

EVALUACIÓN DE LA PERFUSIÓN PULMONAR MEDIANTE CAPNOGRAFÍA VOLUMÉTRICA DURANTE LA PRUEBA DE VENTILACIÓN ESPONTÁNEA

EN PACIENTES DEL HOSPITAL DE CLÍNICAS "DR. MANUEL QUINTELA", URUGUAY EN EL AÑO 2021

CENTRO DE TRATAMIENTO INTENSIVO DEL HOSPITAL DE CLÍNICAS "DR. MANUEL
QUINTELA", FACULTAD DE MEDICINA, UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA.
MONTEVIDEO, URUGUAY. JULIO-OCTUBRE, 2023
N° DE REGISTRO MSP: 8259428

GRUPO N° 57

ORIENTADORES:
DR. BRIVA, ARTURO²
DR. CUELLO, SEBASTIÁN²

BR. ALMEIDA, LUCIANA SOFÍA¹
BR. DELGADO, JUAN IGNACIO¹
BR. GUTIERREZ, JUAN IGNACIO¹
BR. SANGUINETTI, MARÍA CLARA¹
BR. SELLANES, SOFÍA VICTORIA¹
BR. SUÁREZ, FLORENCIA¹



HOSPITAL DE CLINICAS
Dr. Manuel Quintela



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY

ÍNDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN	3
1.INTRODUCCIÓN	4
1.1 ASISTENCIA VENTILATORIA MECÁNICA Y “WEANING”	4
1.2 PRUEBA DE VENTILACIÓN ESPONTÁNEA	4
1.3 RELACIÓN VENTILACIÓN - PERFUSIÓN	5
1.4 ZONAS DE WEST	6
1.5 CAPNOGRAFÍA VOLUMÉTRICA	8
2.OBJETIVOS	9
3.METODOLOGÍA	9
3.1 CONSIDERACIONES ÉTICAS	11
5. RESULTADOS	12
6.DISCUSIÓN	14
7.CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS	16
8.REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	18
10.ANEXOS	19
10.1 CONSENTIMIENTO INFORMADO 2021	19
10.2 RESOLUCIÓN DE COMITÉ DE ÉTICA 2021	22

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. ZONAS DE WEST	7
FIGURA 2. FASES DEL CAPNOGRAMA VOLUMÉTRICO	8
FIGURA 3. CAMBIOS EN LA PENDIENTE DE LA FASE DOS CON CAMBIOS EN LA PERFUSIÓN PULMONAR	8
FIGURA 4. EQUIPO A UTILIZAR, CAPNOGRAMA Y DETALLE	10
FIGURA 5. PENDIENTE DE FASE II, ÁNGULO II Y ANGULO I EN FUNCIÓN DEL TIEMPO, PACIENTES I-VI	12
FIGURA 6. PENDIENTE DE LA FASE II EN PREPVE, PVE Y POSPVE, PACIENTES III Y IV	13
FIGURA 7. PENDIENTE DE LA FASE III EN PREPVE, PVE Y POSPVE, PACIENTES III Y IV	13

RESUMEN

La asistencia ventilatoria mecánica (AVM) es un tratamiento temporal que se asocia a complicaciones, por lo que uno de los objetivos en los centros de tratamiento intensivo (CTI) es encontrar el momento óptimo para desvincular al paciente, minimizando las probabilidades de fallo y evitando la sobreexposición al tratamiento. Si bien se han elaborado protocolos que demuestran una mejoría en los resultados, algunos criterios a ser incluidos en la desvinculación continúan siendo discutidos, por ello la identificación de factores de riesgo de fallo en la extubación implicaría una gran ayuda para optimizar el destete.

En la presente investigación se monitorizaron variables vinculadas a la hemodinamia pulmonar, estudiadas a partir de capnografía volumétrica (VCAP), durante la prueba de ventilación espontánea (PVE). Para ello se dispuso de material confeccionado en el marco de investigaciones previas del servicio, incluyendo registros audiovisuales de un grupo de 6 pacientes neurocríticos que se encontraban bajo AVM en el CTI del Hospital de Clínicas. Estos registros fueron analizados con ImageJ y Geogebra, se interpretaron sus modificaciones a lo largo de una serie de intervenciones planificadas, para establecer su relación con cambios en la relación V/Q de estos pacientes. Se plantearon hipótesis que pretenden explicar los mecanismos involucrados en las variaciones observadas y contextualizarlos dentro de la práctica diaria de la medicina intensiva.

En términos generales se logró incorporar los datos aportados por la VCAP en la monitorización de la hemodinamia pulmonar en pacientes sometidos a AVM durante la PVE. En relación al bajo número de pacientes incorporados en el estudio, al tratarse de un plan piloto se lo consideró como un número mínimo adecuado para identificar problemas potenciales de registro y medición de datos que servirán para un etapa posterior en la que se busque incorporar mayor cantidad de pacientes al estudio.

PALABRAS CLAVE: Capnograma volumétrico - Prueba de ventilación espontánea - Perfusión pulmonar - Asistencia ventilación mecánica.

ABSTRACT

Mechanical ventilation (MV) is a temporary treatment associated with complications, therefore, in order to reduce extubation failure and avoid overexposure to treatment, finding the optimal moment to wean patients is a goal at intensive care units (ICUs). The development of extubation protocols have shown improved results, although some criteria to be included in those protocols continue to be discussed, therefore the identification of risk factors for extubation failure would imply a great help to optimize the process of extubation.

Variables vinculated to pulmonary hemodynamics were monitorized in this study, as from volumetric capnography (VCAP), during the spontaneous breathing trial (SBT). For this purpose, material prepared in the framework of service previous investigations was used, including audiovisual recordings of a group of 6 neurocritical patients who were under MV in the UCI of the Hospital de Clínicas. These records were analyzed with ImageJ and Geogebra, its variations were interpreted whitin a serires of planified interventions, to establish its relation with variations of ventilation-perfusion relationship. Hypotheses were proposed that attempt to explain mechanisms involved in those variations, and contextualize them whitin daily practice at ICUs.

Overall, we were able to incorporate data provided by VCAP in the monitorization of undergoing MV patients pulmonary hemodynamics, during SBT. In relation to the low number of patients included in the study, since this was a pilot plan, we consider it to be an adequate minimum number to identify potential problems in the data recording and measurement that will be useful for a later stage, in which a greater number of patients could be included.

KEYWORDS: Volumetric capnogram - Spontaneous breathing trial - Pulmonar perfusion - Mechanical ventilation -

1.INTRODUCCIÓN

1.1 ASISTENCIA VENTILATORIA MECÁNICA Y “WEANING”

La asistencia ventilatoria mecánica (AVM) es un tratamiento temporal de soporte de la función ventilatoria que se emplea ante situaciones en las que esta se ve comprometida. Es un tratamiento de uso frecuente en los centros de tratamiento intensivo (CTI), con una prevalencia de entre un 30 y 40%.⁽¹⁾ Existen diferentes modalidades de AVM pero en términos generales el aporte brindado por el ventilador en la ventilación controlada por presión se compone de una presión de soporte inspiratorio (PSI), que puede estar programada a ciclos regulares, o desencadenarse por la detección del esfuerzo ventilatorio del paciente; y una presión positiva al final de la espiración (PEEP, por sus siglas en inglés), destinada a evitar el colapso alveolar al final de la espiración y prevenir la consecuente formación de atelectasias.

