



PUESTA AL DÍA EN MEDICINA INTENSIVA: ECOGRAFÍA EN EL PACIENTE CRÍTICO. APLICACIONES CLÍNICAS

Papel de la ecografía en la insuficiencia respiratoria aguda y en el *weaning* de la ventilación mecánica



Luis Zapata^{a,*}, Rafael Blancas^b, Isabel Conejo-Márquez^c y Marina García-de-Acilu^d

^a Servicio de Medicina Intensiva, Hospital de la Santa Creu i Sant Pau, Universitat Autònoma de Barcelona, Barcelona, España

^b Servicio de Medicina Intensiva, Hospital Universitario del Tajo, Universidad Alfonso X El Sabio, Aranjuez, Madrid, España

^c Servicio de Medicina Intensiva, Hospital Universitario del Henares, Coslada, Madrid, España

^d Servicio de Medicina Intensiva, Hospital Universitario Parc Taulí, Sabadell, Barcelona, España

Recibido el 18 de enero de 2023; aceptado el 31 de marzo de 2023

Disponible en Internet el 13 de mayo de 2023

PALABRAS CLAVE

Insuficiencia respiratoria aguda;
Paciente crítico;
Ecografía;
Ventilación mecánica

Resumen La evaluación integral mediante ecografía se ha convertido en una herramienta indispensable para facilitar el diagnóstico y el manejo terapéutico en los pacientes críticos con insuficiencia respiratoria aguda (IRA). Existe evidencia que apoya el uso de la ecografía para el diagnóstico de neumotórax, síndrome de distrés respiratorio agudo, edema pulmonar cardiogénico, neumonía, tromboembolismo pulmonar agudo y el paciente con COVID-19. Además, en los últimos años se ha desarrollado el uso de la ecografía para evaluar la respuesta a los tratamientos en los pacientes críticos con IRA, brindando una herramienta no invasiva para la titulación de la presión positiva al final de la espiración, monitorizar las maniobras de reclutamiento y la respuesta al prono, así como para facilitar la retirada de la ventilación mecánica. El objetivo de esta revisión es resumir los conceptos básicos sobre la utilidad de la ecografía en el diagnóstico y la monitorización de los pacientes críticos con IRA.

© 2023 Elsevier España, S.L.U. y SEMICYUC. Todos los derechos reservados.

KEYWORDS

Acute respiratory failure;
Critically ill;
Echocardiography;
Mechanical ventilation

Role of ultrasound in acute respiratory failure and in the weaning of mechanical ventilation

Abstract Comprehensive ultrasound assessment has become an essential tool to facilitate diagnosis and therapeutic management in critically ill patients with acute respiratory failure (ARF). There is evidence supporting the use of ultrasound for the diagnosis of pneumothorax, acute respiratory distress syndrome, cardiogenic pulmonary edema, pneumonia, acute pulmonary thromboembolism, and the patient with COVID-19. In addition, in recent years, the use of ultrasound to evaluate response to treatments in critically ill patients with ARF has been developed,

* Autor para correspondencia.

Correo electrónico: LZapata@santpau.cat (L. Zapata).

providing a non-invasive tool for titrating positive end-expiratory pressure, monitoring recruitment maneuvers and response to prone, as well as to facilitate weaning from mechanical ventilation. The objective of this review is to summarize the basic concepts on the utility of ultrasound in the diagnosis and monitoring of critically ill patients with ARF.
© 2023 Elsevier España, S.L.U. y SEMICYUC. All rights reserved.

Introducción

La insuficiencia respiratoria aguda (IRA) es uno de los principales problemas a los que nos enfrentamos en las unidades de cuidados intensivos (UCI). En la IRA, uno de los elementos diagnósticos claves son las pruebas de imagen. En este sentido, la ecografía, que permite obtener imágenes en tiempo real, a pie de cama y de manera no invasiva, ha demostrado ser una herramienta con un rendimiento diagnóstico superior al de la radiografía de tórax para el diagnóstico de las principales entidades que afectan al paciente crítico, siendo una alternativa a la tomografía computarizada (TC)¹.

Ecografía en el diagnóstico diferencial de la insuficiencia respiratoria en el paciente crítico

Protocolo BLUE

El BLUE Protocol (*Bedside Lung Ultrasound in Emergency Protocol*) supone el primer algoritmo diagnóstico de la IRA mediante ultrasonidos².

Tal y como se ha comentado en capítulos anteriores de esta serie, este protocolo genera patrones basados en la presencia en los campos pulmonares estudiados de líneas A, B y del deslizamiento pleural, así como la existencia del punto pulmón y la existencia de PLAPS (*posterolateral alveolar and pleural síndrome*). Basado en estos patrones, se propuso un algoritmo diagnóstico para la IRA (fig. 1). En conjunto, estos perfiles proporcionan un diagnóstico correcto en el 90,5% de los casos (tabla 1), siendo más difícil el diagnóstico de neumonía, que se realiza con mayor precisión ante la presencia de PLAPS (fig. 2).

Neumotórax

La sensibilidad de los ultrasonidos para la detección del neumotórax es superior a la de la radiología convencional y similar a la de la TC^{3,4}.

En la exploración ecográfica del neumotórax aparecen los siguientes hallazgos:

- Ausencia de deslizamiento pulmonar (*lung sliding*).
- Ausencia de líneas B (al no existir parénquima pulmonar inmediatamente por debajo de la línea pleural).
- Cambio del patrón normal en modo M, denominando patrón en «orilla de la playa» al patrón en «código de barras», también llamado «de la estratosfera». Este

presenta una serie de líneas paralelas de distinto grosor (fig. 2). Este signo también puede aparecer al explorar grandes bullas, que pueden ser confundidas con neumotórax.

- Presencia de punto pulmón, hallazgo presente cuando el neumotórax no es masivo. Este signo consiste en la aparición de pulmón en la imagen 2D en inspiración, y su desaparición en la espiración, correspondiendo con el lugar en el que la pleura visceral y la parietal se despegan. También podemos encontrarlo como cambios en el modo M, consistentes en paso de patrón en «orilla de la playa» a «código de barras» en sucesivos ciclos respiratorios (fig. 2 y vídeo 1 del material electrónico suplementario). Su especificidad es del 100% para el diagnóstico de neumotórax.

Diagnóstico diferencial del síndrome intersticial

Tanto el síndrome de distrés respiratorio agudo (SDRA) como el edema agudo de pulmón de origen cardiogénico producen una imagen ecográfica con patrón B bilateral del BLUE Protocol, en ambos casos denominado síndrome intersticial². En el síndrome intersticial de causa no cardiogénica los campos pulmonares son habitualmente desiguales en su afectación, especialmente al inicio de la insuficiencia respiratoria, afectando a zonas dependientes de gravedad, a diferencia de cuando la causa es cardiaca, donde la distribución es hidrostática. Patologías previas pulmonares con destrucción de parénquima (enfisema) alteran la homogeneidad de los hallazgos en el edema agudo de pulmón.

Algunos datos adicionales, como el aumento del grosor y la irregularidad de la línea pleural, sugieren que el síndrome intersticial esté relacionado con algún proceso inflamatorio, ya sea neumonía u otro proceso inflamatorio pulmonar⁴. El hallazgo de condensaciones subpleurales también apunta a la existencia de neumonía como origen del síndrome intersticial.

No obstante, el estudio mediante ultrasonidos de la función cardiaca, tanto sistólica como diastólica, y del calibre de la vena cava inferior complementan la información para un diagnóstico más preciso.

Neumonía

Para el diagnóstico de neumonía mediante ultrasonidos identificaremos patrones B', A/B y C. El hallazgo de PLAPS añade precisión diagnóstica. Es muy importante poder encontrar consolidaciones subpleurales en los campos anteriores, caracterizadas por zonas hipocóicas en contacto con la

