

Ecografía en el paciente hemodinámicamente inestable

I. Oulego Erroz

Servicio de Pediatría. Complejo Asistencial Universitario de León.

Nota: El contenido de esta revisión solo es aplicable a los pacientes con fisiología biventricular y ventrículo izquierdo sistémico. No existen estudios sobre la valoración hemodinámica por el intensivista en niños con cardiopatías complejas. Las aplicaciones basadas en las interacciones cardiorrespiratorias y la predicción de respuesta a líquidos probablemente no son aplicables en pacientes con shunts, aunque no existen estudios que lo confirmen o desmientan.

INTRODUCCIÓN

La ecografía dirigida a pie de cama realizada por el intensivista es una técnica de uso creciente en el paciente pediátrico crítico y se considera una parte integral del currículum formativo en cuidados intensivos^(1,2). Una de las principales utilidades de la ecografía es la valoración de la situación hemodinámica. En este caso podemos distinguir dos tipos de aplicaciones: el uso de aquellas aplicaciones de la ecografía no cardíaca que tienen utilidad en la valoración hemodinámica (ej. E-FAST en paciente traumatizado) y la ecocardiografía. Dentro de esta segunda aplicación podemos distinguir su uso como herramienta de diagnóstico rápido en el paciente en shock, lo que se conoce como “*Focused Cardiac Ultrasound* (FCUS)” que utiliza un número limitado de ventanas ecocardiográficas y exige un nivel básico de entrenamiento. Dentro de la ecocardiografía en el paciente crítico también existen una serie de aplicaciones avanzadas en las que la técnica se utiliza como una herramienta de monitorización hemodinámica que permite el cálculo de parámetros como el gasto cardíaco o la predicción de la respuesta a líquidos y que exige un mayor dominio de la técnica. En esta revisión nos vamos a centrar en la ecocardiografía aunque se mencionarán brevemente aplicaciones de la ecografía no cardíaca. Salvo que se indique lo contrario nos referiremos en todo momento a la utilización de la ecocardiografía transtorácica (ETT)

Uso de la ecocardiografía en Cuidados Intensivos

El papel de la ecocardiografía como herramienta de diagnóstico y monitorización hemodinámica por parte del intensivista está claramente establecido en el adulto crítico donde ha demostrado ser capaz de establecer la fisiopatología del shock y su potencial para modificar la pauta de tratamiento respecto al manejo convencional. En dos estudios recientes la incorporación de la ecocardiografía en pacientes con shock séptico modificó el tratamiento (disminución de la prescripción de líquidos y aumento del uso de inotrópicos) respecto a la terapia convencional. En el paciente pediátrico las principales ventajas de la ecocardiografía son su no invasividad, portabilidad, su carácter dinámico y la rapidez de obtención de los resultados. Pero por encima de todo, la versatilidad de la ecografía, no tiene comparación con ninguna otra técnica en la UCIP. El uso de la ETT en el paciente pediátrico tiene la ventaja adicional de que suele ser más fácil obtener imágenes de calidad. Los estudios muestran que los pediatras pueden adquirir en poco tiempo la competencia

necesaria para obtener imágenes útiles en la valoración hemodinámica^(5,6). Aunque la experiencia publicada en niños es aún escasa, algunos estudios han demostrado que su uso se traduce en un cambio del diagnóstico o de la terapia del shock en un alto porcentaje de pacientes⁽⁷⁾.

ECOCARDIOGRAFÍA DIRIGIDA EN EL PACIENTE CRÍTICO (FCUS)

Concepto y definición

La ecocardiografía dirigida en el paciente crítico o “*Focused Cardiac Ultrasound*” (FCUS) difiere de la ecocardiografía convencional realizada por el cardiólogo o por el intensivista con un nivel avanzado de ecocardiografía. En la FCUS se buscan diagnósticos rápidos y sencillos que nos orienten sobre el mecanismo más probable del shock mediante una valoración somera y cualitativa del corazón utilizando unas pocas ventanas ecocardiográficas. En el paciente crítico la ecocardiografía se realiza en condiciones adversas en relación a la obtención de imágenes de calidad. No obstante, la FCUS tiene el objetivo de obtener información útil para el manejo del paciente y no un diagnóstico anatómico preciso o la valoración funcional exhaustiva. Distintas sociedades científicas han publicado guías clínicas sobre las indicaciones, metodología y requerimientos formativos para la aplicación de la FCUS⁽⁸⁾. La definición conceptual de la FCUS según International Liaison Committee of Focused Cardiac Ultrasound (ILC-FoCUS) puede resumirse como: *dirigida, orientada a un problema, con un objetivo limitado, simple, rápida, repetible, cualitativa o semicuantitativa, realizada en punto de cuidado por el clínico.*

Objetivos de valoración en la FCUS

La FCUS debe interpretarse siempre en el contexto clínico del paciente y junto con las demás herramientas de monitorización. En la FCUS se centra en la valoración rápida y cualitativa del mecanismo de shock circulatorio mediante la el examen de los siguientes aspectos:

- Función del ventrículo izquierdo
- Volemia
- Función del ventrículo derecho
- Derrame pericárdico
- Otros: detección de insuficiencia o valvulopatía significativa, fallo “diastólico” con o sin obstrucción del tracto de salida, masas, vegetaciones o trombos intracardiacos

Metodología de aplicación

En la Figura 1 se resumen los aspectos a valorar y las ventanas sugeridas en la FCUS. En cuanto a los medios técnicos tanto los equipos de ecocardiografía (portátiles o no) como los ecógrafos portátiles utilizados habitualmente en las UCIs son válidos para la realización de la FCUS en el paciente crítico. Para la realización de un examen de FCUS se recomienda el uso de una sonda cardíaca “phased array”. La frecuencia de la sonda debe oscilar entre 2-5 MHz en los niños mayores y entre 5-8 MHz en los niños pequeños. Deben registrarse los estudios para su posterior revisión lo cual debe realizarse de forma sistemática al igual que la adquisición de la imágenes.

