

Pulsioximetría y capnografía

F.J. Cambra Lasaosa y M. Pons Ódena

Unidad de Cuidados Intensivos Pediátricos. Unidad Integrada de Pediatría.
Hospital Sant Joan de Déu-Clinic. Universidad de Barcelona. España.

Los métodos no invasivos de monitorización son fundamentales en el manejo del paciente crítico, característica que los hace todavía más interesantes en el ámbito pediátrico. La pulsioximetría valorando la SatHb permite variar las concentraciones de oxígeno administradas al paciente según sus necesidades, disminuyendo el número de gasometrías realizadas, y consigue un seguimiento continuo del niño críticamente enfermo. Existen una serie de servidumbres que pueden alterar la exactitud de la técnica como el estado de la perfusión o los movimientos del paciente, que pueden ir subsanándose gracias al empleo de pulsioxímetros más sofisticados.

La medición del CO₂ espirado mediante un capnógrafo constituye un método excelente para valorar en determinadas circunstancias, fundamentalmente en el paciente intubado la eliminación de CO₂ en tiempo real. La capnografía consiste en la medida y visualización gráfica del trazado de la concentración de CO₂ y la capnometría en la visualización numérica de esa concentración. Esta técnica de monitorización puede resultar de gran utilidad en el seguimiento de diversas alteraciones respiratorias y situaciones como el destete o en la comprobación de la correcta ubicación de una cánula endotraqueal.

Palabras clave:

Pulsioximetría. Capnografía. CO₂ espirado. Monitorización continua. Pediatría.

PULSE OXIMETRY AND CAPNOGRAPHY

Noninvasive methods of monitoring are crucial in the management of intensive care patients, especially in the pediatric field. Pulse oxymetry measures arterial oxygen saturation in severely ill patients, allows oxygen requirements to be adjusted to the patient, reduces invasive gasometric studies and achieves continuous monitoring of the critically ill child. Motion and deficient tissular perfusion reduce the accuracy of the measured values, but more sophisticated pulse oximeters are more effective in preventing these artifacts.

Capnometers are an excellent method of measuring end-tidal CO₂ values in real time in intubated patients. Capnography produces a graphic curve of end-tidal CO₂ while capnometry provides a numerical representation of this concentration. This technique is highly useful in the continuous monitoring of various respiratory problems and situations such as weaning or checking the correct placement of endotracheal cannulas.

Key words:

Capnography. Pulse oximetry. End-tidal CO₂. Continuous monitoring. Child.

PULSIOXIMETRÍA

Concepto

La pulsioximetría es una técnica incruenta que valora la SatO₂ basándose en las propiedades de absorción espec-

Correspondencia Dr. M. Pons Ódena.
Pº Sant Joan de Déu, 2. 08950 Esplugues de Llobregat. Barcelona. España.
Correo electrónico: mpons@hsjdbcn.org

Recibido en abril de 2003.
Aceptado para su publicación en abril de 2003.

tofotométricas de la hemoglobina. Para valores superiores al 70% la exactitud de la técnica es del 4%.

El sensor mide la saturación de oxígeno de las hemoglobinas funcionales, utilizando dos diodos emisores de luz como fuentes luminosas y un fotodiodo como detector de luz. Los diodos emisores (leds) y el fotodiodo están situados frente a frente, a ambos lados de una arteria. Un emisor manda luz roja con una longitud de onda de 660 nm y el otro infrarrojo de 910 nm y el fotodiodo mide la cantidad de cada tipo de luz que se transmite a través del tejido. Con una longitud de onda de 660 nm la hemoglobina oxigenada refleja la luz de manera más efectiva que la reducida, y con longitudes de onda de 940 nm sucede al contrario. El pulsioxímetro mide de manera continua la absorción de luz a cada longitud de onda. Cuando no está presente la sangre pulsátil, el tejido, el hueso y la sangre venosa absorben una cantidad de luz relativamente constante. Con el impulso cardíaco se produce un flujo de sangre arterial que inunda los tejidos; de esta forma, se incrementa la absorción de ambas longitudes de onda, pero como esta sangre es rica en oxihemoglobina, se absorbe proporcionalmente más luz infrarroja. Para cada longitud de onda se determina la luz absorbida cuando la sangre pulsátil está presente y cuando no está presente. A partir de estos dos valores los monitores calculan el logaritmo de su relación determinando la saturación de oxígeno (Ley de Beer). También miden la frecuencia del pulso^{1,2}.