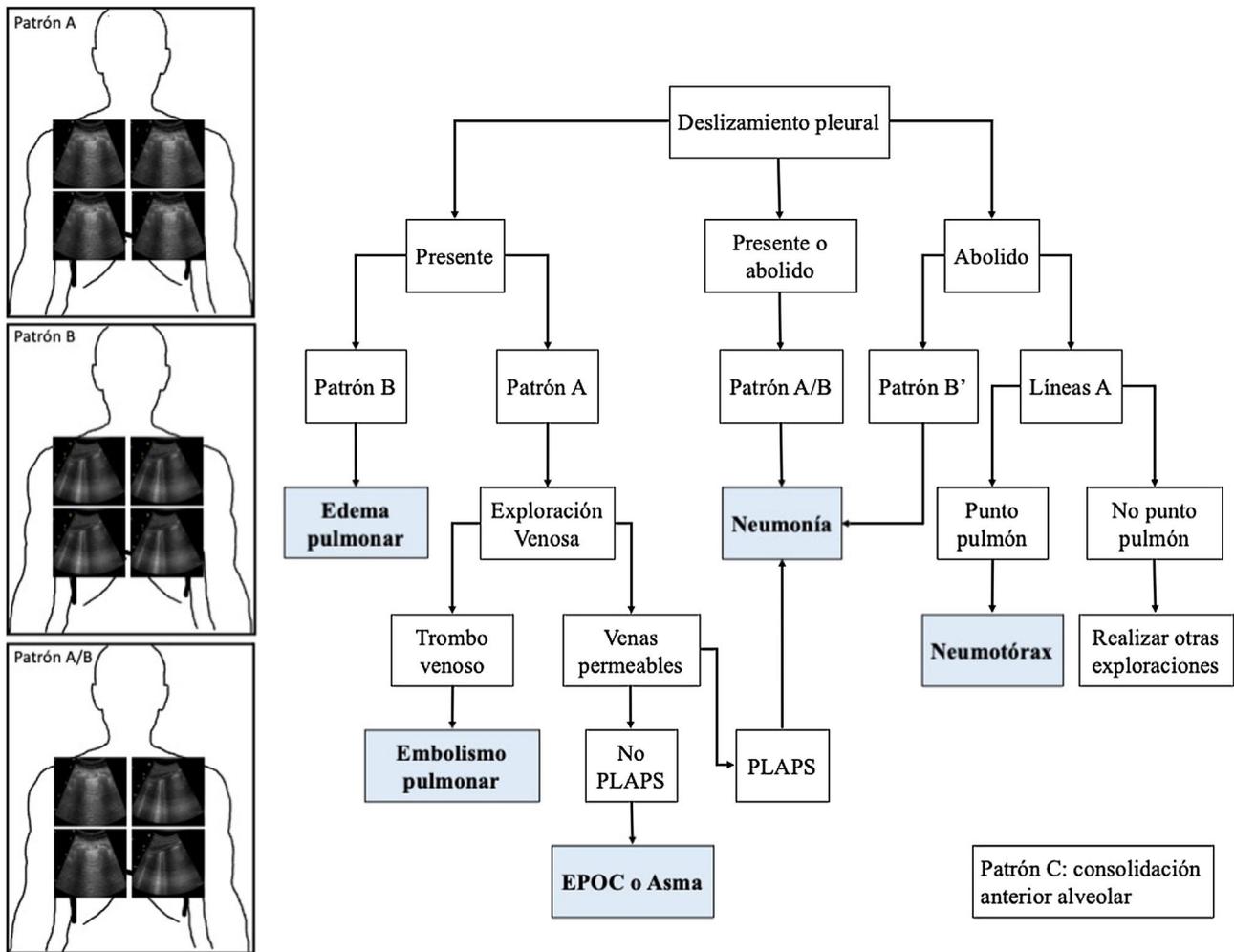


Figura 1 BLUE Protocol. Se muestran los patrones más frecuentes: el patrón A, con líneas A en los cuatro puntos estudiados; el patrón B, con líneas B en los cuatro cuadrantes, y el patrón A/B, que muestra una distribución variable de líneas A y B. En función de los patrones ecográficos y del deslizamiento pulmonar se pueden establecer los diferentes diagnósticos en los pacientes con insuficiencia respiratoria aguda. PLAPS: *posterolateral alveolar and pleural syndrome*.

línea pleural⁵. Estas zonas hipoeoicas tienen márgenes irregulares, lo que se denomina signo fragmentado o fractal (*shred sign*, fig. 2).

La aparición de broncograma aéreo móvil dirige al diagnóstico de neumonía. Consiste en imágenes hiperecoicas lineales, con apariencia ramificada en ocasiones, que se mueven con la respiración si la vía respiratoria correspondiente se encuentra permeable. La imagen es ocasionada por la entrada de gas en el árbol bronquial conteniendo secreciones (fig. 2 y vídeo 2 del material electrónico suplementario).

Tromboembolismo pulmonar

En el contexto de un paciente con insuficiencia respiratoria, el patrón A bilateral del BLUE Protocol tiene como posible diagnóstico el embolismo pulmonar². Se complementa esta exploración con la vascular en la búsqueda de trombosis venosa (fig. 2), y con la exploración cardíaca en busca de signos de disfunción o dilatación del ventrículo derecho.

Otro posible hallazgo ecográfico relacionado con el embolismo pulmonar es la imagen de infarto pulmonar, caracterizada como una zona hipoeoica, triangular y subpleural⁶ (fig. 2).

EPOC descompensada y asma

La presencia de patrón A bilateral y la ausencia de trombosis venosa y de PLAPS son datos que orientan a que la IRA se deba a enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC) o asma².

La utilidad y la precisión de la exploración mediante ultrasonidos para estos diagnósticos, obviando la necesidad de trasladar al paciente al área de radiodiagnóstico, ha sido publicada en un reciente metaanálisis, con sensibilidad de 0,78 (IC 95%: 0,67-0,86) y especificidad de 0,94 (IC 95%: 0,89-0,97)⁷.

Tabla 1 Patrones y patologías asociadas según el *BLUE Protocol*

	Patrón	Hallazgos	Patología asociada	Excluye
Deslizamiento pleural presente	A	<ul style="list-style-type: none"> • Ecografía pulmonar: <i>Sliding</i> presente Líneas A bilaterales • Ecocardiografía: VD dilatado Disfunción VD • Ecografía venosa: Trombosis 	EPOC Asma TEP Neumonías posteriores	Edema pulmonar Neumonía anterior
	B	<ul style="list-style-type: none"> • Ecografía pulmonar: <i>Sliding</i> presente Líneas B bilaterales • Ecocardiografía: Disfunción VI Presiones de llenado • VExUS: Congestión grave 	Edema pulmonar Cardiogénico SDRA	EPOC reagudizado Asma TEP Neumotórax
	A/B	<ul style="list-style-type: none"> • Ecografía pulmonar: <i>Sliding</i> presente Líneas B en un lado Líneas A en otro 	Neumonía unilateral	EPOC reagudizado Asma
Deslizamiento pleural ausente	A'	<ul style="list-style-type: none"> • Ecografía pulmonar: <i>Sliding</i> ausente Líneas A Signo código barras Punto pulmón 	Neumotórax	Edema pulmonar
	B'	<ul style="list-style-type: none"> • Ecografía pulmonar: <i>Sliding</i> ausente Líneas B 	Neumonía SDRA	Neumotórax
	C	<ul style="list-style-type: none"> • Consolidación alveolar encontrada en campos pulmonares anteriores 	Neumonía	

EPOC: enfermedad pulmonar obstructiva crónica; SDRA: síndrome de distrés respiratorio agudo; TEP: tromboembolismo pulmonar; VD: ventrículo derecho; VExUS: valoración de la congestión venosa con ecografía; VI: ventrículo izquierdo.

Ecografía en el paciente con COVID-19

La ecografía pulmonar ha demostrado ser de utilidad en el paciente con COVID-19⁸. La ecografía ofrece información sobre el diagnóstico y la extensión de la afectación pulmonar en la fase temprana o paucisintomática, con una mayor capacidad diagnóstica que la radiografía convencional⁹.

En general, los principales hallazgos ecográficos no difieren de aquellos que podemos observar en pacientes con SDRA de otra etiología y en otras patologías pulmonares, por lo que el hallazgo principal serán las líneas B, reflejando la afectación intersticial o alveolo-intersticial en la neumonía por SARS-CoV-2. No obstante, existen algunas particularidades^{10,11}, como un artefacto característico que aparece en fases precoces (*light beam*), hiperecogénico, en forma de banda, que se extiende desde una línea pleural regular y un fondo de líneas A, y que aparece y desaparece con el deslizamiento pleural. El resto de los hallazgos se resumen en la [figura 3](#).

Aunque ninguno de estos signos es específico de la neumonía COVID-19, la distribución de estas alteraciones, en un entorno epidemiológico concreto, le otorga una gran especificidad. Es característica la afectación bilateral, en forma de grupos parcheados de líneas B que conviven con otras zonas

pulmonares «libres»^{10,12}. Las lesiones tienen una distribución periférica y predominan en campos posteroinferiores, extendiéndose a regiones laterales y anteriores a medida que progresa la enfermedad. Por el contrario, la aparición de derrames pleurales significativos o de grandes consolidaciones lobares obliga a tener en cuenta diagnósticos alternativos o complicaciones¹².

La ecografía como herramienta para guiar el tratamiento de los pacientes con insuficiencia respiratoria

Intubación

La utilidad de la ecografía en la intubación incluye tanto la valoración de la vía aérea superior para predecir una vía aérea difícil^{13,14} como a modo de herramienta para comprobar la posición correcta del tubo endotraqueal (TET) tras la intubación^{15,16}. Nos centraremos en este segundo caso, por ser la intubación emergente uno de los escenarios más frecuentes en el paciente crítico, no siendo posible en la mayoría de las ocasiones valorar una vía aérea antes de la intubar.

