

## Monitorización no invasiva de la PaCO<sub>2</sub> en pacientes críticos con ventilación mecánica

J. PELÁEZ FERNÁNDEZ, V. CERDEÑO IMPUESTO Y M. JIMÉNEZ LENDÍNEZ

Servicio de Medicina Intensiva. Hospital Universitario La Paz. Madrid.

**Objetivo.** Determinar la presión arterial de dióxido de carbono, en pacientes con soporte ventilatorio completo, mediante dos técnicas de monitorización no invasivas, la calorimetría indirecta (eliminación de CO<sub>2</sub>) y la capniografía (presión teleespiratoria de CO<sub>2</sub>). Comparar sus resultados frente a los obtenidos mediante la extracción de gasometrías arteriales.

**Métodos.** Veinte pacientes en ventilación mecánica, sometidos a un cambio en el volumen ventilatorio, fueron monitorizados con un computador metabólico (Deltatrac) y un capniógrafo. Se determinaron las siguientes variables antes y después del cambio ventilatorio: eliminación de CO<sub>2</sub> (VeCO<sub>2</sub>), consumo de oxígeno, PETCO<sub>2</sub> y PaCO<sub>2</sub> (gasometría arterial). Se calcularon los nuevos niveles de PaCO<sub>2</sub> mediante calorimetría indirecta utilizando  $PaCO_{2-final} = PaCO_{2-basal} \times VeCO_{2-basal} / VeCO_{2-1\text{ minuto}}$  y mediante capniografía, utilizando  $PaCO_{2-final} = PETCO_{2-final} + Grad(PaCO_{2-PETCO_{2}})$ .

**Resultados.** Los niveles de PaCO<sub>2</sub> obtenidos mediante calorimetría indirecta fueron de 37 (DE 5,2) mmHg y mediante la PETCO<sub>2</sub> de 35,4 (8,3) mmHg; tras la extracción de gases arteriales los niveles fueron de 37,1 (6,4) mmHg y 37,2 (6,7) mmHg, respectivamente. La correlación entre la PaCO<sub>2</sub> calculada y la medida mediante gasometrías arteriales fue de  $r = 0,93$  ( $p < 0,001$ ) para la calorimetría indirecta y de  $r = 0,55$  ( $p < 0,05$ ) para la PETCO<sub>2</sub>. En el análisis de concordancia de ambas técnicas frente a la gasometría arterial los límites de acuerdo fueron más estrechos para la calorimetría indirecta (-5,11/5,31 mmHg frente

a -12,35/16,07 mmHg, margen de confianza del 95%).

**Conclusiones.** En nuestro estudio se confirma la escasa utilidad de la PETCO<sub>2</sub> para la determinación de los cambios sufridos por la PaCO<sub>2</sub> en pacientes críticos en los que se han variado los parámetros ventilatorios.

**PALABRAS CLAVE:** calorimetría indirecta, presión arterial de PaCO<sub>2</sub>, eliminación de CO<sub>2</sub>, ventilación mecánica, presión teleespiratoria de CO<sub>2</sub>.

### NONINVASIVE MONITORIZATION OF PaCO<sub>2</sub> IN CRITICALLY ILL VENTILATED PATIENTS

**Objective.** To determine the arterial pressure of carbon dioxide, in critically ill patients with full support ventilation, through two noninvasive monitoring methods, indirect calorimetry (CO<sub>2</sub> elimination) and capnography (end tidal CO<sub>2</sub>). To compare its results with the results obtained through the analysis of arterial blood gases.

**Methods.** Twenty mechanically ventilated patients, submitted to a change in minute volume ventilation, were monitored with a metabolic cart (Deltatrac) and a CO<sub>2</sub> analyzer. We measured, before and after ventilatory resetting: CO<sub>2</sub> elimination (VeCO<sub>2</sub>), oxygen consumption, PETCO<sub>2</sub> and PaCO<sub>2</sub> (blood gases). We calculated the new values of PaCO<sub>2</sub> through indirect calorimetry using  $PaCO_{2-final} = PaCO_{2-basal} \times VeCO_{2-basal} / VeCO_{2-1\text{ minute}}$  and through capnography using  $PaCO_{2-final} = PETCO_{2-final} + Grad(PaCO_{2-PETCO_{2}})$ .

**Results.** The calculated PaCO<sub>2</sub> through indirect calorimetry was 37(5.2) mmHg, and through PETCO<sub>2</sub> was 35.4(8.3) mmHg; after blood gas analysis the new levels were 37.1(6.4) mmHg and 37.2(6.7) mmHg, respectively. The correlation among calculated PaCO<sub>2</sub> and measured through blood gas analysis were:  $r = 0.93$  ( $p < 0.001$ )

Correspondencia: Dr. Jesús Peláez Fernández.  
C./ Canto de la Cueva, n.º 9.  
28250 Torrelozanes. Madrid.

Manuscrito aceptado el 28-IV-2000.

for indirect calorimetry, and  $r = 0.55$  ( $p < 0.05$ ) for  $PETCO_2$ . The limits of agreement of both techniques compared with arterial blood gas analysis were more narrow for indirect calorimetry ( $-5.11/5.31$  mmHg vs  $-12.35/16.07$  mmHg, 95% confidence interval).

**Conclusions.** Our results confirm the little usefulness of  $PETCO_2$  for determining the  $PaCO_2$  changes in critical patients in which ventilatory parameters were reseted.