Ventajas

La introducción de este método de monitorización permite variar las concentraciones de oxígeno según las necesidades del paciente, disminuyendo el número de gasometrías arteriales, además de permitir un seguimiento continuo del paciente crítico o potencialmente grave que permitirá responder con rapidez a los problemas de oxigenación que puedan surgir³.

Factores que influyen en la pulsioximetría

Deben tenerse en cuenta una serie de factores al valorar la exactitud de la pulsioximetría.

1. Correlación con la clínica. Es importante buscar una buena correlación clínica con la saturación determinada por el monitor, ya que puede ocurrir en ocasiones que exista una importante disparidad entre la saturación que puede marcar cifras del 100% existiendo en realidad una importante cianosis.

2. Colocación del sensor. El emisor y el receptor tienen que estar situados uno frente a otro, ya que en otro caso la medición no será correcta. Los lugares más habituales para su colocación son los dedos de manos o pies, el lóbulo de la oreja y, en niños muy pequeños, en la mano o el tobillo.

3. Alteraciones del flujo arterial. Si se producen alteraciones del flujo arterial en la zona donde está situado el sensor pueden producirse medidas incorrectas. La colocación del pulsioxímetro en situación distal a un catéter intraarterial puede dar medidas inexactas, y si se ubica distalmente a un manguito de presión se producirá la desaparición de la medición de la pulsioximetría coincidiendo con el aumento de presión del manguito al realizar la medición de la PA.

4. Situaciones de mala perfusión periférica. La hipotermia, hipotensión, bajo gasto cardíaco y vasoconstricción, pueden dar lecturas incorrectas o imposibilidad de medición.

5. Pigmentación cutánea. La hiperpigmentación cutánea puede dar falsas lecturas, por lo que en niños de raza negra puede haber problemas en su valoración. Si se utilizan los sensores digitales, alteraciones de las uñas (onicomicosis) o su coloración con diversas lacas pueden alterar los resultados^{1,3}.

6. Movimientos. Con los movimientos puede perderse la lectura o que ésta sea inexacta. Es importante asegurarse que exista una buena onda de pulso en el monitor para considerar que la medición de pulsioximetría es correcta.

7. Carboxihemoglobina. Cuando existen concentraciones elevadas de carboxihemoglobina, la pulsioximetría refleja mediciones erróneamente altas, ya que la carboxihemoglobina absorbe muy poca luz infrarroja, pero mucha roja. Por cada 1% de carboxihemoglobina circulante el pulsioxímetro hipervalora un 1% más de saturación de oxígeno. Por esta razón, la pulsioximetría no es útil para valorar la oxigenación en casos de intoxicación por CO.

8. Metahemoglobinemia. La metahemoglobina presenta una absorción igual para la luz roja e infrarroja. Con valores elevados de metahemoglobina la pulsioximetría se sitúa en torno al 85%.

9. Colorantes como el azul de metileno, el verde de indocianina o el índigo carmín pueden dar saturaciones inferiores a la real, siendo este efecto transitorio hasta que se produce su distribución.

10. Iluminación cercana. Las lámparas de luz infrarroja producen valores de pulsioximetría inferiores a los reales y las fluorescentes y de xenón valores superiores.

11. Modelo de pulsioxímetro. La exactitud de los diferentes pulsioxímetros puede variar según el modelo utilizado. La aplicación de nuevas técnicas, la adopción de filtros y utilización de diferentes algoritmos de trabajo en los monitores (Masimo®) permite disponer en la actualidad de aparatos capaces de minimizar el error producido por el movimiento, frío o situaciones de bajo gasto, lo que representa un considerable aumento de la fiabilidad de la pulsioximetría en diversas circunstancias como en la monitorización de recién nacidos y pacientes de menor edad y durante el transporte de pacientes críticos^{4,5}.

CAPNOGRAFÍA

Concepto

El CO_2 es producido por el metabolismo tisular y transportado posteriormente por la sangre a los pulmones donde pasa al alvéolo siendo después exhalado. La concentración de CO_2 al final de la espiración puede considerarse un fiel reflejo de la PaCO_2 . La concentración será invariablemente menor que la arterial aunque la diferencia arterioalveolar de CO_2 ($D_{(a-A)}\text{CO}_2$) no será superior a 2-3 mmHg⁵.

El CO_2 posee unas bandas de absorción características, de gran intensidad, en la región infrarroja, en torno a los 4.200 nm, gracias a esto, es posible su medición continua en los gases respiratorios. Para su cuantificación, además del análisis infrarrojo, puede utilizarse la espectrometría masiva, aunque este método es muy caro y su mantenimiento difícil, por lo que su uso en clínica para la monitorización sistemática es prácticamente inexistente.