Si bien es una herramienta de suma utilidad, la AVM no es inocua, su uso asocia una serie de comorbilidades como pueden ser la neumonía asociada al ventilador, las lesiones inducidas por la ventilación mecánica (barotrauma, volutrauma), el compromiso de los reflejos de la vía aérea, entre otros.⁽²⁾ Algunas de estas complicaciones aumentan su incidencia con la prolongación del tratamiento, y a su vez, una mayor permanencia bajo AVM se asoció a mayor incidencia de fallo en la extubación ⁽³⁾ (entendiéndose como la necesidad de reintubación dentro de las 48 horas posteriores a la desconexión). Por otro lado, la desconexión en forma temprana también puede llevar a un fallo en la extubación, y este se asocia a su vez a un aumento en la duración global del tratamiento con AVM, una mayor necesidad de traqueostomía, un incremento en los costos sanitarios y un aumento de un 25-50% de la mortalidad. ⁽³⁾ Por todo lo antedicho es que es preciso encontrar el momento óptimo para desvincular al paciente, donde se minimicen las probabilidades de fallo a la vez que se evite la sobreexposición al tratamiento.

El “weaning” o destete es el proceso por el cual se busca la desvinculación del paciente de la AVM. Comienza en el momento en que se estabiliza la patología que causó la necesidad de intubación, y se estima que ocupa hasta el 50% del tiempo total de AVM ⁽⁴⁾. Para extubar al paciente, este debe cumplir con ciertos criterios de destete y haber pasado exitosamente la prueba de ventilación espontánea (PVE) ⁽³⁾.

1.2 PRUEBA DE VENTILACIÓN ESPONTÁNEA

Esta prueba pretende valorar si el paciente tendría la capacidad de respirar espontáneamente al ser extubado ⁽⁵⁾, para ello durante 60 minutos aproximadamente, se reduce el aporte de PSI, y se reduce o se retira el aporte de PEEP (según se considere o no que el paciente requerirá de un aporte ventilatorio no invasivo luego de la eventual extubación), para posteriormente retomar las condiciones ventilatorias previas a la realización de la prueba. La persistencia de un aporte ventilatorio durante la prueba permite compensar el incremento de la resistencia dada por la presencia del tubo endotraqueal y las tubuladuras del ventilador.

Para ser elegible para ser sometido a la PVE el paciente debe presentar una mejoría del cuadro clínico que produjo el fallo respiratorio, estabilidad respiratoria y hemodinámica, ser capaz de iniciar el esfuerzo ventilatorio, tener un Glasgow mayor a 8 y mantener el reflejo de tos y capacidad muscular conservada para poder expectorar las secreciones.

Durante la prueba se monitorean variables vinculadas a la valoración cardiovascular, de la mecánica ventilo-respiratoria, de la permeabilidad de la vía aérea, y de la respuesta disfuncional al estrés cardiopulmonar que implica la realización de la prueba. El valor predictivo de dichos parámetros medidos de forma individual es limitado, pero la monitorización en su conjunto permite valorar la tolerancia del paciente a la desconexión de la ventilación mecánica. (6) (7)

Si bien se han elaborado protocolos que han demostrado una mejoría en los resultados (5), algunos criterios a ser incluidos en los protocolos de desvinculación continúan siendo controversiales. (3) Se estima que entre 10-20% de los pacientes que son extubados tras desempeñarse exitosamente en la PVE, sufren un fallo en la extubación.

Teniendo en consideración las complicaciones asociadas tanto a una desvinculación temprana como a la desvinculación tardía, la identificación de factores de riesgo contundentes para el fallo en la extubación implicaría una gran ayuda al objetivo de optimizar el proceso de desvinculación de la AVM.

A nivel nacional, desde la Cátedra de Medicina Intensiva de la Facultad de Medicina se viene trabajando sobre el protocolo de desvinculación existente en el servicio, así como en la monitorización de diferentes variables durante la PVE, buscando encontrar posibles predictores de éxito o fracaso de la extubación. Para ello se realizaron estudios descriptivos mediante el registro de la monitorización multimodal de la PVE. Puntualmente en el 2019 se analizaron videos de curvas de capnografías volumétricas registradas en trabajos anteriores, para la valoración de estos aspectos, pudiendo concluir que es posible recabar información de calidad a través de las imágenes grabadas, e identificando de manera preliminar algunos eventos catalogados como esperados y otros como novedosos. (8)

1.3 RELACIÓN VENTILACIÓN - PERFUSIÓN

La producción tisular de dióxido de carbono (CO_2), su transporte por la sangre, difusión hacia el alveolo y eliminación por la ventilación, son procesos que se encuentran en equilibrio. Cualquier desbalance puede alterar la homeostasis y producir hipercapnia, lo cual es un hallazgo normal en pacientes ventilados. (7)

La efectividad del intercambio gaseoso se encuentra determinada a su vez por la relación existente entre la ventilación (V) y el flujo sanguíneo (Q), de modo que esta es más eficiente en la medida que el cociente entre ambos tiende a 1. El desajuste de alguna de estas variables producirá una alteración en la transferencia tanto del oxígeno (O_2) como del CO_2 .

Cuando hay un elevado cociente ventilación-perfusión (V/Q) se produce una ventilación ineficaz, que en su máxima expresión determina la formación de espacio muerto alveolar (VD^{alv}), es decir, zonas que

están siendo correctamente ventiladas pero no perfundidas. En el caso contrario, una baja relación V/Q, se expresa en última instancia como el fenómeno de shunt intrapulmonar, dónde existen regiones correctamente perfundidas pero que no están siendo ventiladas, el cual constituye uno de los mecanismos productores de hipoxemia. Las diferencias entre los cocientes V/Q aumentan con la edad y durante las afecciones pulmonares.

De forma fisiológica, no todo el gas ventilado participa del intercambio gaseoso, este volumen que queda excluido del intercambio se denomina espacio muerto fisiológico (VD^{phy}), y se compone a su vez del espacio muerto anatómico (VD^{aw}), correspondiente al gas contenido en la vía aérea de conducción, y el VD^{alv} , que como mencionamos, corresponde a un desbalance positivo en la relación V/Q. Este a su vez, puede corresponder a un desbalance espacial (en paralelo) dónde unidades bien y mal perfundidas se vacían simultáneamente, y/o a un desbalance temporal dentro de las unidades terminales, dónde la máxima ventilación y perfusión no ocurren simultáneamente. La mayoría de las causas de VD^{phy} están influenciadas por el patrón de flujo inspiratorio y el tiempo disponible para la difusión y distribución del gas.(9)

Durante la AVM, el decúbito supino y la disminución del tono en la musculatura respiratoria, producen una reducción del volumen intrapulmonar, que determina una reducción del cociente V/Q, pudiendo llevar al shunt por colapso alveolar en ciertas regiones del parénquima pulmonar. El aporte de PEEP permite evitar esta situación, a expensas de un aumento de la relación V/Q, que en áreas con una relación V/Q previamente elevada, puede determinar un aumento del VD^{alv} . Se aplican niveles de PEEP que mantengan abiertos el mayor número de alvéolos, evitando su colapso durante la espiración, pero que al mismo tiempo no provoque una significativa sobredistensión de las áreas sanas. (10)

La alteración de la presión intratorácica tiene implicancias tanto en la circulación pulmonar como en la funcionalidad cardíaca propiamente. Su aumento determina directamente un aumento de la resistencia vascular pulmonar, y una limitación en el llenado ventricular de ambos ventrículos, con la consecuente disminución del gasto cardíaco. (11) Es así que el aumento de la poscarga, y la disminución de la precarga del ventrículo derecho (dada por la disminución del gradiente de presión venosa entre las cavidades abdominal y torácica) pueden ser causa de falla cardíaca derecha. (12)

1.4 ZONAS DE WEST

El flujo sanguíneo en el pulmón humano no se distribuye de manera uniforme, disminuye casi de forma lineal desde la base hacia el vértice. Esta distribución se explica por las diferencias de presión hidrostática dentro de los vasos sanguíneos, en un sistema de presiones tan bajas como la circulación pulmonar.