**KEY WORDS:** *Indirect calorimetry, arterial pressure  $CO_2$ ,  $CO_2$  elimination, mechanical ventilation, end tidal  $CO_2$ .*

(Med Intensiva 2000; 24: 293-299)

## INTRODUCCIÓN

La determinación de la presión arterial de dióxido de carbono ( $PaCO_2$ ) en pacientes críticos con ventilación mecánica es esencial para conocer la eficacia del intercambio gaseoso y poder adecuar el equilibrio entre la producción de  $CO_2$  ( $VCO_2$ ) y su eliminación ( $VeCO_2$ )<sup>1</sup>. El conocimiento de la  $PaCO_2$  se hace más imprescindible en determinadas patologías (hipertensión endocraneal, traumatismo craneoencefálico, postoperatorio neuroquirúrgico) y con la utilización de ciertas modalidades ventilatorias (hipercapnia permisiva).

La técnica de referencia, hasta estos momentos, es la determinación de los gases sanguíneos mediante extracción de una muestra de sangre arterial<sup>2</sup>. Esta técnica presenta una serie de inconvenientes, tales como el ser invasiva, precisar de personal entrenado para su extracción y manipulación, y ser necesario un tiempo de espera entre la extracción, el transporte, y la determinación de los gases<sup>3</sup>. Además, cuando se pretende determinar el nuevo valor de la  $PaCO_2$  tras variar el reglaje ventilatorio, es preciso esperar un tiempo hasta que la  $PaCO_2$  alcanza su nuevo valor<sup>4,5</sup>.

Por ello, se han buscado otras técnicas alternativas que la sustituyan, tales como la presión teleespiratoria de  $CO_2$  ( $PETCO_2$ )<sup>1,3</sup> y, más recientemente, la calorimetría indirecta<sup>6</sup>. En nuestro estudio pretendemos comparar los resultados obtenidos por ambas técnicas en pacientes críticos sometidos a ventilación mecánica, comparando sus resultados frente a los obtenidos con la extracción de gases sanguíneos arteriales.

## MATERIAL Y MÉTODOS

### Pacientes

Se incluyeron en el estudio 20 pacientes críticos con soporte ventilatorio completo que precisaron un reajuste de los parámetros ventilatorios tanto para adecuar la eliminación de  $CO_2$  con su producción, como para ajustar los niveles de  $PaCO_2$  al margen terapéutico deseado.

### Aspectos generales

Todos los pacientes fueron ventilados mediante el respirador Evita I (Dräger, Alemania), el cual permite variar los parámetros ventilatorios con rapidez, a la vez que monitoriza de forma simultánea el flujo espiratorio, la fracción inspirada de oxígeno y las presiones en la vía aérea. La modalidad ventilatoria empleada en todos los pacientes fue la mandatoria intermitente sincronizada (SIMV). Ningún paciente tenía respiración espontánea, para lo cual se administró sedación mediante una perfusión intravenosa continua de midazolam (5-10 mg/h) y fentanilo (0,1-0,3 mg/h), complementada, cuando fue necesario, con bloqueo neuromuscular mediante la administración de bolos intravenosos de pancuronio o vecuronio.

Para obtener unos datos fiables con el monitor metabólico, se exigió que todos los pacientes se encontraran en unas condiciones de estabilidad metabólica y hemodinámica. La primera se valoró mediante el consumo de oxígeno, permitiendo variaciones del mismo inferiores al 5% respecto de la situación basal. Para valorar la situación hemodinámica se monitorizó la presión arterial de forma cruenta o incruenta, excluyéndose aquellos pacientes en los que la presión arterial media sufrió variaciones superiores al 5% del valor basal y/o aquéllos en los que para mantenerla estable fue preciso variar las dosis de fármacos vasoactivos. No se incluyeron en el estudio pacientes que precisaran una fracción inspirada de oxígeno superior al 60%, ya que valores superiores pueden artefactar los datos obtenidos mediante calorimetría indirecta.

### Calorimetría indirecta

El computador metabólico utilizado para la monitorización de la eliminación de  $CO_2$  fue el Deltatrac (Datex Inst., Helsinki, Finlandia). El Deltatrac realiza las diferentes mediciones mediante un analizador diferencial paramagnético de oxígeno y un sensor de infrarrojos de  $CO_2$ ; además, posee un generador de flujo de 40-50 lpm, una cámara de mezclas y un microprocesador. Los datos obtenidos quedan reflejados en un monitor, a la vez que pueden ser imprimidos minuto a minuto.

Antes de cada medición, el calorímetro se calibró siguiendo el procedimiento descrito por el fabricante y mediante muestras de  $O_2$  y  $CO_2$  estandarizadas ( $O_2$  al 95% y  $CO_2$  al 5%). La calibración se comprobó en todos los pacientes y en cada una de las mediciones, comparando el volumen minuto y la  $FiO_2$  obtenidas mediante el monitor metabólico con las reflejadas por el respirador.

### Presión teleespiratoria de $CO_2$

La presión teleespiratoria de  $CO_2$  se determinó mediante un capnógrafo Hewlett-Packard, colocado

entre el tubo endotraqueal y las tubuladuras del respirador. Se calibró siguiendo las recomendaciones del fabricante antes de cada medida.