La medición del CO_2 en los gases respiratorios es un medio no invasivo que permite una monitorización continua en tiempo real de la eliminación de CO_2 . Requiere el análisis de gas espirado no contaminado, por lo que su mayor utilidad se encuentra en el estudio de pacientes intubados^{6,7}.

Capnografía y capnometría

La capnografía consiste en la medida y visualización gráfica del trazado de la concentración de CO_2 mediante un capnógrafo en el que a través de una cámara de medición, se analizan los gases respiratorios durante todo el ciclo respiratorio, inspiración y espiración. En el trazado capnográfico la PCO_2 se encuentra en el eje de ordenadas y el tiempo en el eje de abscisas. Las velocidades de registro rápidas, mayores a 10 mm/s, evalúan cada respiración y las velocidades lentas, menores a 1 mm/s, permiten evaluar la tendencia del capnograma espiratorio.

La capnometría consiste en la medición y la visualización numérica de esa concentración de CO_2 (sin visualización gráfica del trazado).

En el análisis infrarrojo existen dos tipos de analizadores según la forma en el que el gas llegue a la cámara de medición. Ambos sistemas requieren la colocación de una pieza para poder acoplar el analizador, que añadirá un pequeño espacio muerto al circuito.

1. *En línea.* En este caso la cámara y el analizador forman parte del circuito del ventilador.

2. *De muestreo lateral.* Existe un sistema de succión que aspira el gas hasta el monitor que tiene el analizador en su interior.

Capnografía normal

La capnografía se trata de una técnica más cualitativa que cuantitativa, y la morfología del capnograma puede

aportar en según qué situaciones más información que la medición aislada de la presión de CO_2 al final de la espiración (PetCO_2)^{7,8}.

En la inspiración la concentración de CO_2 es de 0 y a medida que progresa la espiración va aumentando su contenido, existiendo tres compartimentos seriados: espacio muerto instrumental, espacio muerto anatómico y el gas alveolar⁶. Se puede dividir el trazado capnográfico en tres fases (fig. 1):

1. *Fase I (línea A-B).* Traduce el inicio de la espiración y representa primordialmente el gas del espacio muerto anatómico, por lo que las concentraciones de CO_2 serán bajas.

2. *Fase II (línea B-C).* En esta fase se produce un incremento rápido en la curva que traduce el aumento progresivo en las concentraciones de CO_2 en el aire espirado al vaciarse de forma progresiva los alvéolos.

3. *Fase III (línea C-D).* Se produce una meseta en el trazado que informa esencialmente del gas alveolar. El valor máximo de CO_2 en esta fase normalmente coincide con el final de la espiración y se denomina presión parcial de CO_2 corriente final o *end tidal* (PetCO_2) y será reflejo de la PCO_2 arterial. Después de la meseta se dará un descenso brusco de CO_2 a la línea basal que corresponde a la inspiración (línea D-E).

Las enfermedades obstructivas de la vía aérea pueden dar una curva de espiración prolongada con una meseta poco definida y las alteraciones restrictivas muestran una meseta mellada.

Estimación de la PaCO_2 a partir de la PetCO_2 : diferencia arterio-alveolar de CO_2 ($D_{(a-A)}\text{CO}_2$)

La PaCO_2 normal es de 40 mmHg y refleja el contenido de CO_2 de la sangre arterial. La presión de CO_2 alveo-

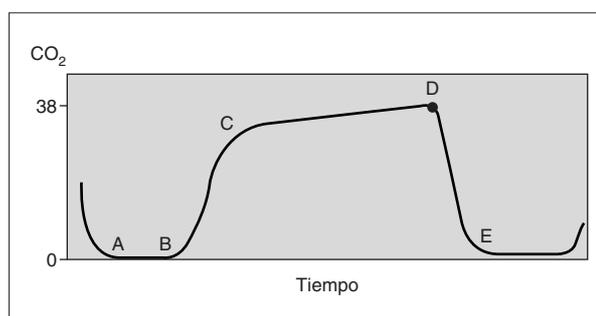


Figura 1. Trazado capnográfico normal. Línea A-B: Inicio de la espiración. Línea B-C: aumento de CO_2 en el aire espirado al vaciarse progresivamente los alvéolos. Línea C-D: meseta de gas alveolar. El valor máximo del CO_2 coincide con el final de la espiración (PetCO_2). Línea D-E: descenso brusco del CO_2 a la línea basal que corresponde a la inspiración.

