

# TRABAJO FIN DE GRADO

## GUÍA RÁPIDA Y PÓSTER SOBRE CAPNOGRAFÍA



**Paula Pérez de Mendiguren Monreal**

**Directora: Elena Irigaray Osés**

Grado en Enfermería. 4º curso

Primera convocatoria: Junio

Universidad Pública de Navarra

Curso académico 2016/2017

## RESUMEN

La capnografía es un método de monitorización no invasivo que consiste en la medición continua de la presión parcial del dióxido de carbono exhalado a lo largo del tiempo <sup>(1, 2)</sup>.

Presenta gran diversidad de aplicaciones clínicas, aportando información fundamental en tiempo real sobre el estado respiratorio, hemodinámico y metabólico y, por tanto, permite la detección de alteraciones en cualquiera de estos tres procesos <sup>(1, 2)</sup>.

La variedad de resultados y la escasa formación y conocimiento de esta técnica por parte de los profesionales sanitarios, han supuesto que no se utilice lo debidamente requerida en la práctica clínica <sup>(3)</sup>.

La elaboración de este Trabajo Fin de Grado trata de la realización de una guía y un póster que permitan sistematizar los conocimientos precisos acerca de la capnografía con el fin de promover un empleo correcto y eficaz del capnógrafo.

## PALABRAS CLAVE

Capnografía, dióxido de carbono, monitorización, ventilación, enfermería.

## ABSTRACT

Capnography is a non-invasive monitoring method which consists of continuous measurement of carbon dioxide's partial pressure in exhaled breath over time.

It has plenty clinical applications providing basic information about respiratory function, haemodynamic and metabolic systems in real time. Hence, it allows detecting variations in any of these three processes.

The large variety of results and the lack of academic training and knowledge about this technique of nursing professionals have supposed that it is not enough used in clinical practice.

This end of course Final Project attempts to provide a guide and a poster for collating accurate knowledge on capnography in order to promote an appropriate and effective use of the capnograph.

## KEY WORDS

Capnography, carbon dioxide, monitoring, ventilation, nursing.

## ABREVIATURAS

AHA: *American Heart Association*

ASA: *American Society of Anesthesiologists*

ATP: Adenosín trifosfato

BIPAP: *Bilevel Positive Airway Pressure*

CO<sub>2</sub>: Dióxido de carbono

CPAP: *Continuous Positive Airway Pressure*

EPOC: Enfermedad pulmonar obstructiva crónica

ERC: *European Resuscitation Council*

EtCO<sub>2</sub>: *End-tidal CO<sub>2</sub>*

GRADE: *Grading of Recommendations, Assessment, Development and Evaluation*

Hb: Hemoglobina

Hb-CO<sub>2</sub>: Carbaminohemoglobina

HbO<sub>2</sub>: Oxihemoglobina

H<sup>+</sup>: Hidrogenión

H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>: Ácido carbónico

HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>: Ion bicarbonato

O<sub>2</sub>: Oxígeno

PaO<sub>2</sub>: Presión arterial de oxígeno

PaCO<sub>2</sub>: Presión arterial de dióxido de carbono

PCR: Parada cardiorrespiratoria

RCP: Reanimación cardiopulmonar

TEP: Tromboembolismo pulmonar

TET: Tubo endotraqueal

UCI: Unidad de cuidados intensivos

UVI: Unidad de vigilancia intensiva

V/Q: Ventilación/Perfusión

VM: Ventilación mecánica

## ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. Definición e historia de la capnografía .....	1
1.2. Niveles de evidencia y grados de recomendación .....	2
2. OBJETIVOS .....	5
2.1 General .....	5
2.2 Específicos .....	5
3. METODOLOGÍA .....	6
3.1 Diseño del Trabajo Fin de Grado .....	6
3.2 Recursos.....	8
4. DESARROLLO.....	9
4.1. Guía rápida sobre capnografía .....	10
4.2 Póster sobre capnografía.....	42
5. DISCUSIONES Y CONCLUSIONES .....	44
6. AGRADECIMIENTOS .....	45
7. BIBLIOGRAFÍA .....	46
8. ANEXOS.....	52

## 1. INTRODUCCIÓN

La elección del tema de este Trabajo Fin de Grado se fundamenta en el interés de la autora por la enfermería de cuidados intensivos y la consiguiente propuesta de la capnografía como tema objeto de estudio por parte de la tutora Elena Irigaray.

Durante mi estancia como alumna de enfermería en la UCI-A del Complejo Hospitalario de Navarra y posteriormente en la UCI del Hospital de Carabineros de Santiago de Chile, entré en contacto por primera vez con la capnografía, un método de monitorización completamente nuevo para mí. Por ello, consideré la propuesta como una oportunidad para aprender sobre un tema novedoso e interesante, con gran diversidad de aplicaciones clínicas en diferentes ámbitos de atención sanitaria y, sin embargo, muy desconocido en la actualidad por parte de los profesionales de enfermería.

Todo ello evidencia la necesidad de elaborar una guía-póster sobre el capnógrafo dirigido al personal de enfermería para facilitar la interpretación de los datos obtenidos, permitiendo un manejo rápido y eficaz del mismo.

### 1.1. Definición e historia de la capnografía

Se entiende por capnografía “la monitorización continua y no invasiva de la presión parcial de dióxido de carbono exhalado por el paciente a lo largo del tiempo”. De este modo, la capnografía permite monitorizar la ventilación del paciente, proceso que a su vez depende de otros dos que tienen lugar con anterioridad: el metabolismo, en el que tiene lugar la producción de CO<sub>2</sub>, y la perfusión, mediante el cual se transporta el CO<sub>2</sub> hasta los pulmones para que este gas sea expulsado al exterior <sup>(1, 2)</sup>. La medición del CO<sub>2</sub> exhalado tiene, por tanto, estos tres procesos como determinantes fundamentales y cualquier alteración clínica en alguno de ellos producirá variaciones en los valores obtenidos con el capnógrafo <sup>(1, 2, 4)</sup>.

Con el fin de evitar errores, es necesario comprender en primer lugar la diferencia entre la capnografía y la capnometría. La capnografía consiste en la medición y representación gráfica del trazado de la concentración de CO<sub>2</sub>, representándose en el eje vertical la presión parcial de CO<sub>2</sub> exhalado en mmHg y en el eje horizontal el tiempo en segundos. Sin embargo, la capnometría consiste en la medición y visualización numérica de esa concentración de dióxido de carbono, sin visualización gráfica del trazado <sup>(1, 2, 5)</sup>.

La capnografía tiene su base en el descubrimiento del químico Joseph Black, quien en 1775 detectó las propiedades de un gas liberado durante la espiración. Dicho gas, al que llamó “aire fijo”, se trataba del dióxido de carbono <sup>(6)</sup>.

Desde los primeros estudios realizados en la década de los 70 por Smallhout y Kalenda, se ha ido empleando la capnografía para monitorizar al paciente intubado en el medio hospitalario, primero en Europa y a partir de los años 80 en Estados Unidos <sup>(2, 7)</sup>. Desde la década de los 80, ha sido muy común la monitorización del CO<sub>2</sub> exhalado mediante la

capnografía en procedimientos que requerían de anestesia general, para detectar problemas en las vías respiratorias y prevenir tempranamente la disfunción pulmonar o cardíaca <sup>(8)</sup>.

Desde 1991, la *American Society of Anesthesiologists* (ASA) considera que el conjunto de la capnografía y la pulsioximetría es el estándar de atención en la monitorización en quirófano. Desde 1995, la *American College of Emergency Physicians* (ACEP) recomienda el uso de la capnografía de forma rutinaria en el paciente intubado, tanto en el medio intrahospitalario como extrahospitalario. La American Heart Association (AHA) aconseja desde el año 2000 su empleo durante la parada cardiorrespiratoria (PCR) y el tratamiento vascular urgente, en el ámbito intra y extrahospitalario. Desde el 2002, la *Intensive Care Society* la considera un estándar de atención en el transporte del paciente crítico en el Reino Unido y desde el 2005 la *European Resuscitation Council* (ERC) la recomienda para confirmar la correcta colocación del tubo endotraqueal durante la PCR. En el año 2007, la *European Committee for Standardization* elaboró los estándares europeos para las ambulancias terrestres, incluyendo el capnómetro dentro del equipamiento necesario de las unidades de emergencia o UVI móviles <sup>(2,7)</sup>. En la guía de 2010 de la ERC, se hace especial énfasis en el uso de la capnografía para confirmar la correcta posición del tubo endotraqueal, evaluar la calidad de la RCP y proporcionar información de forma temprana sobre la recuperación de la circulación espontánea <sup>(9)</sup>. Asimismo, la última guía publicada por la ERC en 2015 reafirma las recomendaciones dadas en torno a la capnografía <sup>(10)</sup>.

## **1.2. Niveles de evidencia y grados de recomendación**

En la actualidad se pueden distinguir diversas aplicaciones clínicas de la capnografía, unas con mayor grado de evidencia científica que otras.

En los últimos años se ha producido un importante desarrollo de los sistemas de información y ello ha permitido un acceso enorme a información biomédica. Sin embargo, esto que a priori parece ser una gran ventaja, también tiene sus inconvenientes puesto que el gran volumen de información exige una necesidad de actualización constante, puede llevar a resultados discordantes al revisar un tema clínico y en muchas ocasiones se puede observar un desfase enorme entre la evidencia científica publicada y la práctica clínica habitual <sup>(11)</sup>. Esto refleja la necesidad de recurrir a la Medicina Basada en la Evidencia con el fin de utilizar la mejor información científica disponible para aplicarla a la práctica clínica <sup>(12)</sup>.

De esta forma, con el objetivo de establecer el nivel de evidencia y grado de recomendación del empleo de la capnografía/capnometría según las diferentes aplicaciones clínicas, en este trabajo se ha recurrido a la escala *Grading of Recommendations, Assessment, Development and Evaluation* (GRADE) que define la calidad de la evidencia como el grado de confianza que tenemos en que la estimación de un efecto sea la adecuada para efectuar una recomendación <sup>(13)</sup>. En el anexo I se recoge la tabla en la que se especifican los diferentes niveles de evidencia y grados de recomendación de esta escala GRADE.

