personalizado⁵.

Una variable en investigación, es la deformación longitudinal "strain", que detectaría alteraciones no evidentes por otras técnicas, que tiene asociación con mortalidad en sepsis, shock séptico y COVID-19²⁰.

En la evaluación de la contractilidad también se observa la motilidad segmentaria, central en patología isquémica, su alteración puede sugerir afección de territorios coronarios específicos, así también diagnósticos alternativos como miocardiopatía de estrés^{15,17}.

Evaluación de función diastólica

La evaluación diastólica en UCI difiere ligeramente de la cardiológica¹⁵, que en sus guías recientes se ha complejizado con una aproximación algorítmica basada en las variables a medir²¹. Además de una mayor variabilidad en lo hemodinámico,

los pacientes críticos tienen otras consideraciones como la presión positiva intratorácica²² por lo que existen resultados inconsistentes en cuanto a asociación pronóstica de la función diastólica²³ teniendo E/e' los mejores resultados²⁴. Nuevos índices están siendo explorados.

En ECC la evaluación diastólica está orientada a anticipar problemas y toma de decisiones, especialmente durante destete de ventilación mecánica. Durante la prueba de ventilación espontánea puede aumentar la presión de capilar pulmonar, entre 12 a 26 mmHg, asociada con cambios en E/A y E/e'²⁵ y la disfunción diastólica bajo definición tradicional, es un factor de riesgo de destete fallido²⁶. La terapia guiada por ecocardiografía que corrige aumentos de E y E/A en ha mostrado lograr extubaciones exitosas²⁷. Así, la ECC podría guiar medidas preventivas como ventilación no invasiva, depleción, o hipotensores, pero se requieren trabajos prospectivos.

Evaluación ventricular derecha

La evaluación de VD es particularmente relevante en pacientes críticos especialmente en ventilación mecánica y falla respiratoria, que pueden impactarlo negativamente impactando desenlaces clínicos. Pese a ello, aún no existe consenso en una definición de falla de VD, siendo actualmente un foco de desarrollo establecer una definición de uso práctico²⁸.

Al evaluar VD hay que considerar que su función es mantener una baja resistencia al retorno venoso sin congestión ni elevación de presión atrial derecha; trabajando con menores presiones en una circulación de baja resistencia, siendo susceptible de fallar ante postcarga excesiva²⁹. La hipertensión pulmonar y la disfunción del VD se han asociado a peor pronóstico en síndrome de distrés respiratorio agudo (SDRA), sepsis y shock séptico³⁰, siendo escenarios prioritarios para su evaluación dado impacto en desenlace³¹.

En SDRA se ha precisado la definición clave de cor pulmonale agudo con la relación de área diastólica de VD/VI sobre 0,6 (que objetiva dilatación) con presencia de septum paradójico³², hallazgos de ECC asociadas a mortalidad. Usando definiciones variables en la literatura, se describe

falla o disfunción de VD en alrededor de 21% de pacientes con SDRA, pero con un rango de 9,5 a 89,5%³³.

Para objetivar función sistólica de VD existen diversos parámetros³⁴ incluyendo la excursión anteroposterior del anillo tricuspídeo (TAPSE), la onda s' en la evaluación Doppler tisular derecha, el cambio fraccional del área, la fracción de eyección calculada o medida en ecografía tridimensional e incluso "strain", teniendo las evaluaciones más simples mayor respaldo y aplicabilidad, especialmente TAPSE, incluso asociado a pronóstico en hipertensión pulmonar, tromboembolismo pulmonar y SDRA³⁵.

Con la ECC se estima la presión sistólica de arteria pulmonar, sumando el gradiente transtricuspídeo en Doppler continuo, con la presión venosa central como equivalente de atrio derecho, en ambulatorio estimada con la observación de vena cava inferior^{15,17}, pero que, en pacientes críticos, para una precisión aceptable, requiere usar la presión venosa central medida con catéter³⁶.

Evaluación de pericardio

Diversas enfermedades y procedimientos en pacientes críticos pueden afectar el pericardio, la evaluación con ECC se orienta a diagnóstico de derrame y signos de taponamiento cardíaco, como causa de shock o paro cardíaco⁶ y apoyo procedural para el drenaje pericárdico. No existe otra modalidad con mejor tiempo de respuesta que la ECC.