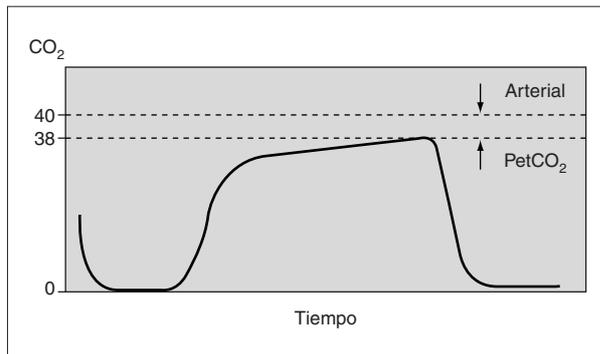


Figura 2. Diferencia normal entre la $PaCO_2$ y la $PetCO_2$ (CO_2 al final de la espiración).

lar ($PaCO_2$) refleja la presión de todos los alvéolos participantes en la ventilación. La presión parcial de CO_2 al final de la espiración ($PetCO_2$) refleja normalmente toda la $PaCO_2$ y sus valores normales son de 37-38 mmHg. La diferencia normal entre la $PaCO_2$ y la $PetCO_2$ ($D_{(a-N)}CO_2$) es de 2-3 mmHg (fig. 2). En condiciones en las que existe una correcta perfusión y ventilación pulmonar la diferencia $D_{(a-N)}CO_2$ es pequeña, por lo que la $PetCO_2$ puede utilizarse para monitorizar al paciente, ya que refleja⁹ la $PaCO_2$.

En el momento de iniciar la capnografía se debe realizar una extracción de sangre arterial para medición de los gases en sangre, poder correlacionar simultáneamente ambos valores y calcular su gradiente. Posteriormente puede utilizarse el CO_2 espirado para efectuar el seguimiento del niño.

Capnografía en pacientes sin alteración de la ventilación-perfusión

En los pacientes con un parénquima pulmonar normal y una correcta perfusión, la $PetCO_2$ es un fiel reflejo de la $PaCO_2$. En estas situaciones, la capnografía disminuye la necesidad de gasometrías, es útil para diagnosticar hiperventilación o hipoventilación y para detectar de forma inmediata diversos problemas como intubación incorrecta o desplazamientos del tubo endotraqueal^{10,11}.

Diagnóstico de hiperventilación e hipoventilación

La $PetCO_2$ será útil en clínica para modificar las características de la ventilación mecánica, tal como se hace con la gasometría. Hay que tener en cuenta que:

1. Una $PetCO_2$ baja puede indicar hiperventilación, hipotermia o acidosis metabólica.
2. Una $PetCO_2$ alta puede indicar hipoventilación, hipotermia o alcalosis metabólica.

Detección de reinspiración del aire espirado

En esta circunstancia irán ascendiendo progresivamente tanto la línea basal del trazado de la capnografía como

la $PetCO_2$ que será más elevada. Algunos capnógrafos cuantifican y expresan numéricamente la PCO_2 inspirada lo que ayuda a diagnosticar este problema.

Se pueden encontrar alteraciones similares en alteraciones del funcionamiento de la válvula espiratoria del ventilador.

Confirmación de la intubación y desplazamientos del tubo endotraqueal

1. *Intubación.* El CO_2 puede resultar muy útil para comprobar la correcta introducción del tubo endotraqueal en las vías respiratorias; en tal situación a través del tubo saldrá el aire espiratorio del paciente con lo que el capnógrafo detectará presencia de CO_2 ; por el contrario, si el tubo se encuentra alojado en el esófago, al no recoger el flujo espiratorio del niño, el CO_2 será muy bajo o nulo.

2. *Desplazamiento del tubo endotraqueal.* En el desplazamiento del tubo endotraqueal a la hipofaringe se detectará un descenso importante del CO_2 espirado, que se convertirá prácticamente en cero, en el caso de la extubación, por lo que puede detectarse dicha eventualidad con rapidez. Descensos similares se observan en la desconexión del circuito respiratorio o en la oclusión completa del tubo endotraqueal^{12,13}.

3. *Ventilación con máscara laríngea.* Descensos de la $PetCO_2$ nos indicarán una fijación deficiente.

4. *Fuga alrededor del tubo endotraqueal.* Se observa un descenso de la $PetCO_2$ ya que no será cuantificado en su totalidad el gas procedente de los pulmones.