El empleo de la capnografía en la confirmación de la correcta colocación y posición del tubo endotraqueal cuenta con un nivel de evidencia alto (1A) <sup>(14, 15)</sup>. En numerosos documentos científicos se describe que es ésta la indicación más relevante y de mayor evidencia científica del capnógrafo <sup>(1, 2, 8)</sup>. De este modo, la *European Resuscitation Council* lo recomienda para confirmar y monitorizar de forma continua la correcta posición del TET durante el soporte vital avanzado <sup>(10)</sup>. En el caso en que no se disponga de un capnógrafo, se sugiere la capnometría como método inicial para verificar la posición del tubo en la parada cardíaca, tratándose ésta de una recomendación de grado 2B <sup>(15)</sup>.

Asimismo, la ERC y la AHA recomiendan el uso del mismo para evaluar la calidad de las compresiones torácicas, estimar el pronóstico del paciente y detectar rápidamente la recuperación de la circulación espontánea durante la RCP <sup>(10, 16)</sup>. De este modo, se sugiere la capnografía en pacientes intubados para monitorizar la calidad de la reanimación, optimizar las compresiones torácicas y detectar la recuperación de la circulación espontánea durante las compresiones y cuando el chequeo de ritmo revela un ritmo organizado, atribuyéndole así un grado de recomendación 2C <sup>(15)</sup>.

Respecto a la utilización de la capnografía como uno de los métodos en la vigilancia de la ventilación tanto invasiva como no invasiva, la *American Association of Respiratory Care* señala en la guía de práctica clínica "*Capnography/Capnometry During Mechanical Ventilation*" <sup>(15)</sup> que se sugiere la EtCO<sub>2</sub> para guiar el manejo de la ventilación y recomienda la capnometría continua durante el transporte del paciente con VM, alcanzando en ambos casos un grado de recomendación 2B.

Uno de los beneficios que se obtiene con el empleo de la capnografía en procedimientos realizados bajo sedo-analgesia es la detección temprana de la depresión respiratoria definida como apnea, hipoventilación y/o desaturación <sup>(17)</sup>. Por ello, hoy en día es un método muy utilizado en numerosos quirófanos y unidades que emplean anestesia para llevar a cabo determinados procedimientos. Además, es considerable el número de estudios que abordan esta aplicación del capnógrafo <sup>(17, 18, 19, 20)</sup>. En la "Vía clínica de recuperación intensificada de cirugía abdominal" <sup>(21)</sup> del Instituto Aragonés de ciencias de la salud se describe que la monitorización de CO<sub>2</sub> mediante capnografía debe ser obligada en toda cirugía, especialmente en la laparoscópica, ya que cualquier variación en la curva del CO<sub>2</sub> tele-espíromio puede ser signo de complicación intraoperatoria, entre ellas la depresión respiratoria. Como consecuencia, alcanza un nivel de evidencia alto y por tanto un grado de recomendación fuerte en la escala GRADE.

A diferencia de las aplicaciones clínicas anteriores y a pesar de los beneficios revelados, la escasez de estudios sobre el empleo de la capnografía/capnometría en situaciones de tromboembolismo pulmonar, hipovolemias súbitas o estados metabólicos, ha supuesto que a día de hoy no haya encontrado un estudio definitivo que determine una recomendación concreta en la escala GRADE en dichos casos.

Parecido sucede con la utilización de la capnografía en el broncoespasmo. En esta situación permite evaluar en tiempo real la evolución del cuadro y la eficacia del tratamiento. Sin embargo y a pesar de aportar estas importantes ventajas, no he encontrado una determinación de un nivel específico de evidencia en las diversas Guías de Práctica Clínica revisadas sobre la actuación en asma y reagudización del EPOC.



## 2. OBJETIVOS

Los objetivos a alcanzar con el Trabajo Fin de Grado son los siguientes:

### 2.1 General

Elaborar una guía-póster que proporcione información actualizada, concisa y basada en la evidencia científica, que permita un manejo eficaz del capnógrafo a los profesionales de enfermería de los diferentes ámbitos de atención sanitaria.

### 2.2 Específicos

- Profundizar a través de una búsqueda y revisión bibliográfica en el conocimiento de la capnografía en cuanto a su definición, tipos, indicaciones y posibles cuadros clínicos en los que se pueden presentar alterados sus valores.
- Recordar la anatomía y fisiología del aparato respiratorio para comprender de forma más precisa y lógica el uso de la capnografía.
- Facilitar un manejo rápido y eficaz del capnógrafo a los profesionales de enfermería a través del diseño de una guía-póster que presente la información de forma visual y gráfica.
- Conocer e interpretar la capnometría y la capnografía a través de una lectura sencilla y visual.

### 3. METODOLOGÍA

#### 3.1 Diseño del Trabajo Fin de Grado

El presente Trabajo Fin de Grado denominado “Guía rápida y póster sobre capnografía” se ha diseñado de acuerdo a las rúbricas y apartados valorados por la facultad de enfermería de la Universidad Pública de Navarra (UPNA), así como se han tenido en cuenta en su elaboración las fechas especificadas por dicha facultad.

Para la elaboración de este trabajo se han seguido los siguientes pasos. En primer lugar, se ha realizado una búsqueda y revisión bibliográfica extensa sobre la capnografía, teniendo presente en qué consiste, sus tipos, modelos y aplicaciones clínicas. Se ha revisado información sobre la utilidad de este método de monitorización del paciente y los conocimientos que los profesionales de enfermería necesitan a la hora de utilizarlo en la práctica clínica.

Se han utilizado para ello diferentes fuentes de información:

- Bases de datos consultadas desde la biblioteca virtual de la UPNA: CINAHL Complete, CUIDEN, Dialnet, Pubmed, Scielo, Scopus, Web of Science.
- Libros en papel y en formato electrónico, especialmente de anatomía y fisiología respiratoria.
- Revistas electrónicas: *Respiratory Care*, *Medicina Intensiva*, *Archivos de Bronconeumología*, *Anales de Pediatría*, etc.
- Artículos científicos publicados en revistas de carácter científico.
- Páginas web: *European Resuscitation Council*, *American Heart Association*, etc.
- Trabajos fin de grado publicados en la biblioteca virtual de la página web de la UPNA.
- Guías de Práctica Clínica de diversas sociedades científicas: *European Resuscitation Council*, *American Heart Association*, *American Association of Respiratory Care*.

Para la búsqueda de información en las diferentes bases de datos en soporte informático se han empleado las siguientes palabras clave: “capnografía”, “dióxido de carbono”, “monitorización”, “ventilación”, “enfermería”. Así como se han utilizado las siguientes palabras en aquellas fuentes que utilizan el inglés como idioma principal: “*capnography*”, “*carbon dioxide*”, “*monitoring*”, “*ventilation*” “*nursing*”.

Los límites manejados para la búsqueda de los documentos que podían ser de interés para la realización del presente trabajo han sido los siguientes:

- Idiomas: han sido empleados dos idiomas para la revisión de información, el español y el inglés. El primero de ellos se corresponde con el idioma principal empleado en la facultad de enfermería de la UPNA y el segundo se ha utilizado porque gran diversidad de documentos de carácter científico e internacional utilizan el inglés. Además es una lengua conocida en gran parte por la autora del trabajo.

- Año: el límite de fecha para realizar las búsquedas ha sido el año 2009, a excepción de ocho documentos que fueron publicados en los años 1998, 2000, 2003, 2004, 2006, 2007 y 2008, y dos libros en 1999 y 2006.

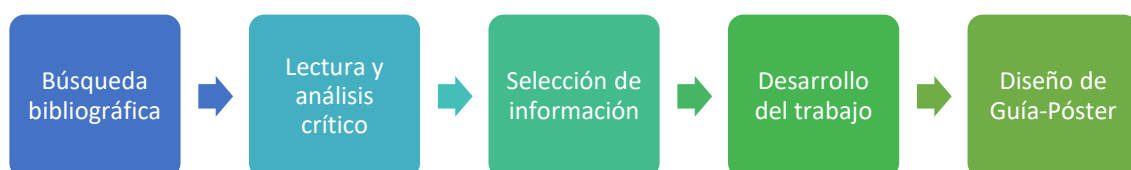
El objetivo de la búsqueda en dichas fuentes bibliográficas consistía en encontrar artículos de carácter científico y guías de práctica clínica que abordaran el tema de la capnografía con el mayor grado de evidencia científica y actualidad posible.

Tras la realización de la búsqueda bibliográfica, se procede a efectuar la lectura y análisis crítico de los diferentes documentos para llevar a cabo posteriormente la selección de aquella información considerada necesaria y útil para el desarrollo del presente trabajo y el logro de los objetivos propuestos. En dicho proceso de análisis y selección de la información se tienen en cuenta los siguientes aspectos:

- Presentación: se valora si la información es clara y está bien estructurada y organizada. Se revisa su estructura, evaluando si presenta introducción, conclusiones y bibliografía, así como se identifica el autor.
- Pertinencia: se seleccionan aquellos documentos que se adecúan a las necesidades propias, a los objetivos propuestos al inicio del trabajo y al tema objeto de estudio.
- Objetividad: se escogen aquellos documentos basados en evidencia científica, evitando aquellos que presentan carácter subjetivo.
- Procedencia: se escogen documentos de organismos y sociedades científicas reconocidas a nivel mundial y se seleccionan artículos procedentes de diferentes bases de datos tras la identificación de sus autores.
- Audiencia: se han seleccionado documentos dirigidos a profesionales sanitarios y especialmente aquellos destinados a enfermería puesto que el objetivo del trabajo está dirigido a este grupo de profesionales.
- Grado de actualidad del documento: se han seleccionado 31 documentos publicados desde 2009 hasta la actualidad y 10 publicados antes de dicha fecha.

De forma paralela, resaltar que he tenido la oportunidad de entrar en contacto con diferentes tipos de capnógrafos al acudir a la UCI-A del Complejo Hospitalario de Navarra y al servicio de urgencias extrahospitalarias durante el desarrollo del trabajo.

Por último, una vez conocido, desarrollado e interiorizado el tema, se ha llevado a cabo la creación de un póster explicativo que recoge los aspectos más relevantes de la capnografía que se han de tener en cuenta en la práctica de enfermería, siendo presentados los mismos de forma visual y gráfica, de forma que permitan un manejo hábil del capnógrafo.



### **3.2 Recursos**

Para la elaboración de este Trabajo Fin de Grado se ha utilizado fundamentalmente como recurso el material bibliográfico obtenido tras una búsqueda amplia, con el fin de llevar a cabo posteriormente el desarrollo del trabajo y el diseño de la guía-póster.

## 4. DESARROLLO

Se desarrollará la siguiente Guía – Póster como resultado de la revisión bibliográfica que se ha llevado a cabo en el presente Trabajo Fin de Grado. Su elaboración está destinada a facilitar a los profesionales de enfermería conocimientos sobre la capnografía, permitiendo una interpretación correcta de los datos obtenidos con el capnógrafo/capnómetro.