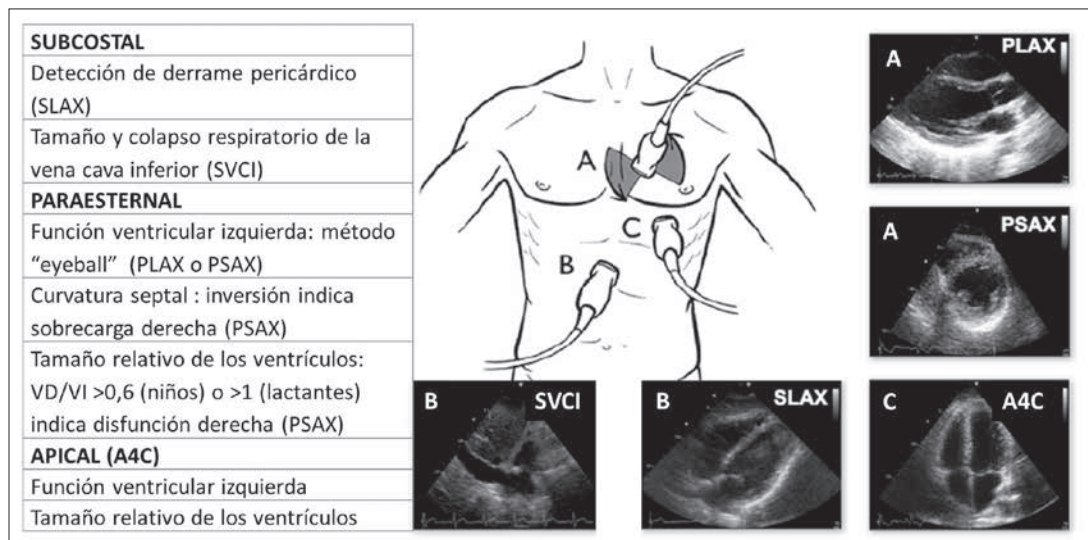


Figura 1. Ventanas y hallazgos en la FCUS. A) ventana paraesternal. PLAX: paraesternal eje largo, PSAX, paraesternal eje corto. B) ventana subcostal; SVCI, subcostal vena cava inferior; SLAX, subcostal eje largo (también llamado subcostal 4 cámaras). C) ventana apical; A4C, apical 4 cámaras.

Patrones de shock identificables mediante FCUS

Existen cuatro patrones de shock circulatorio (shock hipovolémico, shock distributivo, shock cardiogénico y shock obstructivo). Clínicamente puede ser difícil diferenciar cuál es el patrón predominante en un paciente concreto. La FCUS nos permite identificar de forma sencilla algunas de las características de cada uno de estos tipos de shock y guiar el tratamiento inicial.

Disfunción ventricular aguda (shock cardiogénico)

Cualquier plano es útil para la valoración de la función ventricular izquierda siendo A4C y PLAX los más utilizados. Podemos estimar de forma cualitativa la función ventricular mediante el método "eyeball". Consiste en imaginar un punto fijo en medio de la cavidad ventricular y observar el grado de acercamiento del septo interventricular y la pared posterior hacia ese punto. Con entrenamiento guarda una buena relación con la medición de la fracción de eyección y es más reproducible que esta en el paciente crítico⁽⁹⁾. En la disfunción aguda de VI lo más habitual será encontrar una cavidad ventricular dilatada con una hipoquinesia global lo cual es suficiente en el paciente en shock para iniciar soporte inotrópico. Otro signo útil es observar el movimiento de la valva mitral anterior hacia el septo interventricular. En caso de disfunción ventricular la valva mitral se mantiene alejada del septo. Se asocia frecuentemente a la aparición de un jet de insuficiencia mitral central. Causas posibles de este patrón son la miocarditis, la isquemia miocárdica o la depresión miocárdica en el shock séptico. Es importante recalcar que en la FCUS no se realiza una medición cuantitativa de la función ventricular. Esta debe clasificarse simplemente en normal/supranormal, ligeramente deprimida o claramente deprimida. Una pequeña disminución de la función ventricular no se considera significativa.

Hipovolemia franca (shock hipovolémico o distributivo)

Se visualiza en los planos de 4 cámaras (subcostal o apical) un VD "vacío" y un VI hiperdinámico con colapso sistólico de la cavidad ventricular. En PSAX se puede observar el contacto de los músculos papilares entre sí durante la sístole ("kissing papillary muscles"). Otro indicador de hipovolemia es el contacto de la valva mitral anterior con el septo en un PLAX. Además en SCVI se observará una vena cava pequeña y con colapso inspiratorio casi completo (respiración espontánea). Estos hallazgos en un paciente con inestabilidad hemodinámica indican la necesidad de iniciar o continuar la administración de volumen.

Disfunción del ventrículo derecho "con tensión" (shock obstructivo)

Aquellas situaciones en las que se produzca un aumento brusco de la postcarga del VD van a ocasionar su disfunción y shock. Los hallazgos en este caso son la dilatación del VD con un VI pequeño e hiperdinámico por falta de precarga. En A4C una relación VD/VI > 0,6 es indicativa de dilata-

ción del VD en el niño mayor y una relación > 1 lo sugiere en el lactante y neonato. Además es muy útil la valoración de la curvatura del septo interventricular en PSAX observándose inversión hacia el ventrículo izquierdo en sístole cuando la presión del VD es suprasistémica. En este caso la VCI se encontrará dilatada por aumento de la presión en aurícula derecha (AD). En los niños pequeños es frecuente observar un shunt derecha izquierda en el foramen oval en este contexto. Este patrón se observa en el TEP masivo, en la hipertensión pulmonar o en el neumotórax a tensión. También pueden observarse signos de fallo derecho en el paciente con fallo respiratorio agudo sometido a ventilación mecánica ("cor pulmonale").

Taponamiento cardiaco (shock obstructivo)

Se valora mejor en el SLAX. Si el derrame es significativo se visualizara un área hipocóica rodeando el VD y la AD. El signo más sensible de taponamiento es el colapso telediastólico de la pared de la AD mientras que el signo más específico es el colapso de la pared libre del VD inicio de la diástole. En caso de derrame masivo se observará líquido rodeando todo el corazón, que aparecerá bamboleándose dentro del saco pericárdico "swinging heart". El concepto de taponamiento es clínico y no ecocardiográfico. La repercusión clínica del derrame dependerá del estado de la función ventricular previo y de la rapidez con la que se instaura el derrame. Las vistas subcostal y apical pueden utilizarse para realizar una pericardiocentesis urgente guiada por ecografía.

Evaluación del paciente con compromiso hemodinámico agudo mediante ecografía: una visión ampliada

En el paciente pediátrico crítico con hipotensión o shock indiferenciado de causa no traumática la FCUS suele ser suficiente para hacer una aproximación inicial a la causa del shock. La valoración ecocardiográfica se ha integrado en la valoración ecográfica del paciente crítico mediante distintos protocolos. Los protocolos se han diseñado para ser aplicados en situaciones clínicas como la parada cardiorrespiratorio, el shock, la administración de volumen en el paciente crítico, el fallo respiratorio agudo. Muchos protocolos integran los conocimientos de varias aplicaciones de la ecografía en cuidados intensivos (cardiaca, pulmonar, abdominal, vascular, etc.). El protocolo RUSH (*Rapid Ultrasound in Shock*) integra distintas aplicaciones de la ecografía en la valoración de paciente en shock y es útil tanto en el paciente con patología médica como en el paciente traumatizado⁽¹⁰⁾. En la figura 2 se muestra un resumen de los hallazgos con RUSH en los distintos tipos de shock. En la figura 3 se muestra una sistemática para la integración de las aplicaciones diagnósticas (FCUS, RUSH) y las aplicaciones de la ecocardiografía avanzada en la monitorización hemodinámica (gasto cardíaco, respuesta a líquidos...) del paciente con shock. A lo largo del texto se detallan los aspectos concretos que figuran en el esquema. Este esquema es solo una propuesta de tantas

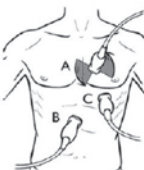
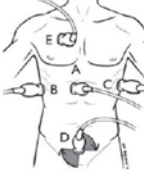