Es así que pueden describirse tres zonas de la circulación pulmonar, o zonas de West (Figura 1), en función de la relación entre la Presión arterial pulmonar (P_a), la presión venosa pulmonar (P_v) y la presión alveolar (P_A).

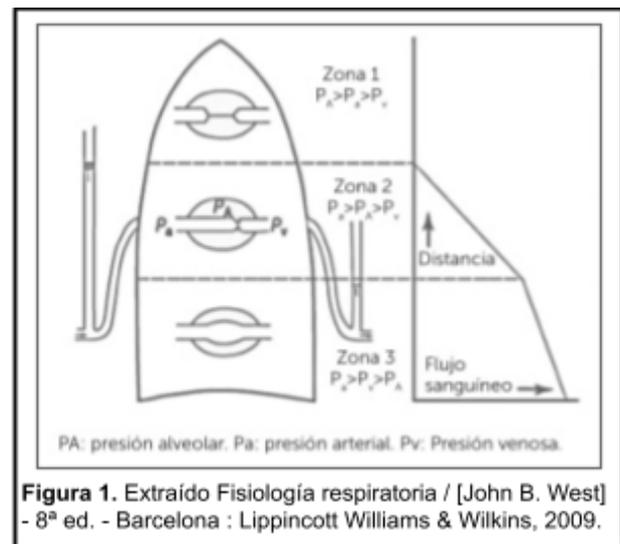
La zona 1 no está presente de forma fisiológica, pero se ubicaría en la zona más alta del pulmón, si se diera la situación en que la P_a descendiera por debajo de la P_A (que normalmente es similar a la presión atmosférica

(P_{atm})), o, por el contrario, si la P_a aumentara por sobre la P_A . Esto provocaría el colapso de los capilares, produciendo un sector del pulmón subperfundido y que, por tanto, quedaría excluido del intercambio gaseoso (VD^{alv}). Esta situación puede darse por una disminución del volumen circulatorio o, como se mencionó, durante la ventilación a presión positiva, por ejemplo.

La zona 2 está dada por un aumento de la P_a a causa del efecto hidrostático, de modo que esta es mayor que la P_A . La P_v continúa siendo menor que la P_A , por lo que no influye en el flujo sanguíneo y este dependerá de la diferencia entre las presiones arterial y alveolar.

La zona 3 corresponde a las bases pulmonares, donde la P_v es mayor que la P_A , y el flujo está dado, como es usual, por la diferencia de presión arteriovenosa. El aumento del flujo en esta región se debe principalmente a la distensión de los capilares y el reclutamiento de vasos, producto de la mayor presión hidrostática.(6) Dado que la relación V/Q varía de manera considerable debido al efecto hidrostático y a diferencias intrarregionales de la distribución del flujo sanguíneo, esta puede verse alterada por los cambios posturales. En decúbito dorsal, el flujo sanguíneo en la zona apical aumenta, pero en la zona basal se mantiene prácticamente invariable, con el resultado de que la distribución desde el vértice hasta la base se torna casi uniforme. En esta postura el flujo sanguíneo es mayor en las regiones posteriores que se encuentran en declive.

Otras situaciones fisiopatológicas pueden alterar la relación V/Q, en el caso de una neumonía por ejemplo, la existencia de áreas de condensación parenquimatosa con exudado alveolar inflamatorio y aumento de la resistencia de la vía aérea, pueden disminuir la relación V/Q, produciendo áreas de shunt intrapulmonar. Es así que la presencia de hipercapnia en pacientes con neumonía grave, suele ser un indicador de un estado avanzado de compromiso funcional, que puede ser debido a shunt extenso, extrema inhomogeneidad V/Q, o en ocasiones, hipoventilación alveolar sobreagregada por fatiga muscular.(10) En pacientes con patologías obstructivas que tienden al atrapamiento aéreo, cuando se



produce hiperinsuflación, disminuye la perfusión pulmonar por el aumento de la resistencia en los vasos sanguíneos produciendo un aumento en la relación V/Q.

1.5 CAPNOGRAFÍA VOLUMÉTRICA

El análisis continuo del CO₂ es importante para la medición y entendimiento de la mezcla de gas dentro del pulmón, así como de la relación V/Q.

La capnografía volumétrica (VCAP) es un método de monitorización continua y no invasiva de la concentración de CO₂ exhalado en relación al volumen exhalado. Los capnógrafos volumétricos reciben información de sensores de flujo que se encuentran adaptados a analizadores infrarrojos de CO₂, permitiendo integrar en forma simultánea y en tiempo real, el CO₂ al volumen corriente espirado. A partir de estos registros es posible estimar el espacio muerto y la ventilación alveolar en forma dinámica y no invasiva. (13)

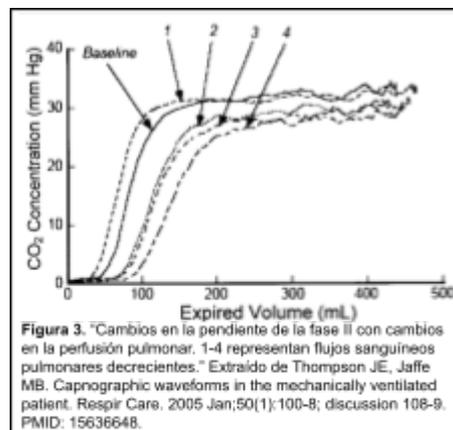
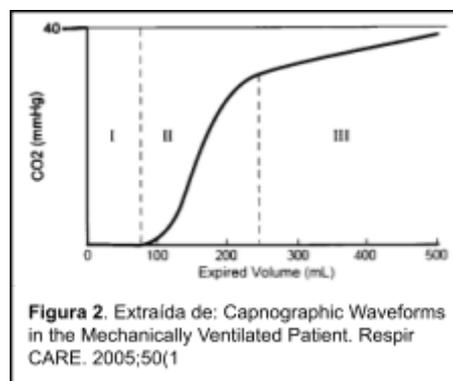
La VCAP se representa gráficamente en el capnograma volumétrico.

La curva del capnograma se compone de tres fases (Figura 2). A los ángulos de inflexión entre las fases I y II, y entre las fases II y III, los llamaremos respectivamente ángulo I y II.

- Fase I. Volumen de gas libre de CO₂, representa el gas contenido en la porción de conducción de la vía aérea correspondiente a la primera parte de la espiración.
- Fase II. Representa la transición de gas libre de CO₂ proveniente de las vías aéreas, con el gas de vaciamiento temprano de los alvéolos. Su pendiente depende principalmente de las diferentes velocidades de vaciado de las unidades pulmonares, pero se vincula con cambios en la perfusión pulmonar (Figura 3), en las resistencias de la vía aérea, y en la PEEP. (13) (14)
- Fase III. Meseta alveolar de pendiente positiva que indica un incremento lento del volumen de CO₂, se compone puramente de gas proveniente de los alvéolos. Su pendiente depende principalmente de la variación en la relación V/Q pulmonar (15), de modo que esta constituye una medida cuantitativa de la heterogeneidad de la ventilación alveolar. (7,16) (17)

El ángulo II aumenta junto con el incremento de la pendiente de la fase III, de modo que constituye una indicación indirecta del estado de la relación V/Q. (18) (19)

Las fases II y III en su conjunto representan la fracción del volumen corriente que participa efectivamente del intercambio gaseoso.(9)). Mientras que el área bajo la curva representa la cantidad de CO₂ eliminado en un ciclo respiratorio.