<b>4.1. GUÍA RÁPIDA SOBRE CAPNOGRAFÍA</b> .....	10
<b>1. EL APARATO RESPIRATORIO Y FISIOLÓGÍA DE LA RESPIRACIÓN</b> .....	10
<b>1.1 EL CICLO RESPIRATORIO</b> .....	11
<b>1.2 LA RESPIRACIÓN</b> .....	12
<b>2. EL DIÓXIDO DE CARBONO (CO<sub>2</sub>)</b> .....	22
<b>3. LA CAPNOGRAFÍA Y LA CAPNOMETRÍA</b> .....	24
<b>3.1 TECNOLOGÍA</b> .....	24
<b>3.2 EL CAPNOGRAMA</b> .....	27
<b>3.3 APLICACIONES CLÍNICAS Y ALTERACIONES CAPNOGRÁFICAS</b> .....	28
<b>3.4 INTERPRETACIÓN DEL CAPNOGRAMA</b> .....	40
<b>4.2 PÓSTER SOBRE CAPNOGRAFÍA</b> .....	42

## 4.1. GUÍA RÁPIDA SOBRE CAPNOGRAFÍA

### 1. EL APARATO RESPIRATORIO Y FISIOLÓGÍA DE LA RESPIRACIÓN

El aparato respiratorio está compuesto por la nariz, la faringe, la laringe, la tráquea, los bronquios y los pulmones.

Sus partes se pueden clasificar según su estructura o su función.

De acuerdo a su estructura, el aparato respiratorio consta de dos porciones:

- El aparato respiratorio superior que incluye la nariz, la cavidad nasal, la faringe y las estructuras asociadas.
- El aparato respiratorio inferior que incluye la laringe, la tráquea, los bronquios y los pulmones <sup>(22)</sup>.

Según su función, el aparato respiratorio también puede dividirse en dos partes:

- La zona de conducción compuesta por una serie de cavidades y tubos interconectados, tanto fuera como dentro de los pulmones (nariz, cavidad nasal, faringe, laringe, tráquea, bronquios, bronquiolos y bronquiolos terminales), que filtran, calientan y humidifican el aire y lo conducen hacia los pulmones <sup>(22)</sup>. El aire en esta sección del tracto respiratorio no cambia su composición durante el ciclo respiratorio puesto que no permite el intercambio gaseoso al tratarse de un “espacio muerto” <sup>(23)</sup>.
- La zona respiratoria está constituida por tubos y tejidos dentro de los pulmones (bronquiolos respiratorios, conductos alveolares, sacos alveolares y alvéolos) que llevan a cabo el intercambio de gases entre el aire y la sangre <sup>(22)</sup>.

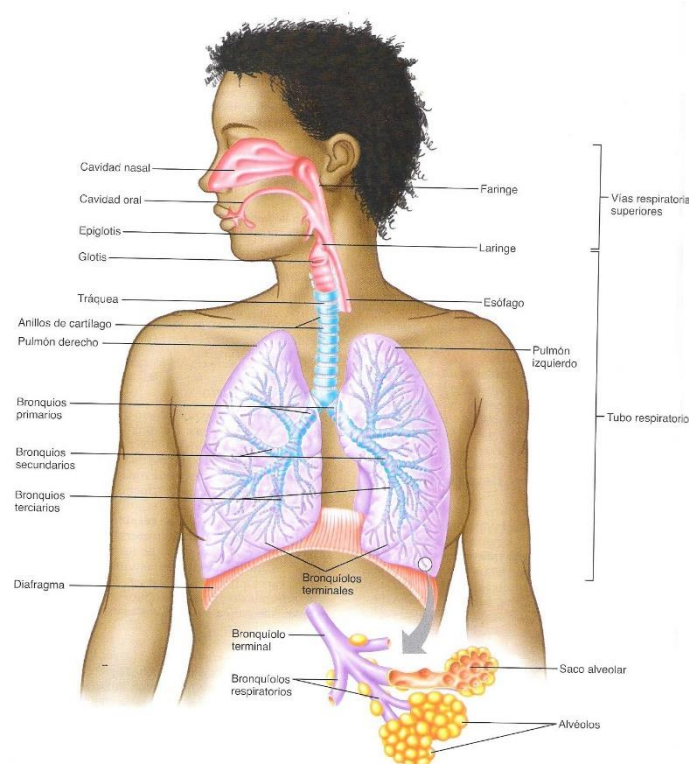


Figura 1. Estructuras del aparato respiratorio <sup>(23)</sup>.

## 1.1 EL CICLO RESPIRATORIO

El ciclo respiratorio está compuesto por dos procesos fisiológicos independientes: la oxigenación y la ventilación <sup>(1)</sup>.

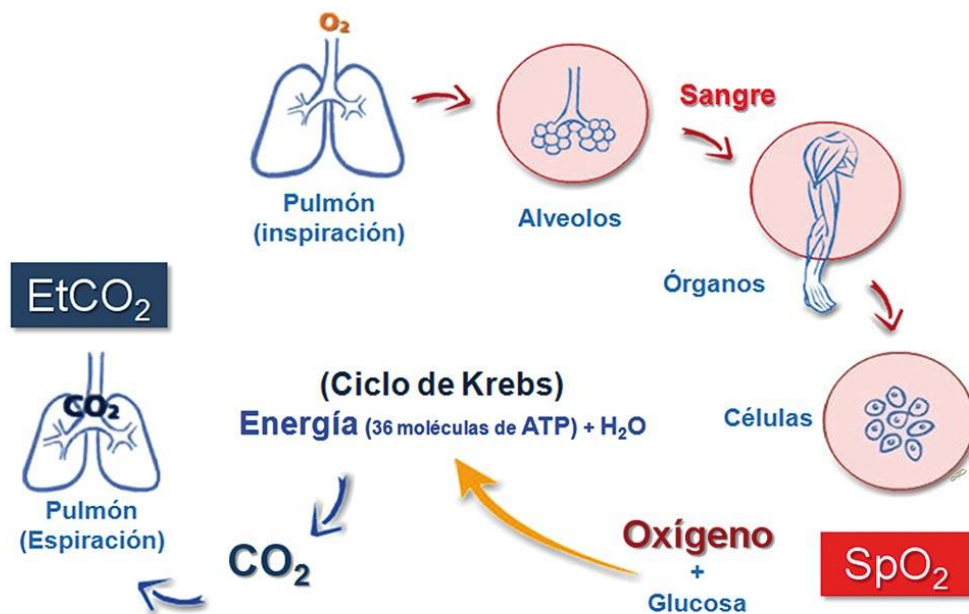


Figura 2. Fisiología del ciclo respiratorio. Oxigenación y ventilación fisiológicas <sup>(1)</sup>.

La **oxigenación** comienza con la entrada de aire oxigenado en los pulmones, gracias a una diferencia de gradiente de presión (ley de los gases) <sup>(1, 2, 24)</sup>. Una vez que el oxígeno ha llegado a los alvéolos, éste difunde a través de la membrana alvéolo-capilar hacia una gran red de capilares interconectados entre sí, que se caracterizan por su gran extensión y proximidad estrecha con las paredes de los alvéolos <sup>(22, 25)</sup>.

El oxígeno se une de forma reversible a la hemoglobina en los eritrocitos. Cuando la sangre abandona los pulmones a través de la vena pulmonar, transporta el 97% del  $O_2$  en forma de oxihemoglobina y el 3% restante permanece disuelto en plasma. Cada una de las moléculas de hemoglobina transportará el oxígeno hasta el interior de las mitocondrias, donde se llevará a cabo la respiración celular o interna <sup>(1)</sup>.

A nivel celular se produce la respiración interna mediante la degradación de la biomoléculas en presencia de oxígeno. Se forma así ácido pirúvico, el cual se desdobra en  $CO_2$  y  $H_2O$ . Durante dicha reacción se producen 36 moléculas netas de ATP, el nucleótido fundamental en la obtención de energía celular <sup>(1)</sup>.

El dióxido de carbono proveniente de los desechos celulares pasa al torrente sanguíneo: una parte se transforma en ácido carbónico ( $H_2CO_3$ ), que se ioniza formando bicarbonato ( $HCO_3^-$ ) y protones ( $H^+$ ), y el resto es llevado a los pulmones disuelto en plasma o unido a la hemoglobina en forma de carbaminohemoglobina donde será eliminado mediante la **ventilación** <sup>(1, 2, 24)</sup>.

## 1.2 LA RESPIRACIÓN

El término respiración tiene varios significados en fisiología. Por un lado, la respiración celular o interna hace referencia al intercambio de gases entre la sangre en los capilares sistémicos y las células tisulares. Por otro lado, la respiración externa es el intercambio de oxígeno y dióxido de carbono entre la sangre y la atmósfera <sup>(22, 23)</sup>.

### 1.2.1 La respiración externa

La respiración externa o pulmonar es el intercambio de gases entre la sangre que circula por los capilares sistémicos y la que circula por los capilares pulmonares, a través de la membrana respiratoria. Durante este proceso, la sangre capilar pulmonar obtiene O<sub>2</sub> y pierde CO<sub>2</sub> <sup>(22)</sup>.

El proceso de respiración externa puede dividirse en cuatro etapas principales:

- a. La ventilación pulmonar que consiste en el intercambio de aire entre la atmósfera y los pulmones.
- b. El intercambio de gases O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> entre los pulmones y la sangre. Es decir, la difusión de oxígeno desde los alvéolos a la sangre y el paso de dióxido de carbono desde la sangre a los alvéolos.
- c. El transporte de O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> por la sangre.
- d. Y por último, la regulación del proceso respiratorio <sup>(22, 25)</sup>.

#### a. Ventilación pulmonar

La ventilación pulmonar es la inspiración y espiración de aire, lo que produce el intercambio de aire entre la atmósfera y los alvéolos pulmonares <sup>(22, 23)</sup>.

El aire atmosférico es una mezcla de gases y vapor de agua. Cada gas en una mezcla de gases ejerce su propia presión como si fuera el único. La presión de un gas en una mezcla de gases se llama presión parcial (P<sub>x</sub>) y es determinado por su abundancia en la mezcla <sup>(25)</sup>. Por tanto, la presión total de la mezcla se calcula sumando todas las presiones parciales y son estas presiones las que determinan el desplazamiento del O<sub>2</sub> y del CO<sub>2</sub> entre la atmósfera y los pulmones; entre los pulmones y la sangre; y entre la sangre y las células <sup>(22)</sup>.