RUSH	Shock hipovolémico	Shock cardiogénico	Shock obstructivo	Shock distributivo
Bomba 	Corazón hipercontráctil (colapsos sistólico VI) Ventriculo derecho pequeño	Corazón dilatado Hipocontráctil	Corazón hipercontráctil Derrame pericárdico Taponamiento Dilatación de VD ("con tensión") Trombos intracardiacos	Corazón hipercontráctil (shock caliente) Corazón hipocontráctil (shock frío)
Tanque 	VCI pequeña, colapso >50% Vena yugular pequeña Líquido peritoneal (FAST) Derrame pleural	VCI dilatada, no colapsable Edema pulmonar (líneas B) Ascitis Derrame pleural (bilateral, anecoico)	VCI dilatada No colapsable Neumotórax (ausencia de deslizamiento, no líneas B, punto pulmonar)	VCI colapsada, pequeña Neumonía/derrame (causa de la sepsis) Líquido peritoneal (causa de la sepsis)
Circuito 	Aneurisma aorta abdominal Disección aórtica	Normal	Trombosis venosa profunda (femoral no compresible, Poplítea no compresible)	Normal

Figura 2. Hallazgos posibles en las distintas causas de shock según el protocolo RUSH. (Adaptado de Perera et al.⁽¹⁰⁾).

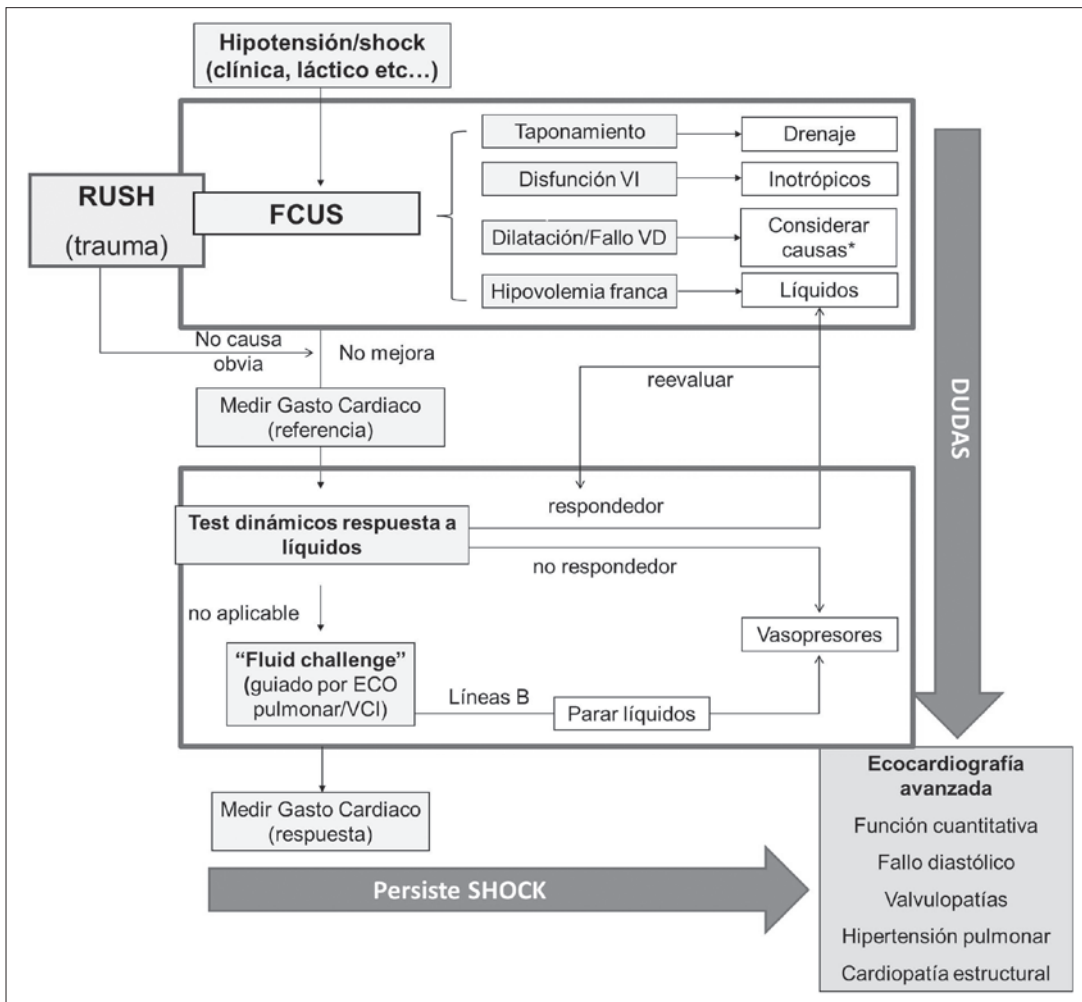


Figura 3. Integración de la FCUS y la ecocardiografía avanzada en el paciente crítico. RUSH: *Rapid Ultrasound in Shock*; FCUS: *Focused Cardiac Ultrasound*. *Causas posibles: hipertensión pulmonar, tromboembolismo pulmonar, cor pulmonale agudo, neumotórax (trauma, ventilación mecánica).

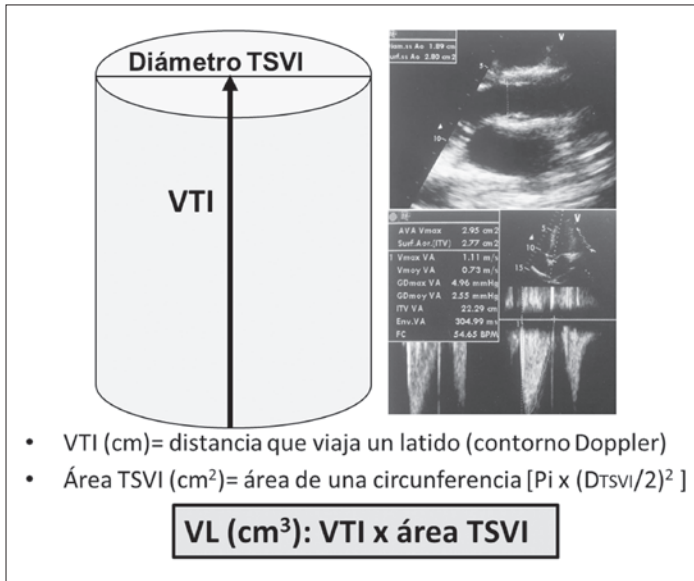


Figura 4. Cálculo del volumen latido por ecocardiografía-Doppler. TSVI: tracto de salida del ventrículo izquierdo. VTI: integral de la velocidad-tiempo. Se obtiene trazando el contorno de la onda Doppler obtenida en el TSVI a nivel de la válvula aórtica.

posibles y no ha sido evaluado en la práctica clínica por lo que solo tiene una intención didáctica.