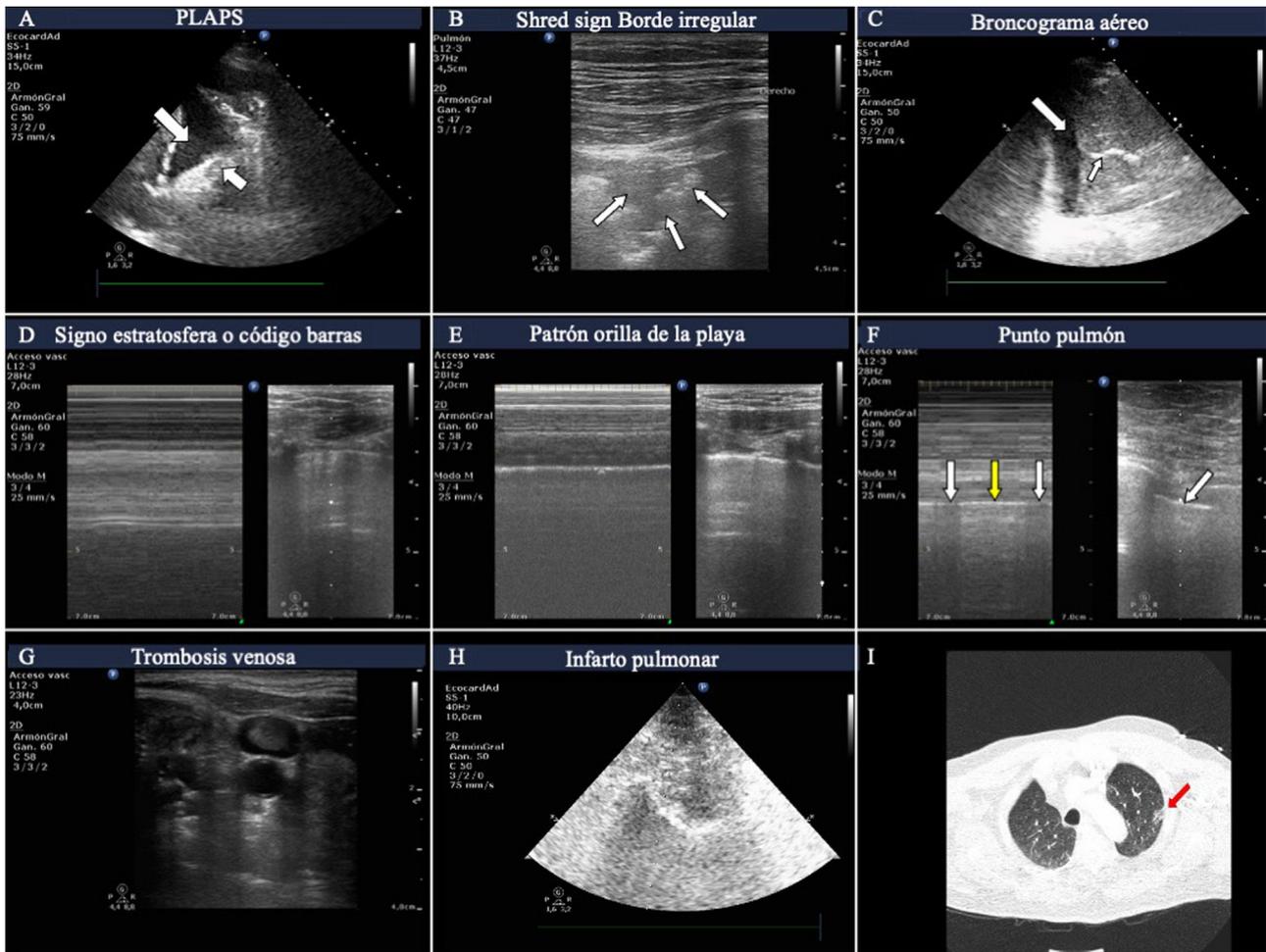


Figura 2 Hallazgos más frecuentes en pacientes con insuficiencia respiratoria aguda. A) Imágenes de PLAPS mostrando zonas hiperecoicas que delimitan un borde mal definido (flecha pequeña) y derrame pleural (flecha grande). B) Consolidación subpleural consistente en zona hipoeicoica en contacto con la línea pleura, rodeada de borde hipereicoico irregular (*shred sign*). C) Imagen de broncograma aéreo mostrando líneas hiperecoicas (flecha pequeña) en el seno de un pulmón hepatizado rodeado de derrame pleural adyacente (flecha grande). D) Patrón de «código de barras», también denominado «de la estratosfera» en el modo M, correspondiente a un neumotórax. E) Patrón de «orilla de la playa» de un pulmón con un deslizamiento pleural preservado. F) Modo M colocado (izquierda) en la zona correspondiente al punto pulmón (flecha, imagen derecha); se puede observar cómo oscilan los patrones en orilla de la playa (flechas blancas) y en código de barras (flecha amarilla) en relación a las fases inspiratoria y espiratoria. G) Imagen de trombo en la vena yugular interna que aparece como hipereicoica, ocupando la mayor parte de la luz vascular. H) Infarto pulmonar: zona hipoeicoica, con imagen hipereicoica en su interior (tomada con sonda de baja frecuencia) que se corresponde con árbol bronquial. I) Región de infarto pulmonar (flecha roja) en la tomografía computarizada pulmonar del mismo paciente.

Comprobación de la intubación

La confirmación de una correcta posición del TET es fundamental, ya que se estima que el 3,3% de intubaciones emergentes son esofágicas¹⁷.

La ecografía traqueal ha mostrado tener el mismo valor que la capnografía para la exclusión de la intubación esofágica, con el 98,7% de sensibilidad y el 97,1% de especificidad, siendo incluso superior en pacientes con bajo gasto cardiaco en el contexto de una parada cardiaca¹⁸. Además, la ecografía traqueal presenta la ventaja de no precisar el inicio de las ventilaciones para la confirmación, lo que sí requiere la capnografía, disminuyendo el riesgo de distensión gástrica y de broncoaspiración.

Para descartar la intubación esofágica es necesario utilizar un transductor lineal de alta frecuencia situado en la

escotadura supraesternal, obteniendo una imagen transversal anterior del cuello y la vía aérea. En este plano, la tráquea se identifica como una línea hiperecogénica con forma de U invertida, generada por la interfase mucosa-vía aérea, con un artefacto con sombra acústica típica posterior (fig. 4). El esófago está colapsado y se encuentra en posición paratraqueal lateral izquierda. Una intubación esofágica se detectaría por la observación de una estructura circular anecoica adyacente a la tráquea (generalmente en el lado izquierdo de la tráquea), signo que se conoce como «doble tráquea» (fig. 4).

Se ha propuesto un protocolo¹⁶ que combina la ecografía traqueal y la torácica para evaluar la viabilidad de la ecografía en la confirmación de la posición correcta del TET en pacientes en UCI (algoritmo 1).

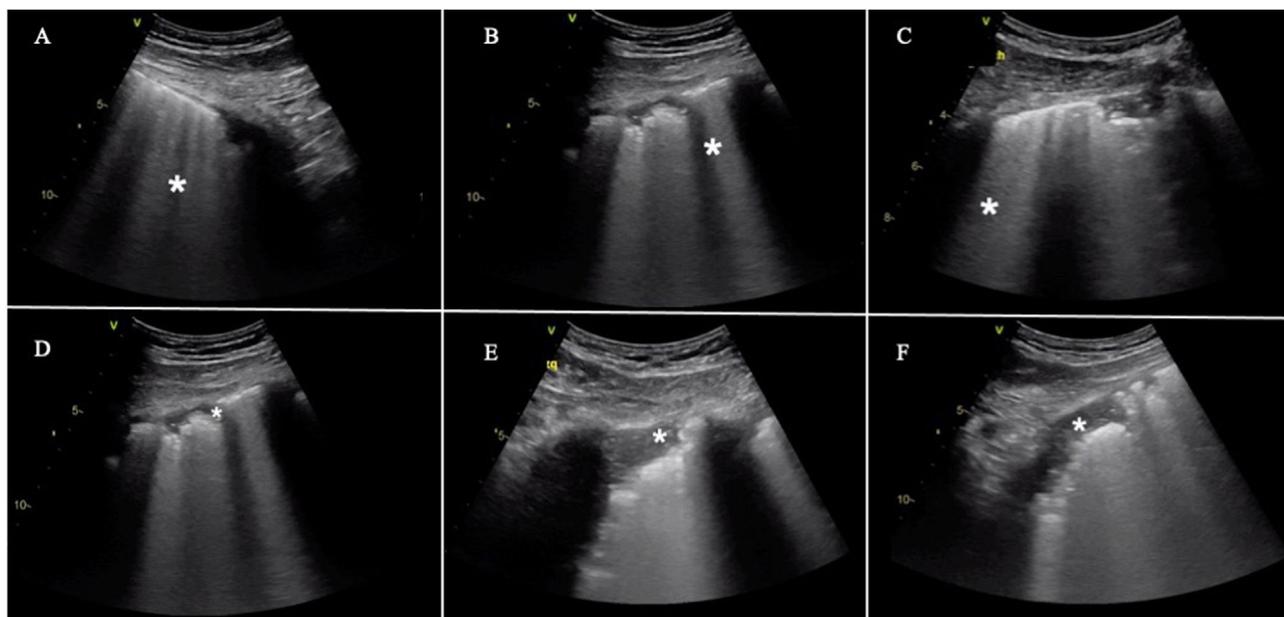


Figura 3 Hallazgos frecuentes en pacientes con insuficiencia respiratoria aguda asociada a COVID-19. Incluye la presencia de líneas B en todas sus formas posibles, separadas o coalescentes, llegando incluso a formar una imagen de «pulmón blanco». Pueden partir de la línea pleural o de pequeñas consolidaciones periféricas. A) Líneas B separadas. B) Líneas B coalescentes. C) «Pulmón blanco». D) Línea pleural irregular y fragmentada. E y F) Consolidaciones subpleurales.

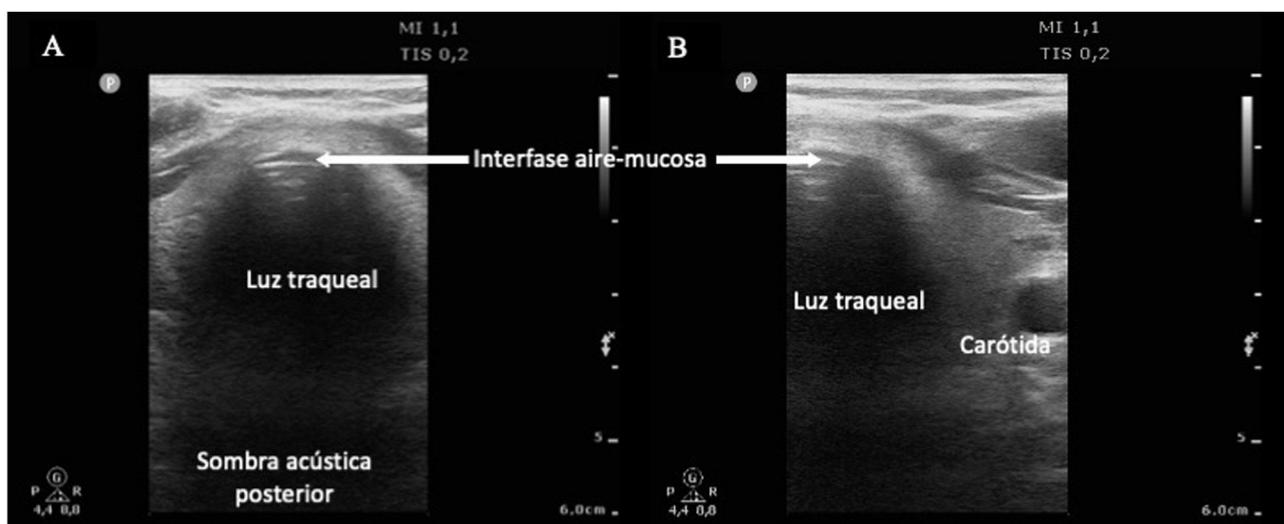


Figura 4 Imagen de la tráquea. A) Visión normal centrada de la tráquea a la altura de la escotadura supraesternal. B) Visión normal lateralizada a la izquierda donde se observa la arteria carótida.

En algunos casos dudosos, o para tener una confirmación adicional, se puede realizar una ecografía diafragmática para observar la excursión diafragmática durante las ventilaciones.