En este punto, es fundamental resaltar la ley de Dalton para entender la forma en que se mueven los gases según sus diferencias de presión por difusión <sup>(22)</sup>.

Cada gas difunde a través de una membrana permeable, desde el área de mayor presión parcial hacia el área de menor presión parcial. Cuanto mayor es la diferencia en la presión parcial, más rápida es la difusión <sup>(22)</sup>.

En comparación con el aire inspirado, el aire alveolar tiene menos O<sub>2</sub> (13,6% frente a 20,9%) y más CO<sub>2</sub> (5,2% frente a 0,04%) por dos razones. La primera es porque el intercambio



gaseoso en los alvéolos aumenta el contenido de CO<sub>2</sub> y disminuye el contenido de O<sub>2</sub> alveolar. La segunda se explica porque cuando el aire se inspira, se humidifica al pasar por la cubierta mucosa húmeda, lo que aumenta el contenido del vapor de agua en el aire, disminuyendo el porcentaje relativo de O<sub>2</sub>. Y en cambio, el aire espirado contiene más O<sub>2</sub> que el alveolar (16% frente a 13,6%) y menos CO<sub>2</sub> (4,5% frente a 5,2%) porque parte del aire espirado se encontraba en el espacio muerto y no participó en el intercambio gaseoso (22).

Por convección, en fisiología respiratoria se considera a la presión atmosférica como 0 mmHg. Por ello, cuando se habla de presión negativa se hace referencia a una presión por debajo de la atmosférica y cuando se habla de presión positiva se habla de una presión por encima de la atmosférica (25).

En la ventilación, el flujo global a favor de gradientes de presión explica cómo se intercambia el aire entre el ambiente externo y los pulmones. La contracción y relajación de los músculos respiratorios crean gradientes de presión (25) y, cada vez que haya un gradiente de presión, habrá un flujo de aire que se dirige desde las áreas de mayor presión hacia las áreas de menor presión (22, 23).

Este movimiento a favor de gradiente de presión también se aplica a los gases individuales como se ha comentado anteriormente. Por ejemplo, el dióxido de carbono se desplaza desde las áreas de mayor presión parcial de CO<sub>2</sub> hacia las de menor presión parcial de CO<sub>2</sub> (22).

Según la Ley de Boyle, la presión de un gas en un compartimento cerrado es inversamente proporcional al volumen del recipiente que lo contiene, lo que significa que si el tamaño de un recipiente cerrado aumenta, la presión del gas en su interior disminuye, y que si el recipiente disminuye de tamaño, sucede a la inversa (22).

Las diferencias de presión provocadas por los cambios en el volumen de los pulmones, obligan al aire a entrar en ellos durante la inspiración y a salir durante la espiración (22).

La presión atmosférica es relativamente constante, por lo que la presión en los pulmones deberá ser mayor o menor a la misma para que se genere ese flujo de aire entre la atmósfera y los alvéolos (25).

Durante la **inspiración**, la contracción de los músculos respiratorios da lugar a un incremento de la capacidad de la cavidad torácica, disminuyendo así la presión intrapulmonar frente a la presión atmosférica y generándose así una diferencia de gradiente de presión por la que el aire entra a las vías respiratorias. Por ello, se dice el proceso de inspiración es activo (25).

Con la **espiración**, los músculos se relajan y vuelven a su posición de reposo (proceso pasivo). Disminuye así la capacidad de la cavidad torácica, que hace que la presión intrapulmonar aumente provocando un flujo de aire desde los pulmones hacia el ambiente externo (25).

Cabe resaltar que además de las diferencias de presión del aire, existen tres factores más que afectan a la velocidad de flujo de aire y la facilidad de la ventilación pulmonar. Estos son <sup>(22)</sup>:

- La tensión superficial del líquido alveolar

Los alvéolos están rodeados por una fina capa de líquido alveolar compuesta por fosfolípidos y lipoproteínas denominada surfactante <sup>(22)</sup>.

Cuando un líquido rodea una esfera de aire, como es el caso de un alvéolo, la tensión superficial produce una fuerza dirigida hacia adentro. En los pulmones, la tensión superficial hace que los alvéolos adopten el menor diámetro posible <sup>(22)</sup>.

Durante la respiración, se debe superar la tensión superficial para expandir los pulmones en cada inspiración y esta tensión superficial también es responsable de dos tercios de la retracción elástica del pulmón, que disminuye el tamaño de los alvéolos en cada espiración <sup>(22)</sup>.

El surfactante presente en el líquido alveolar disminuye la tensión superficial del mismo, lo que a su vez reduce la tendencia de los alvéolos a colapsar manteniendo así su permeabilidad <sup>(22)</sup>.

La deficiencia de surfactante ocurre, por ejemplo, en recién nacidos prematuros produciendo el síndrome de dificultad respiratoria, que se caracteriza por el colapso de los alvéolos requiriendo así un gran esfuerzo en la siguiente inspiración para abrir los alvéolos colapsados <sup>(22)</sup>.

- La distensibilidad pulmonar

La distensibilidad pulmonar o *compliance* es la capacidad con la que los pulmones pueden ser insuflados, es decir, es el esfuerzo requerido para expandir los pulmones y la pared del tórax <sup>(22, 26)</sup>.

Un pulmón que presenta una *compliance* alta significa que los pulmones y la pared torácica se expanden con facilidad, mientras que una *compliance* baja hace referencia a que los pulmones se resisten a la expansión, requiriendo de más fuerza de los músculos respiratorios para expandirse <sup>(25)</sup>.

En condiciones normales, los pulmones se expanden fácilmente porque las fibras elásticas del tejido pulmonar se estiran de manera normal y el surfactante del líquido alveolar reduce la tensión superficial <sup>(22)</sup>.

Sin embargo, en determinados trastornos pulmonares se ve afectada la distensibilidad pulmonar, teniendo consecuencias en la ventilación pulmonar. Algunos de estos trastornos son: la parálisis de los músculos intercostales que impide la expansión de los pulmones y el enfisema, en el que se produce una reducción de la *compliance* como consecuencia de la destrucción de las fibras elásticas de las paredes alveolares <sup>(22)</sup>.

- La resistencia de las vías aéreas

La velocidad del flujo de aire a través de las vías aéreas depende tanto de la diferencia de presión como de la resistencia. De esta forma, el flujo de aire es igual a la diferencia de presión entre los alvéolos y la atmósfera, dividida por la resistencia <sup>(22)</sup>.

Las paredes de las vías aéreas, y en especial de los bronquiolos, ofrecen cierta resistencia al flujo normal de aire hacia el interior y el exterior de los pulmones. Cuando los pulmones se expanden, durante la inspiración, los bronquiolos aumentan de tamaño ya que sus paredes son traccionadas hacia afuera <sup>(22)</sup>.

Los factores que contribuyen a la resistencia de las vías aéreas al flujo de aire son tres: la longitud y el diámetro de las vías aéreas y la viscosidad del flujo de aire que fluye a través de las vías <sup>(25)</sup>.

Obviamente, las vías aéreas de mayor tamaño son las que ofrecen menor resistencia y dicha resistencia se ve aumentada durante la espiración a medida que disminuye el diámetro de los bronquiolos. Asimismo, el diámetro de las vías aéreas también depende del grado de contracción y relajación del músculo liso de sus paredes <sup>(22)</sup>.

Por ello, cualquier situación que disminuye u obstruya el diámetro de las vías aéreas aumentará la resistencia al flujo de aire, de forma que se requerirá de mayor presión para mantener el mismo flujo <sup>(22)</sup>.

Dos situaciones fundamentales en las que se ve aumentada la resistencia de las vías aéreas son el asma y el EPOC, incluyendo este último el enfisema y la bronquitis crónica <sup>(22)</sup>.

## **b. El intercambio de gases O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> entre los pulmones y la sangre**

Una vez que los alvéolos se han ventilado, la siguiente etapa del proceso respiratorio consiste en el intercambio de oxígeno y dióxido de carbono entre el aire alveolar y la sangre pulmonar. Ocurre así la difusión del O<sub>2</sub> desde los alvéolos hacia los capilares pulmonares y del CO<sub>2</sub> en dirección opuesta <sup>(22, 25)</sup>.

Este intercambio de gases entre los espacios aéreos en los pulmones y la sangre tiene lugar por difusión, a través de las paredes alveolares y capilares, que juntas forman la membrana respiratoria o membrana alvéolo-capilar. Esta membrana está compuesta por cuatro capas muy delgadas (0,5µm de espesor), lo que permite la difusión de los gases <sup>(22)</sup>. Sobre las paredes alveolares existe una gran red de capilares interconectados entre sí que se caracterizan por su gran extensión y por su proximidad estrecha con las paredes de los alvéolos <sup>(25)</sup>.

La cantidad de O<sub>2</sub> y de CO<sub>2</sub> que se disuelve en el plasma depende del gradiente de presiones y de la solubilidad del gas. Ya que la solubilidad de cada gas es constante, el principal determinante del intercambio de gases es el gradiente de presión parcial del gas a ambos

lados de la membrana alvéolo-capilar, difundiendo los gases desde las áreas de mayor presión parcial del gas hacia las de menor presión parcial <sup>(25)</sup>.

La  $P_{O_2}$  normal en los alvéolos es de 100 mmHg mientras que la  $P_{O_2}$  normal en la sangre venosa que llega a los pulmones es de 40 mmHg. De este modo, el oxígeno se desplaza desde los alvéolos hacia la sangre. Sin embargo, sucede lo contrario con el dióxido de carbono. La  $P_{CO_2}$  normal en los alvéolos es de 40 mmHg mientras que la  $P_{CO_2}$  normal en la sangre venosa que llega a los pulmones es de 46 mmHg, por lo que el  $CO_2$  se mueve desde el plasma hacia el interior de los alvéolos <sup>(25)</sup>.

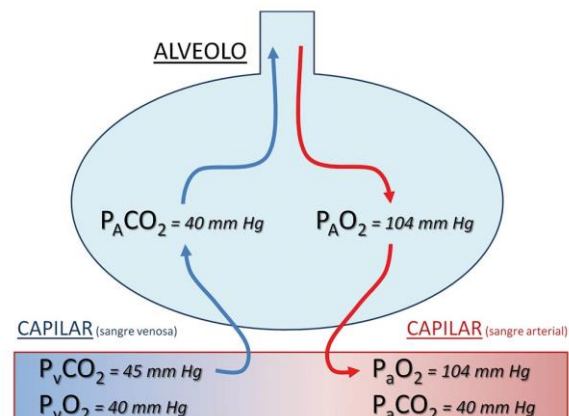


Figura 3. Intercambio de oxígeno y dióxido de carbono a nivel alvéolo-capilar <sup>(1)</sup>.