Cuando se mide el CO₂ espirado o el CO₂ arterial se obtiene una medida global debido a que en los distintos sectores pulmonares su concentración difiere. Esto puede conllevar a que las decisiones tomadas a punto de partida de la medición del CO₂ no siempre sean efectivas. Por su parte la VCAP si bien es una medida global, permite identificar al menos dos grandes componentes de la fisiología respiratoria, el componente vascular y el aéreo medido de forma indirecta por las fluctuaciones del CO₂ espirado.

La VCAP es un método no invasivo, accesible y de bajo costo, que aporta datos sobre la perfusión pulmonar, intercambio gaseoso y del estado hemodinámico del paciente ventilado. Una de las principales razones de su desuso, es el desconocimiento que existe sobre la compleja información que brindan estos dispositivos. (13) Es por esto que en este trabajo se intentará abordar la información brindada por el capnograma buscando evaluar cambios en la hemodinamia pulmonar en pacientes sometidos a la PVE.

2.OBJETIVOS

2.1 Objetivo general:

- Emplear los datos aportados por la capnografía volumétrica en la monitorización de la hemodinamia pulmonar en pacientes sometidos a asistencia ventilatoria mecánica durante la prueba de ventilación espontánea.

2.2 Objetivos específicos:

- Analizar y procesar variables del capnograma volumétrico vinculadas a la hemodinamia pulmonar.
- Estudiar si existe variación en variables seleccionadas del capnograma volumétrico a lo largo de la prueba de ventilación espontánea, y su relación con la hemodinamia pulmonar.

3.METODOLOGÍA

El presente es un estudio descriptivo observacional, a forma de plan piloto, dónde se estudiaron variables vinculadas a la hemodinamia pulmonar durante la PVE en un grupo de 6 pacientes neurocríticos, que se encontraban bajo AVM en el CTI del Hospital de Clínicas “Dr. Manuel Quintela” durante el año 2021. Todos los pacientes superaron la prueba de ventilación espontánea, y fueron desvinculados exitosamente. La muestra fue seleccionada a partir de un muestreo no probabilístico por conveniencia, de acuerdo a la disponibilidad de los mismos.

Se utilizaron registros audiovisuales del monitor del capnógrafo volumétrico obtenidos en el marco de investigaciones previas del servicio, dónde se estudió la monitorización multimodal de la PVE durante el proceso de desvinculación de la AVM. Se incluyó en dichos trabajos a pacientes mayores de 18 años, que hubieran recibido AVM por al menos 48 horas, y que cumplieran con los requisitos para iniciar la PVE. Se excluyó a los pacientes en los que no fue posible obtener el consentimiento informado y a los pacientes en los que la desvinculación estuviera relacionada a la limitación del esfuerzo terapéutico.

De los registros disponibles se seleccionaron aquellos que cumplieran con un criterio de calidad de imagen que permitiera el análisis de las curvas.

Partiendo de los registros resultantes de la preselección se realizó un preprocesamiento por parte de los orientadores, extrayendo una imagen cada 30-60 segundos, de modo que se obtuvieron 120 imágenes por paciente aproximadamente, las cuales fueron agrupadas según el paciente (I-VI) y la etapa correspondiente de la prueba. Se consideró una etapa previa a la realización de la prueba de 5 minutos (prePVE), el período de realización de la prueba en sí misma, que se dividió en dos etapas de 30 minutos cada una (PVE1 y PVE2) y una etapa posterior de 5 minutos de duración (posPVE). Se realiza una distinción artificial entre PVE1 y PVE2 para considerar la eventual variación entre la primera y segunda mitad de la prueba, que pudiera corresponderse al agotamiento por el esfuerzo cardiopulmonar que implica su realización.

Las imágenes fueron procesadas por el resto de los investigadores y tratadas de forma que estos no tuvieran conocimiento del paciente al que pertenecían. A su vez, las imágenes correspondientes a un mismo paciente fueron procesadas por un único investigador con el objetivo de disminuir los sesgos de medición entre los investigadores.

En primera instancia las imágenes fueron procesadas con el programa ImageJ (nih.gov), dónde para cada imagen obtenida se sobrescribieron vectores representativos de cada uno de los tres segmentos de la curva, midiendo los ángulos I y II. De forma similar, con el programa GeoGebra se sobrescribieron rectas al segmento dos y tres de cada curva, cuyas pendientes se corresponden con la de la fase II y la fase III respectivamente de la capnografía volumétrica. Con estos datos se elaboró una tabla de registro de los valores de ángulo I, ángulo II, y pendientes de la fase II y III, en función del tiempo para cada paciente, discriminando las diferentes etapas de la prueba. Estas se representan gráficamente por medio de gráficos de líneas, donde el eje "x" representa el tiempo y corresponde al número de imagen.

Se realizaron gráficos de tipo boxplot para las pendientes de la fase II y III.

Dado el "n" reducido, el análisis realizado se limitó a una descripción con fines exploratorios del comportamiento de las pendientes de las fases II y III, y los ángulos I y II.

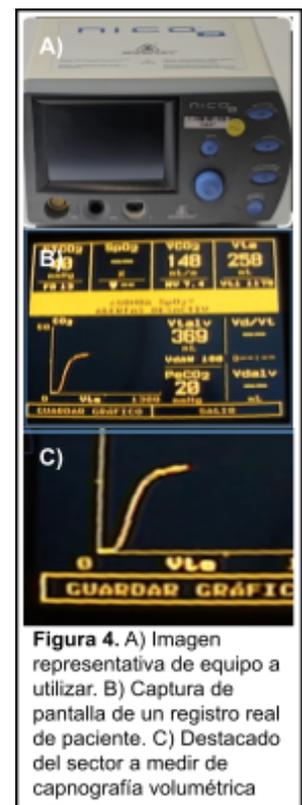


Figura 4. A) Imagen representativa de equipo a utilizar. B) Captura de pantalla de un registro real de paciente. C) Destacado del sector a medir de capnografía volumétrica

3.1 CONSIDERACIONES ÉTICAS

Con marco legal en la normativa vigente a nivel nacional (20), que regula la investigación en seres humanos, el proyecto fue presentado ante el comité de ética del Hospital de Clínicas para su correspondiente aprobación.

Dado que en el presente proyecto se utilizaron registros obtenidos en una investigación previa, que junto con este, constituyen diferentes etapas de análisis del mismo proyecto, se consideraron los consentimientos informados con los que fue recabado el material.

Durante la recolección de datos se mantuvo en total y absoluta confidencialidad la identidad de los pacientes, dado que las imágenes no asocian ninguna información que comprometa su identidad, ni la fecha o el lugar donde fueron recabadas. Es a su vez con este fin, que los registros audiovisuales fueron manipulados únicamente por los orientadores quienes a su vez fueron parte del equipo de investigación que recabó dicho material.