El pericardio se observa en todas las ventanas, siendo posible cuantificar derrame, observar presencia de contenidos anormales como tumores o adherencias y el impacto hemodinámico que pueda producir. La ECC es relevante también en seguimiento con énfasis en detectar progresión a taponamiento^{15,37}.

Existen diversos signos de taponamiento, siendo fundamental el colapso diastólico de cavidades, de menor a mayor presión, iniciando en atrio derecho. La observación puede ser compleja en derrame de gran volumen con taquicardia y oscilación cardíaca y en nuestra experiencia, visualizar la grabación con velocidad reducida lo facilita³⁷.

Evaluación valvular

La ECC permite observar estructuralmente y funcionalmente las válvulas cardíacas, que pueden ser causa de falla hemodinámica y/o respiratoria, especialmente en alteraciones agudas como endocarditis o isquemia y que también pueden presentar anomalías subagudas o crónicas, que determinen complejidades en el manejo hemodinámico y ventilatorio, permitiendo la ECC diagnosticar y optimizar manejo¹.

La evaluación inicia con el aspecto estructural, grosor y movimientos de velos, luego observación con Doppler color, detectando insuficiencias o turbulencias sugerentes de estenosis estructurales o funcionales como la obstrucción dinámica del tracto de salida del VI⁶. Detectar alteraciones graves es parte de las habilidades centrales de un operador básico³⁸ con foco en diagnosticar causantes de conflictos hemodinámicos y patología de resolución urgente.

Evaluación venosa

La evaluación venosa en la ECC, se orienta a conocer el estado de la volemia considerando además el contexto de las presiones ventilatorias (positivas o negativas).

En vena cava inferior (VCI), su diámetro y variabilidad, se usan para estimación de presión venosa para cálculos en cardiología y para predicción de respuesta a fluidos^{6,15}.

La VCI se observa desde ventana subcostal, midiéndose la variación respiratoria de su diámetro, la que tendrá sentidos opuestos según tipo de ventilación, a presión negativa la VCI colapsa en inspiración mientras siendo un aceptable predictor³⁹ con punto de corte 39-50% y esta precisión puede ser mejorada con uso de maniobras como una inspiración solicitada al paciente y medir a una distancia adecuada del diafragma⁴⁰ mientras que a presión positiva se produce un incremento de tamaño y tiene menor capacidad diagnóstica con un valor de corte diferente, 10-16%⁴¹, su rendimiento en general es mediocre⁴² siendo superada por otros predictores de respuesta a fluidos⁴³. Respecto al diámetro, tiene un valor impreciso y no diagnóstico⁴⁴. Un error común en nuestro medio observado por los autores en

operadores no entrenados formalmente es uso de corte de presión negativa en pacientes ventilados, induciendo errores de interpretación significativos.

La evaluación de la vena cava superior (VCS) es un tema en progreso, en críticos, la VCS evaluada vía transesofágica en pacientes ventilados permite medir la variación con el ciclo respiratorio como predictor de respuesta a fluidos⁴⁵, y recientemente se ha descrito una ventana transtorácica con igual fin⁴⁶; con buenos resultados en pabellón⁴⁷ actualmente en estudio en UCI (NCT05211765).

En el espectro contrario, existen herramientas para evaluar congestión a nivel venoso. La evaluación conocida como VEXUS⁴⁸ utiliza flujos en 3 territorios para establecer patrones con valor predictivo para injuria renal, hasta el momento en subgrupos específicos de pacientes.

Pruebas dinámicas

La ECC combinada con maniobras aplicadas al paciente puede obtener información adicional, por ejemplo, con la elevación pasiva de las piernas el aumento de IVT sobre un 10% permite identificar respuesta a fluidos⁴²; de forma similar se ha usado una combinación pausa inspiratoria y espiratoria en el ventilador con buen rendimiento diagnóstico⁴⁹ al usar cambio en IVT.

La mayor precisión se ha observado con las pruebas de fluidos reducidas (llamadas habitualmente mini o micro desafíos), usando 100 ó 50 ml en rápida infusión con medición del incremento del IVT⁵⁰.

Novedades y escenarios particulares

La ECC es una técnica surgida del progreso tecnológico en la ecografía. En diversas áreas su avance continúa, por ejemplo, aplicando simulación computarizada para acelerar aprendizaje, el uso de imagen tridimensional en tiempo real y nuevas mediciones de función miocárdica basados en seguimiento de partículas⁵¹, la inteligencia artificial que permite acelerar medición de FEVI o reconocer patrones y se ha progresado en reducir el tamaño y costo de los equipos^{52,53}.