A medida que difunde más un gas de un lado a otro de la membrana, la diferencia de la presión parcial a uno y a otro lado de la membrana va disminuyendo, por lo que la intensidad de la difusión es cada vez menor hasta el punto en que no se produce esa diferencia de gradiente de presión a ambos lados de la membrana y la difusión se detiene <sup>(25)</sup>.

Las propiedades del intercambio gaseoso del pulmón dependen del **equilibrio entre la ventilación y la perfusión**, el cual asegura que cantidades iguales de aire y sangre ingresen a la porción respiratoria de los pulmones <sup>(26)</sup>.

Se pueden distinguir dos factores que puede interferir en ese equilibrio:

- **El espacio muerto:** es el volumen de aire que se moviliza con cada respiración pero que no participa en el intercambio gaseoso. Hay dos tipos:
  - Espacio muerto anatómico: el contenido en las vías aéreas de conducción (150-200 mL).
  - Espacio muerto alveolar: el contenido en la porción respiratoria del pulmón (5-10 mL). Esto ocurre cuando los alvéolos son ventilados pero están privados de flujo sanguíneo.

El espacio muerto fisiológico es la suma del espacio muerto anatómico y el espacio muerto alveolar <sup>(26)</sup>.

- **El cortocircuito o shunt:** hace referencia a la sangre que se desplaza del lado derecho al lado izquierdo de la circulación sin haber sido oxigenada. Hay dos tipos:
  - Cortocircuito anatómico: la sangre va del lado venoso al arterial de la circulación sin pasar por los pulmones.
  - Cortocircuito fisiológico: se produce un desequilibrio entre la ventilación y la perfusión, que resulta en una ventilación insuficiente para la oxigenación de la sangre que circula por los capilares alveolares. En la mayoría de los casos se debe a una enfermedad pulmonar destructiva o a una insuficiencia cardíaca <sup>(26)</sup>.

De esta forma, tanto el espacio muerto como el *shunt* producen un desequilibrio entre la ventilación y la perfusión.

En el espacio muerto hay ventilación sin perfusión, produciendo una relación V/Q alta. Sucede por ejemplo en el TEP, que altera el flujo sanguíneo hacia una parte del pulmón.

En el *shunt* sucede a la inversa, por lo que hay perfusión sin ventilación, dando lugar a una relación V/Q baja. Ocurre en la atelectasia, en la cual se produce una obstrucción de la vía aérea.

Muchas de las enfermedades que causan desequilibrio entre la ventilación y la perfusión incluyen al espacio muerto anatómico y al *shunt*. En el EPOC, por ejemplo, puede haber alteración de la ventilación en un área del pulmón y alteración de la perfusión en otra área <sup>(26)</sup>.

### c. El transporte de O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> en la sangre

El **oxígeno** no se disuelve fácilmente en el agua, por lo que sólo el 1,5% del O<sub>2</sub> inspirado se disuelve en el plasma. Cerca del 98,5% del O<sub>2</sub> de la sangre está unido a la hemoglobina en los eritrocitos <sup>(22)</sup>.

La porción hemo de la hemoglobina contiene 4 átomos de hierro, cada uno de los cuales es capaz de unirse a una molécula de O<sub>2</sub>. De esta forma, el oxígeno y la hemoglobina se unen en una reacción fácilmente reversible para formar oxihemoglobina (HbO<sub>2</sub>) <sup>(22)</sup>.

Por otro lado, el **dióxido de carbono** proveniente de los desechos celulares pasa al torrente sanguíneo y se transporta en la sangre en 3 formas principales:

- CO<sub>2</sub> disuelto en plasma

El porcentaje más pequeño (alrededor del 7%). Al llegar a los pulmones difunde hacia el aire alveolar y se elimina <sup>(22)</sup>.

- Compuestos carbamínicos

Un porcentaje de alrededor del 23% se combina con los grupos amino de los aminoácidos y las proteínas de la sangre para formar compuestos carbamínicos. Debido a que la proteína más abundante en la sangre es la hemoglobina, la mayor parte del CO<sub>2</sub> es transportado junto a esta proteína, siendo las cadenas alfa y beta de la globina los principales sitios de unión del CO<sub>2</sub>. La hemoglobina unida al CO<sub>2</sub> se denomina carbaminohemoglobina (Hb-CO<sub>2</sub>). La formación de Hb-CO<sub>2</sub> depende mucho de la P<sub>CO2</sub>. Por ejemplo, en los capilares tisulares la P<sub>CO2</sub> es relativamente alta por lo que promueve la formación de carbaminohemoglobina. Sin embargo, en los capilares pulmonares la P<sub>CO2</sub> es relativamente baja por lo que se separa de la globina rápidamente y entra en los alvéolos por difusión <sup>(22)</sup>.

- Iones bicarbonato

Alrededor del 70% del  $\text{CO}_2$  se transporta en el plasma como iones bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ). Cuando el  $\text{CO}_2$  difunde hacia los capilares sistémicos e ingresa en los eritrocitos, reacciona con el agua en presencia de la enzima anhidrasa carbónica para formar ácido carbónico ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ), que a su vez se disocia en  $\text{H}^+$  y  $\text{HCO}_3^-$ . De esta forma, a medida que el  $\text{CO}_2$  pasa al torrente sanguíneo, se acumula  $\text{HCO}_3^-$  en los eritrocitos. Parte del  $\text{HCO}_3^-$  sale hacia el plasma a favor de gradiente de concentración, y se intercambia por iones cloruro ( $\text{Cl}^-$ ) que se desplazan desde el plasma hacia los eritrocitos. Este intercambio de iones negativos entre el plasma y el citosol del eritrocito, mantiene el equilibrio eléctrico y se denomina desviación de cloruro. El efecto neto de estas reacciones es la eliminación del  $\text{CO}_2$  por las células y su transporte en el plasma como  $\text{HCO}_3^-$ . Y según la sangre va atravesando los capilares pulmonares, estas reacciones se producen a la inversa y se desprende  $\text{CO}_2$  <sup>(22)</sup>.

La cantidad del  $\text{CO}_2$  que puede transportar la sangre depende del porcentaje de la oxihemoglobina. Cuanto menor es la cantidad de la misma, mayor es la capacidad sanguínea de transportar  $\text{CO}_2$ . Esta relación es conocida como efecto Haldane y dos características de la desoxihemoglobina dan lugar a este efecto:

- La desoxihemoglobina se une con más  $\text{CO}_2$  y por tanto transporta más  $\text{CO}_2$  que  $\text{Hb-O}_2$ .
- La desoxihemoglobina también amortigua más  $\text{H}^+$  que la  $\text{Hb-O}_2$ , lo que permite eliminar  $\text{H}^+$  de una solución y favorece la conversión del  $\text{CO}_2$  en  $\text{HCO}_3^-$ , mediante la reacción catalizada por la anhidrasa carbónica <sup>(22)</sup>.

#### **d. La regulación del proceso respiratorio**

Tal y como se ha descrito anteriormente, el tórax aumenta o disminuye su tamaño como consecuencia de la contracción y relajación de los músculos respiratorios. La contracción ocurre porque los músculos respiratorios reciben impulsos nerviosos procedentes desde el centro respiratorio y la relajación, por el contrario, sucede en ausencia de dichos impulsos <sup>(22)</sup>.

El centro respiratorio es un conglomerado de neuronas localizadas en ambos lados del bulbo raquídeo y la protuberancia del tronco encefálico. Pueden distinguirse tres áreas dentro del centro respiratorio según la función que desempeñan:

- Área del ritmo bulbar

Controla el ritmo básico de la respiración. Existen áreas inspiratorias y espiratorias dentro de esta región.

En una respiración normal la inspiración dura alrededor de 2 segundos y la espiración alrededor de 3 segundos. Los impulsos nerviosos se generan en el área inspiratoria, inervando los músculos intercostales externos y el diafragma, provocando así la

contracción de los mismos y produciéndose una inspiración de alrededor de 2 segundos. Al cabo de esos 2 segundos, el área inspiratoria se inactiva y deja de enviar impulsos nerviosos, dando lugar a la espiración mediante la relajación de los músculos respiratorios. De esta forma, durante una respiración normal el área espiratoria permanece inactiva. Por el contrario, en una respiración forzada los impulsos nerviosos del área inspiratoria activan el área espiratoria, la cual inerva los músculos intercostales internos y los abdominales, disminuyendo así el tamaño de la cavidad torácica <sup>(22)</sup>.

- Área neumotáxica

Localizada en la parte superior de la protuberancia, ayuda a coordinar la transición entre la inspiración y la espiración al enviar impulsos nerviosos al área inspiratoria para inhibirla antes de que los pulmones se insuflen en exceso. Por tanto, cuanto más activa esté el área neumotáxica, mayor será la frecuencia respiratoria <sup>(22)</sup>.

- Área apnéustica

Situada en la parte inferior de la protuberancia, coordina también la transición entre la inspiración y la espiración al enviar impulsos estimuladores al área inspiratoria que la activan y prolongan la inspiración. Cuando el área neumotáxica está activa, contrarresta las señales del área apnéustica <sup>(22)</sup>.

De esta forma, la respiración se produce a consecuencia de una descarga rítmica de neuronas motoras situadas en la médula espinal, que inervan los músculos respiratorios. Pero al mismo tiempo, cabe señalar que esas motoneuronas espinales están controladas por dos mecanismos nerviosos separados pero interdependientes <sup>(25)</sup>:

- **Un sistema voluntario** localizado en la corteza cerebral por la que el ser humano regula voluntariamente la frecuencia y profundidad de la respiración. Por ejemplo, al tocar un instrumento de viento <sup>(25)</sup>.
- **Un sistema automático o involuntario** regulado por el centro respiratorio, el cual adecúa la respiración de acuerdo a las necesidades metabólicas del organismo. La actividad global de dicho centro respiratorio depende básicamente de dos mecanismos, un control químico y otro no químico de la respiración <sup>(25)</sup>.

- Regulación de la respiración por medio de quimiorreceptores:

El aparato respiratorio mantiene niveles adecuados de  $P_{O_2}$ ,  $P_{CO_2}$  y es muy sensible a cambios de los niveles de estos gases en los líquidos corporales. Estos cambios son detectados por los quimiorreceptores, neuronas sensitivas capaces de responder a cambios en la concentración de  $H^+$ , en la  $P_{CO_2}$  o en ambos, en el líquido cefalorraquídeo (LCR). Existen quimiorreceptores centrales situados en el bulbo raquídeo y quimiorreceptores periféricos localizados en la aorta y la carótida <sup>(22)</sup>.