### Determinación del espacio muerto

La situación basal se definió mediante los datos obtenidos 30 minutos antes del reajuste ventilatorio; en esta situación basal se obtuvieron las siguientes variables: VO<sub>2</sub> y VeCO<sub>2</sub> mediante calorimetría indirecta, PaO<sub>2</sub> y PaCO<sub>2</sub> mediante gasometría arterial, y PETCO<sub>2</sub> mediante el capnógrafo. En 10 pacientes se buscó una mayor ventilación alveolar, aumentando la frecuencia de ciclado y/o el volumen corriente (aumento del Vm del 54(15), y en el resto, los cambios tuvieron por objeto la reducción del volumen ventilatorio minuto (descenso del Vm del 42(20)%).

Transcurrido un minuto tras la variación ventilatoria se determinó la VeCO<sub>2-1 minuto</sub>. Finalmente, en la nueva situación de equilibrio, se determinaron los nuevos valores de PETCO<sub>2</sub> y PaCO<sub>2</sub>, esta última tras extracción de gasometría arterial.

En todos los pacientes se calculó la nueva PaCO<sub>2</sub> mediante los dos métodos: eliminación de CO<sub>2</sub> y presión teleespiratoria de CO<sub>2</sub>.

1. *Calorimetría indirecta.* Para el cálculo de la PaCO<sub>2</sub> mediante calorimetría indirecta se utilizó la fórmula descrita y validada en estudios previos<sup>6</sup>, mediante la eliminación de CO<sub>2</sub> basal y la correspondiente al primer minuto (VeCO<sub>2-1 minuto</sub>) tras el nuevo reglaje:

$$PaCO_{2-final} = PaCO_{2-basal} \times VeCO_{2-basal} / VeCO_{2-1\ minuto}$$

2. *Presión teleespiratoria de dióxido de carbono.* La estimación de la nueva PaCO<sub>2</sub> mediante la PETCO<sub>2</sub> se realizó determinando el gradiente PaCO<sub>2-basal</sub>-PETCO<sub>2</sub>:

$$Grad (PaCO_2 - PETCO_2) = PaCO_{2-basal} - PETCO_{2-basal}$$

Tras el cambio ventilatorio, la nueva PaCO<sub>2</sub> será el resultado de la suma del gradiente el valor de la PETCO<sub>2</sub> correspondiente a la nueva situación de equilibrio (PETCO<sub>2-final</sub>):

$$PaCO_{2-final} = PETCO_{2-final} + Grad (PaCO_2 - PETCO_2)$$

### Análisis estadístico

Los resultados se expresan mediante el valor medio ± DE. Se empleó el análisis de la varianza para medidas repetidas y se correlacionaron mediante regresión lineal los valores obtenidos con ambas técnicas y los obtenidos mediante gasometría arterial; finalmente se realizó un análisis de concordancia<sup>7</sup> para cada técnica predictiva, todo ello con la ayuda del programa informático SPSS, con una significación estadística de p < 0,05.

### Aspectos éticos

Nuestro estudio, aprobado por el comité de ética de nuestro hospital, se ha basado en la monitorización del dióxido de carbono espirado mediante técnicas no invasivas, y los pacientes no han sido sometidos a ninguna manipulación que no estuviera indicada por su situación clínica.

### RESULTADOS

Los diagnósticos de ingreso de los 20 pacientes incluidos en el estudio (11H:9M) se reflejan en la tabla 1, así como la edad (media 58,6 (DE 14,6) años, rango 28-82) y el APACHE II (media 15,4 [5,4]).

Tras variar los parámetros ventilatorios de los pacientes incluidos en esta fase del estudio, los nuevos niveles de PaCO<sub>2</sub> se determinaron mediante:

1. *Calorimetría indirecta:* utilizando la formulación descrita previamente se obtuvo una PaCO<sub>2</sub> final media de 37,1 (5,2) mmHg.

2. *Monitorización de la PCO<sub>2</sub> teleespiratoria:* calculando el gradiente PaCO<sub>2</sub>-PETCO<sub>2</sub> y midiendo la PETCO<sub>2</sub> del nuevo equilibrio ventilatorio:

a) PETCO<sub>2</sub> basal media: 36,1 (7,1) mmHg; b) gradiente PaCO<sub>2</sub>-PETCO<sub>2</sub> medio: 3,5 (3,1) mmHg;

c) PETCO<sub>2</sub> final media: 37,0 (8,0) mmHg; y d) PaCO<sub>2</sub> calculada media: 35,4 (8,3) mmHg.

3. *Extracción de muestras sanguíneas arteriales y medición de la PaCO<sub>2</sub> en el laboratorio:*

TABLA 1. Características de los pacientes

Paciente	Patología de ingreso	Sexo	Edad	APACHE II
1	Peritonitis fecaloidea	M	75	18
2	Hematoma cerebral por ACO	H	67	17
3	Shock cardiogénico post-IAM	H	64	17
4	EPOC reagudizado	M	72	11
5	Neumonía extrahospitalaria, ADVP	H	28	13
6	Shock séptico post-prostatectomía	H	72	16
7	Peritonitis aguda, colecistitis	M	54	11
8	Isquemia mesentérica	M	82	25
9	HDA, cirrosis biliar	H	63	16
10	Sepsis post-gastrectomía	H	38	12
11	Neumonía por aspiración, ACV	M	65	17
12	Neumonía, EPOC	H	50	15
13	Politraumatismo, contusión pulmonar	H	47	9
14	Postoperatorio neuroquirúrgico, TCE	H	41	21
15	Hematoma subdural crónico	M	74	23
16	Tromboembolismo pulmonar agudo	M	54	9
17	Postoperatorio neuroquirúrgico, TCE	H	67	22
18	Postoperatorio neuroquirúrgico, HSA	M	72	22
19	Politraumatismo	H	38	6
20	Sepsis abdominal, absceso hepático	M	48	7

IAM: infarto agudo de miocardio; EPOC: enfermedad pulmonar obstructiva crónica; ADVP: adictos a drogas por vía parenteral; HDA: hemorragia digestiva alta; ACV: accidente cerebrovascular; HSA: hemorragia subaracnoidea; TCE: traumatismo craneoencefálico.