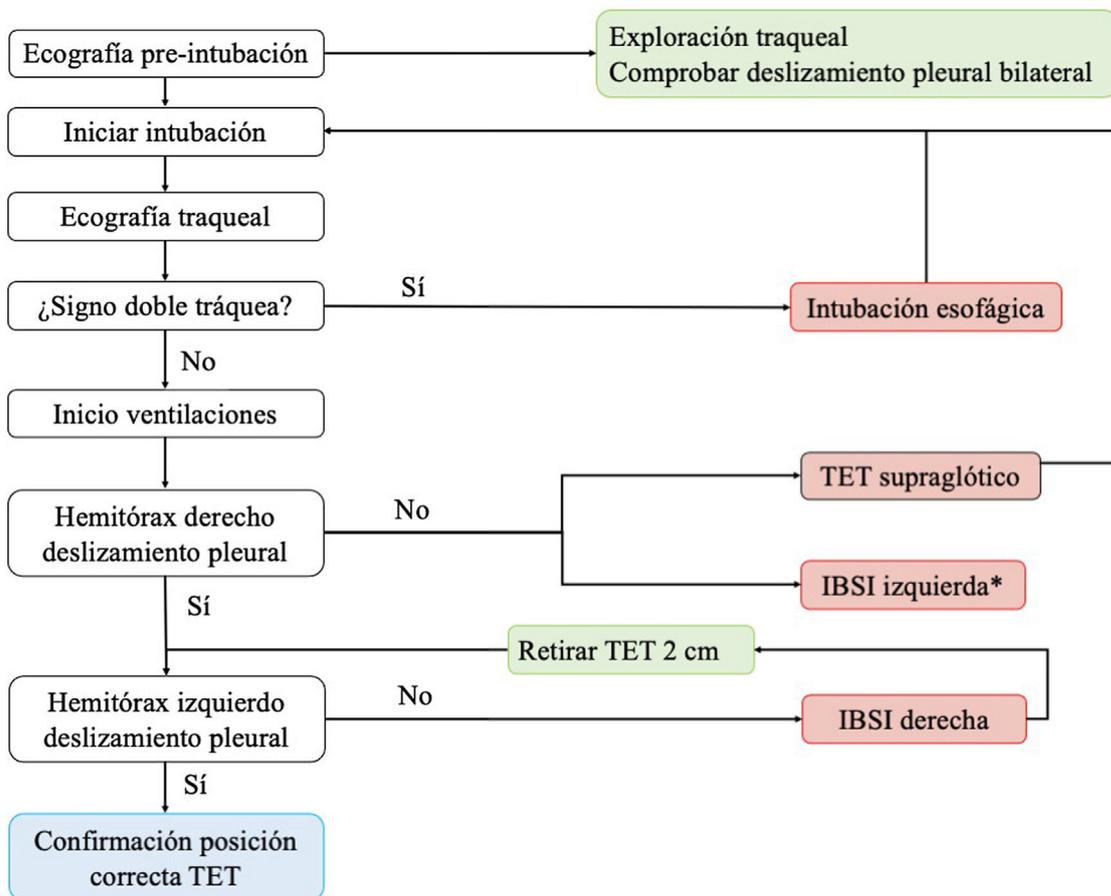
Respuesta a las maniobras de reclutamiento y el decúbito prono

La ecografía ofrece la posibilidad de valorar, de una forma semicuantitativa, el grado y la distribución de la aireación pulmonar. Además, la posibilidad de repetir la exploración a

pie de cama nos permite evaluar los cambios en respuesta a los tratamientos y maniobras que apliquemos en pacientes con IRA.

Cuantificación de la aireación pulmonar

Los diferentes patrones ecográficos reflejan diferentes grados de aireación (fig. 5). Así, el patrón A corresponde a un parénquima pulmonar normalmente aireado. La presencia de tres o más líneas B en un espacio intercostal, separadas (B1), corresponde a una moderada pérdida de aireación, resultado de la afectación intersticial. Las líneas B coalescentes (B2) aparecen con una pérdida de aireación grave,



Algoritmo 1 Algoritmo propuesto para la comprobación de la correcta posición del tubo endotraqueal¹⁶. IBSI: intubación bronquial selectiva inadvertida. TET: tubo endotraqueal; *Poco frecuente.

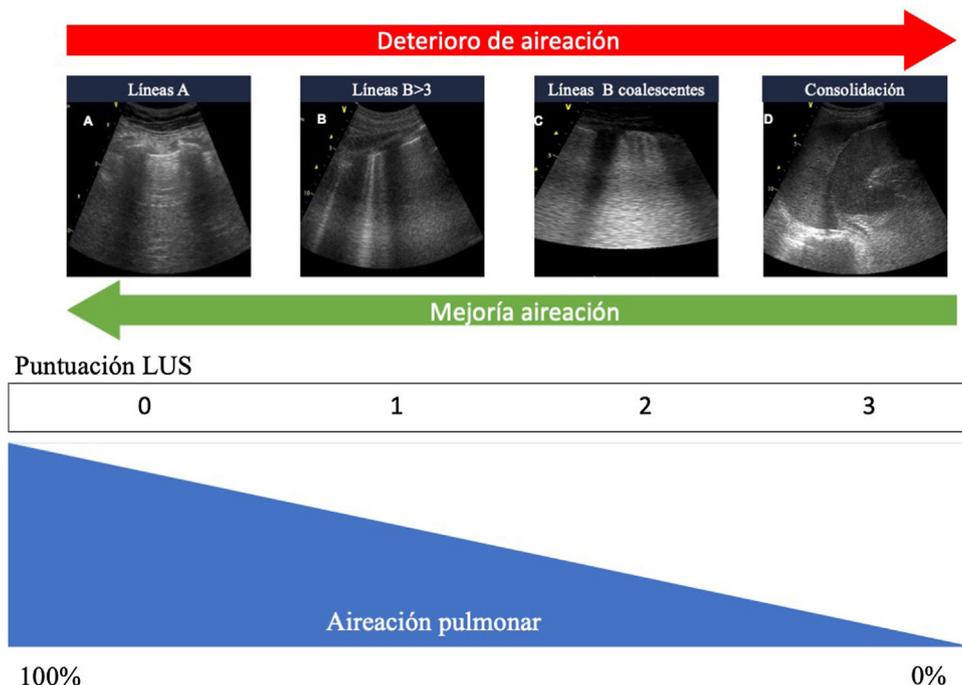


Figura 5 Patrones ecográficos de aireación pulmonar. A) Patrón de líneas A, aireación normal. B) $B \geq 3$, líneas B separadas que indica moderada pérdida de aireación. C) Líneas B coalescentes, pérdida grave de aireación. D) Patrón tisular o de consolidación, pérdida completa de aireación. A cada patrón le corresponde una puntuación para generar el Lung Ultrasound Score (LUS).

Tabla 2 Clasificación de la aireación pulmonar

	Clásica	Modificada
0: aireación normal	Líneas A (< 3 líneas B)	Líneas A (< 3 líneas B)
1: pérdida moderada	≥ Líneas B1, separadas	Ocupación por artefactos ≤ 50% de la pleural
2: pérdida grave	Líneas B2, coalescentes	Ocupación por artefactos > 50% de la pleural
3: pérdida completa	Patrón tisular	Patrón tisular

como resultado de la afectación alveolar. Cuando la pérdida de aireación es completa, observaremos un patrón de consolidación (C)¹⁹.

Dividiendo cada hemitórax en regiones y otorgando un valor numérico a cada patrón, se puede obtener un valor global. La clasificación más extendida analiza doce regiones torácicas (seis por hemitórax: superior e inferior en los cuadrantes anteriores, laterales y posteriores)¹⁹. Cada región recibe una puntuación en función del patrón ecográfico (de 0 a 3 puntos). Siguiendo esta clasificación, la puntuación global (*Global score* o *Lung Ultrasound Score* [LUS]) variará entre 0 (pulmones aireados) y 36 (pulmones con pérdida total de la aireación). De este modo, se pueden utilizar variaciones de esta puntuación para expresar tanto la pérdida de aireación como la re-aireación en diferentes situaciones clínicas^{19,20}.

Se han propuesto modificaciones sobre esta clasificación con el objetivo de mejorar la precisión en la valoración de la aireación pulmonar²¹. En este caso, seguiremos clasificando como normal un patrón A y como pérdida completa de aireación un patrón C. El grado de afectación entre estos dos extremos variará en función del compromiso de la línea pleural. Consideraremos que la pérdida de aireación es moderada cuando menos del 50% de la línea pleural esté afectada. Sin embargo, si encontramos artefactos (líneas B o consolidaciones subpleurales) en más del 50% de la línea pleural, consideraremos que existe una pérdida grave de aireación (tabla 2).

Distribución de la aireación pulmonar

La ecografía permite evaluar la distribución de la pérdida de aireación²². Esta información resulta útil para diferenciar dos fenotipos de SDRA en función de su morfología. En los pacientes con SDRA focal predomina la afectación en regiones posteroinferiores, con una pérdida grave o completa de la aireación, mientras que los campos pulmonares anteriores están relativamente respetados. Estos pacientes responden mejor al prono²³, mientras que niveles altos de presión positiva al final de la espiración (PEEP) pueden dar lugar a sobredistensión de las áreas con aireación conservada²⁴. Por el contrario, los pacientes con SDRA de distribución difusa, en los que la pérdida de aireación afecta de forma parcheada a todas las regiones pulmonares, responden mejor a las maniobras de reclutamiento y niveles más elevados de PEEP²⁴. Identificar los diferentes fenotipos de SDRA en función de su morfología es fundamental, ya que la elección

de la estrategia ventilatoria en función de la clasificación puede repercutir sobre el pronóstico clínico²⁵.

Utilizando los patrones ecográficos mencionados anteriormente (A, B1, B2 y C) calcularemos el LUS. Una puntuación ≥ 3 en regiones anteriores permite excluir con precisión la morfología focal²⁶, en comparación con la TC. Se han descrito otros dos métodos que emplean el mismo sistema de puntuación y que complementan la información con el estudio de campos laterales y posteriores²⁷.

Predicción de la respuesta al decúbito prono

Varios estudios han analizado la capacidad de la ecografía para predecir la respuesta al decúbito prono en pacientes con SDRA^{23,28,29}. La presencia de un patrón ecográfico de aireación normal en campos anteriores en supino podría predecir la respuesta al prono, definida como una mejoría en la oxigenación²³. Recientemente se han descrito resultados similares en pacientes con SDRA secundario a COVID-19²⁹. No obstante, aunque la ecografía parece predecir la re-aireación de las zonas dorsales tras la maniobra de decúbito prono, no ha sido capaz de predecir la mejoría de la oxigenación en todos los estudios³⁰, probablemente debido a los diferentes mecanismos implicados en la respuesta al prono y las limitaciones de la ecografía para cuantificar la aireación y la sobredistensión pulmonar³¹.