5. RESULTADOS

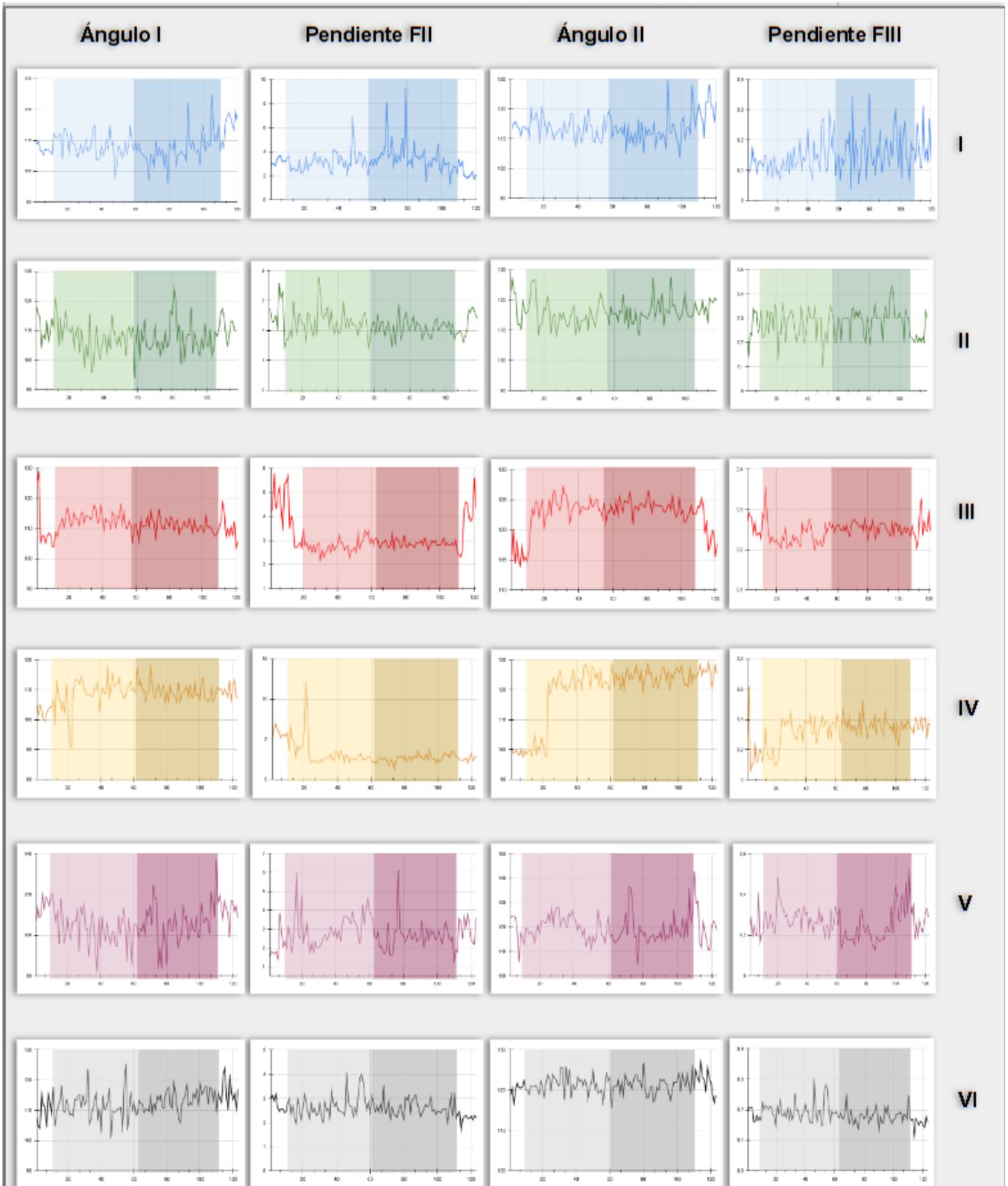
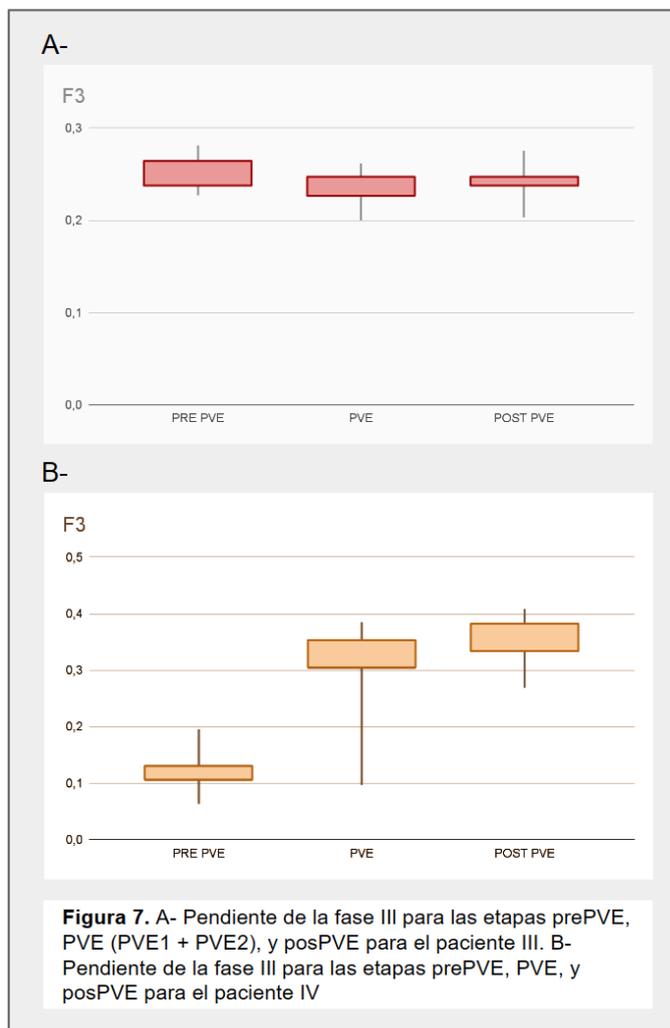
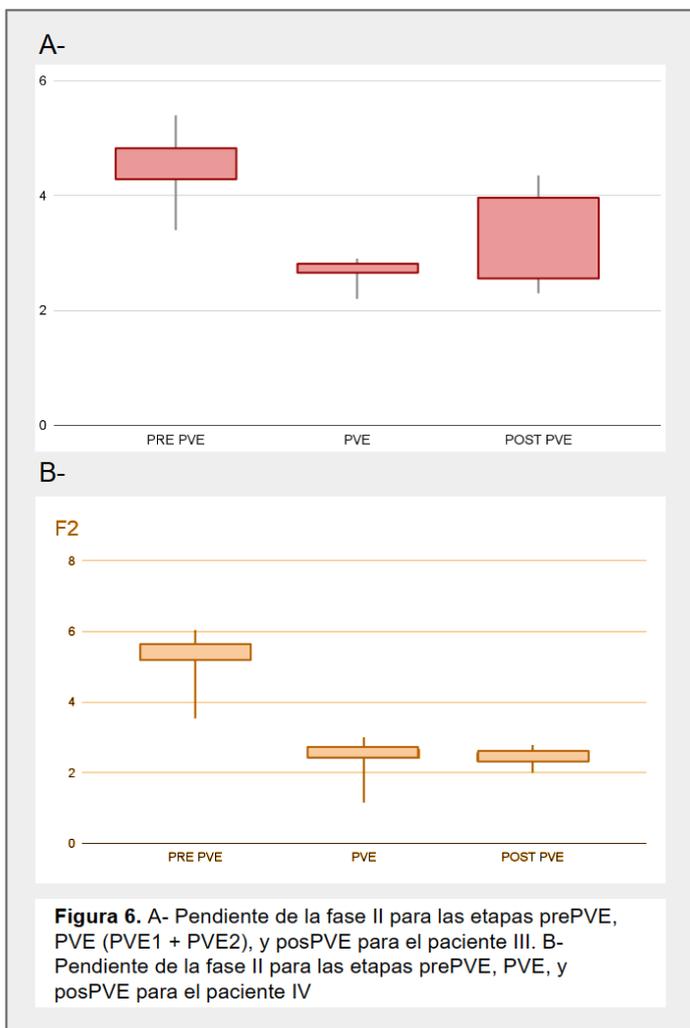


Figura 5. De arriba hacia abajo se disponen los resultados de los pacientes I-VI respectivamente. De izquierda a derecha se representa la medida del ángulo I, la pendiente de la fase II, el ángulo II y la pendiente de la fase III en función del tiempo para cada paciente, con distinción de las fases prePVE, PVE1, PVE2 y posPVE.