Los primeros son muy sensibles a pequeños aumentos de la  $P_{CO_2}$  (hipercapnia) estimulando de forma directa el centro respiratorio, el cual incrementará la frecuencia respiratoria y como consiguiente aumentará la eliminación del  $CO_2$  de la sangre <sup>(25)</sup>. El dióxido de carbono es el controlador químico más importante en la ventilación pulmonar, por lo que cuando la  $P_{CO_2}$  aumenta por encima de sus niveles normales (40 mmHg), los quimiorreceptores centrales recibirán un estímulo. Cuando la  $P_{CO_2}$  aumenta, el  $CO_2$  cruza con gran facilidad la barrera sangre-líquido cefalorraquídeo, pero éste tiene muy poco efecto estimulante sobre el centro respiratorio. Sin embargo, los iones  $H^+$  que aumentan en el LCR cuando se incrementa el  $CO_2$ , sí que tienen un potente efecto estimulante directo sobre el centro respiratorio. Este incremento de  $H^+$  se produce porque el  $CO_2$  en presencia de la enzima anhidrasa carbónica se combina con agua ( $H_2O$ ) para formar ácido carbónico ( $H_2CO_3$ ), el cual a su vez se desdobra rápidamente en  $H^+$  y  $HCO_3^-$  <sup>(22, 25)</sup>. Por su parte, los quimiorreceptores periféricos, que forman parte del sistema nervioso periférico, también responden ante el aumento de la concentración de  $CO_2$  y  $H^+$  pero con menor intensidad, y éstos además son especialmente sensibles al déficit de  $O_2$  en sangre arterial. Cuando la  $P_{O_2}$  desciende por debajo del nivel normal de 100 mmHg pero aún es superior a 50 mmHg, se estimulan los quimiorreceptores periféricos <sup>(22)</sup>. Por todo ello, como las variaciones de la ventilación alveolar tienen un efecto importante sobre el dióxido de carbono en sangre y tejidos, es éste el principal regulador de la respiración en condiciones normales <sup>(25)</sup>.

○ Control no químico de la respiración

Existen diversos factores en el organismo que contribuyen a la regulación no química de la respiración.

- Estimulación por propioceptores: localizados en las articulaciones y músculos del organismo, estimulan el área inspiratoria del bulbo raquídeo para aumentar la frecuencia y profundidad de la respiración durante la realización de la actividad física, incluso antes de que se produzcan cambios en la  $P_{O_2}$ ,  $P_{CO_2}$  o la concentración de  $H^+$ .
- Estimulación por barorreceptores o receptores de estiramiento: situados en las paredes de los bronquios y bronquiolos, activan el área inspiratoria y el área apnéustica cuando se estiran al producirse una hiperinsuflación de los pulmones. Como consecuencia, el área inspiratoria se inhibe directamente, mientras que el área apnéustica se inhibe por activación del área inspiratoria, y como resultado, comienza la espiración. Al desinflarse los pulmones con la espiración, las áreas inspiratoria y apnéustica no reciben estímulos de los barorreceptores, y comienza una nueva inspiración (reflejo de insuflación de Hering-Breuer) <sup>(22)</sup>.



- Existen además muchos otros factores que influyen en la regulación de la respiración. Algunos de éstos son: la estimulación del sistema límbico, incrementos o descensos de la temperatura corporal, el dolor, la dilatación del músculo del esfínter anal, la irritación de las vías aéreas o la variación en la tensión arterial <sup>(22)</sup>.

### 1.2.2 La respiración interna

La respiración interna es el proceso por el cual se lleva a cabo la degradación de biomoléculas (glucosa, lípidos y proteínas) en presencia de oxígeno (respiración aeróbica), con el fin de liberar la energía necesaria para que el organismo pueda llevar a cabo sus funciones vitales <sup>(1)</sup>.

Mediante la degradación de la glucosa en el proceso conocido como glucólisis, se forma ácido pirúvico, el cual se desdobra en CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O. Durante dicha reacción se producen 36 moléculas netas de ATP, el nucleótido fundamental en la obtención de energía celular y el cual es consumido por muchas enzimas en la catálisis de numerosos procesos químicos <sup>(1)</sup>.

## 2. EL DIÓXIDO DE CARBONO (CO<sub>2</sub>)

El dióxido de carbono es un gas inodoro, incoloro, ligeramente ácido y no inflamable. Se trata de una molécula lineal constituida por un átomo de carbono unido a dos átomos de oxígeno, de modo que su fórmula química es CO<sub>2</sub> <sup>(27)</sup>.

El aire atmosférico contiene una cantidad insignificante de dióxido de carbono (0,03%), por lo que se considera que el aire que se introduce en los pulmones apenas contiene CO<sub>2</sub>. Por su parte, el dióxido de carbono exhalado procedente del intercambio gaseoso en los alvéolos, es generado a partir de las reacciones metabólicas que tienen lugar en el interior de las células <sup>(8, 23)</sup>.

El CO<sub>2</sub> es producido principalmente durante la ruptura de los nutrientes para obtener energía en forma de ATP en las células. De esta forma, la cantidad de CO<sub>2</sub> producido depende de la cantidad relativa de hidratos de carbono, grasas y proteínas, así como de la tasa de metabolismo. Esta última se puede ver incrementada en situaciones de ejercicio, fiebre o traumatismo, entre otros <sup>(8)</sup>.

Una vez formado, el CO<sub>2</sub> difunde desde las células hacia el torrente sanguíneo, donde es transportado hasta los pulmones para ser eliminado mediante la ventilación. Esto es debido a que una acumulación de una cantidad excesiva de CO<sub>2</sub> produce una acidez que puede ser tóxica para las células, por lo que dicho exceso debe eliminarse rápida y eficientemente <sup>(8, 22)</sup>.

La presión de CO<sub>2</sub> (P<sub>CO<sub>2</sub></sub>) de la sangre desoxigenada que entra en los capilares pulmonares es de 46 mmHg, mientras que la del aire alveolar es de 40 mmHg. Debido a esta diferencia de la presión parcial del CO<sub>2</sub> a un lado y a otro de la membrana alvéolo-capilar, el CO<sub>2</sub> difunde desde la sangre hacia los alvéolos hasta que la P<sub>CO<sub>2</sub></sub> en sangre disminuye a 40 mmHg y se alcanza el equilibrio en la difusión. La espiración mantiene la P<sub>CO<sub>2</sub></sub> alveolar en 40 mmHg y la sangre oxigenada que retorna a la aurícula izquierda a través de las venas pulmonares tiene entonces una P<sub>CO<sub>2</sub></sub> de 40 mmHg <sup>(22, 23)</sup>.

Tabla 1. Presiones parciales típicas del CO<sub>2</sub> en el aire atmosférico y en varios lugares del organismo <sup>(23)</sup>.

	CO <sub>2</sub>
<b>Aire atmosférico</b>	0,3 mmHg
<b>Aire alveolar</b>	40 mmHg
<b>Venas pulmonares</b>	40 mmHg
<b>Arterias sistémicas</b>	40 mmHg
<b>Células</b>	≥ 46 mmHg
<b>Venas sistémicas</b>	46 mmHg
<b>Arterias pulmonares</b>	46 mmHg

El  $\text{CO}_2$  se trata de un gas altamente soluble, por lo que unos pulmones que funcionan correctamente pueden compensar fácilmente cualquier aumento en la producción del  $\text{CO}_2$  (8).

Cabe señalar que el dióxido de carbono actúa en procesos fisiológicos fundamentales en el organismo, destacando entre ellos la amortiguación del pH y la regulación de la respiración (8).

### 3. LA CAPNOGRAFÍA Y LA CAPNOMETRÍA

La capnografía consiste en la medición continua y representación gráfica en tiempo real y de forma no invasiva del dióxido de carbono exhalado a lo largo del tiempo <sup>(1, 2, 4, 5, 28)</sup>.

En primer lugar, es necesario comprender la diferencia entre capnometría y capnografía.

La primera hace referencia a la medición del CO<sub>2</sub> exhalado y por tanto el capnómetro, monitor utilizado para ello, muestra un valor numérico en la pantalla. Muestra también la frecuencia respiratoria.

La capnografía por su parte, ofrece ese valor numérico del CO<sub>2</sub> exhalado por el paciente y además aporta una representación gráfica de la eliminación del CO<sub>2</sub> a tiempo real y la frecuencia respiratoria. El monitor empleado para ello es el capnógrafo, que tal y como se ha descrito, nos ofrecerá de forma continua la capnometría (CO<sub>2</sub> exhalado), un registro gráfico (capnograma) y la frecuencia respiratoria del paciente <sup>(1, 2)</sup>.

Con la capnografía monitorizamos de forma continua la eliminación pulmonar de CO<sub>2</sub>, es decir, la ventilación, la cual a su vez depende de otros dos procesos del ciclo respiratorio que se producen con anterioridad: el metabolismo y la perfusión <sup>(1, 2)</sup>.

Por tanto, la medición del CO<sub>2</sub> exhalado se podrá ver afectada por tres factores:

- El **metabolismo**: donde se produce el dióxido de carbono.
- La **perfusión**: hace referencia al transporte de dicho gas hasta los pulmones.
- La **ventilación**: sistema de eliminación del CO<sub>2</sub>.

De este modo, la alteración clínica de cualquiera de estos tres procesos producirá variaciones continuas y significativas en los valores obtenidos y medidos por el capnógrafo <sup>(1, 2)</sup>.

#### 3.1 TECNOLOGÍA

Hoy en día existen diversas formas de medir el CO<sub>2</sub> exhalado. Podemos distinguir métodos invasivos, como la gasometría arterial que permite una estimación indirecta, y no invasivos, capaces de medir el CO<sub>2</sub> exhalado mediante luz infrarroja, pH, cromatografía o espectrofotometría, entre otros <sup>(1, 29)</sup>.

Existen dispositivos que emplean la luz infrarroja en la medición del CO<sub>2</sub> exhalado y que proporcionan gran información sobre la función respiratoria del paciente. Este es el caso de los capnógrafos, que emplean técnicas espectroscópicas de medida del CO<sub>2</sub> basadas en la absorción de la radiación infrarroja a una longitud de onda determinada (4,26 μm) y su emisión posterior es captada por un fotodetector <sup>(2)</sup>.