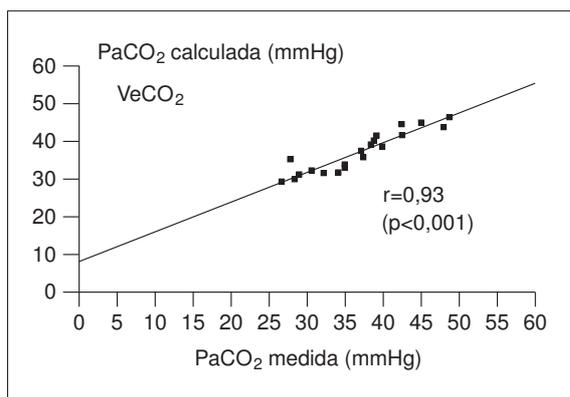


Fig. 1. Análisis de regresión lineal entre la presión arterial de CO<sub>2</sub> calculada mediante calorimetría indirecta y la medida tras extracción de gases arteriales.

a) PaCO<sub>2</sub> final medida tras la monitorización de la VeCO<sub>2</sub>: 37,1 (6,4) mmHg, y b) PaCO<sub>2</sub> final medida tras la monitorización de la PETCO<sub>2</sub>: 37,2 (6,7) mmHg.

El análisis de regresión lineal entre los niveles arteriales de CO<sub>2</sub> calculados y los medidos tras extracción de gasometrías arteriales demostró una correlación más estrecha con los valores obtenidos mediante la calorimetría indirecta ( $r = 0,93$ ,  $p < 0,001$ ) (fig. 1), siendo la correlación conseguida con la monitorización de la PETCO<sub>2</sub> de  $r = 0,55$  ( $p < 0,05$ ) (fig. 2).

Las diferencias medias entre los valores calculados y los medidos fueron de 1,86 (7,25) mmHg para la PETCO<sub>2</sub> y de 0,10 (2,66) mmHg para la calorimetría indirecta, siendo los límites de acuerdo entre -12,35 y 16,07 mmHg con la PETCO<sub>2</sub> (fig. 3) y entre -5,11 y 5,31 mmHg con la calorimetría indirecta (fig. 4), con un margen de confianza del 95% en ambos casos.

## DISCUSIÓN

En el paciente crítico la extracción de gases sanguíneos se hace imprescindible y en ocasiones debe

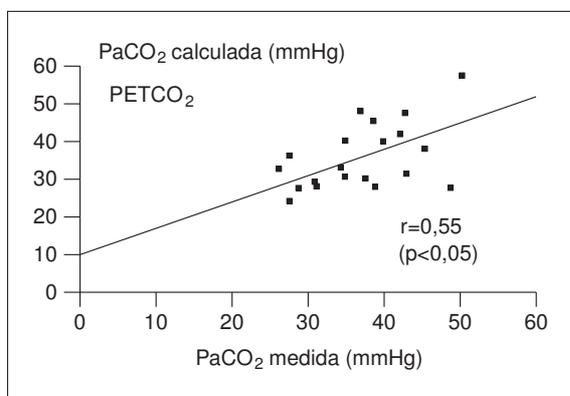


Fig. 2. Análisis de regresión lineal entre la presión arterial de CO<sub>2</sub> calculada mediante la presión telespiratoria de CO<sub>2</sub> y la medida tras extracción de gases arteriales.

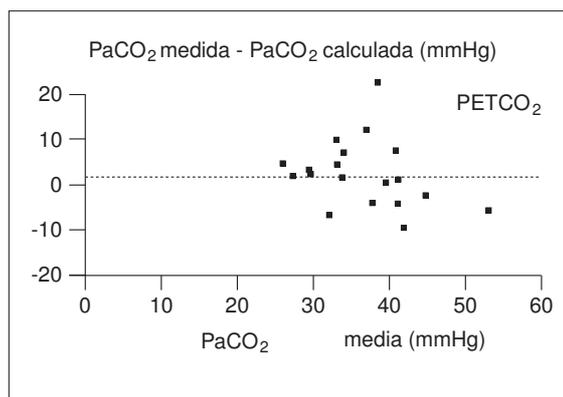


Fig. 3. Análisis de concordancia entre los valores de PaCO<sub>2</sub> calculados mediante la presión telespiratoria de CO<sub>2</sub> y los medidos mediante gasometría arterial.

repetirse con mucha frecuencia, para la determinación de la presión arterial de oxígeno y la PaCO<sub>2</sub>. Para evitar la extracción de tantas muestras de sangre arterial, se ha intentado sustituir esta técnica invasiva por técnicas no invasivas. Así, la medida de saturación arterial de oxígeno, mediante pulsioximetría, permite objetivar la eficacia de la oxigenación arterial. Por el contrario, aún no existe una técnica no invasiva que haya sustituido a la medición de la PaCO<sub>2</sub> en muestras arteriales de sangre<sup>1,3</sup>.