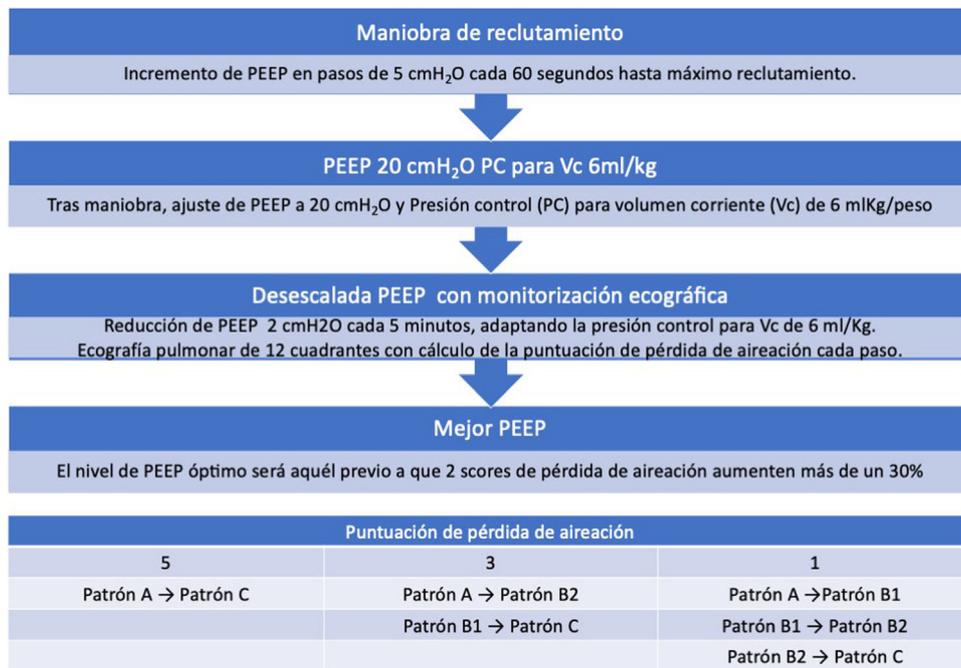
A raíz de la pandemia por SARS-CoV-2 ha crecido considerablemente el decúbito prono en pacientes con IRA hipoxémica que no reciben ventilación mecánica invasiva. En este tipo de pacientes también se ha propuesto que los cambios en los patrones de aireación pulmonar evaluados mediante ecografía podrían predecir la respuesta a prono³². Además, entre los pacientes con IRA hipoxémica que reciben oxigenoterapia de alto flujo, el éxito de la técnica parece relacionarse con una mayor disminución del LUS en las zonas dorsales en respuesta al prono³³.

Respuesta a maniobras de reclutamiento y titulación de la PEEP

Basándose en la alta sensibilidad y especificidad de la ecografía para la detección del colapso pulmonar³⁴, así como la capacidad para monitorizar los cambios en la aireación pulmonar en tiempo real, se ha propuesto su potencial utilidad para guiar las maniobras de reclutamiento y titulación de la PEEP³⁵. De hecho, se ha descrito una correlación entre el reclutamiento pulmonar inducido por la PEEP medido por las curvas de presión-volumen y la puntuación de re-aireación por ecografía¹⁹. Sin embargo, los cambios en la puntuación por ecografía no parecen asociarse con el reclutamiento evaluado mediante TC, considerado el *gold standard*³⁶, seguramente debido a que los cambios en la puntuación ecográfica se deben a cualquier modificación en la aireación y no solo a la aireación de regiones consolidadas.

Mediante el estudio de la aireación pulmonar en los 12 cuadrantes mencionados, podremos detectar los cambios inducidos por un aumento de la PEEP al observar una disminución progresiva de líneas B o la aparición de estas en zonas previamente consolidadas en caso de reclutamiento¹⁹.

Aunque de forma experimental, se ha propuesto un enfoque para titular la PEEP con ecografía en pacientes con SDRA³⁷ (algoritmo 2).



Algoritmo 2 Algoritmo propuesto para la titulación de la presión al final de la espiración (PEEP) guiada por ecografía pulmonar. La puntuación de pérdida de aireación se calcula mediante la suma de los cambios observados en los patrones ecográficos en cada uno de los 12 cuadrantes estudiados. Patrón A: patrón de líneas A. Patrón B1: patrón de líneas B separadas. Patrón B2: patrón de líneas B coalescentes; Patrón C: patrón de condensación pulmonar.

No existen signos ecográficos específicos que nos permita detectar la sobredistensión pulmonar ocasionada por el aumento de las presiones intratorácicas; sin embargo, algunos signos indirectos nos pueden inducir a sospecharlo. La disminución considerable o incluso la desaparición del deslizamiento pleural puede asociarse a una significativa alteración en la ventilación relacionada con PEEP elevadas³⁸, sobre todo si reaparece cuando se disminuye de nuevo la PEEP³⁹. En cualquier caso, existe una limitada evidencia disponible en el uso de la ecografía pulmonar para la titulación de la PEEP y no debe ser el único método para realizarla, ya que no permite una evaluación precisa de la hiperinsuflación pulmonar inducida por PEEP.

Utilidad de la ecografía en el *weaning* de la ventilación mecánica

El fracaso del *weaning* o la reintubación precoz se asocian a una elevada morbimortalidad⁴⁰, por lo que una evaluación dirigida al diagnóstico precoz de las causas que dificultan la desconexión de la ventilación mejorará el pronóstico de los pacientes. Las principales causas de fracaso del *weaning* pueden resumirse en tres grandes grupos: respiratorias, cardíacas y neuromusculares⁴¹. En ese sentido, el estudio mediante ecografía del corazón, los pulmones y la musculatura respiratoria puede ayudar a comprender el proceso fisiopatológico por el que un paciente fracasa en el proceso de *weaning* (fig. 6 y algoritmo 3).

Ecocardiografía

Durante la fase de *weaning*, el aumento de la precarga y la poscarga cardíacas causadas por el cambio de la presión intratorácica de positiva a negativa, el aumento de la secreción de catecolaminas y el trabajo respiratorio⁴² pueden inducir un edema pulmonar cardiogénico (*weaning induced pulmonary oedema* [WIPO]). Si bien la incidencia de WIPO no está bien establecida, se estima que puede estar involucrado en entre el 30% y el 87% de los fracasos^{43,44}.

El estudio mediante ecocardiografía de los parámetros de función diastólica (llenado ventricular y relajación miocárdica) y presiones de llenado del ventrículo izquierdo juega un papel primordial en la evaluación del fracaso del *weaning* de la ventilación mecánica⁴⁵. El estudio del flujo transmitral mediante Doppler pulsado y de la velocidad de desplazamiento del anillo mitral mediante Doppler tisular permite identificar las ondas E y e', respectivamente (fig. 6). La relación entre las ondas E/e' se ha sugerido como una medida para estimar la presión de llenado del ventrículo izquierdo⁴⁶, si bien los resultados son contradictorios⁴⁷.

El aumento del r el paso a respiración espontánea se verá reflejado en la ecocardiografía con un aumento significativo de la onda E⁴⁸. En pacientes con disfunción diastólica y ventrículos poco compliantes (onda e' < 10 cm/s) el aumento del retorno venoso puede provocar un aumento de la presión de llenado que se verá reflejado por aumento en la relación E/e'. Lamia et al. demostraron que una combinación de E/A > 0,95 y E/e' > 8,5 detectaba aquellos pacientes en los que la

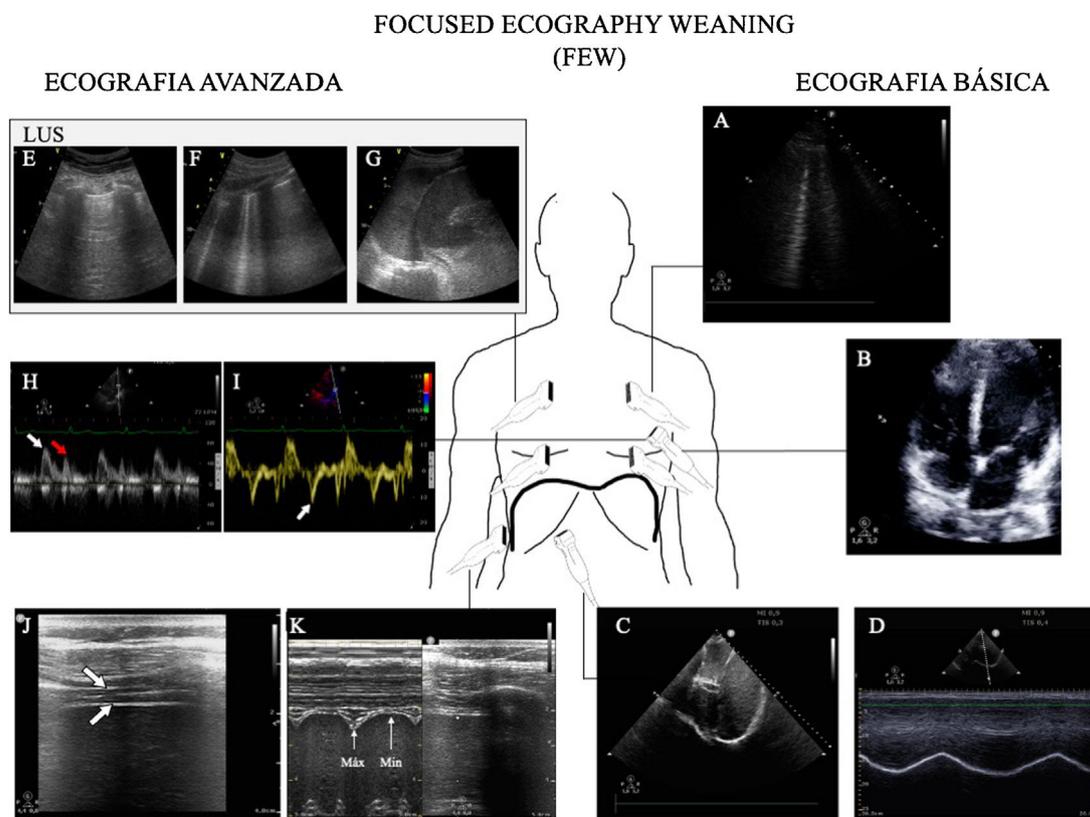


Figura 6 Principales exploraciones ecográficas utilizadas para el diagnóstico de la causa del fracaso de la retirada de la ventilación mecánica. Se dividen en exploraciones que precisan un conocimiento básico de ecografía y exploraciones que precisan un grado avanzado de formación en ecografía. A) Ecografía pulmonar con detección de un aumento ≥ 6 líneas B durante la prueba de respiración espontánea para el diagnóstico de edema pulmonar inducido por el *weaning* (WIPO). B) Ecografía cardíaca, plano apical 4 cámaras para estudio de la función sistólica del ventrículo izquierdo y el estudio de alteraciones estructurales del mismo (hipertrofia, dilatación, insuficiencia mitral grave). C) Estudio del diafragma mediante la excursión, en imagen en 2 dimensiones (ver [vídeo del material electrónico suplementario](#)). D) Estudio del diafragma mediante la excursión, imagen en modo M; obsérvese la onda generada por el desplazamiento diafragmático con los movimientos respiratorios (una excursión < 10 mm se considera patológica). E-G) Imágenes utilizadas para el cálculo del *Lung Ultrasound Score* (LUS) tal y como se describe en el texto. H) Estudio de la función diastólica, imagen de Doppler pulsado del flujo transmitral mostrando las ondas de llenado temprano (E, flecha blanca) y tardío (A, flecha roja). I) Estudio de función diastólica, imagen de Doppler tisular del anillo mitral lateral mostrando la onda e' (flecha blanca). J) Imagen en modo bidimensional del diafragma en la zona de aposición sobre el noveno espacio intercostal; el diafragma es la estructura localizada ente las dos líneas hiperecogénicas identificadas con la flechas (superior pleura, inferior diafragma, [vídeo del material electrónico suplementario](#)). K) Imagen en modo M para el estudio de la fracción de engrosamiento diafragmática identificando el grosor máximo en la inspiración y el mínimo en la espiración.