Los monitores actuales permiten una lectura específica del CO<sub>2</sub>, por lo que la misma no se altera en presencia de altas concentraciones de O<sub>2</sub> u otros gases. Además, no requieren de

grandes volúmenes de muestra de CO<sub>2</sub>, lo que posibilita su empleo en pacientes de todas las edades (desde neonatos hasta personas de la tercera edad), en pacientes intubados con volúmenes variables y en pacientes críticos con altas frecuencias respiratorias y volúmenes pequeños <sup>(2)</sup>.

### 3.1.1 Capnografía temporal o volumétrica

El CO<sub>2</sub> exhalado se puede medir de dos formas diferentes mediante el empleo de la capnografía.

La primera de ellas, conocida como “capnografía volumétrica”, permite la monitorización del volumen del CO<sub>2</sub> mediante una representación gráfica de la presión parcial del CO<sub>2</sub> exhalado frente al volumen espirado. Es utilizada principalmente en pacientes intubados en unidades de cuidados intensivos y en quirófanos. La segunda, denominada “capnografía temporal”, mide la presión parcial del CO<sub>2</sub> con respecto a una línea de tiempo. Cuando en la bibliografía se emplea el término “capnografía” sin calificativo, se hace referencia a esta última y se conoce internacionalmente con las siglas PetCO<sub>2</sub> que se suele abreviar como EtCO<sub>2</sub> (*end-tidal CO<sub>2</sub>*, en inglés) <sup>(1, 2, 30)</sup>.

El capnograma basado en el tiempo es el método capnográfico más comúnmente utilizado en la práctica clínica <sup>(31)</sup>. Informa sobre una medición cuantitativa del CO<sub>2</sub> exhalado y no es capaz de cuantificar directamente la ventilación del espacio muerto alveolar (V<sub>D</sub>) ni la ventilación del espacio muerto anatómico (V<sub>T</sub>). La capnografía volumétrica, además de monitorizar cuantitativamente la EtCO<sub>2</sub>, proporciona extensa información sobre la producción, el transporte y la eliminación de CO<sub>2</sub> dentro de los pulmones por medio de patrones de onda <sup>(30, 31)</sup>.

Esta capnografía volumétrica requiere de equipos más complejos ya que necesita de un neumotacógrafo conectado al capnógrafo para medir el flujo respiratorio, haciendo que sea un aparato de mayor coste con respecto al monitor empleado en la capnografía temporal <sup>(31)</sup>.

Hoy en día son pocos los capnógrafos volumétricos disponibles en el comercio y la mayoría de ellos están adjuntos a ventiladores mecánicos modernos. Es cierto que la capnografía volumétrica es considerada el mejor método para guiar el soporte ventilatorio de acuerdo a las fracciones del espacio fisiológico muerto, pero tal y como se ha descrito anteriormente, requiere de un equipo especializado y caro. Por su contra, la capnografía temporal es una herramienta factible y una opción más barata para evaluar la ventilación del paciente. De este modo, el presente trabajo fin de grado abordará y se centrará únicamente en la capnografía temporal al tratarse del método capnográfico mayormente empleado en nuestro medio <sup>(31)</sup>.

### 3.1.2 Tipos de capnógrafos

Por otro lado, es preciso señalar que existen dos tipos de capnógrafos según la forma que emplean para medir el CO<sub>2</sub>: de flujo principal (*mainstream* en inglés) y de flujo lateral (*sidestream* o *microstream*)<sup>(1, 2, 24)</sup>.

Hasta hace pocos días, los capnógrafos **de flujo principal** únicamente podían ser empleados en pacientes intubados puesto que medían el CO<sub>2</sub> directamente en la vía aérea colocando un sensor en el tubo endotraqueal<sup>(2, 24)</sup>. Sin embargo, recientes avances tecnológicos han supuesto que hoy en día también existan capnógrafos tipo *mainstream* para pacientes no intubados<sup>(32)</sup>.

El capnógrafo *mainstream* tiene un sensor incluido en el circuito ventilatorio en pacientes intubados o bien se fija a un adaptador aéreo o naso-oral en el caso de pacientes con ventilación espontánea. Dicho sensor se conecta a un monitor. En este tipo de capnógrafos la fuente de infrarrojos y los fotodetectores están en línea, en lados opuestos del circuito principal, a través del cual pasan los rayos, o bien debajo de la nariz en pacientes no intubados<sup>(2, 24, 32, 33)</sup>. Tienen una respuesta más rápida y no precisan retirar una muestra de gas de la vía aérea<sup>(2, 24)</sup>. Además, es preciso resaltar que al encontrarse el sensor en la vía aérea, la lectura presenta muchas veces alteraciones en presencia de secreciones, requiriendo calibraciones y reposiciones de forma frecuente<sup>(2)</sup>.

En los capnógrafos de **flujo lateral**, el sensor se encuentra dentro del monitor y se mide el CO<sub>2</sub> mediante la aspiración continua a través de un tubo fino de pequeñas muestras de gas exhalado que son trasladadas a una cámara de medida<sup>(2, 24, 33)</sup>. Esto hace que exista un ligero retraso en el análisis como consecuencia del tiempo requerido para el transporte del gas<sup>(8, 33)</sup>.

Los capnógrafos *sidestream* pueden ser empleados en pacientes intubados (utilizando un adaptador en el TET y el circuito del respirador) y en no intubados (empleando una cánula oral-nasal que mide el CO<sub>2</sub> exhalado y que permite la administración simultánea de O<sub>2</sub>). De esta forma, los capnógrafos de flujo lateral permiten lecturas fiables del CO<sub>2</sub> exhalado en todo tipo de pacientes, desde neonatos hasta adultos, con ventilación mecánica invasiva, no invasiva y en respiración espontánea. Además, no necesitan ser calibrados por los profesionales sanitarios, sino que únicamente requieren de una revisión anual o cada dos años por personal técnico<sup>(2)</sup>.

Un problema fundamental que presentan los capnógrafos *sidestream* es la condensación del agua, acumulándose el vapor de agua en la muestra del tubo y provocando ello errores en la detección correcta del CO<sub>2</sub>. Para ello, algunas unidades contienen un adaptador especial con trampa de agua con el fin de minimizar este problema<sup>(8, 24)</sup>.

### 3.2 EL CAPNOGRAMA

El capnograma o registro capnográfico es la representación gráfica de la ventilación del paciente a lo largo del tiempo, registrándose en el eje vertical la presión parcial de CO<sub>2</sub> en mmHg y en el eje horizontal el tiempo en segundos <sup>(2)</sup>.

Los valores normales de la presión parcial de CO<sub>2</sub> al final de la espiración (EtCO<sub>2</sub>) oscilan entre 35 y 45 mmHg <sup>(3)</sup>. Además, en pacientes sanos la EtCO<sub>2</sub> refleja generalmente la PaCO<sub>2</sub>, existiendo una diferencia de 2-5 mmHg a favor de la arterial <sup>(1, 4, 5, 33, 34, 36)</sup>.

En un capnograma normal podemos distinguir claramente cuatro fases <sup>(1, 2, 5, 7, 24, 33)</sup>:

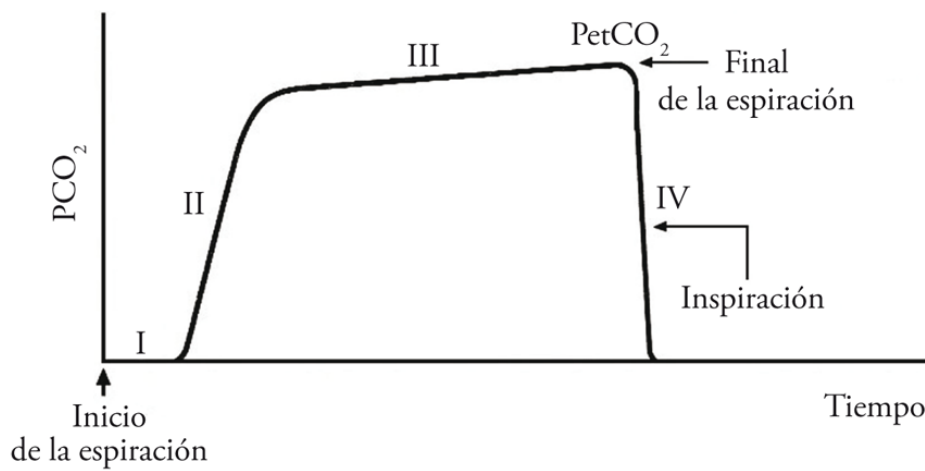


Figura 4. Fases del capnograma normal <sup>(33)</sup>.

1. **Fase I**: corresponde con el período comprendido entre el final de la inspiración y el comienzo de la espiración siguiente, cuando se inicia la ventilación del espacio muerto formado por la vía aérea superior y parte del árbol bronquial que no tienen capacidad de intercambiar gases (espacio anatómico muerto) y, por tanto, cuyo volumen de aire está prácticamente libre de CO<sub>2</sub> siendo muy similar al del aire atmosférico. El capnógrafo reconoce esta presión de CO<sub>2</sub> ambiental y la asimila al valor "cero", proceso conocido como "autocero" observándose una línea isoelectrica en el gráfico.
2. **Fase II**: se observa una rápida subida al inicio de la espiración por la eliminación de CO<sub>2</sub> del espacio muerto mezclado con CO<sub>2</sub> alveolar.
3. **Fase III** o meseta alveolar: corresponde a la exhalación del CO<sub>2</sub> del aire procedente enteramente de los alvéolos, observándose un ascenso lento y progresivo que forma una meseta, hasta alcanzar el punto en que la presión parcial del CO<sub>2</sub> es máxima. El valor de esta presión parcial de CO<sub>2</sub> al final de la espiración es el CO<sub>2</sub> tele-espiratorio o EtCO<sub>2</sub> (*end-tidal* CO<sub>2</sub> en inglés), siendo éste el valor que registra el capnógrafo/capnómetro.
4. **Fase IV**: comienza la fase inspiratoria, y por tanto la presión parcial de CO<sub>2</sub> decrece rápidamente hasta quedarse a cero <sup>(1, 2, 5, 7, 24, 33)</sup>.

Cambios en la forma o en la altura de la línea gráfica del capnograma pueden indicar alteraciones en la función respiratoria, la perfusión, el metabolismo del paciente o fallos en el equipo <sup>(1, 2, 8)</sup>.

Por ello, es importante comprender las diferentes fases de un capnograma normal para posteriormente ser capaces de detectar alteraciones en el mismo y averiguar cuál es la posible causa de ello.