La determinación de la presión transcutánea de CO<sub>2</sub> (PtCO<sub>2</sub>) se basa en la utilización de un electrodo de Severinghaus modificado<sup>8</sup>, el cual es capaz de detectar y cuantificar el CO<sub>2</sub> que difunde a través de la piel. Su utilidad práctica se ha limitado debido a la necesidad de ser preciso calentar la piel hasta 44 °C, la cual sobrepasa el umbral lesivo del tejido cutáneo, por lo que para evitar la aparición de quemaduras, los parches deben cambiarse de localización cada 4-6 horas. Además, aunque la PtCO<sub>2</sub> refleja de forma bastante exacta la PaCO<sub>2</sub> en situaciones de estabilidad hemodinámica y metabólica ( $r = 0,93$ )<sup>9</sup>, esta correlación se pierde ante la aparición de fiebre y edemas, y en los casos de hipoperfusión periférica y shock, en los que la PtCO<sub>2</sub> aumenta de for-

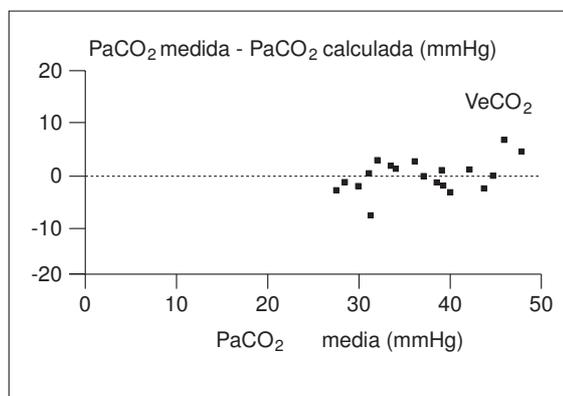


Fig. 4. Análisis de concordancia entre los valores de PaCO<sub>2</sub> calculados mediante la eliminación de CO<sub>2</sub> y los medidos mediante gasometría arterial.

ma desproporcionada por la acumulación del CO<sub>2</sub> en los tejidos<sup>10,11</sup>.

La determinación mediante capniografía de la presión teleespiratoria de CO<sub>2</sub> (PETCO<sub>2</sub>) permite monitorizar la PCO<sub>2</sub> alveolar y, por tanto, la PaCO<sub>2</sub><sup>12</sup>, ya que esta última no es más que la representación fisiológica de la PCO<sub>2</sub> alveolar verdadera. Las determinaciones aisladas de PaCO<sub>2</sub> y PETCO<sub>2</sub> presentan una buena correlación estadística entre sí; de hecho, en pacientes con una función pulmonar normal la PETCO<sub>2</sub> es un fiel reflejo de la PaCO<sub>2</sub>, manteniéndose entre 1 y 5 mmHg por debajo del valor de la PaCO<sub>2</sub><sup>13,14</sup>.

Los niveles de PETCO<sub>2</sub> se pueden alterar en las siguientes situaciones: variaciones en el aporte de CO<sub>2</sub> a los pulmones, secundarias a cambios en el gasto cardíaco o en la producción de CO<sub>2</sub>, variaciones de la ventilación alveolar y, finalmente, a problemas técnicos relacionados con la medida de la PETCO<sub>2</sub><sup>3</sup>. En nuestro estudio se exigió tanto una estabilidad metabólica (VO<sub>2</sub> estable) como hemodinámica para que los cambios de la PETCO<sub>2</sub> reflejaran variaciones de la ventilación alveolar.

En sujetos sanos, el gradiente PaCO<sub>2</sub>-PETCO<sub>2</sub> normalmente es menor de 5 mmHg; sin embargo, en pacientes con patología pulmonar, en los que se afecta la relación V/Q, dicho gradiente aumenta de forma impredecible en 10 mmHg o más, por lo que los niveles de PETCO<sub>2</sub> dejan de ser un fiel reflejo de la PaCO<sub>2</sub>, como confirmaron Yamanaka MK y Sue DY<sup>15</sup> en un estudio realizado en 17 pacientes, en el que, por otro lado, defienden la utilidad del gradiente PaCO<sub>2</sub>-PETCO<sub>2</sub> para la monitorización de la eficacia de la ventilación, ya que, según ellos, se correlaciona de forma estrecha con el Vd/Vt.

Un descenso en los niveles de PETCO<sub>2</sub> puede reflejar un ascenso, un descenso o incluso ninguna variación en los niveles de PaCO<sub>2</sub> y, aunque normalmente una PETCO<sub>2</sub> elevada refleja unos niveles elevados de PaCO<sub>2</sub>, la cuantía del aumento de los mismos puede estar infraestimada<sup>3</sup>. Por otro lado, el gradiente PaCO<sub>2</sub>-PETCO<sub>2</sub> puede ser negativo siendo las causas más frecuentemente referidas el paso de CO<sub>2</sub> del espacio muerto anatómico al alveolo más compliante, el equilibrio entre la presión alveolar de CO<sub>2</sub> con la presión venosa mixta de CO<sub>2</sub> en pacientes con un V/Q descendido, el efecto Haldane, asociado a una liberación de CO<sub>2</sub> conforme la hemoglobina se satura de oxígeno, y la negatividad de la pared del capilar pulmonar, la cual atrae a los protones (H<sup>+</sup>) liberando a su vez CO<sub>2</sub> a partir del bicarbonato<sup>16</sup>.