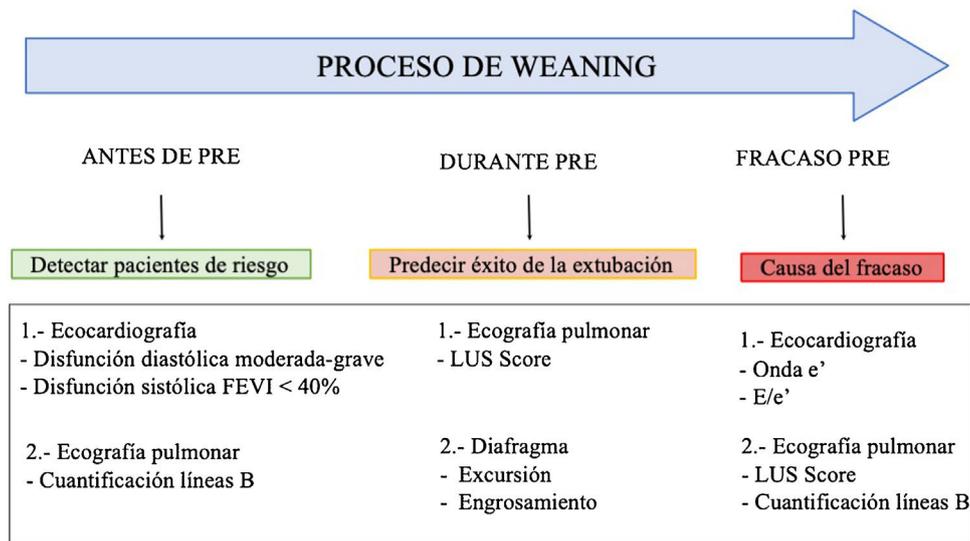
prueba de respiración espontánea (PRE) inducía un aumento de la presión capilar⁴⁹. Un metaanálisis publicado recientemente ha demostrado que los pacientes que fracasan en el *weaning* presentan velocidades de onda E más elevadas y de onda e' menores, con ratio E/e' significativamente más elevada que los pacientes que completan la PRE con éxito⁵⁰. Sin embargo, los estudios incluidos en el análisis muestran valores de las diferentes velocidades muy heterogéneos, por lo que no se puede establecer un punto de corte.

La función sistólica, estudiada mediante la fracción de eyección, no se ha asociado de forma significativa con el fracaso del *weaning*⁵⁰. Sin embargo, como todos los resultados que hagan referencia a la fracción de eyección en pacientes críticos, deben interpretarse con cautela, ya que el parámetro depende en gran medida de las condiciones de carga. Otros parámetros, como la onda S' o el *strain*, podrían

tener un papel importante en el contexto del *weaning* de la ventilación mecánica.

Ecografía pulmonar

En los pacientes sometidos a ventilación mecánica, el inicio de la respiración espontánea se asocia con cierta pérdida de aireación pulmonar⁵¹, ya sea por una ocupación de los alvéolos por edema pulmonar en el contexto de WIPO o por un desreclutamiento alveolar por la pérdida de la PEEP o asociada a una disfunción diafragmática. La utilización de la ecografía permite objetivar y monitorizar esta pérdida de aireación de forma objetiva mediante el LUS. El cálculo del LUS a los 60 minutos del inicio de la PRE ha demostrado ser una herramienta precisa para predecir la aparición de insuficiencia respiratoria posterior a la



Algoritmo 3 Temporización y hallazgos ecográficos en el proceso de *weaning*. FEVI: fracción de eyección del ventrículo izquierdo; LUS: *Lung Ultrasound Score*; PRE: prueba de respiración espontánea.

extubación⁵¹. Los pacientes que presentarán insuficiencia respiratoria tras la extubación tienen puntuaciones mayores en el LUS, independientemente de la causa subyacente. El límite identificado para predecir un riesgo del 85% de fracaso posterior a la extubación es LUS > 17, mientras que un valor < 13 indica un riesgo insignificante de desarrollar un fracaso posterior a la extubación. Cabe decir que la puntuación LUS tal y como se define, en la práctica clínica, está limitada por su complejidad y por el tiempo necesario para su cálculo preciso.

La ecografía pulmonar también es útil para detectar el WIPO. En este caso, el estudio reducido a los 4 cuadrantes torácicos anteriores del BLUE Protocol, con la cuantificación de las líneas B de cada cuadrante antes y al final de la PRE, permite el diagnóstico de WIPO con una sensibilidad del 88% y una especificidad del 88% si la cantidad de líneas B aumenta en ≥ 6 durante la PRE⁵².

Ecografía diafragmática

El diafragma es el principal músculo respiratorio y tiene un papel vital en la ventilación. La evidencia acumulada sugiere que la mayoría de los pacientes críticos sometidos a ventilación mecánica desarrollan algún grado de disfunción diafragmática y juegan un importante papel en el fracaso del *weaning* de la ventilación mecánica⁵³.

Si bien la medida de la presión transdiafragmática se considera el *gold standard* para el diagnóstico de disfunción diafragmática, la ecografía permite la visualización del diafragma y su variación durante los ciclos respiratorios de forma no invasiva. Se han descrito dos parámetros ultrasonográficos diferentes para evaluar la funcionalidad diafragmática (fig. 6 y vídeos 3 y 4 del material electrónico suplementario).

El primer parámetro es la medición de la excursión diafragmática⁵⁴. La excursión se puede medir fácilmente con una sonda de 3 a 5 MHz colocada en la línea medio-clavicular

debajo del margen costal, orientada dorsalmente para visualizar la excursión de la cúpula diafragmática usando el hígado (o el bazo, en el lado izquierdo) como ventana acústica (fig. 6). Los pacientes con disfunción diafragmática, definida por un valor de excursión < 10 mm para cualquiera de los hemidiafragmas, tienen un mayor tiempo de *weaning* y una mayor frecuencia de reintubación⁵⁵. Recientemente una revisión sistemática⁵⁶ concluye que la excursión diafragmática puede predecir el fracaso del *weaning* con una *odds ratio* diagnóstica de 9,14 (IC 95%: 4,74-17,64).

Algunos estudios han propuesto integrar la excursión diafragmática en un índice que la relaciona con la frecuencia respiratoria⁵⁷. Este índice (frecuencia respiratoria/excursión diafragmática en milímetros) ha demostrado mejores resultados que la evaluación aislada de la excursión diafragmática.

El segundo parámetro describe el engrosamiento del músculo diafragmático durante la inspiración. Colocando una sonda de 10 MHz sobre el noveno espacio intercostal, en la zona de aposición del diafragma, podemos medir el grosor diafragmático máximo (al final de la inspiración) y mínimo (al final de la espiración) calculando la fracción de engrosamiento ([grosor al final de la inspiración – grosor al final de la espiración]/grosor al final de la espiración)⁵⁸. Una fracción de engrosamiento del 30%-36% se asocia con el éxito del *weaning* con una *odds ratio* diagnóstica de 42,6 (IC 95%: 17,6-103,0)^{59,60}.

En la práctica clínica, al seleccionar una u otra medida de evaluación diafragmática deberíamos tener en consideración la modalidad de la PRE. Se ha demostrado que en pacientes ventilados en presión soporte el engrosamiento diafragmático se correlaciona con parámetros invasivos de presión diafragmática, siendo un indicador fidedigno del esfuerzo respiratorio, mientras que la excursión no se correlaciona con el esfuerzo respiratorio, reflejando únicamente el desplazamiento pasivo del diafragma por la presión proporcionada por el ventilador, por lo que solo debería usarse en aquellos pacientes en que la PRE se realice en tubo en T⁶¹.

Limitaciones de la ecografía en el paciente con IRA y el weaning de la ventilación mecánica

Es importante tener en cuenta las limitaciones de la ecografía al interpretar los hallazgos. En primer lugar, la técnica es operador-dependiente y requiere un grado de formación que puede ser básico o avanzado⁶², mientras que en el estudio básico mediante el BLUE Protocol, la estimación visual de la función sistólica del ventrículo izquierdo o la excursión diafragmática requieren niveles básicos de formación, y la valoración cuantitativa de la aireación pulmonar, el estudio de la vía aérea, del engrosamiento diafragmático o de las presiones de llenado del ventrículo izquierdo necesitan un grado avanzado de formación⁶³.

Además, la ecografía pulmonar permite visualizar las alteraciones y los artefactos que estén en contacto directo con la pleural, de manera que no es posible visualizar algunas lesiones profundas que no tengan traducción sobre la línea pleural. Por lo tanto, los hallazgos deben interpretarse con precaución y siempre teniendo en cuenta el contexto clínico⁶⁴.

La exploración puede verse dificultada por las características anatómicas del paciente o por la presencia de dispositivos artificiales o de enfisema subcutáneo. Además, la visualización de la pleura está limitada por la amplitud del espacio intercostal.