APLICACIONES AVANZADAS DE LA ECOCARDIOGRAFÍA EN LA MONITORIZACIÓN HEMODINÁMICA DEL PACIENTE CRÍTICO

Estimación del volumen latido y gasto cardiaco por ecocardiografía

La ecocardiografía permite cuantificar el volumen latido (VL) y por tanto el gasto cardiaco a pie de cama. Existen dos métodos para la valoración del volumen latido por ecocardiografía. El VL puede calcularse como la diferencia entre el volumen diastólico ventricular y el volumen sistólico por planimetría 2D. Se considera el método más exacto. Sin embargo exige una buena delimitación de todo el endocardio ventricular lo cual es difícil en el paciente crítico. Además solo es aplicable en el ventrículo izquierdo. Un segundo método es el cálculo mediante Doppler del tracto de salida ventricular. En este método se asumen que el tracto de salida tiene una forma cilíndrica. La estimación del volumen de este cilindro latido a latido equivale al volumen latido (VL) por lo que es necesario calcular el área de la base (TSVI) y la altura (“stroke distance” o VTI) (Fig. 4). Este método ha demostrado tener una alta correlación con el VL medido mediante termodilución. Además puede aplicarse tanto en el VD como en el VI. Si existen shunt intracardiacos la medición no es aplicable y se deben buscar otros métodos.

Evaluación de la volemia y capacidad de respuesta a líquidos

En muchas situaciones como la hipotensión arterial, la oliguria o mala perfusión se puede sospechar un componente de hipovolemia. El clínico puede optar por dos estrategias terapéuticas. Puede decidir administrar líquidos en base a los datos clínicos o a los índices hemodinámicos estáticos (PVC, el volumen ventricular, PCP...) En esta estrategia, denominada en la literatura “fluid challenge”, se observa la respuesta a posteriori. Se considera al paciente respondedor si el VL o el gasto cardiaco aumenta > 10-15% tras la carga de líquidos según los estudios. Puede evaluarse el VL por ecocardiografía antes y después de la carga de líquidos para comprobar si ha habido respuesta. Evidentemente si la decisión no es correcta se expone al paciente al riesgo de sobrecarga hídrica y sus consecuencias adversas. Por el contrario el clínico puede intentar predecir a priori la capacidad de respuesta a los líquidos del paciente mediante el análisis de una serie de indicadores dinámicos. Esto se conoce como “fluid responsiveness”. Para que el paciente tenga conservada la respuesta a líquidos debe estar en la fase ascendente de la relación de

Frank-Starling (precarga-dependiente). Estudios en adultos han mostrado que solo el 50% de los pacientes críticos en los que se administra volumen responden realmente con un aumento del VL. Los indicadores estáticos aunque se utilizan frecuentemente no han demostrado un buen rendimiento para detectar a los pacientes con precarga-dependencia en distintos estudios y meta-análisis salvo cuando los valores están en el extremo inferior (ej. PVC < 4). En los últimos años se han desarrollado estrategias para la predicción de la respuesta a líquidos basados en índices dinámicos que estiman los cambios en el VL en condiciones variables de precarga (ventilación mecánica, elevación de piernas etc...) La ecocardiografía es útil no solo para establecer el diagnóstico de hipovolemia en ciertos pacientes sino que también permite el cálculo de algunos indicadores dinámicos útiles cuando el diagnóstico de hipovolemia no está claro. A continuación vamos a repasar algunos de estos índices dinámicos ecocardiográficos.

Tamaño de la vena cava y colapso de la vena cava inferior en respiración espontánea

La valoración de la colapsabilidad de la vena cava inferior puede dar una idea de la presión de llenado del ventrículo derecho. No se puede considerar estrictamente un índice dinámico. Si el colapso es > 40-50% y la vena cava no está distendida es probable que el paciente pueda responder favorablemente a la administración de líquidos. Sin embargo cuando el colapso es menor no se puede descartar que el paciente responda a la carga con líquidos. En este caso puede estar indicado una prueba de administración de líquidos (“fluid challenge”) que se puede complementar con la medición antes-después del VL.

Variación del diámetro de la vena cava en ventilación mecánica:

La variación en la distensibilidad de la vena cava inferior ($\Delta dVCI$) con ETT o la colapsabilidad de la vena cava superior ($\Delta cVCS$) con ETE son altamente sensibles y específicas para predecir la respuesta a líquidos. En un paciente en ventilación mecánica sin esfuerzo respiratorio la VCI se dilata durante la inspiración y se colapsa durante la espiración. El ($\Delta dVCI$) se puede calcular como $(D_{max}-D_{min})/D_{medio} \times 100$ o como $(D_{m\acute{a}x}-D_{min})/D_{min} \times 100$. Un índice > 12% (sensibilidad del 93% y una especificidad del 92%) en el primer caso o > 18% (sensibilidad 90%, especificidad 90%) en el segundo caso identifica al paciente respondedor^(11,12). Por el contrario la VCS se colapsa en inspiración en ventilación mecánica. Utilizando ETE un ($\Delta cVCS$) calculado como $(\text{diámetro máximo}-\text{diámetro mínimo})/\text{diámetro máximo} > 36\%$ tiene un 90% de sensibilidad y un 100% de especificidad para identificar al paciente respondedor⁽¹³⁾.

Variación del diámetro de la vena yugular interna en ventilación mecánica

Otra opción es medir al distensibilidad de la vena yugular ($\Delta dVYI$) en ventilación mecánica calculado como $(D_{m\acute{a}x}-D_{min})/D_{min} \times 100$. Una ventaja de esta técnica es que la vena yugular es muy fácil de medir en todos los pacientes con ecografía. En un estudio reciente se mostró que un índice de distensibilidad > 18% tenía una sensibilidad y una especificidad del 80% y 85% respectivamente⁽¹⁴⁾.

Variación del flujo aórtico máximo en ventilación mecánica

Durante la ventilación mecánica, en la inspiración disminuye el retorno venoso derecho y aumenta la post-carga ventricular derecha con caída del VL derecho lo cual se acompaña unos tres ciclos cardiacos después de una caída del VL izquierdo en la espiración. La estimación de esta variación del VL en ventilación mecánica puede realizarse con técnicas basadas en termodilución, análisis de la onda de pulso o de onda de presión arterial. La ecocardiografía es una buena herramienta para calcular el VL. La velocidad Doppler máxima en el tracto de salida ventricular es proporcional al VL por lo que si evaluamos su variación con el ciclo respiratorio podremos estimar la variación del VL. Cuanto mayor sea la variación de la velocidad del flujo aórtico máximo con el ciclo respiratorio tanto mayor será la variación del VL y la reserva de precarga (probabilidad de una respuesta positiva a la administración de volumen). Para realizar esta técnica únicamente es necesario obtener un plano del tracto de salida ventricular (apical 5 cámaras) y