En la Figura 5 se presentan de arriba hacia abajo las gráficas correspondientes a los pacientes I-VI, y de izquierda a derecha respectivamente la medida del ángulo I, la pendiente de fase II, el ángulo II y la pendiente de fase III en función del tiempo. A su vez se representa con rectángulos coloreados el segmento correspondiente a la PVE1 (claro) y la PVE2 (oscuro). Los segmentos no coloreados corresponden de izquierda a derecha a la prePVE y posPVE, respectivamente.

En términos generales en los pacientes I, II, V y VI no se observaron variaciones significativas entre las diferentes etapas de la prueba para los registros correspondientes a las cuatro variables.

En el caso del paciente III se observa un aumento moderado en el valor del ángulo I, una duplicación del valor promedio para el ángulo II y un descenso marcado en la pendiente del segmento II, que se corresponden con el inicio de la PVE1 y se mantienen hasta culminada la PVE2, retornando a valores similares a los previos a iniciar la prueba con la reincorporación del aporte ventilatorio durante la etapa posPVE. Respecto a la pendiente del segmento III se observan valores aumentados en la PVE2 con respecto a la PVE1. Para el resto de las variables y pacientes no se observaron variaciones entre la PVE 1 y la PVE 2. En la Figura 6 y Figura 7 se presenta, mediante gráficas de tipo boxplot, la distribución de los valores adquiridos por la pendiente del segmento II y III respectivamente, discriminando entre las etapas prePVE, PVE (correspondiente a la conjunción de las etapas PVE1 y PVE2), y posPVE, para los pacientes III (A) y IV (B).



En la Figura 6-A se evidencia una marcada disminución de los valores para la pendiente de la fase II durante la PVE con respecto a la pre y posPVE, esta última a su vez presenta mayor dispersión que las etapas previas.

En el caso del paciente IV, al igual que en el paciente III, en la Figura 5 se observa una marcada disminución del valor de la pendiente de la fase II, y un incremento del valor del ángulo I y pendiente de la fase III, así como un incremento importante en el valor del ángulo II, coincidentes con el inicio de la PVE. Al contrario de lo ocurrido con el paciente III, en este caso no se evidenció un retorno a los valores previos con la reinstauración de las condiciones previas a la realización de la prueba. Esto también se observó para la pendiente de la fase II en la figura 6-B.

En la figura 7-A se observó que para el paciente III, el valor de la pendiente del segmento III se mantuvo relativamente constante. En el paciente IV, por el contrario, se observó un aumento de la pendiente del segmento III durante la PVE y posterior a su finalización en la posPVE, con respecto a los valores durante la prePVE.

6.DISCUSIÓN

Como se mencionó anteriormente el aporte de PEEP determina un aumento de la relación V/Q, con el consiguiente aumento del VD^{alv} , tanto por el aumento de la P_A como por la disminución de la perfusión pulmonar (dada por el aumento de la resistencia vascular pulmonar y disminución del gasto cardíaco), o la combinación de ambas. Es así que durante la realización de la prueba disminuye la presión media de la vía aérea (valor promedio entre la presión pico y la presión al final de la espiración), lo que favorece la circulación pulmonar, y disminuye la poscarga para el ventrículo derecho.

La mejora en la eficiencia de la dinámica ventilatoria se evidencia en la pendiente de la fase II, dado que esta depende directamente de la velocidad de vaciamiento de las unidades alveolares. Es así que una mayor pendiente se relaciona con una mayor eficiencia en la transición de gas de la vía aérea a gas de vaciamiento alveolar, ya sea por una mayor velocidad de vaciamiento de las unidades (por una menor resistencia a la salida de gas), como por una mayor homogeneidad temporal entre las diferentes unidades. En los pacientes asmáticos, por ejemplo, el aumento de la resistencia de la vía aérea en la espiración, que determina una menor eficiencia en el vaciamiento alveolar, se traduce gráficamente en una fase II prolongada y con menor pendiente. (14)

Por otro lado y como se mencionó anteriormente, la pendiente de la fase III constituye una medida cuantitativa de la heterogeneidad de la ventilación alveolar, de forma que, una mayor pendiente refleja el incremento en la desigualdad de la relación V/Q, y específicamente, de un aumento del espacio muerto. (21) Es así que la disminución del VD^{alv} generada por el retiro de la PEEP y consiguiente mejora en la relación V/Q, se observaría con una disminución en la pendiente de la fase III.

Frente al análisis de la prueba cardiorrespiratoria realizada por cada paciente durante la PVE, nos planteamos a priori la posibilidad de que se encuentren comprendidos dentro de alguno de los siguientes escenarios básicos:

Un primer escenario sería una **prueba de ejercicio cardiopulmonar sin modificaciones de la relación V/Q**. En esta situación no deberían encontrarse diferencias significativas en la pendiente de los segmentos II o III durante la PVE I o PVE II comparado con el segmento prePVE. Por lo tanto, la reducción en los niveles de presión positiva de la vía aérea durante la PVE no afecta significativamente la relación V/Q, por lo que es posible suponer que la reducción de la PEEP durante la PVE no genera colapso alveolar, o que el esfuerzo muscular añadido por el paciente logra mantener una adecuada ventilación alveolar durante la PVE. Del mismo modo, se puede suponer que los cambios en la presión de la vía aérea no modifican el flujo sanguíneo pulmonar de manera significativa y, por tanto, no se observan variaciones de la poscarga del VD durante esta prueba. En este caso puede suponerse a su vez, que la actividad respiratoria espontánea del paciente (que implica una mayor presión negativa intratorácica) mejora la precarga del VD y por ello no se observan variaciones en la relación V/Q durante esta etapa. Este escenario se ajusta a lo observado en los pacientes I, II, V y VI

Un segundo escenario sería una **prueba de ejercicio cardiopulmonar con mejoría de la relación V/Q**. En este escenario se asume que durante la PVE se reduce la presión media de la vía aérea y que probablemente los niveles de presión durante la prePVE fueran superiores a las necesidades del paciente, generando mayor distensión alveolar y niveles superiores de VD^{alv} . De esta manera, al iniciar la PVE con menor presión de vía aérea se observa una mejor relación V/Q, recuperando zonas alveolares que antes estaban sobredistendidas.

El tercer escenario corresponde a la **prueba cardiopulmonar con deterioro de la relación V/Q**. En este escenario se observaría durante la PVE que la disminución de la presión de vía aérea permitiría un nivel mayor de colapso alveolar, de esta manera se generaría un progresivo y marcado deterioro de la relación V/Q que podría incluso condicionar el fracaso de la PVE si las áreas de colapso fueran muy extensas.

Esta respuesta no se vió en este grupo de pacientes, pero sería una de las que más fuertemente se asociaría al fracaso de la salida del apoyo ventilatorio del paciente.

Si bien estos tres escenarios son factibles como formas puras de presentación de los casos clínicos, también sería posible observar mezcla de patrones o combinaciones de respuestas a lo largo de la PVE.