Por último, una de las principales limitaciones de la ecografía, sobre todo al evaluar el reclutamiento, es la ausencia de signos específicos que nos permita detectar la sobredistensión pulmonar ocasionada por el aumento de las presiones intratorácicas¹⁹.

Financiación

No se recibió financiación para este trabajo y su publicación.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no tienen conflicto de intereses.

Anexo. Material adicional

Se puede consultar material adicional a este artículo en su versión electrónica disponible en [doi:10.1016/j.medin.2023.03.009](https://doi.org/10.1016/j.medin.2023.03.009).

Bibliografía

- Xirouchaki N, Magkanas E, Vaporidi K, Kondili E, Platakaki M, Patrianakos A, et al. Lung ultrasound in critically ill patients: Comparison with bedside chest radiography. *Intensive Care Med.* 2011;37:1488–93, <http://dx.doi.org/10.1007/S00134-011-2317-Y>.
- Lichtenstein DA, Mezière GA. Relevance of lung ultrasound in the diagnosis of acute respiratory failure: The BLUE Protocol. *Chest.* 2008;134:117–25, <http://dx.doi.org/10.1378/chest.07-2800>.
- Jalli R, Sefidbakht S, Jafari SH. Value of ultrasound in diagnosis of pneumothorax: A prospective study. *Emerg Radiol.* 2013;20:131–4, <http://dx.doi.org/10.1007/S10140-012-1091-7>.
- Prada G, Vieillard-Baron A, Martin AK, Hernandez A, Mookadam F, Ramakrishna H, et al. Tracheal lung, and diaphragmatic applications of M-mode ultrasonography in anesthesiology and critical care. *J Cardiothorac Vasc Anesth.* 2021;35:310–22, <http://dx.doi.org/10.1053/J.JVCA.201911051>.
- Biswas A, Lascano JE, Mehta HJ, Faruqi I. The utility of the «Shred Sign» in the diagnosis of acute respiratory distress syndrome resulting from multifocal pneumonia. *Am J Respir Crit Care Med.* 2017;195:e20–2, <http://dx.doi.org/10.1164/RCCM.201608-1671M>.
- Copetti R, Cominotto F, Meduri S, Orso D. The «Survived Lung»: An ultrasound sign of «bubbly consolidation» pulmonary infarction. *Ultrasound Med Biol.* 2020;46:2546–50, <http://dx.doi.org/10.1016/J.ULTRASMEDBIO.202004036>.
- Alqahtani JS, Oyelade T, Sreedharan J, Aldhahir AM, Alghamdi SM, Alrajeh AM, et al. Diagnostic and clinical values of non-cardiac ultrasound in COPD: A systematic review. *BMJ Open Respir Res.* 2020;7:e000717, <http://dx.doi.org/10.1136/BMJRESP-2020-000717>.
- Fraile Gutiérrez V, Ayuela Azcárate JM, Pérez-Torres D, Zapata L, Rodríguez Yakushev A, Ochagavía A. Ecografía en el manejo del paciente crítico con infección por SARS-CoV-2 (COVID-19): una revisión narrativa. *Med Intensiva.* 2020;44:551, <http://dx.doi.org/10.1016/J.MEDIN.202004016>.
- Volpicelli G, Cardinale L, Fracalini T, Calandri M, Piatti C, Geninatti C, et al. Descriptive analysis of a comparison between lung ultrasound and chest radiography in patients suspected of COVID-19. *Ultrasound J.* 2021;13:11, <http://dx.doi.org/10.1186/S13089-021-00215-9>.
- Volpicelli G, Gargani L. Sonographic signs and patterns of COVID-19 pneumonia. *Ultrasound J.* 2020;12:22, <http://dx.doi.org/10.1186/S13089-020-00171-W>.
- Gil-Rodríguez J, Pérez de Rojas J, Aranda-Laserna P, Benavente-Fernández A, Martos-Ruiz M, Peregrina-Rivas JA, et al. Ultrasound findings of lung ultrasonography in COVID-19: A systematic review. *Eur J Radiol.* 2022;148:110156, <http://dx.doi.org/10.1016/J.EJRAD.2022.110156>.
- Millington SJ, Koenig S, Mayo P, Volpicelli G. Lung ultrasound for patients with coronavirus disease 2019 pulmonary disease. *Chest.* 2021;159:205–11, <http://dx.doi.org/10.1016/J.CHEST.2020082054>.
- Sotoodehnia M, Rafiemanesh H, Mirfazaelian H, Safaie A, Baratlou A. Ultrasonography indicators for predicting difficult intubation: A systematic review and meta-analysis. *BMC Emerg Med.* 2021;21:76, <http://dx.doi.org/10.1186/S12873-021-00472-W>.
- Abraham S, Himarani J, Mary Nancy S, Shanmugasundaram S, Krishnakumar Raja VB. Ultrasound as an assessment method in predicting difficult intubation: A prospective clinical study. *J Maxillofac Oral Surg.* 2018;17:563–9, <http://dx.doi.org/10.1007/s12663-018-1088-1>.
- Chou EH, Dickman E, Tsou PY, Tessaro M, Tsai YM, Ma MHM, et al. Ultrasonography for confirmation of endotracheal tube placement: A systematic review and meta-analysis. *Resuscitation.* 2015;90:97–103, <http://dx.doi.org/10.1016/J.RESUSCITATION.201502013>.
- Senussi MH, Kantamneni PC, Latifi M, Omranian AP, Krveshi L, Barakat AF, et al. Protocolized tracheal and thoracic ultrasound for confirmation of endotracheal intubation and positioning: A multicenter observational study. *Crit Care Explor.* 2020;2:e0225, <http://dx.doi.org/10.1097/CCE.0000000000000225>.
- Brown CA, Bair AE, Pallin DJ, Walls RM. Techniques, success, and adverse events of emergency department adult intubations. *Ann Emerg Med.* 2015;65:363–70.e1, <http://dx.doi.org/10.1016/J.ANNEMERGMED.2014.10.036>.
- Tanigawa K, Takeda T, Goto E, Tanaka K. The efficacy of esophageal detector devices in verifying tracheal tube placement: A randomized cross-over study of out-of-