Otro escenario interesante es el embarazo, la ECC permite monitorizar sus cambios hemodinámicos⁵⁴ y ha demostrado ser efectiva en

pacientes críticas obstétricas con sepsis, SDRA y preeclampsia, pudiendo agregarse ultrasonografía pulmonar⁵⁵.

La pandemia de COVID-19 mostró el rol relevante de la ECC en situaciones de alta demanda. El SARS CoV-2 produce manifestaciones cardíacas como arritmias, miocarditis, insuficiencia cardíaca, entre otras y la ECC ha demostrado utilidad en la valoración inicial, monitorización y estratificación⁵⁶, la presión asistencial también reforzó ventajas como incorporar el uso de la ecografía en prono, que descrita hace pocos años^{57,58}, asimismo potenció la ecografía pulmonar y de múltiples sistemas⁵⁹.

Formación

Siendo un elemento central en la evaluación hemodinámica moderna, la ECC ya es incorporada en la formación de medicina intensiva actual, existiendo en el mundo programas a nivel nacional y estándares de sociedades^{1,6}, si bien se ha observado que existe variabilidad entre ellos y que aún puede existir un déficit de programas dedicados⁶⁰.

La ECC es una habilidad compleja, con componentes motores y cognitivos que deben ser entrenados. Sin embargo, goza de popularidad en la oferta de cursos teóricos que no cumplen recomendaciones.

Metodológicamente, habitualmente la formación combina teoría, prácticas en individuos sanos y aprendizaje directo supervisado con pacientes en números variables según país o normativa, siendo el aspecto común y central la práctica y realización repetida bajo supervisión directa⁶¹, lo que es demandante para estudiantes y centros formativos, por lo que se han probado estrategias para reducir tiempos, por ejemplo se ha observado que un "campamento de entrenamiento", de pocos días, permite lograr avances significativos para potenciar habilidades en ecocardiografía pediátrica⁶².

En cuanto a la curva de aprendizaje, un programa experimental en enfermeras de cuidados intensivos describe que algunas habilidades puntuales como medir IVT pueden adquirirse desde las 13 evaluaciones⁶³ y en residentes de medicina

interna 20 a 40 ecografías para alcanzar las herramientas básicas⁶⁴. En especialistas de neumología en formación se observa >85% de logro sobre 20 evaluaciones y 90% sobre 30 evaluaciones, siendo esta la meseta de adquisición de habilidades en novatos⁶⁵ encontrándose un valor similar en entrenamiento avanzado con ecocardiografía transesofágica, 31 evaluaciones a lo largo de 6 meses⁶⁶. Como referente internacional existe la recomendación de 30 ECC supervisadas de la sociedad europea, para operadores básicos⁶⁷. Ahora bien, el ritmo de progresión puede ser modificado; las tecnologías de simulación pueden acelerar la curva inicial, estabilizándose en los meses siguientes⁶⁸ facilitando la etapa motora y cursos acotados como complemento de un programa mayor pueden facilitar avances acortar requerimientos o realizar menor número de ecografías a lo descrito empeora los resultados⁶⁰.

La evaluación y certificación varían según región o programa¹; metodológicamente, se plantean esquemas por dominios semicuantitativos para estandarizar la apreciación de los tutores⁶⁹, este tipo de pautas se correlaciona adecuadamente con el nivel de experiencia de los operadores y con la capacidad de detectar factores del alumno como causal de varianza⁷⁰.

Por lo tanto, según los datos disponibles, para ser efectivo, un entrenamiento de ECC debe ser realizado con práctica supervisada con número alrededor de 30 y ser evaluado con pautas cuantitativas.

Conclusiones

En suma, la ECC es una técnica que incluye múltiples evaluaciones relevantes en los pacientes críticos, con un rol de utilidad para diagnóstico y manejo hemodinámico de forma integral y personalizada en diversos escenarios de importancia. Es susceptible aún de progreso tecnológico y continua investigación. Su implementación requiere equipamiento y operadores entrenados de forma práctica según lo recomendado.

Referencias

1. Vieillard-Baron A, Millington SJ, Sanfilippo F, Chew M, Diaz-Gomez J, McLean A, et al. A decade of progress in

critical care echocardiography: A narrative review. *Intensive Care Med.* 2019; 45(6): 770-788.