En todas estas situaciones además de disminuir la $PetCO_2$ también se alterará la morfología de la curva de capnografía, pudiendo no observarse una meseta final.

Capnografía en las alteraciones ventilación-perfusión

En las alteraciones de la ventilación-perfusión, secundarias a enfermedad pulmonar (el aire no llena de forma correcta los alvéolos), a alteraciones en la perfusión (la sangre no llega adecuadamente a los alvéolos para que el gas se intercambie), o ambas simultáneamente, no se produce un intercambio gaseoso adecuado. En estas situaciones, la $D_{(a-N)}CO_2$ puede ser importante, y es arriesgado confiar en el CO_2 espirado como reflejo de la arterial, por lo que sólo puede utilizarse el CO_2 espirado una vez calculado el gradiente con la $PaCO_2$ como una tendencia que nos ayude para valorar la evolución.

Ventilación del espacio muerto

Normalmente en cada inspiración existe una parte del volumen aéreo que no alcanza las zonas de intercambio gaseoso, es el espacio muerto anatómico, que está compuesto por el gas que llena las tubuladuras del respirador y las vías aéreas. En diversas alteraciones pulmonares en las que se produce hipoperfusión pulmonar, como en

el tromboembolismo pulmonar, la hipotensión grave, la parada cardíaca, la ventilación mecánica con presiones altas que produce una sobredistensión de los alvéolos con compresión los capilares adyacentes, o el enfisema grave, puede generarse un espacio muerto alveolar, ya que existen alvéolos ventilados pero no perfundidos¹⁴. La composición del gas que contienen estos alvéolos será muy similar a la del aire atmosférico, y al mezclarse con el de otros alvéolos en los que haya existido contacto con la sangre producen una concentración de CO₂ total del aire espirado muy inferior a los valores de CO₂ arterial, aumentando el gradiente PetCO₂-PaCO₂. El CO₂ espirado puede llegar a 0 en situaciones de parada cardíaca, y si existe una reanimación efectiva la capnografía demostrará un aumento progresivo de la PetCO₂.

Cortocircuito pulmonar

En algunas enfermedades pulmonares (atelectasia, bronconeumonía, síndrome de dificultad respiratoria aguda [SDRA], intubación bronquial selectiva) existen alvéolos perfundidos pero no ventilados. La ventilación alveolar continúa gracias a los alvéolos sanos los cuales dan un valor promedio de CO₂ espirado de alrededor de 40 mmHg. La PetCO₂ es aquí un reflejo de los alvéolos que participan en el intercambio gaseoso mostrando niveles normales, y el gradiente PetCO₂-PaCO₂ no se incrementa o incluso puede ser pequeña o nula.

Capnografía en el vaciado alveolar incompleto

En las situaciones en que está dificultado el vaciado de los pulmones en la espiración, como en el asma, alteraciones obstructivas crónicas o en la obstrucción parcial del tubo endotraqueal, también se produce un aumento del gradiente PetCO₂-PaCO₂, con unos niveles de PetCO₂ bajos (fig. 3).

La morfología de la curva ayuda a distinguirla de las alteraciones con aumento del espacio muerto.

Retirada de la asistencia respiratoria

La capnografía puede ser útil en la retirada de la ventilación mecánica¹⁵. En este proceso la capnografía puede servir para:

1. Detectar respiraciones ineficaces y esfuerzos inspiratorios. En modalidades espontáneas, la capnografía puede detectar movimientos respiratorios que movilizan únicamente el aire contenido en el espacio muerto. La curva del capnograma tendrá un ascenso pequeño o nulo y valores bajos de PetCO₂, sin alcanzar la meseta característica de la fase III. También puede identificar esfuerzos respiratorios que no consiguen abrir la válvula inspiratoria, y distinguir las ventilaciones proporcionadas por el ventilador de las realizadas por el niño.