Por ejemplo, si durante el desarrollo de la PVE se generaran cambios de la relación V/Q que inicialmente se explicaran por un aumento del colapso alveolar, pero a su vez se modificaran los tiempos espiratorios, alterando el vaciado pulmonar (el paciente con mayor trabajo respiratorio intenta aumentar su volumen minuto), se podría generar atrapamiento aéreo que, indirectamente podría lograr la apertura de unidades alveolares que al inicio de la prueba corrían riesgo de colapsar (generación de presión positiva intrínseca de final de la espiración ($PEEP_t$)).

La disminución de la pendiente de la fase II observada en los pacientes III y IV con el inicio de la PVE se traduce como una desmejora en la eficiencia ventilatoria. Esta a su vez, se asocia en el paciente IV, con un aumento en la pendiente de la fase III durante la PVE, que no revierte en la posPVE.

Para explicar esto se plantea como posibilidad que la disminución del aporte ventilatorio implique que el paciente, en la búsqueda de la estabilidad, incremente su frecuencia respiratoria, alterando así la relación entre los tiempos inspiratorios y espiratorios. Como se mencionó, la disminución del tiempo espiratorio, podría determinar un incompleto vaciado alveolar que conduciría a la hiperinsuflación pulmonar dinámica. Este atrapamiento aéreo a nivel alveolar determina una $PEEP_i$, que el paciente debe vencer antes de iniciar la inspiración. A su vez el volumen torácico de final de la espiración se sitúa por sobre el volumen de relajación del sistema respiratorio, de forma que la elasticidad torácica se ejerce en el mismo sentido que la pulmonar, y determina otra carga que el paciente debe vencer para iniciar la inspiración. (22) Esta situación se revertiría con la reintroducción de la PEEP y soporte inspiratorio dado que al igualar la presión inspiratoria con la presión intraalveolar, se vencería la resistencia ejercida sobre la vía aérea, permitiendo así el pasaje de gas y facilitando el vaciamiento de los alvéolos. Por este mecanismo se explicarían los fenómenos evidenciados en el paciente III. Mientras que para el paciente IV se plantea que el tiempo de registro posterior a la prueba podría haber resultado insuficiente para evidenciar dicho fenómeno.

7. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

En líneas generales se logró el objetivo del grupo de aproximarse a la patología del paciente grave, incorporando conceptos de ventilación mecánica y monitoreo ventilatorio, junto a conceptos provenientes de la fisiología y fisiopatología cardiopulmonar.

Para la realización de este trabajo fue necesario consultar bibliografía específica de medicina intensiva, lo que significó un desafío extra para el grupo al momento de comprender y analizar los resultados.

Desde el punto de vista metodológico se enfrentó la dificultad de contar con una cantidad reducida de datos, por lo que fue necesario adoptar el modelo de ensayo piloto, con una estrategia predominantemente descriptiva en el análisis de los resultados.

Independientemente de las consideraciones específicas sobre los resultados obtenidos, el equipo considera que este desafío le ha permitido a sus integrantes implementar herramientas metodológicas teóricas en un ambiente de investigación "real", lo cual es siempre muy positivo.

En términos generales se logró incorporar los datos aportados por la capnografía volumétrica en la monitorización de la hemodinamia pulmonar en pacientes sometidos a asistencia ventilatoria mecánica durante la prueba de ventilación espontánea.

Específicamente fue posible tomar señales obtenidas al pie de cama de los pacientes y procesarlas de manera estandarizada para obtener un volumen de datos capaces de ser utilizados en un protocolo de análisis científico. La variable objetivo a analizar fue la señal del CO₂ espirado a través de la capnografía volumétrica. Desde allí, se interpretaron sus modificaciones a lo largo de una serie de intervenciones planificadas durante el período de asistencia ventilatoria, para establecer su relación con cambios en la relación V/Q de estos pacientes.

De este análisis surgieron hipótesis que pretenden explicar los mecanismos involucrados en las variaciones observadas y contextualizarlos dentro de la práctica diaria de la medicina intensiva.

Dentro de las limitaciones identificadas en el trabajo deben destacarse la estrategia de obtención de datos (por un método manual de análisis de registro) y el bajo número de pacientes analizados. Para solucionar la primer limitante se desarrolló una metodología a ciegas, de forma que los registros medidos no permitieran identificar al paciente ni su situación clínica, y procurando estandarizar la necesaria variación surgida por un método manual de medida. Para que esta medida fuera lo más homogénea posible, se recurrió al programa Geogebra y se conservó un archivo con todas las imágenes para posibilitar una medición menos manual en el futuro.

En relación al bajo número de pacientes incorporados en esta etapa, al tratarse de un plan piloto se considera como un número mínimo adecuado para identificar problemas potenciales de registro y medición de datos que servirán, sin dudas para un etapa posterior en la que se busque incorporar mayor cantidad de pacientes al estudio.

8.REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Esteban A, Frutos-Vivar F, Muriel A, Ferguson ND, Peñuelas O, Abraira V, et al. Evolution of Mortality over Time in Patients Receiving Mechanical Ventilation. *Am J Respir Crit Care Med*. 15 de julio de 2013;188(2):220-30.
2. Ventilación mecánica. Fernando Gutiérrez Muñoz. Artículo de revisión, *Acta Med Per* 28(2) 2011. [Internet]. [citado 25 de mayo de 2023].
3. Torrini F, Gendreau S, Morel J, Carteaux G, Thille AW, Antonelli M, et al. Prediction of extubation outcome in critically ill patients: a systematic review and meta-analysis. *Crit Care Lond Engl*. 15 de noviembre de 2021;25(1):391.
4. Schreiber AF, Ceriana P, Ambrosino N, Malovini A, Nava S. Physiotherapy and Weaning From Prolonged Mechanical Ventilation. *Respir Care*. enero de 2019;64(1):17-25.
5. Blackwood B, Burns KE, Cardwell CR, O'Halloran P. Protocolized versus non-protocolized weaning for reducing the duration of mechanical ventilation in critically ill adult patients. *Cochrane Database Syst Rev* [Internet]. 2014 [citado 26 de mayo de 2023];(11).
6. West JB. Fisiología respiratoria. 8ª ed. Barcelona: Lippincott Williams & Wilkins; 2009. 186 p.
7. Kremeier P, Böhm SH, Tusman G. Clinical use of volumetric capnography in mechanically ventilated patients. *J Clin Monit Comput*. febrero de 2020;34(1):7-16.
8. Carbone V, Cardoso M, De Boni V, Gandulia C, Módena C, Montiel P. Capnografía volumétrica y desvinculación de la ventilación mecánica. 2019 [citado 16 de mayo de 2023];
9. Fletcher R, Jonson B, Cumming G, Brew J. The concept of deadspace with special reference to the single breath test for carbon dioxide. *Br J Anaesth*. enero de 1981;53(1):77-88.
10. Hurtado J, Boggia J, Angulo M. FISIOPATOLOGÍA, MECANISMOS DE LAS DISFUNCIONES ORGÁNICAS. 2.ª ed. BiblioMédica; 2019. 600 p.
11. Verhoeff K, Mitchell JR. Cardiopulmonary physiology: why the heart and lungs are inextricably linked. *Adv Physiol Educ*. 1 de septiembre de 2017;41(3):348-53.
12. Apostolakis S, Konstantinides S. The Right Ventricle in Health and Disease: Insights into Physiology, Pathophysiology and Diagnostic Management. *Cardiology*. 2012;121(4):263-73.
13. Albanese MHB, Barrera FP, Valenzuela CC, Gil D, Riquelme C, Olive F, et al. Capnografía volumétrica y su aplicación en la monitorización de la ventilación mecánica. 2019;
14. Thompson JE, Jaffe MB. Capnographic waveforms in the mechanically ventilated patient. *Respir Care*. enero de 2005;50(1):100-8; discussion 108-109.
15. Tusman G, Suarez-Sipmann F, Bohm SH, Borges JB, Hedenstierna G. Capnography reflects ventilation/perfusion distribution in a model of acute lung injury: Phase III slope of capnograms is related to the V/Q ratio. *Acta Anaesthesiol Scand*. mayo de 2011;55(5):597-606.
16. Capnographic Waveforms in the Mechanically Ventilated Patient. *Respir CARE*. 2005;50(1).
17. Miller RD, Eriksson LI, Fleisher LA, Wiener-Kronish JP, Cohen NH. Miller. Anestesia [Internet]. Elsevier Health Sciences Spain; 2015. Disponible en: <https://books.google.com.uy/books?id=WsuqCgAAQBAJ>
18. Bhavani-Shankar K, Philip JH. Defining Segments and Phases of a Time Capnogram. *Anesth Analg*. octubre de 2000;91(4):973.
19. Bhavani-Shankar K, Kumar AY, Moseley HS, Ahyee-Hallsworth R. Terminology and the current limitations of time capnography: a brief review. *J Clin Monit*. mayo de 1995;11(3):175-82.
20. Decreto N° 158/019 [Internet]. [citado 28 de mayo de 2023]. Disponible en: <https://www.impo.com.uy/bases/decretos-originales/158-2019>
21. Miller RD, Eriksson LI, Fleisher LA, Wiener-Kronish JP, Cohen NH. Miller. Anestesia [Internet]. Elsevier Health Sciences Spain; 2015. Disponible en: <https://books.google.com.uy/books?id=WsuqCgAAQBAJ>
22. Lisboa B. C, Borzone T. G, Díaz P. O. Hiperinflación pulmonar en la enfermedad pulmonar obstructiva crónica: Importancia funcional y clínica. *Rev Chil Enfermedades Respir* [Internet]. enero de 2004 [citado 15 de noviembre de 2023];20(1).