2. Cecconi M, De Backer D, Antonelli M, Beale R, Bakker J, Hofer C, et al. Consensus on circulatory shock and hemodynamic monitoring. Task force of the European Society of Intensive Care Medicine. *Intensive Care Med.* 2014; 40(12): 1795-1815.
3. Feng M, McSparron JJ, Kien DT, Stone DJ, Roberts DH, Schwartzstein RM, et al. Transthoracic echocardiography and mortality in sepsis: analysis of the MIMIC-III database. *Intensive Care Med.* 2018; 44(6): 884-892.
4. Becker TK, Tafoya CA, Osei-Ampofo M, Tafoya MJ, Kessler RA, Theyyanni N, et al. Cardiopulmonary ultrasound for critically ill adults improves diagnostic accuracy in a resource-limited setting: The AFRICA trial. *Trop Med Int Health.* 2017; 22(12): 1599-1608.
5. Saugel B, Vincent JL, Wagner JY. Personalized hemodynamic management: *Curr Opin Crit Care.* 2017; 23(4): 334-341.
6. McLean AS. Echocardiography in shock management. *Crit Care.* 2016; 20(1): 275.
7. Long B, Alerhand S, Malie K, Koyfman A. Echocardiography in cardiac arrest: An emergency medicine review. *Am J Emerg Med.* 2018; 36(3): 488-493.
8. Vammen L, Fjølner J, Hansen K, Granfeldt A. Optimizing hemodynamic function during cardiopulmonary resuscitation. *Curr Opin Crit Care.* 2021; 27(3): 216-222.
9. Moskowitz A, Berg KM. First do no harm: Echocardiography during cardiac arrest may increase pulse check duration. *Resuscitation.* 2017; 119: A2-A3.
10. Mayo P, Volpicelli G, Lerolle N, Schreiber A, Doelken P, Vieillard-Baron A. Ultrasonography evaluation during the weaning process: The heart, the diaphragm, the pleura and the lung. *Intensive Care Med.* 2016; 42(7): 1107-1117.
11. Chan D. Echocardiography in thoracic trauma. *Emerg Med Clin North Am.* 1998; 16(1): 191-207.
12. Whitson MR, Mayo PH. Ultrasonography in the emergency department. *Crit Care.* 2016 Dec; 20(1): 227.
13. Lichtenstein DA, Mezière GA. Relevance of Lung Ultrasound in the Diagnosis of Acute Respiratory Failure*: The BLUE Protocol. *Chest.* 2008; 134(1): 117-125.
14. Lichtenstein D, Goldstein I, Mourgeon E, Cluzel P, Grenier P, Rouby JJ. Comparative Diagnostic Performances of Auscultation, Chest Radiography and Lung Ultrasonography in Acute Respiratory Distress Syndrome. *Anesthesiology.* 2004; 100(1): 9-15.
15. Mitchell C, Rahko PS, Blauwet LA, Canaday B, Finstuen JA, Foster MC, 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.
16. Vieillard-Baron A, Charron C, Chergui K, Peyrouset O, Jardin F. Bedside echocardiographic evaluation of hemodynamics in sepsis: Is a qualitative evaluation sufficient? *Intensive Care Med.* 2006; 32(10): 1547-1552.
17. Lang RM, Badano LP, Mor-Avi V, Afialo J, Armstrong A, Ernande L, 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.
18. Chawla S, Sato R, Duggal A, Alwakeel M, Hasegawa D, Alayan D, et al. Correlation between tissue Doppler-derived left ventricular systolic velocity (S') and left ventricle ejection fraction in sepsis and septic shock: A retrospective cohort study. *J Intensive Care.* 2023; 11(1): 28.
 19. Mercado P, Maizel J, Beyls C, Titeca-Beauport D, Joris M, Kontar L, et al. Transthoracic echocardiography: An accurate and precise method for estimating cardiac output in the critically ill patient. *Crit Care.* 2017; 21(1): 136.
 20. Sanfilippo F, Corredor C, Fletcher N, Tritapepe L, Lorini FL, Arcadipane A, et al. Left ventricular systolic function evaluated by strain echocardiography and relationship with mortality in patients with severe sepsis or septic shock: A systematic review and meta-analysis. *Crit Care.* 2018; 22(1): 183.
 21. Nagueh SF, Smiseth OA, Appleton CP, Byrd BF, Dokainish H, Edvardsen T, et al. Recommendations for the Evaluation of Left Ventricular Diastolic Function by Echocardiography: An Update from the American Society of Echocardiography and the European Association of Cardiovascular Imaging. *J Am Soc Echocardiogr.* 2016; 29(4): 277-314.
 22. Vignon P. Ventricular diastolic abnormalities in the critically ill. *Curr Opin Crit Care.* 2013; 19(3): 242-249.
 23. Garry D, Newton J, Colebourn C. Tissue Doppler indices of diastolic function in critically ill patients and association with mortality – a systematic review. *J Intensive Care Soc.* 2016; 17(1): 51-62.
 24. Greenstein YY, Mayo PH. Evaluation of Left Ventricular Diastolic Function by the Intensivist. *Chest.* 2018; 153(3): 723-732.