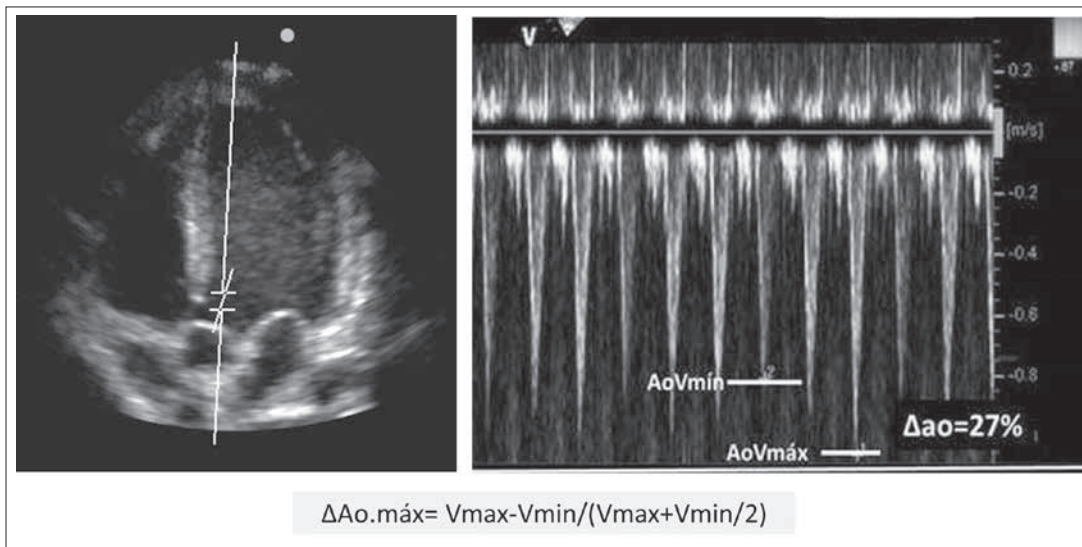


Figura 5. Variación del flujo aórtico máximo en ventilación mecánica.

medir la velocidad pico con Doppler pulsado a nivel del tracto de salida o la válvula aórtica obteniendo el valor máximo y mínimo en el ciclo respiratorio, algo relativamente sencillo de hacer en la mayoría de los pacientes. Según la fórmula $Ao. Max - Ao. Min / (Ao. Max + Ao. Min / 2) \times 100$ se obtiene el porcentaje de variación (Fig. 5). En adultos el mejor punto de corte para discriminar a los respondedores y no respondedores utilizando esta técnica se sitúa alrededor del 12% aunque existen variaciones según la metodología⁽¹⁵⁾. Recientemente se ha publicado un meta-análisis de 6 estudios pediátricos incluyendo un total de 163 pacientes. Se demostró la utilidad de la técnica para discriminar a los pacientes respondedores a volumen con una sensibilidad, especificidad, razón de probabilidad positiva y negativas del 92%, 85,5%, 4,89 y 0,13 respectivamente. El punto de corte óptimo varió entre los estudios entre un 7-20% (5 de los 6 estudio indicaron un valor óptimo por encima del 10%)⁽¹⁶⁾. En un meta-análisis de estudios pediátricos se ha mostrado que la variación del flujo aórtico discrimina mejor la respuesta a líquidos respecto a los métodos basados en la onda de pulso o la presión arterial⁽¹⁷⁾. Una posible explicación es que la mayor elasticidad arterial en los niños disminuye la sensibilidad de los métodos basados en la onda del pulso para reflejar los cambios en el volumen latido ya que el lecho arterial acomodaría los cambios de volumen con facilidad, algo que no sucedería en los adultos con arterias más rígidas⁽¹⁸⁾. Globalmente podemos decir que esta técnica es la única que se ha demostrado útil para la predicción de la respuesta a líquidos en niños con un buen nivel de evidencia científica.

Limitaciones de los índices dinámicos en ventilación mecánica

El efecto de la ventilación mecánica en la presión intratorácica y en el VL es la base para la utilidad de muchos índices dinámicos y también su principal limitación. Para que los índices basados en las variaciones respiratorias se puedan interpretar adecuadamente es necesario por un lado que estas variaciones sean lo suficientemente importantes como para inducir cambios en el VL detectables y que los cambios detectados se deban únicamente a la ventilación mecánica y no a otros factores. Se han establecido las condiciones necesarias para poder aplicar estos índices dinámicos en ventilación mecánica los cuales que se cumplir en todas las técnicas basadas en las variaciones del VL en ventilación mecánica se utilice o no la ecocardiografía. Es necesario que el paciente esté intubado, sin respiraciones espontáneas, con volumen tidal de al menos 7-8 cc/kg, no haya arritmias cardíacas (excepto en los parámetros de vena cava) y no exista disfunción significativa del VD.

Variación inducida por elevación pasiva de las piernas por ecocardiografía

Se han buscado otros test de respuesta a líquidos que no adolezcan de estas limitaciones. El test de elevación pasiva de las piernas (TEPP) se basa en la simulación de una carga de volumen mediante la movilización de la

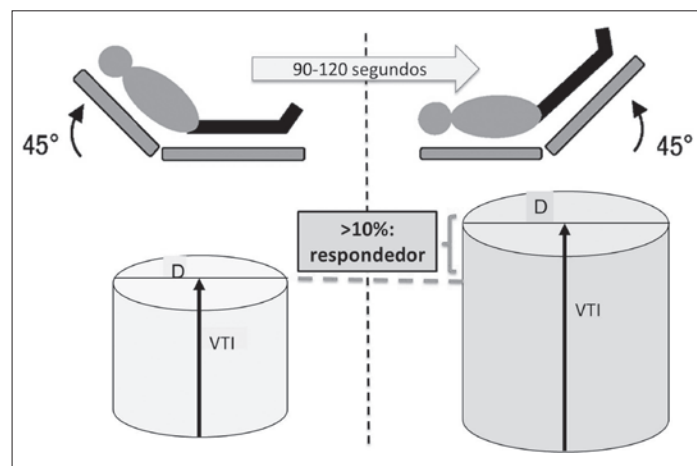


Figura 6. Test de elevación pasiva de las piernas. Partiendo de una posición con la cabecera a 45° se elevan las piernas a 45° con el tronco a 0°. A los 90-120 segundos se repite la medición del VL. Si se produce un aumento > 10% se considera respondedor a volumen.

sangre venosa de las piernas y el abdomen hacia el corazón. La medición del VL o el índice cardíaco antes y después del test nos permite estimar el cambio de VL que producirá una carga de volumen. La realización del test se ilustra en la figura 6. Dos metanálisis publicados en adultos han mostrado que este test identifica a los respondedores a volumen independientemente de los parámetros ventilatorios, el tipo de líquido usado, la posición del paciente o la presencia de arritmias. El mejor punto de corte cuando la respuesta se evalúa por el gasto cardíaco ha variado entre un $10 \pm 2\%$. La sensibilidad ha sido del 85% y la especificidad entre el 91-92%^(19,20). Según los autores este test debería sustituir al “fluid challenge” dado su potencial para disminuir el riesgo de sobrecarga de volumen en el paciente crítico. El TEPP se puede aplicar en todos los pacientes con la excepción de aquellos afectados por hipertensión abdominal. En niños se han publicado muy pocos estudios usando el TEPP. A diferencia de los adultos los resultados han sido decepcionantes. La sensibilidad del test ha sido en general más baja que en adultos. Lukito et al mostraron que un aumento > 10% en el índice cardíaco a los 5 minutos del test tenía una sensibilidad del 55% y una especificidad del 85% para identificar a los respondedores⁽²¹⁾. El rango de edad de los pacientes en el estudio era de 1 a 8 años. La principal limitación para la aplicación de este test es la asunción de que la elevación de las piernas conlleva un aumento del retorno venoso de similar magnitud independientemente del