- hospital cardiac arrest patients. *Anesth Analg*. 2001;92:375–8, <http://dx.doi.org/10.1097/0000539-200102000-00018>.
19. Bouhemad B, Brisson H, le-Guen M, Arbelot C, Lu Q, Rouby JJ. Bedside ultrasound assessment of positive end-expiratory pressure-induced lung recruitment. *Am J Respir Crit Care Med*. 2011;183:341–7, <http://dx.doi.org/10.1164/RCCM.201003-0369OC>.
 20. Bouhemad B, Liu ZH, Arbelot C, Zhang M, Ferarri F, le-Guen M, et al. Ultrasound assessment of antibiotic-induced pulmonary re-aeration in ventilator-associated pneumonia. *Crit Care Med*. 2010;38:84–92, <http://dx.doi.org/10.1097/CCM.0B013E3181B08CDB>.
 21. Mongodi S, Bouhemad B, Orlando A, Stella A, Tavazzi G, Via G, et al. Modified lung ultrasound score for assessing and monitoring pulmonary aeration. *Ultraschall Med*. 2017;38:530–7, <http://dx.doi.org/10.1055/S-0042-120260>.
 22. Bouhemad B, Mongodi S, Via G, Rouquette I. Ultrasound for «lung monitoring» of ventilated patients. *Anesthesiology*. 2015;122:437–47, <http://dx.doi.org/10.1097/ALN.0000000000000558>.
 23. Prat G, Guinard S, Bizien N, Nowak E, Tonnelier JM, Alavi Z, et al. Can lung ultrasonography predict prone positioning response in acute respiratory distress syndrome patients? *J Crit Care*. 2016;32:36–41, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcrc.2015.12.015>.
 24. Constantin JM, Grasso S, Chanques G, Aurfot S, Futier E, Sebbane M, et al. Lung morphology predicts response to recruitment maneuver in patients with acute respiratory distress syndrome. *Crit Care Med*. 2010;38:1108–17, <http://dx.doi.org/10.1097/CCM.0B013E3181D451EC>.
 25. Constantin JM, Jabaudon M, Lefrant JY, Jaber S, Quenot JP, Langeron O, et al. Personalised mechanical ventilation tailored to lung morphology versus low positive end-expiratory pressure for patients with acute respiratory distress syndrome in France (the LIVE study): A multicentre, single-blind, randomised controlled trial. *Lancet Respir Med*. 2019;7:870–80, [http://dx.doi.org/10.1016/S2213-2600\(19\)30138-9](http://dx.doi.org/10.1016/S2213-2600(19)30138-9).
 26. Costamagna A, Pivetta E, Goffi A, Steinberg I, Arina P, Mazzeo AT, et al. Clinical performance of lung ultrasound in predicting ARDS morphology. *Ann Intensive Care*. 2021;11:51, <http://dx.doi.org/10.1186/S13613-021-00837-1>.
 27. Pierrakos C, Smit MR, Pisani L, Paulus F, Schultz MJ, Constantin JM, et al. Lung ultrasound assessment of focal and non-focal lung morphology in patients with acute respiratory distress syndrome. *Front Physiol*. 2021;12:730857, <http://dx.doi.org/10.3389/FPHYS.2021.730857>.
 28. Wang XT, Ding X, Zhang HM, Chen H, Su LX, Liu DW, Chinese Critical Ultrasound Study Group (CCUSG). Lung ultrasound can be used to predict the potential of prone positioning and assess prognosis in patients with acute respiratory distress syndrome. *Crit Care*. 2016;20:385, <http://dx.doi.org/10.1186/S13054-016-1558-0>.
 29. Heldeweg MLA, Mousa A, van Ekeren J, Lieveveld AWE, Walburgh-Schmidt RS, Smit JM, et al. Lung ultrasound to predict gas-exchange response to prone positioning in COVID-19 patients: A prospective study in pilot and confirmation cohorts. *J Crit Care*. 2023;73:154173, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcrc.2022.154173>.
 30. Haddam M, Zieskiewicz L, Perbet S, Baldovini A, Guervilly C, Arbelot C, et al. Lung ultrasonography for assessment of oxygenation response to prone position ventilation in ARDS. *Intensive Care Med*. 2016;42:1546–56, <http://dx.doi.org/10.1007/S00134-016-4411-7>.
 31. Guerin C, Gattinoni L. Assessment of oxygenation response to prone position ventilation in ARDS by lung ultrasonography. *Intensive Care Med*. 2016;42:1601–3, <http://dx.doi.org/10.1007/s00134-016-4440-2>.
 32. Avdeev SN, Nekludova GV, Trushenko NV, Tsareva NA, Yaroshetskiy AI, Kosanovic D. Lung ultrasound can predict response to the prone position in awake non-intubated patients with COVID-19 associated acute respiratory distress syndrome. *Crit Care*. 2021;25:35, <http://dx.doi.org/10.1186/S13054-021-03472-1>.
 33. Ibarra-Estrada M, Gamero-Rodríguez MJ, García-de-Acilu M, Roca O, Sandoval-Plascencia L, Aguirre-Avalos G, et al. Lung ultrasound response to awake prone positioning predicts the need for intubation in patients with COVID-19 induced acute hypoxemic respiratory failure: An observational study. *Crit Care*. 2022;26:189, <http://dx.doi.org/10.1186/s13054-022-04064-3>.
 34. Volpicelli G, Elbarbary M, Blaivas M, Lichtenstein DA, Mathis G, Kirkpatrick AW, et al. International evidence-based recommendations for point-of-care lung ultrasound. *Intensive Care Med*. 2012;38:577–91, <http://dx.doi.org/10.1007/S00134-012-2513-4>.
 35. Tusman G, Acosta CM, Costantini M. Ultrasonography for the assessment of lung recruitment maneuvers. *Crit Ultrasound J*. 2016;8:8, <http://dx.doi.org/10.1186/S13089-016-0045-9>.
 36. Chiumello D, Mongodi S, Algieri I, Vergani GL, Orlando A, Via G, et al. Assessment of lung aeration and recruitment by CT scan and ultrasound in acute respiratory distress syndrome patients. *Crit Care Med*. 2018;46:1761–8, <http://dx.doi.org/10.1097/CCM.0000000000003340>.
 37. Tang KQ, Yang SL, Zhang B, Liu HX, Ye DY, Zhang HZ, et al. Ultrasonic monitoring in the assessment of pulmonary recruitment and the best positive end-expiratory pressure. *Medicine (Baltimore)*. 2017;96:e8168, <http://dx.doi.org/10.1097/MD.00000000000008168>.
 38. Markota A, Golub J, Svenšek F, Sinkovič A, Markota A, Stožer A, et al. Absence of lung sliding is not a reliable sign of pneumothorax in patients with high positive end-expiratory pressure. *Am J Emerg Med*. 2016;34:2034–6, <http://dx.doi.org/10.1016/J.AJEM.201607032>.
 39. Pesenti A, Musch G, Lichtenstein D, Mojoli F, Amato MBP, Cinnella G, et al. Imaging in acute respiratory distress syndrome. *Intensive Care Med*. 2016;42:686–98, <http://dx.doi.org/10.1007/S00134-016-4328-1>.
 40. Béduneau G, Pham T, Schortgen F, Piquilloud L, Zogheib E, Jonas M, et al. Epidemiology of weaning outcome according to a new definition. The WIND study. *Am J Respir Crit Care Med*. 2017;195:772–83, <http://dx.doi.org/10.1164/rccm.201602-0320OC>.
 41. Boles JM, Bion J, Connors A, Herridge M, Marsh B, Melot C, et al. Weaning from mechanical ventilation. *Eur Respir J*. 2007;29:1033–56, <http://dx.doi.org/10.1183/09031936.00010206>.
 42. Lemaire F, Teboul JL, Cinotti L, Giotto G, Abrouk F, Steg G, et al. Acute left ventricular dysfunction during unsuccessful weaning from mechanical ventilation. *Anesthesiology*. 1988;69:171–9, <http://dx.doi.org/10.1097/0000542-198808000-00004>.
 43. Zapata L, Vera P, Roglan A, Gich I, Ordonez-Llanos J, Betbesé AJ. B-type natriuretic peptides for prediction and diagnosis of weaning failure from cardiac origin. *Intensive Care Med*. 2011;37:477–85, <http://dx.doi.org/10.1007/s00134-010-2101-4>.
 44. Dres M, Rozenberg E, Morawiec E, Mayaux J, Delemazure J, Similowski T, et al. Diaphragm dysfunction, lung aeration loss and weaning-induced pulmonary oedema in difficult-to-wean patients. *Ann Intensive Care*. 2021;11:99, <http://dx.doi.org/10.1186/S13613-021-00886-6>.
 45. Suárez JC, López P, Mancebo J, Zapata L. Diastolic dysfunction in the critically ill patient. *Med Intensiva*. 2016;40:499–510, <http://dx.doi.org/10.1016/j.medin.2016.06.006>.
 46. Combes A, Arnoult F, Trouillet JL. Tissue Doppler imaging estimation of pulmonary artery occlusion pressure

- in ICU patients. *Intensive Care Med.* 2004;30:75–81, <http://dx.doi.org/10.1007/S00134-003-2039-X>.
47. Mercado P, Maizel J, Marc J, Beyls C, Zerbib Y, Zogheib E, et al. Doppler Echocardiographic Indices Are Specific But Not Sensitive to Predict Pulmonary Artery Occlusion Pressure in Critically Ill Patients Under Mechanical Ventilation. *Crit Care Med.* 2021;49:e1–10, <http://dx.doi.org/10.1097/CCM.0000000000004702>.
 48. Roche-Campo F, Bedet A, Vivier E, Brochard L, Mekontso Dessap A. Cardiac function during weaning failure: The role of diastolic dysfunction. *Ann Intensive Care.* 2018;8:2, <http://dx.doi.org/10.1186/s13613-017-0348-4>.
 49. 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;37:1696–701, <http://dx.doi.org/10.1097/CCM.0b013e31819f13d0>.
 50. Sanfilippo F, di Falco D, Noto A, Santonocito C, Morelli A, Bignami E, et al. Association of weaning failure from mechanical ventilation with transthoracic echocardiography parameters: A systematic review and meta-analysis. *Br J Anaesth.* 2021;126:319–30, <http://dx.doi.org/10.1016/j.bja.2020.07.059>.
 51. Soummer A, Perbet S, Brisson H, Arbelot C, Constantin JM, Lu Q, et al. Ultrasound assessment of lung aeration loss during a successful weaning trial predicts postextubation distress. *Crit Care Med.* 2012;40:2064–72, <http://dx.doi.org/10.1097/CCM.0B013E31824E68AE>.
 52. Ferré A, Guillot M, Lichtenstein D, Mezière G, Richard C, Teboul JL, et al. Lung ultrasound allows the diagnosis of weaning-induced pulmonary oedema. *Intensive Care Med.* 2019;45:601–8, <http://dx.doi.org/10.1007/s00134-019-05573-6>.
 53. Dres M, Goligher EC, Heunks LMA, Brochard LJ. Critical illness-associated diaphragm weakness. *Intensive Care Med.* 2017;43:1441–52, <http://dx.doi.org/10.1007/s00134-017-4928-4>.
 54. Lerolle N, Guérot E, Dimassi S, Zegdi R, Faisy C, Fagon JY, et al. Ultrasonographic diagnostic criterion for severe diaphragmatic dysfunction after cardiac surgery. *Chest.* 2009;135:401–7, <http://dx.doi.org/10.1378/CHEST.08-1531>.
 55. Kim WY, Suh HJ, Hong SB, Koh Y, Lim CM. Diaphragm dysfunction assessed by ultrasonography: Influence on weaning from mechanical ventilation. *Crit Care Med.* 2011;39:2627–30, <http://dx.doi.org/10.1097/CCM.0B013E3182266408>.
 56. Mahmoodpoor A, Fouladi S, Ramouz A, Shadvar K, Ostadi Z, Soleimanpour H. Diaphragm ultrasound to predict weaning outcome: Systematic review and meta-analysis. *Anaesthesiol Intensive Ther.* 2022;54:164–74, <http://dx.doi.org/10.5114/ait.2022.117273>.
 57. Spadaro S, Grasso S, Mauri T, dalla Corte F, Alvisi V, Ragazzi R, et al. Can diaphragmatic ultrasonography performed during the T-tube trial predict weaning failure? The role of diaphragmatic rapid shallow breathing index. *Crit Care.* 2016;20:305, <http://dx.doi.org/10.1186/s13054-016-1479-y>.
 58. Summerhill EM, el-Sameed YA, Glidden TJ, McCool FD. Monitoring recovery from diaphragm paralysis with ultrasound. *Chest.* 2008;133:737–43, <http://dx.doi.org/10.1378/CHEST.07-2200>.
 59. Dinino E, Gartman EJ, Sethi JM, McCool FD. Diaphragm ultrasound as a predictor of successful extubation from mechanical ventilation. *Thorax.* 2014;69:423–7, <http://dx.doi.org/10.1136/THORAXJNL-2013-204111>.
 60. Ferrari G, de Filippi G, Elia F, Panero F, Volpicelli G, Aprà F. Diaphragm ultrasound as a new index of discontinuation from mechanical ventilation. *Crit Ultrasound J.* 2014;6:1–6, <http://dx.doi.org/10.1186/2036-7902-6-8>.
 61. Umbrello M, Formenti P, Longhi D, Galimberti A, Piva I, Pezzi A, et al. Diaphragm ultrasound as indicator of respiratory effort in critically ill patients undergoing assisted mechanical ventilation: A pilot clinical study. *Crit Care.* 2015;19:161, <http://dx.doi.org/10.1186/S13054-015-0894-9>.
 62. Ayuela Azcárate JM, Clau-Terré F, Vicho Pereira R, Guerrero de Mier M, Carrillo López A, Ochagavia A, et al. [Consensus document on ultrasound training in Intensive Care Medicine. Care process, use of the technique and acquisition of professional skills]. *Med Intensiva.* 2014;38:33–40, <http://dx.doi.org/10.1016/J.MEDIN.2013.07.003>.
 63. Robba C, Wong A, Poole D, al Tayar A, Arntfield RT, Chew MS, et al. Basic ultrasound head-to-toe skills for intensivists in the general and neuro intensive care unit population: Consensus and expert recommendations of the European Society of Intensive Care Medicine. *Intensive Care Med.* 2021;47:1347–67, <http://dx.doi.org/10.1007/S00134-021-06486-Z>.
 64. Lichtenstein DA. BLUE-protocol and FALLS-protocol: Two applications of lung ultrasound in the critically ill. *Chest.* 2015;147:1659–70, <http://dx.doi.org/10.1378/CHEST.14-1313>.