 25. Lamia B, Maizel J, Ochagavia A, Chemla D, Osman D, Richard C, et al. Echocardiographic diagnosis of pulmonary artery occlusion pressure elevation during weaning from mechanical ventilation*. *Crit Care Med.* 2009; 37(5): 1696-16701.
 26. Konomi I, Tasoulis A, Kaltsi I, Karatzanos E, Vasileiadis I, Temperikidis P, et al. Left Ventricular Diastolic Dysfunction- An Independent Risk Factor for Weaning Failure from Mechanical Ventilation. *Anaesth Intensive Care.* 2016; 44(4): 466-473.
 27. Coudelin M, Champy P, Amiel JB, Evrard B, Fedou AL, Daix T, et al. Left ventricular overloading identified by critical care echocardiography is key in weaning-induced pulmonary edema. *Intensive Care Med.* 2020; 46(7): 1371-1381.
 28. Vieillard-Baron A, Naeije R, Haddad F, Bogaard HJ, Bull TM, Fletcher N, et al. Diagnostic workup, etiologies and management of acute right ventricle failure: A state-of-the-art paper. *Intensive Care Med.* 2018; 44(6): 774-790.
 29. Pinsky MR. The right ventricle: Interaction with the pulmonary circulation. *Crit Care.* 2016; 20(1): 266.
 30. Sibbald WJ, Driedger AA. Right ventricular function in acute disease states: Pathophysiologic considerations. *Crit Care Med.* 1983; 11(5): 339-345.
 31. Vallabhajosyula S, Shankar A, Vojjini R, Cheungpasitporn W, Sundaragiri PR, DuBrock HM, et al. Impact of Right Ventricular Dysfunction on Short-term and Long-term Mortality in Sepsis. *Chest.* 2021; 159(6): 2254-2263.
 32. Vieillard-Baron A, Prin S, Chergui K, Dubourg O, Jardin F. Echo-Doppler Demonstration of Acute Cor Pulmonale at the Bedside in the Medical Intensive Care Unit. *Am J Respir Crit Care Med.* 2002; 166(10): 1310-1319.
 33. Sato R, Dugar S, Cheungpasitporn W, Schleicher M, Collier P, Vallabhajosyula S, et al. The impact of right ventricular injury on the mortality in patients with acute respiratory distress syndrome: A systematic review and meta-analysis. *Crit Care.* 2021; 25(1): 172.
 34. Rudski LG, Lai WW, Afilalo J, Hua L, Handschumacher MD, Chandrasekaran K, et al. Guidelines for the Echocardiographic Assessment of the Right Heart in Adults: A Report from the American Society of Echocardiography. *J Am Soc Echocardiogr.* 2010; 23(7): 685-713.
 35. Prada G, Vieillard-Baron A, Martin AK, Hernandez A, Mookadam F, Ramakrishna H, et al. Echocardiographic Applications of M-Mode Ultrasonography in Anesthesiology and Critical Care. *J Cardiothorac Vasc Anesth.* 2019; 33(6): 1559-1583.
 36. Mercado P, Maizel J, Beyls C, Kontar L, Orde S, Huang S, 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.
 37. McCanny P, Coleeavy F. Echocardiographic approach to cardiac tamponade in critically ill patients. *J Crit Care.* 2017; 39: 271-277.
 38. Wong A, Galarza L, Forni L, De Backer D, Slama M, Cholley B, et al. Recommendations for core critical care ultrasound competencies as a part of specialist training in multidisciplinary intensive care: a framework proposed by the European Society of Intensive Care Medicine (ESICM). *Crit Care.* 2020; 24(1): 393.
 39. Bortolotti P, Colling D, Colas V, Voisin B, Dewavrin F, Poissy J, et al. Respiratory changes of the inferior vena cava diameter predict fluid responsiveness in spontaneously breathing patients with cardiac arrhythmias. *Ann Intensive Care.* 2018; 8(1): 79.
 40. Caplan M, Durand A, Bortolotti P, Colling D, Goutay J, Duburcq T, et al. Measurement site of inferior vena cava diameter affects the accuracy with which fluid responsiveness can be predicted in spontaneously breathing patients: A post hoc analysis of two prospective cohorts. *Ann Intensive Care.* 2020; 10(1): 168.
 41. Huang H, Shen Q, Liu Y, Xu H, Fang Y. Value of variation index of inferior vena cava diameter in predicting fluid responsiveness in patients with circulatory shock receiving mechanical ventilation: A systematic review and meta-analysis. *Crit Care.* 2018; 22(1): 204.
 42. Vignon P, Repessé X, Bégot E, Léger J, Jacob C, Bouferrache K, et al. Comparison of Echocardiographic Indices Used to Predict Fluid Responsiveness in Ventilated Patients. *Am J Respir Crit Care Med.* 2017; 195(8): 1022-1032.
 43. Chaves RCDF, Barbas CSV, Queiroz VNF, Serpa Neto A, Deliberato RO, Pereira AJ, et al. Assessment of fluid responsiveness using pulse pressure variation, stroke volume variation, plethysmographic variability index, central venous