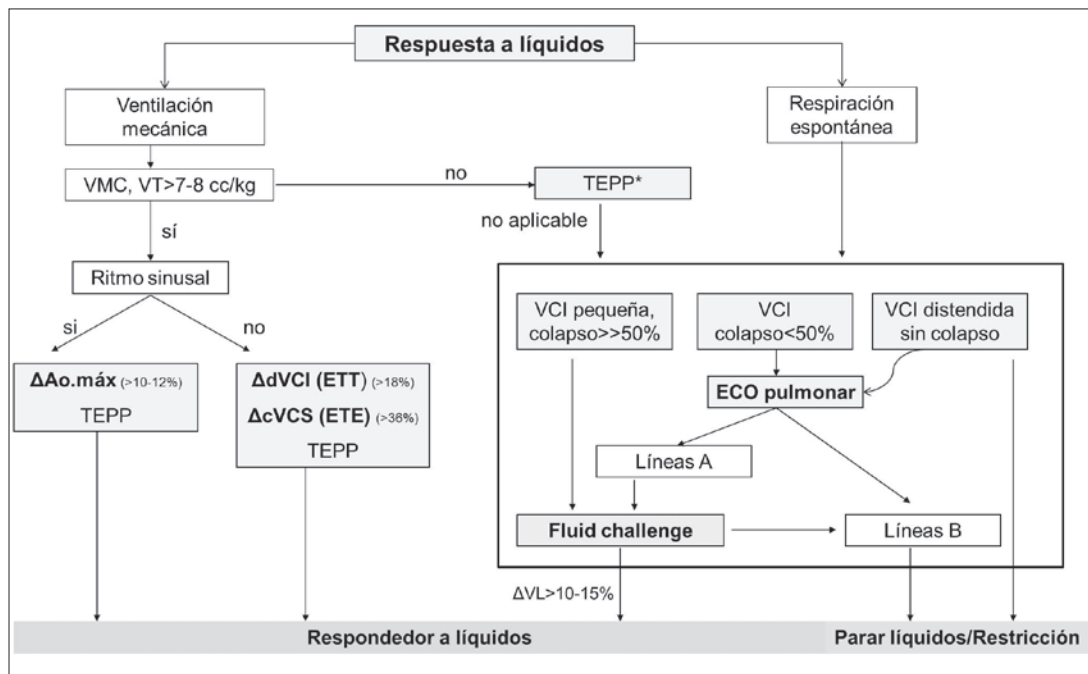


Figura 7. Sistemática para guiar la administración de líquidos por ecocardiografía. *Valorar la aplicación de TEPP en niños mayores (por encima de 6-8 años) considerando significativo un aumento de > 10-12% en el volumen latido.

tamaño del paciente. Los niños pequeños tienen una menor proporción del volumen sanguíneo venoso en el territorio de la vena cava inferior. Por tanto la elevación pasiva de las piernas en niños pequeños puede no desencadenar un aumento del volumen latido de suficiente magnitud como para clasificar al paciente como respondedor (falsos negativos).

Administración de volumen guiada por ecografía en el paciente crítico

La FCUS puede detectar fácilmente al paciente con hipovolemia franca e indicar la administración de líquidos. Sin embargo muchos pacientes en situación de inestabilidad hemodinámica pueden beneficiarse de la administración de líquidos sin presentar datos claros de hipovolemia en la ecografía cardiaca. Por otra parte la administración excesiva de líquidos en perjudicial en el paciente crítico asociándose a una aumento de la morbilidad^(22,23). Existen aplicaciones de la ecografía que pueden ser útiles no solo en la indicación de la administración de líquidos si no en la indicación del final de la resucitación con líquidos mediante la valoración de la tolerancia a líquidos como la ecografía pulmonar.

Valoración del agua extravascular pulmonar con ecografía

La resucitación con líquidos es esencial en la fase inicial de shock. Muchos pacientes con shock séptico desarrollan un SDRA. El aumento de la permeabilidad capilar en el contexto de la inflamación pulmonar predispone a estos pacientes al edema pulmonar y disminución de la aireación. La administración agresiva de líquidos aunque beneficiosa desde el punto de vista hemodinámico puede aumentar el flujo pulmonar y la presión hidrostática (especialmente si coexiste disfunción ventricular) empeorando el shunt intrapulmonar y la oxigenación. La restricción precoz de líquidos se considera una estrategia adecuada en estos pacientes. La ecografía pulmonar puede detectar el aumento del agua extravascular pulmonar antes de que se observe un empeoramiento en los parámetros gasométricos de shunt intrapulmonar. Se basa en la detección de unos artefactos conocidos como líneas B. La aparición de líneas en B en zonas no dependientes del pulmón es indicativa de edema intersticial. Si las líneas B son coalescentes (pulmón blanco ecográfico) indica el desarrollo de edema alveolo-intersticial. Se han descrito diversos scores para cuantificar el grado de edema pulmonar por ecografía en el paciente crítico⁽²⁴⁾. La aparición de edema pulmonar en la ecografía indica la progresiva pérdida de aireación y podría marcar la transición de una estrategia liberal de administración de líquidos hacia la fase de restricción hídrica en pacientes con shock y lesión pulmonar concomitante. Estudios en pacientes con sobrecarga hídrica sometidos a técnicas de depuración extra-renal corroboran el potencial de la

ecografía pulmonar en el manejo del balance hídrico al permitir monitorizar de forma dinámica, no invasiva y rápida los cambios en el agua pulmonar^(25,26).

Sistemática para la aplicación de las maniobras de predicción de respuesta a líquidos

A continuación se propone una sistemática para la utilización de las distintas maniobras de predicción de respuesta a líquidos utilizando la ecografía. Se ofrecen dos aproximaciones: una basada en los índices dinámicos aplicables en pacientes en ventilación mecánica y otra basada en la aplicación de la ecografía pulmonar combinada con la valoración del tamaño y colapsabilidad de la VCI. Ambas aproximaciones se encuentran integradas en la figura 7. Nuevamente el esquema únicamente persigue una función didáctica.

Evaluación de la función ventricular izquierda

La medición cuantitativa de la función ventricular sistólica del ventrículo izquierdo se puede realizar de diversas formas. Utilizando el modo M se puede calcular la fracción de acortamiento del VI. La fracción del VI se puede derivar del modo M (método Teicholz) pero está sujeta a imprecisiones. El método más utilizado para calcular la fracción de eyección es el método de Simpson modificado que se basa en la medición de los volúmenes diastólico y sistólico del VI en A4C. La principal limitación técnica en el paciente crítico es que es difícil obtener una buena delimitación del endocardio apical y de la pared posterior para trazar las áreas por lo que su utilidad y reproducibilidad son limitadas. Además tanto la fracción de eyección como el acortamiento son dependientes de las condiciones de precarga. En pacientes hipovolémicos estos índices tienden a sobreestimar la función ventricular. Otros métodos que se pueden utilizar son el Doppler tisular del anillo mitral en un plano A4C. Este método aunque exige una correcta alineación del Doppler, es más sencillo de obtener que la fracción de eyección y se puede realizar en la mayoría de los pacientes. El parámetro más utilizado es la velocidad máxima de la onda S mitral que es directamente proporcional a fracción de eyección.