Hoffman et al<sup>17</sup> analizaron de forma simultánea la PETCO<sub>2</sub> y la PaCO<sub>2</sub> en 20 pacientes sometidos a ventilación mecánica, obteniendo una buena correlación entre ambos parámetros (r = 0,78); sin embargo, al variar los parámetros ventilatorios, la correlación entre los cambios de ambas variables con respecto a los valores basales, presentaban una débil correlación (r = 0,58); además, en cuatro pacientes el cambio de la PETCO<sub>2</sub> fue en sentido opuesto al sufrido la PaCO<sub>2</sub>. Así mismo, Hess et al<sup>18</sup> encontraron que las variaciones de la PETCO<sub>2</sub> indicaban de

forma errónea la dirección del cambio en la PaCO<sub>2</sub>, en el 43% de los pacientes a los que se estaba retirando la ventilación mecánica, aunque este hallazgo fue clínicamente poco relevante.

Las variaciones encontradas entre PETCO<sub>2</sub> y PaCO<sub>2</sub> se deben al desequilibrio existente entre la ventilación y la perfusión alveolar<sup>13,19</sup>: el gradiente PaCO<sub>2</sub>-PETCO<sub>2</sub> aumentará si existe una mayor contribución de la ventilación desde regiones con un V/Q elevado. Así, y aunque la PETCO<sub>2</sub> es una estimación pobre de la PaCO<sub>2</sub>, la diferencia entre estos dos valores puede tener cierta importancia clínica en los pacientes con enfermedades pulmonares como el síndrome de distrés respiratorio del adulto (SDRA)<sup>20</sup> y en pacientes que están en la fase de destete del respirador<sup>21</sup>.

Por todo ello, la utilidad de la PETCO<sub>2</sub> como reflejo de la PaCO<sub>2</sub> se pierde en los pacientes críticos<sup>22</sup>, y en enfermos con patología pulmonar parenquimatosa, donde, como hemos visto, el gradiente PaCO<sub>2</sub>-PETCO<sub>2</sub> varía de forma impredecible<sup>18,23</sup>. Diversos factores técnicos, tales como la velocidad de los flujos, tamaño del tubo endotraqueal y lugar de colocación del sensor, complican el análisis y la interpretación correcta de los niveles de PETCO<sub>2</sub>, limitando aún más su utilización en dichos pacientes<sup>24,25</sup>.

La calorimetría indirecta es una técnica no invasiva de monitorización continua que mide el intercambio gaseoso, flujos inspiratorios y espiratorios, así como concentraciones y volúmenes para calcular la velocidad del consumo de oxígeno (VO<sub>2</sub>) y la eliminación de dióxido de carbono (VeCO<sub>2</sub>)<sup>26</sup>. Esta última, cuando se determina en una situación de estabilidad metabólica, hemodinámica y ventilatoria, refleja la producción de CO<sub>2</sub> (VCO<sub>2</sub>), ya que las pérdidas de CO<sub>2</sub> a través de la piel son despreciables (1%-2% de la producción total), al igual que las de excretadas por la orina y las heces<sup>27</sup>.

Si se produce una situación de inestabilidad es necesario un tiempo de equilibrio para que se alcance una nueva situación estable. Hennenberg et al<sup>28</sup> demostraron que debían transcurrir entre 20 y 120 minutos, según el peso, la talla, y el estado hemodinámico del paciente, tras un cambio respiratorio o circulatorio en la situación basal, para medir de forma precisa, mediante calorimetría indirecta, la producción de CO<sub>2</sub>, ya que éste era el tiempo necesario para alcanzar un nuevo estado de equilibrio.

El interés despertado por la monitorización metabólica en los pacientes críticos se debe al reconocimiento de la importancia que tiene un adecuado soporte nutricional del enfermo crítico. Actualmente esta técnica se utiliza en las Unidades de Cuidados Intensivos (UCI) con diferentes objetivos:

I. Valoración nutricional: la malnutrición se asocia con un incremento de la mortalidad y con la aparición de debilidad muscular, depresión inmunitaria y retraso de la cicatrización de heridas<sup>29</sup>. Además, el aporte excesivo de calorías y nutrientes puede inducir intolerancia hidrocarbonada, disfunción hepática, esteatosis hepática, aumento de la VCO<sub>2</sub><sup>30</sup>, elevación

del volumen minuto y aparición y/o mantenimiento de la insuficiencia respiratoria<sup>31</sup>. La calorimetría indirecta es actualmente la técnica de referencia en la estimación energética en los pacientes críticos y sus resultados constituyen una guía adecuada para la administración de la nutrición artificial<sup>32</sup>.

2. Utilización de sustratos: con la calorimetría indirecta se monitorizan el consumo de oxígeno, la eliminación de CO<sub>2</sub> y, deducido de estos valores, el cociente respiratorio (RQ), el cual refleja la utilización de los nutrientes suministrados, permitiendo un adecuado aporte de sustratos energéticos (hidratos de carbono/lípidos).