- pressure, and inferior vena cava variation in patients undergoing mechanical ventilation: A systematic review and meta-analysis. *Crit Care*. 2024; 28(1): 289.
44. Vieillard-Baron A, Evrard B, Repessé X, Maizel J, Jacob C, Goudelin M, et al. Limited value of end-expiratory inferior vena cava diameter to predict fluid responsiveness impact of intra-abdominal pressure. *Intensive Care Med*. 2018; 44(2): 197-203.
 45. Vieillard-Baron A, Prin S, Chergui K, Dubourg O, Jardin F. Hemodynamic Instability in Sepsis: Bedside Assessment by Doppler Echocardiography. *Am J Respir Crit Care Med*. 2003; 168(11): 1270-1276.
 46. Ugalde D, Haruel PA, Godement M, Prigent A, Vieillard-Baron A. Transthoracic echocardiography to evaluate the superior vena cava in critically ill patients: Window description and pilot study. *Intensive Care Med*. 2019; 45(7): 1052-1054.
 47. Ma Q, Ji J, Shi X, Lu Z, Xu L, Hao J, et al. Comparison of superior and inferior vena cava diameter variation measured with transthoracic echocardiography to predict fluid responsiveness in mechanically ventilated patients after abdominal surgery. *BMC Anesthesiol*. 2022; 22(1): 150.
 48. Beaubien-Souligny W, Rola P, Haycock K, Bouchard J, Lamarche Y, Spiegel R, et al. Quantifying systemic congestion with Point-Of-Care ultrasound: Development of the venous excess ultrasound grading system. *Ultrasound J*. 2020; 12(1): 16.
 49. Jozwiak M, Depret F, Teboul JL, Alphonsine JE, Lai C, Richard C, et al. Predicting Fluid Responsiveness in Critically Ill Patients by Using Combined End-Expiratory and End-Inspiratory Occlusions With Echocardiography: *Crit Care Med*. 2017; 45(11): e1131-e1138.
 50. Messina A, Dell'Anna A, Baggiani M, Torrini F, Maresca GM, Bennett V, et al. Functional hemodynamic tests: a systematic review and a metanalysis on the reliability of the end-expiratory occlusion test and of the mini-fluid challenge in predicting fluid responsiveness. *Crit Care*. 2019; 23(1): 264.
 51. Vignon P. What is new in critical care echocardiography? *Crit Care*. 2018; 22(1): 40, s13054-018-1970-8.
 52. Schneider M, Bartko P, Geller W, Dannenberg V, König A, Binder C, et al. A machine learning algorithm supports ultrasound-naïve novices in the acquisition of diagnostic echocardiography loops and provides accurate estimation of LVEF. *Int J Cardiovasc Imaging*. 2021; 37(2): 577-586.
 53. Kim YH. Artificial intelligence in medical ultrasonography: Driving on an unpaved road. *Ultrasonography*. 2021; 40(3): 313-317.
 54. Afari HA, Davis EF, Sarma AA. Echocardiography for the Pregnant Heart. *Curr Treat Options Cardiovasc Med*. 2021; 23(8): 55.
 55. Hemodynamic Monitoring of the Critically Ill Obstetric Patient | Article | GLOWM [Internet]. The Global Library of Women's Medicine. [cited 2023 Jun 26]. Available from: <http://www.glowm.com/article/heading/vol-9--principles-and-practice-of-obstetric-high-dependency-and-critical-care-hemodynamic-monitoring-of-the-critically-ill-obstetric-patient/id/414233>