Cálculo de las presiones de llenado ventriculares y función diastólica

Presión de llenado del ventrículo derecho

La presión de llenado del ventrículo derecho se puede estimar mediante la medición del diámetro máximo de la VCI y el grado de colapso inspiratorio en respiración espontánea. Esta técnica está validada frente a la medición invasiva de la presión diastólica del VD en adultos. En niños estos valores dependen de la edad del paciente y es necesario utilizar normogramas lo cual limita su utilidad en la práctica clínica⁽²⁷⁾.

TABLA 1. Parámetros cuantitativos en la valoración hemodinámica por ecocardiografía.

Aplicación	Valor significativo	Observaciones
Administración de líquidos		
Colapso inspiratorio VCI	> 50% (sugiere respondedor) < 50% (no descarta respondedor)	Respiración espontánea
TEPP (dinámico)	> 12% (sugiere respondedor)	Niños mayores Medición de VL antes y después
Δ Ao.máx (dinámico)	> 12% (sugiere respondedor)	Ventilación mecánica, ritmo sinusal
Δ dVCI (ETT) (dinámico)	> 18% (sugiere respondedor)	Ventilación mecánica (modo M)
Δ cVCS (ETE) (dinámico)	> 36% (sugiere respondedor)	
Área del VI/sup. corporal	< 5 cm ² /m ² (sugiere hipovolemia)	Requiere buena imagen
Fluid challenge		
Medición VL antes y después de líquidos	> 10-15% (respondedor)	Útil, si no se pueden aplicar índices dinámicos
Flujo (gasto cardiaco)		
Volumen latido: VTI x (D/2) ²	Depende de la edad	Tendencia más importante que valor No aplicable si shunts
Índice cardiaco= (VLxFC)/SC	< 3,3 l/m ² /min (bajo gasto, sepsis) < 2,2 l/m ² /min (niños sanos)	Tendencia más importante que valor No aplicable si shunts
Función ventricular izquierda		
FA	Normal: 28-44%	Depende precarga
FE	Normal: 55-75%	Depende precarga
Doppler tisular mitral (onda S)	< 6 cm/seg (lactante) < 7 cm/seg (niño) < 9 cm/seg (adolescente)	No depende de geometría Alienación óptima
MAPSE	< 10 mm (equivale a FE < 55%)	Sencillo
VCFc (FE/tiempo eyección)	< 1 circ/seg (patológico)	Independiente de precarga
Función ventrículo derecho		
TAPSE	< 10 mm lactante < 15 mm niños	Modo M Depende de precarga
Onda S tricúspide (doppler tisular)	< 8 cm/seg lactante < 10 cm/seg niños < 12 cm/seg adolescente	Depende de la correcta alineación del Doppler
Relación VD/VI (dilatación del VD)	> 0,6 (niños), > 1 (lactante) Medir en A4C	Errores por efecto del corte
Presión pulmonar		
Jet insuficiencia tricuspídea	PAP sistólica > 35 mmHg	El TSVD tiene que estar libre
Jet de insuficiencia pulmonar	PAP media > 25 mmHg PAP diastólica > 15 mmHg	El TSVD tiene que estar libre
Curvatura septal	Normal (infrasisistémica) Plano (rango sistémico) Invertido (suprasistémica)	Cualitativo (mala relación con PAP por cateterismo)
Shunts derecha-izquierda	Sugiere presión suprasistémica	Neonatos
Presión de llenado VI		
E/Em	> 15 sugiere elevación, < 8 (presión normal)	Poco valorable si patología mitral Zona gris 8-15
Volumen AI	> 34 ml/m ² (dilatación)	Inespecífico

Presión de llenado del ventrículo izquierdo

Para la detección de elevación de la presión de llenado del VI puede utilizarse la estimación del volumen de la aurícula izquierda. Un valor > 34 ml/m² puede considerarse anormal. La presencia de una aurícula dilatada por sí misma no indica un aumento de la presión de llenado. Será necesario valorar los patrones de llenado del VI. En ese sentido un método para el cálculo numérico de la presión de llenado del VI es útil el índice E/Em que

relaciona la velocidad de llenado precoz (Onda E) por Doppler pulsado transmitral con la velocidad de relajación precoz (Em) del anillo mitral lateral por Doppler tisular. Un valor por encima de 15 o un valor > 8 junto con dilatación de la AI es sugestivo de elevación de la presión de llenado. La disfunción diastólica con o sin disfunción sistólica asociada es un factor de riesgo para la aparición de edema pulmonar y fracaso del destete de la ventilación mecánica.

Valoración del ventrículo derecho y la presión pulmonar

Función sistólica

La valoración de la función del VD está limitada por su geometría especial que hace que las mediciones basadas en los volúmenes no sean útiles. A diferencia del VI, la función del VD depende en gran parte del acortamiento longitudinal (base-ápex) de las fibras miocárdicas. La ecocardiografía permite valorar de una manera sencilla el acortamiento longitudinal mediante un parámetro conocido como TAPSE. El TAPSE mide en modo M la distancia que se acerca el plano tricuspídeo al ápex en sístole. Es muy sencillo de obtener y se correlaciona con la FE estimada por resonancia magnética. Los valores aumentan con la edad del paciente. Otro parámetro sencillo es la velocidad máxima de la onda S del anillo tricúspide por Doppler tisular y se considera uno de los parámetros más sensibles y de mayor utilidad para valorar el VD.

Presión pulmonar

Para el cálculo de la presión pulmonar sistólica se utiliza el cálculo del gradiente de presión VD-AD mediante que se obtiene a partir de la ecuación de Bernouilli modificada ($4V^2$) mediante la medición de la velocidad máxima del jet de regurgitación tricuspídea. A este valor se le debe sumar la PVC (medida directamente o estimada por el tamaño y colapso de la VCI). Aplicando el mismo principio se puede calcular también la presión diastólica y media pulmonar con el jet de insuficiencia pulmonar. Para que estos valores reflejen la presión pulmonar no debe existir obstrucción en el tracto de salida del ventrículo derecho, en cuyo caso los valores reflejaran la presión en VD y no la presión pulmonar. La valoración cualitativa de la presión pulmonar incluye la valoración del tamaño relativo de los ventrículos, la curvatura septal y la dirección del shunt en el ductus y foramen oval en caso de que estén presentes.

En la tabla 1 se resumen algunos de los parámetros que pueden evaluarse mediante ecocardiografía en el paciente crítico y la interpretación de los valores.

CONCLUSIONES

La ecocardiografía en el paciente crítico permite valorar la mayor parte de los aspectos que rigen la fisiología cardiovascular. La aplicación de la ecocardiografía dirigida es útil en la valoración rápida de las causas de shock permitiendo orientar el tratamiento inicial. La ecocardiografía también puede utilizarse como herramienta de monitorización durante el tratamiento de los pacientes con compromiso hemodinámico. Una de las áreas de mayor interés es su uso como guía en la administración de líquidos. La variación del flujo aórtico con la ventilación mecánica ha demostrado su utilidad para identificar al paciente pediátrico crítico respondedor a líquidos con evidencias sólidas. El uso combinado con la ecografía pulmonar podría ayudar a limitar los riesgos de la sobrecarga de volumen. Cualquier información obtenida con la ecografía debe valorarse en el contexto clínico del paciente, siendo la ecografía la que encaja con el paciente y no al revés.