2. Valorar la frecuencia respiratoria y el patrón ventilatorio. Siguiendo la curva del capnograma se puede eva-

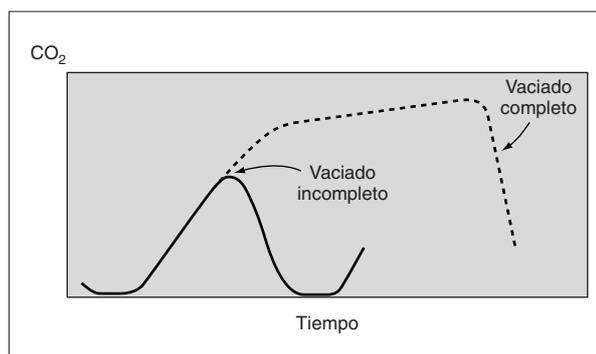


Figura 3. Vaciado alveolar incompleto que puede darse en el asma, alteraciones obstructivas crónicas o en la obstrucción parcial del tubo endotraqueal.

luar la frecuencia respiratoria y el patrón ventilatorio. En ventilación espontánea sirve para detectar la presencia de pausas espiratorias prolongadas y/o alteraciones del ritmo que pueden ser signos de la posibilidad de fracaso en la extubación.

3. Detectar situaciones de ventilación de espacio muerto o cortocircuito pulmonar, mediante la valoración del gradiente PetCO₂-PaCO₂.

Ventajas

1. En situaciones normales del parénquima pulmonar y de su perfusión la PetCO₂ se considera un fiel reflejo de la arterial, lo que permite disminuir el número de gasometrías.

2. Es muy útil en la valoración de la intubación endotraqueal y en el seguimiento de la retirada de la asistencia respiratoria.

3. En las alteraciones de la relación ventilación-perfusión puede ser peligroso confiar en la presión de CO₂ espirado como indicativa de la arterial, aunque puede utilizarse el gradiente y su variación como una orientación evolutiva.

BIBLIOGRAFÍA

1. Casado Flores J. Métodos de medida de la oxigenación. En: Casado Flores, Serrano A, editores. Urgencias y tratamiento del niño grave. Madrid: Ergón, 2000; p. 139-42.
2. De Frutos Martínez C, González Pérez-Yarza E. Monitorización respiratoria. En: López-Herce J, Calvo C, Lorente MJ, Jaimovich D, Baltodano A, editores. Manual de Cuidados Intensivos Pediátricos. 1ª ed. Madrid: Publimed, 2001; p. 579-83.
3. Masclans i Enviz JR, Anglés i Coll R. Monitorización no invasiva en UCI. En Manual de Medicina Intensiva, 2ª ed. Madrid: Harcourt, 2001; p. 53-6.
4. Bohnhorst B, Peter CS, Poets ChF. Pulse oximeters' reliability in detecting hypoxemia and bradycardia: Comparison between a conventional and two new generation oximeters. Crit Care Med 2000;28:1565-8.

5. Shapiro BA, Harrison RA, Cane RC, Templin RK. Manejo clínico de los gases sanguíneos. 4ª ed. Buenos Aires: Panamericana, 1991.
6. Feaster WW, Jost KA, Swedlow DB. Capnografía. California: Nellcor, 1988.
7. Nobel Joel J. Carbon dioxide monitors: Exhaled gas. *Pediatr Emerg Care* 1993;9:244-6.
8. García E, Gutiérrez A, Izquierdo I, Alberola A, Morcillo F. Valor de la capnografía y del CO₂ exhalado en la Unidades de Cuidados Intensivos Neonatales. *An Esp Pediatr* 1997;47:177-80.
9. Rozicki HJ, Sysyn GD, Marshall MK, Malloy R, Wiswell TE. Mainstream end-tidal carbon dioxide monitoring in the neonatal intensive care unit. *Pediatrics* 1998;101:648-53.
10. Bhende MS. Capnography in the pediatric emergency department. *Pediatr Emerg Care* 1999;15:64-9.
11. Carrillo A, Delgado MA, López-Herce J. Reanimación cardiopulmonar avanzada en pediatría. En: Grupo Español de Reanimación Cardiopulmonar Pediátrica y neonatal, editores. Manual de reanimación cardiopulmonar avanzada pediátrica y neonatal. Madrid: Publimed, 2001; p. 63-102.
12. Carli P, Rozemberg A. Pre-hospitalization reanimation in cardiac arrest. *Presse Med* 1999;28:243-5.
13. Bhende MS, Thompson AE. Evaluation of an end-Tidal CO₂ detector during Pediatric Cardiopulmonary Resuscitation. *Pediatrics* 1995;95:395-9.
14. Kline JA, Arunachlam M. Preliminary study of the capnogram waveform area to screen for pulmonary embolism. *Ann Emerg Med* 1998;32:289-96.
15. Blanch LI. Interés de la capnografía durante el weaning. En: Net A, Mancebo J, Benito S, editores. Retirada de la ventilación mecánica. Barcelona: Springer-Verlag, 1995; p. 77-93.