 56. Yau O, Gin K, Luong C, Jue J, Abolmaesumi P, Tsang M, et al. Point-of-care ultrasound in the COVID-19 era: A scoping review. *Echocardiography*. 2021; 38(2): 329-342.
 57. Ugalde D, Medel JN, Romero C, Cornejo R. Transthoracic cardiac ultrasound in prone position: A technique variation description. *Intensive Care Med*. 2018; 44(6): 986-987.
 58. Giustiniano E, Fazzari F, Bragato RM, Curzi M, Cecconi M. Trans-thoracic Echocardiography in Prone Positioning COVID-19 Patients: A Small Case Series. *SN Compr Clin Med*. 2020; 2(11): 2381-2386.
 59. Hussain A, Via G, Melniker L, Goffi A, Tavazzi G, Neri L, et al. Multi-organ point-of-care ultrasound for COVID-19 (PoCUS4COVID): International expert consensus. *Crit Care*. 2020; 24(1): 702.
 60. Gibson LE, White-Dzuro GA, Lindsay PJ, Berg SM, Bittner EA, Chang MG. Ensuring competency in focused cardiac ultrasound: A systematic review of training programs. *J Intensive Care*. 2020; 8(1): 93.
 61. Ruden EA, Way DP, Nagel RW, Cheek F, Auseon AJ. Best practices in teaching echocardiography to cardiology fellows: A review of the evidence. *Echocardiography*. 2016; 33(11): 1634-1641.
 62. Maskatia SA, Altman CA, Morris SA, Cabrera AG. The Echocardiography "Boot Camp": A Novel Approach in Pediatric Cardiovascular Imaging Education. *J Am Soc Echocardiogr*. 2013; 26(10): 1187-1192.
 63. Tulleken AM, Gelissen H, Lust E, Smits T, van Galen T, Cirbes ARJ, et al. UltraNurse: Teaching point-of-care ultrasound to intensive care nurses. *Intensive Care Med*. 2019; 45(5): 727-729.
 64. Hellmann DB, Whiting-O'Keefe Q, Shapiro EP, Martin LD, Martire C, Ziegelstein RC. The rate at which residents learn to use hand-held echocardiography at the bedside. *Am J Med*. 2005; 118(9): 1010-1018.
 65. See KC, Ong V, Ng J, Tan RA, Phua J. Basic Critical Care Echocardiography by Pulmonary Fellows: Learning Trajectory and Prognostic Impact Using a Minimally Resourced Training Model*. *Crit Care Med*. 2014; 42(10): 2169-2177.
 66. Charron C, Vignon P, Prat G, Tonnelier A, Aegerter P, Boles JM, et al. Number of supervised studies required to reach competence in advanced critical care transesophageal echocardiography. *Intensive Care Med*. 2013; 39(6): 1019-1024.
 67. Expert Round Table on Ultrasound in ICU. International expert statement on training standards for critical care ultrasonography. *Intensive Care Med*. 2011; 37(7): 1077-1083.
 68. EchoSimu Group, Vignon P, Pegot B, Dalmay F, Jean-Michel V, Bocher S, et al. Acceleration of the learning curve for mastering basic critical care echocardiography using computerized simulation. *Intensive Care Med*. 2018; 44(7): 1097-1105.
 69. Charron C, Prat G, Caille V, Belliard G, Lefèvre M, Aegerter P, et al. Validation of a skills assessment scoring system for transesophageal echocardiographic monitoring of hemodynamics. *Intensive Care Med*. 2007; 33(10): 1712-1718.
 70. Guldbrand Nielsen D, Jensen SL, O'Neill L. Clinical assessment of transthoracic echocardiography skills: A generalizability study. *BMC Med Educ*. 2015; 15(1): 9.