3. Valoración hemodinámica: mediante la cuantificación del VO<sub>2</sub> se puede calcular, sin necesidad de cateterizar la arteria pulmonar, el gasto cardíaco mediante el método de Fick, consiguiéndose una monitorización continua y no invasiva de dicho valor en pacientes críticos<sup>33</sup>.

4. Monitorización del espacio muerto: si la producción de CO<sub>2</sub> es estable, cualquier variación que se produzca en la ventilación alveolar aumentará o disminuirá la PaCO<sub>2</sub> según disminuya o eleve la eliminación de CO<sub>2</sub><sup>34</sup>. Diversos estudios han demostrado la utilidad de la VeCO<sub>2</sub> como método de monitorización de la ventilación alveolar y del espacio muerto en pacientes con soporte ventilatorio<sup>35-38</sup>.

5. Determinación de la PaCO<sub>2</sub>: recientemente hemos desarrollado una formulación que permite calcular los niveles de PaCO<sub>2</sub> en pacientes con soporte ventilatorio completo en el minuto siguiente de variar los parámetros ventilatorios<sup>6</sup>.

Para que los datos obtenidos mediante la calorimetría indirecta sean fiables hay que evitar las posibles causas de error: durante la fase de recolección y almacenaje de los gases éstos se pueden producir a nivel de pérdida o adición de gases, dilución de los mismos o por hiperventilación; mientras que en la fase de análisis de los gases los errores provienen de fluctuaciones en la fracción inspirada de oxígeno, utilización de FiO<sub>2</sub> elevadas, no medición del volumen inspiratorio, mala calibración de los sistemas o interferencias causadas por el vapor de agua<sup>39</sup>. Además, para una correcta valoración del equilibrio ventilatorio y de la PaCO<sub>2</sub>, es preciso que el paciente se mantenga en una situación de estabilidad hemodinámica y metabólica; la primera fue valorada en nuestro estudio mediante la presión arterial media, la segunda mediante el consumo de oxígeno.

En nuestro estudio se confirma la escasa utilidad del gradiente PaCO<sub>2</sub>-PETCO<sub>2</sub> para la determinación de los cambios sufridos por la PaCO<sub>2</sub> de pacientes críticos en los que se han variado los parámetros ventilatorios. Frente a la gasometría arterial, presenta una correlación lineal de  $r = 0,55$  ( $p < 0,05$ ). Sin embargo, la determinación de la PaCO<sub>2</sub> mediante la monitorización de la eliminación de CO<sub>2</sub> mantiene una correlación lineal, frente a la gasometría arterial de  $r = 0,93$  ( $p < 0,001$ ), similar a la descrita en estudios previos<sup>6</sup>.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Marini JJ, Truitt J. Monitoring the respiratory system. En: Hall JB, Schmidt GA, Wood LH, eds. Principles of critical care. Nueva York: McGraw-Hill, Inc, 1998; 131-154.
2. Popovich J. Mechanical ventilation: keeping all systems 'go'. J Respir Dis 1985; 6: 69-83.
3. Jubran A, Tobin MJ. Monitoring gas exchange during mechanical ventilation. En: Tobin MJ, ed. Principles and Practice of mechanical ventilation. Nueva York: McGraw-Hill, Inc., 1994; 919-943.
4. Nunn JF. Carbon dioxide. En: Nunn JF, ed. Applied respiratory physiology. Cambridge: Butterworth Heinemann; 1993; 219-246.
5. Solis R, Anselmi C, Laviets M, Khan A. Rate of decay or increment of PaO<sub>2</sub> following a change in supplemental oxygen in mechanically ventilated patients with diffuse pneumonia. Chest 1993; 103: 554-556.
6. Peláez J, Jiménez M, Asensio MJ, López J, Arce MA, Yus S. Estimación de la PCO<sub>2</sub> arterial mediante calorimetría indirecta durante la ventilación mecánica. Med Intensiva 1997; 21: 91-95.
7. Bland JM, Altman DG. Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement. Lancet 1986; 1:3 07-310.
8. Mc Lellan PA, Goldstein RS, Ramcharan V, Rebuck AS. Transcutaneous carbon dioxide monitoring. Am Rev Respir Dis 1981; 124: 199-201.
9. Palmisano BW, Severinghaus JW. Transcutaneous PCO<sub>2</sub> and PO<sub>2</sub>: a multicenter study of accuracy. J Clin Monit 1990; 6: 189-195.
10. Tremper KK, Shoemaker WC. Transcutaneous oxygen monitoring of critically ill adults, with and without low flow shock. Crit Care Med 1981; 9: 706-709.
11. Martin RJ. Transcutaneous monitoring: instrumentation and clinical applications. Respir Care 1990; 35: 577-583.
12. Rebuck AS, Chapman KR. Measurement and monitoring of exhaled carbon dioxide. En: Nochomovitz ML, Cherniak NS, eds. Noninvasive respiratory monitoring. Nueva York: Churchill Livingstone, 1986; 189-201.
13. Nunn JF, Hill DW. Respiratory dead space and arterial to end-tidal CO<sub>2</sub> tension difference in anesthetized man. J Appl Physiol 1960; 15:383-389.
14. Healey JH, Fedullo AJ, Swinburne AJ, Wahl GW. Comparison of noninvasive measurements of carbon dioxide tension during withdrawal from mechanical ventilation. Crit Care Med 1987; 15: 764-768.
15. Yamanaka MK, Sue DY. Comparison of arterial-end-tidal PCO<sub>2</sub> difference and dead space/tidal volume ratio in respiratory failure. Chest 1987; 95: 832-835.
16. Moorthy SS, Losasso AM, Wilcox J. End-tidal PCO<sub>2</sub> greater than PaCO<sub>2</sub>. Crit Care Med 1984; 12:534-535.
17. Hoffman RA, Krieger BP, Kramer MR, Segel S, Bizousky F, Gazeroglu H, et al. End-tidal carbon dioxide in critically ill patients during changes in mechanical ventilation. Am Rev Respir Dis 1989; 140:1.265-1.268.
18. Hess D, Schlottag A, Levin B, Mathai J, Rexrode WO. An evaluation of the usefulness of end-tidal PCO<sub>2</sub> to aid weaning from mechanical ventilation following cardiac surgery. Respir Care 1991; 36: 837-843.
19. Hatle L, Rokseth R. The arterial to end-expiratory carbon dioxide tension gradient in acute pulmonary embolism and other cardiopulmonary diseases. Chest 1974; 66: 352-357.
20. Shimada Y, Yoshiya I, Tanaka K, Sone S, Sakurai M. Evaluation of the progress and prognosis of adult respiratory distress syndrome. Simple respiratory physiologic measurement. Chest 1979; 76: 180-186.
21. McNabb L, Globerson T, St Clair R, Wilson AF. The arterial-end tidal CO<sub>2</sub> difference in patients on ventilators. Chest 1981; 80: 381.
22. Moorthy SS, Losasso AM, Wilcox J. End-tidal PCO<sub>2</sub> greater than PaCO<sub>2</sub>. Crit Care Med 1984; 12: 534-535.
23. Yamanaka MK, Sue DY. Comparison of arterial-end-tidal PCO<sub>2</sub> difference and dead space/tidal volume ratio in respiratory failure. Chest 1987; 92: 832-835.
24. Zupan J, Martin M, Benumof JL. End-tidal CO<sub>2</sub> excretion