REFERENCIAS

1. Lambert RL, Boker JR, Maffei FA. National survey of bedside ultrasound use in pediatric critical care. *Pediatr Crit Care Med.* 2011; 12: 655-9.
2. Su E, Pustavoitau A, Hirshberg EL, Nishisaki A, Conlon T, Kantor DB, et al. Establishing intensivists-driven ultrasound at the PICU bedside--it's about time. *Pediatr Crit Care Med.* 2014; 15: 649-52.
3. Kanji HD, McCallum J, Sirounis D, MacRedmond R, Moss R, Boyd JH. Limited echocardiography-guided therapy in subacute shock is associated with change in management and improved outcomes. *J Crit Care.* 2014; 29: 700-5.
4. Bouferrache K, Amiel J-B, Chimot L, Caille V, Charron C, Vignon P, et al. Initial resuscitation guided by the Surviving Sepsis Campaign recommendations and early echocardiographic assessment of hemodynamics in intensive care unit septic patients: a pilot study. *Crit Care Med.* 2012; 40: 2821-7.
5. Pershad J, Myers S, Plouman C, Rosson C, Elam K, Wan J, et al. Bedside limited echocardiography by the emergency physician is accurate during evaluation of the critically ill patient. *Pediatrics.* 2004; 114: e667-71.
6. Spurney CF, Sable CA, Berger JT, Martin GR. Use of a hand-carried ultrasound device by critical care physicians for the diagnosis of pericardial effusions, de-

creased cardiac function, and left ventricular enlargement in pediatric patients. *J Am Soc Echocardiogr.* 2005; 18: 313-9.

7. Rabah F, Al-Senaidi K, Beshlawi I, Alnair A, Abdelmogheth A-AA. Echocardiography in PICU: when the heart sees what is invisible to the eye. *J Pediatr (Rio J).* 2016; 92: 96-100.
8. Via G, Hussain A, Wells M, Reardon R, ElBarbary M, Noble VE, et al. International evidence-based recommendations for focused cardiac ultrasound. *J Am Soc Echocardiogr.* 2014; 27: 683.e1-683.e33.
9. Bergenzaun L, Gudmundsson P, Öhlin H, Düring J, Ersson A, Ihrman L, et al. Assessing left ventricular systolic function in shock: evaluation of echocardiographic parameters in intensive care. *Crit Care Lond Engl.* 2011; 15: R200.
10. Perera P, Mailhot T, Riley D, Mandavia D. The RUSH exam: Rapid Ultrasound in SHock in the evaluation of the critically ill. *Emerg Med Clin North Am.* 2010; 28: 29-56, vii.
11. Feissel M, Michard F, Faller J-P, Teboul J-L. The respiratory variation in inferior vena cava diameter as a guide to fluid therapy. *Intensive Care Med.* 2004; 30: 1834-7.
12. Barbier C, Loubières Y, Schmit C, Hayon J, Ricôme J-L, Jardin F, et al. Respiratory changes in inferior vena cava diameter are helpful in predicting fluid responsiveness in ventilated septic patients. *Intensive Care Med.* 2004; 30: 1740-6.
13. Vieillard-Baron A, Chergui K, Rabiller A, Peyrouset O, Page B, Beauchet A, et al. Superior vena caval collapsibility as a gauge of volume status in ventilated septic patients. *Intensive Care Med.* 2004; 30: 1734-9.
14. Guarracino F, Ferro B, Forfori F, Bertini P, Magliacano L, Pinsky MR. Jugular vein distensibility predicts fluid responsiveness in septic patients. *Crit Care Lond Engl.* 2014; 18: 647.
15. Feissel M, Michard F, Mangin I, Ruyer O, Faller JP, Teboul JL. Respiratory changes in aortic blood velocity as an indicator of fluid responsiveness in ventilated patients with septic shock. *Chest.* 2001; 119: 867-73.
16. Desgranges F-P, Desebbe O, Pereira de Souza Neto E, Raphael D, Chassard D. Respiratory variation in aortic blood flow peak velocity to predict fluid responsiveness in mechanically ventilated children: a systematic review and meta-analysis. *Paediatr Anaesth.* 2016; 26: 37-47.
17. Gan H, Cannesson M, Chandler JR, Ansermino JM. Predicting fluid responsiveness in children: a systematic review. *Anesth Analg.* 2013; 117: 1380-92.
18. Byon H-J, Lim C-W, Lee J-H, Park Y-H, Kim H-S, Kim C-S, et al. Prediction of fluid responsiveness in mechanically ventilated children undergoing neurosurgery. *Br J Anaesth.* 2013; 110: 586-91.
19. Cherpanath TGV, Hirsch A, Geerts BF, Lagrand WK, Leeftang MM, Schultz MJ, et al. Predicting fluid responsiveness by passive leg raising: a systematic review and meta-analysis of 23 clinical trials. *Crit Care Med.* 2016 Jan 6; [En prensa].
20. Monnet X, Marik P, Teboul J-L. Passive leg raising for predicting fluid responsiveness: a systematic review and meta-analysis. *Intensive Care Med.* 2016 Jan 29; [En prensa].
21. Lukito V, Djer MM, Pudjiadi AH, Munasir Z. The role of passive leg raising to predict fluid responsiveness in pediatric intensive care unit patients. *Pediatr Crit Care Med.* 2012; 13: e155-60.
22. Arikan AA, Zappitelli M, Goldstein SL, Naipaul A, Jefferson LS, Loftis LL. Fluid overload is associated with impaired oxygenation and morbidity in critically ill children. *Pediatr Crit Care Med.* 2012; 13: 253-8.
23. Sinitzky L, Walls D, Nadel S, Inwald DP. Fluid overload at 48 hours is associated with respiratory morbidity but not mortality in a general PICU: retrospective cohort study. *Pediatr Crit Care Med.* 2015; 16: 205-9.
24. Caltabeloti F, Monsel A, Arbelot C, Brisson H, Lu Q, Gu W-J, et al. Early fluid loading in acute respiratory distress syndrome with septic shock deteriorates lung aeration without impairing arterial oxygenation: a lung ultrasound observational study. *Crit Care Lond Engl.* 2014; 18: R91.
25. Donadio C, Bozzoli L, Colombini E, Pisanu G, Ricchiuti G, Picano E, et al. Effective and timely evaluation of pulmonary congestion: qualitative comparison between lung ultrasound and thoracic bioelectrical impedance in maintenance hemodialysis patients. *Medicine (Baltimore).* 2015; 94: e473.
26. Trezzi M, Torzillo D, Ceriani E, Costantino G, Caruso S, Damavandi PT, et al. Lung ultrasonography for the assessment of rapid extravascular water variation: evidence from hemodialysis patients. *Intern Emerg Med.* 2013; 8: 409-15.
27. Kutty S, Li L, Hasan R, Peng Q, Rangamani S, Danford DA. Systemic venous diameters, collapsibility indices, and right atrial measurements in normal pediatric subjects. *J Am Soc Echocardiogr.* 2014; 27: 155-62.