10.ANEXOS

10.1 CONSENTIMIENTO INFORMADO 2021

Fecha de realización 23/07/2021

Fecha:

INFORMACIÓN PARA EL FAMILIAR

Mediante este documento invitamos a participar de una investigación perteneciente al Centro de Tratamiento Intensivo (CTI) Hospital de Clínicas «Dr. Manuel Quintela».

Somos un grupo de estudiantes de medicina que, junto con parte del equipo médico del CTI, estamos trabajando en un proyecto de investigación.

Diariamente los médicos evalúan a los pacientes que están conectados a un respirador artificial (tubo) y definen si podrían o no volver a respirar por sí mismos.

Cuando el paciente se encuentra en condiciones, se realiza una prueba durante 60 minutos para definir si le quitan el tubo por completo o no. Durante esta prueba se analiza al paciente al inicio y al final, definiendo entonces si tiene las condiciones suficientes como para intentar respirar solo.

El objetivo de nuestra investigación es analizar al paciente durante toda la prueba (5 minutos antes, durante los 60 minutos y 5 minutos luego de finalizada) grabando las pantallas de los monitores a los cuales se encuentra conectado el paciente, con tres videocámaras junto a algunos datos de la historia clínica que serán recolectados (no grabados). No se grabarán datos identificadores del paciente (como por ejemplo nombre, cédula de identidad); tampoco se filmará ninguna parte del cuerpo ni rostro del paciente (sólo se grabarán las pantallas de los monitores).

Este estudio no implica riesgos físicos, emocionales, sociales o de otra índole para el paciente.

No se tomarán muestras de sangre ni de ningún tipo. No cambiará su tratamiento ni la situación de la enfermedad del paciente.

No se realizará ningún pago económico ni material al paciente ni a sus familiares por la participación en este estudio.

Los resultados obtenidos serán con fines de progresar y mejorar la asistencia de futuros pacientes que se encuentren en la misma condición que su familiar y no implican ningún cambio en el tratamiento que se está realizando en este momento o en el futuro.

Tampoco habrá ningún cambio en el tratamiento si usted no autoriza la participación. El ingreso al estudio es voluntario.

La información sobre el paciente se manejará con total confidencialidad, por lo cual no será posible la identificación del mismo en ninguna grabación de video, ni en los datos clínicos a la hora de publicar los datos del proyecto.

Participar del estudio es un acto voluntario y, como tal, puede usted acceder o no. En caso de acceder a participar del estudio, podrá cambiar de opinión en cualquier momento. Su decisión no cambiará en absoluto la calidad de atención del paciente, sin embargo, los resultados que puedan obtenerse de este estudio serían beneficiosos para el tratamiento de futuros pacientes.

Todas las dudas y/o preguntas que le surjan al leer este documento podrán ser realizadas al equipo responsable antes, durante o incluso al finalizar el estudio.

Fecha:

CONSENTIMIENTO INFORMADO

El siguiente consentimiento es para aceptar la participación en la investigación médica antes detallada.

El día de la fecha, he leído y comprendido la información sobre el estudio que se titula:

<<Análisis multimodal de Prueba de Ventilación Espontánea en neurocríticos del Hospital de Clínicas (julio-octubre 2021)>>.

Se me ha explicado de forma clara y detallada tanto el objetivo del estudio como la forma en que se realizará. He podido plantear las preguntas de mi interés y he obtenido respuesta a las mismas.

Acepto la invitación a formar parte de la investigación de forma voluntaria, en nombre de para su participación, entendiendo que

podrá retirarse del estudio en cualquier momento, sin explicar los motivos de abandono y sin que esto influya en la calidad de la asistencia brindada por el equipo de salud tratante.

El consentimiento puede ser ratificado o cancelado por el paciente 2 o 3 días después de la intervención en caso de estar en condiciones.

Se me ha explicado claramente que la identidad del paciente será absolutamente confidencial y no se revelará bajo ninguna circunstancia.

Participante o familiar

Nombre:

Firma:

Aclaración:

Investigador responsable

Nombre: Arturo Briva

Firma:

Aclaración:

Contacto: 099 666 902

10.2 RESOLUCIÓN DE COMITÉ DE ÉTICA 2021

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
HOSPITAL DE CLÍNICAS
"DR. MANUEL QUINTELA"
SECRETARÍA GENERAL
DEPARTAMENTO DE COMISIONES
COMITÉ DE ÉTICA DE LA INVESTIGACIÓN

Montevideo, 31 de Julio de 2021

Se transcribe resolución del Comité de Ética del Hospital de Clínicas de fecha 31 de Julio de 2021

En relación al proyecto presentado por el Centro de Tratamiento Intensivo

"ANÁLISIS MULTIMODAL DE PRUEBA DE VENTILACIÓN ESPONTÁNEA EN NEUROCRÍTICOS DEL HOSPITAL DE CLÍNICAS (JULIO-OCTUBRE 2021)."

Tutores: Dres. Arturo Briva, Sebastián Cuello

Bres: André Bouvier; Andrés Fernández; Gabriel Suárez; Agustina Torres; Joaquín Valenzuela; Manuela Vincent

El Comité de Ética de la Investigación del Hospital de Clínicas resuelve aprobar la realización de este proyecto en esta Institución.

La aprobación otorgada por este Comité de Ética es desde el 31 de Julio de 2021 hasta la fecha de finalización del mismo.


Prof. Dr. Raúl Ruggia
Coordinador del Comité de Ética de la Investigación