waveform and error with gas sampling line leak. *Anesth Analg* 1988; 67: 579-581.

25. Badgewell JM, McLeod ME, Lerman J, Creighton RE. End-tidal PCO<sub>2</sub> measurements sampled at the distal and proximal ends of the endotracheal tube in infants and children. *Anesth Analg* 1987; 66: 959-964.

26. Bursztein S, Elwyn DH, Askanazi J, Kinney JM, eds. Energy metabolism, indirect calorimetry and nutrition. Baltimore: Williams & Wilkins, 1989.

27. Livesey G, Elia M. Estimation of energy expenditure, net carbohydrate utilization, and net fat oxidation and synthesis by indirect calorimetry: evaluation of errors with special reference to the detailed composition of fuels. *Am J Clin Nutr* 1988; 47: 608-628.

28. Hennenberg S, Söderberg D, Groth T, Stjernström H, Wiklund L. Carbon dioxide production during mechanical ventilation. *Crit Care Med* 1987; 15: 8-13.

29. Apelgren KN, Rombeau JL, Twomey PL, Miller RA. Comparison of nutritional indices and outcome in critically ill patients. *Crit Care Med* 1982; 10: 305-307.

30. Askanazi J, Rosenbaum SH, Hyman AI, Silverberg PA, Milic-Emili J, Kinney JM. Respiratory changes induced by the large glucose loads of total parenteral nutrition. *JAMA* 1980; 243: 1.444-1.447.

31. Cowelli HD, Black JW, Olsen MS, Beekman JF. Respiratory failure precipitated by high carbohydrate loads. *Ann Intern Med* 1981; 95: 579.

32. Makk LJK, Mc Clave SA, Creech PW, Johnson DR, Short

AF, Whitlow NL, et al. Clinical application of the metabolic cart to the delivery of total parenteral nutrition. *Crit Care Med* 1990; 18: 1.320-1.327.

33. Hankeln K, Michelsen H, Kubiak V, Beez M, Boehmert F. Continuous, on-line, real-time measurement of cardiac output and derived cardiorespiratory variables in the critically ill. *Crit Care Med* 1985; 13: 1.071-1.073.

34. Takala J, Keinänen O, Väisänen P, Kari A. Measurement of gas exchange in intensive care: laboratory and clinical validation of a new device. *Crit Care Med* 1989; 17: 1.041-1.047.

35. Kiiski R, Takala J, Eissa T. Measurement of alveolar ventilation and changes in deadspace by indirect calorimetry during mechanical ventilation: a laboratory and clinical validation. *Crit Care Med* 1991; 19: 1.303-1.309.

36. Taskar V, John J, Larsson A, Wetterberg T, Johnson B. Dynamics of carbon dioxide elimination following ventilator re-setting. *Chest* 1995; 108: 196-202.

37. Lum L, Saville A, Shekhar T. Accuracy of physiologic dead space (V<sub>d</sub>/V<sub>t</sub>) measured in intubated pediatric patients using a metabolic monitor. Comparison with the Douglas bag method. *Crit Care Med* 1997; 25 (Suppl 1): A102.

38. Peláez J, Asensio MJ, Sánchez M, García A, Jiménez M. Aplicaciones no metabólicas de la calorimetría indirecta. *Nutr Hosp* 1999; 14: 23-30.

39. Sánchez JM. Valoración del gasto energético en enfermos críticos. En: François M, Artigas A, eds. *Nutrición artificial en reanimación*. Barcelona. Masson, 1988.