### 3.3 APLICACIONES CLÍNICAS Y ALTERACIONES CAPNOGRÁFICAS

#### 3.3.1 Confirmación y control de la adecuada posición del tubo endotraqueal

Hoy en día la indicación con mayor relevancia y evidencia científica del capnógrafo y el capnómetro es la confirmación de la correcta colocación del tubo endotraqueal. Esto es debido a que uno de los principales problemas que conlleva la técnica de intubación es la intubación esofágica, que se estima que ocurre en un 15% de las ocasiones que se lleva a cabo dicho procedimiento en nuestro medio. Si no es rápidamente detectada y corregida, puede tratarse de una complicación potencialmente fatal <sup>(1, 2, 24)</sup>.

Diversos estudios han demostrado en los últimos años que los métodos clínicos empleados para confirmar la correcta posición del TET, como la auscultación pulmonar y epigástrica, la observación de los movimientos torácicos o la presencia de vapor en el interior del tubo, deben complementarse con un método objetivo como la capnografía, con el fin de evitar especialmente la complicación anteriormente citada <sup>(1, 2, 24)</sup>.

De esta forma, con la capnografía se puede verificar rápidamente si el TET está correctamente en vía aérea, lo cual se constata por el mantenimiento de niveles capnométricos y un capnograma normal a lo largo del tiempo. En cambio, si se tratase de una intubación esofágica, en el capnograma observaríamos escaso CO<sub>2</sub> residual o incluso el mismo se encontraría inexistente. En ocasiones, en el tracto digestivo alto se podría observar la aparición de valores capnométricos y curvas en el capnograma muy bajos y decrecientes hasta llegar a cero en un período muy corto de tiempo <sup>(1, 7, 24)</sup>.



Figura 5. Capnograma en la intubación esofágica <sup>(1)</sup>.



Otro de los errores cometidos en este procedimiento es la intubación selectiva que consiste en la introducción del TET en uno de los bronquios principales, generalmente el derecho debido a su abierta angulación con respecto a la tráquea. De este modo, se deja de ventilar el pulmón izquierdo. En este caso, la capnometría no es un método predictivo a corto plazo, puesto que en el 80% de los casos se mantiene estable o se observan alteraciones escasamente notables. Sin embargo, el capnograma puede presentar en algunas ocasiones un cierto patrón obstructivo en las fases II y III debido a que el TET se encuentra apoyado contra la pared del bronquio. En este tipo de situaciones, es la pulsioximetría el método con mayor eficacia para detectar la intubación selectiva, razón por la cual la capnografía y la pulsioximetría deben ser métodos complementarios durante la intubación <sup>(1, 24)</sup>.

Una monitorización continua del EtCO<sub>2</sub> en pacientes intubados, permite también una detección temprana de la salida accidental del tubo durante los traslados o recolocaciones del paciente, así como la detección de obstrucciones, fugas o acodamientos del circuito <sup>(8)</sup>.

De este modo, en el desplazamiento del tubo endotraqueal a la hipofaringe se observará un descenso importante del EtCO<sub>2</sub> en el capnograma, que se traducirá prácticamente en el valor 0 en el caso de la extubación <sup>(5)</sup>.



Figura 6. Capnograma en la extubación <sup>(1)</sup>.



Figura 7. Capnograma en la obstrucción del tubo endotraqueal <sup>(1)</sup>.

### 3.3.2 Evaluación y pronóstico de la reanimación cardiopulmonar (RCP)

Las últimas recomendaciones del Consejo Europeo de Reanimación (*European Resuscitation Council*), incluidas en la guía de 2015, hacen especial énfasis en la utilización de la capnografía durante el soporte vital avanzado para confirmar y monitorizar de forma continua la correcta colocación del TET, evaluar la calidad de la reanimación cardiopulmonar (RCP), indicar rápidamente una recuperación de la circulación espontánea y establecer un pronóstico de la reanimación <sup>(10)</sup>.

Durante la RCP se puede emplear la capnografía para estimar de forma continua la perfusión del paciente, ya que tanto el metabolismo como la ventilación permanecen constantes <sup>(2)</sup>. En diversos estudios se ha descrito que el masaje cardíaco no logra alcanzar

un gasto cardíaco superior al 30% y, por ello, generalmente se observarán valores bajos de EtCO<sub>2</sub> durante las maniobras de RCP (1, 2, 24).

Las fluctuaciones en la tendencia del EtCO<sub>2</sub> proporcionarán información sobre la **calidad** del masaje cardíaco realizado, al estimar de forma no invasiva el gasto cardíaco logrado con la RCP (1, 2). De esta forma, se pueden observar fluctuaciones de hasta 10 mmHg a lo largo de una RCP a consecuencia de la ineficacia de las compresiones torácicas, bien por desconocimiento de la técnica o por cansancio del propio rescatador. En la mayoría de los casos se recuperan los niveles de EtCO<sub>2</sub> previos con una sencilla corrección en la realización del masaje o con el simple cambio del reanimador (1, 24).

La capnografía también es un método útil para detectar de forma temprana la **recuperación de la circulación espontánea**, al producirse una elevación súbita y sostenida del EtCO<sub>2</sub>, debido a un aumento de perfusión no relacionado con el masaje cardíaco, que se produce incluso antes de la recuperación del ritmo (aparición de QRS estrecho en el monitor) y la recuperación del pulso arterial (1, 2).

De esta forma, la monitorización capnográfica posibilita detectar la recuperación de la circulación espontánea sin detener las compresiones torácicas y puede ser utilizada como una forma de evitar la inyección del bolo de adrenalina una vez lograda la recuperación de la circulación. Diferentes estudios han demostrado que cuando se produce la recuperación de la circulación espontánea, se produce un incremento significativo en el EtCO<sub>2</sub>. En caso de sospecharse durante la RCP de esta recuperación de la circulación espontánea, la *European Resuscitation Council* recomienda detener la administración de adrenalina, evitando así un bolo innecesario y potencialmente dañino, y continuar con la RCP. Si en el siguiente chequeo de la RCP se confirma la parada cardíaca, entonces sí se debe administrar adrenalina (10).

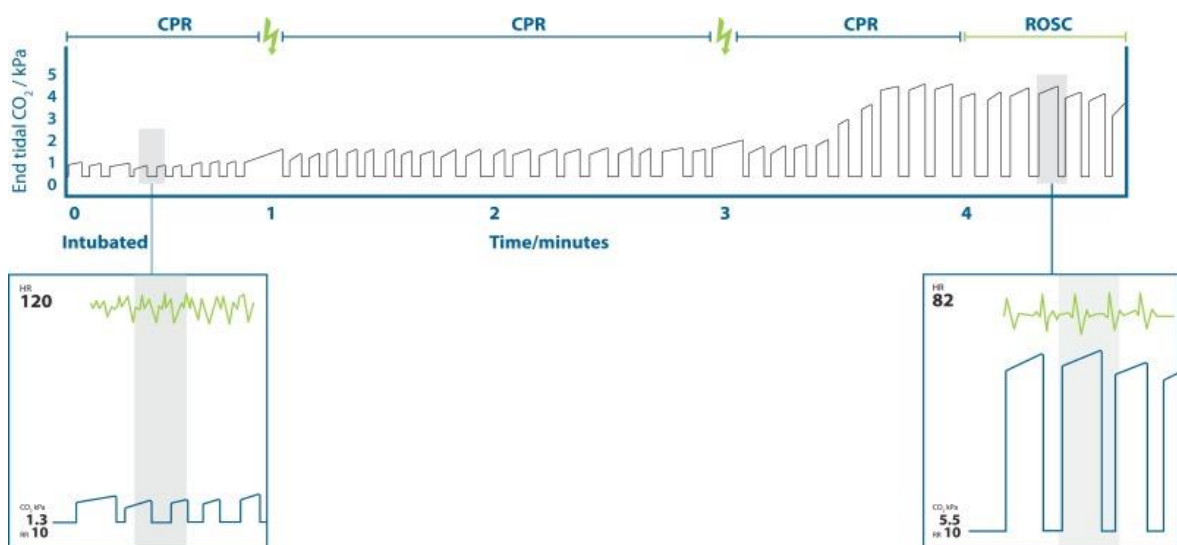


Figura 8. Capnograma durante la PCR y RCP (10).

Por otro lado, la capnografía también puede ser empleada durante la RCP para valorar el **pronóstico** del paciente. Aunque al inicio de las maniobras los valores capnométricos son muy parecidos en la mayoría de las paradas cardiorrespiratorias, en diferentes estudios se indica que niveles bajos de EtCO<sub>2</sub> durante la RCP se han asociado a una menor posibilidad de la recuperación de la circulación espontánea y, por tanto, a un aumento de la mortalidad (1, 2, 10, 24). De esta forma, se ha determinado que el mantenimiento de valores de EtCO<sub>2</sub> por debajo de 10 mmHg de forma prolongada es indicador de imposibilidad de recuperación del paciente y valores mantenidos durante los primeros 30 minutos de RCP por debajo de 20 mmHg tienen un mal pronóstico (1, 2, 10, 24).

De este modo, la ERC ha establecido que la imposibilidad de alcanzar un valor de EtCO<sub>2</sub> mayor a 10 mmHg durante 20 minutos de reanimación es considerada uno de los criterios que se tienen en cuenta a la hora de decidir cuándo poner fin al soporte vital extracorpóreo en pacientes con parada cardíaca refractaria. A pesar de ello, insiste en que éste no debe ser el único criterio empleado para tomar la decisión de detener la reanimación, sino que debe considerarse como un elemento que forma parte de un abordaje multimodal (10, 16).

Por el contrario, niveles altos de EtCO<sub>2</sub> se asocian con una mayor supervivencia al señalar suficiente circulación para permitir el intercambio de gases en los alvéolos (2, 8).

### 3.3.3 Control de la terapia respiratoria

La capnografía puede emplearse para vigilar más estrechamente la ventilación mecánica, tanto invasiva como no invasiva (2).

En el caso de la ventilación mecánica invasiva (VMI), la capnografía permite confirmar el correcto posicionamiento del TET o cualquier dispositivo alternativo a la intubación (mascarilla laríngea, tubo laríngeo) durante todo el proceso ventilatorio (1, 24). Por ejemplo, en el caso de una fijación deficiente de la máscara laríngea se observará un descenso de los valores del EtCO<sub>2</sub> (5).

Además, una monitorización continua de la EtCO<sub>2</sub> en pacientes intubados permite detectar obstrucciones, fugas o acodamientos del circuito (8). En caso de fuga alrededor del tubo endotraqueal, se observará un descenso del CO<sub>2</sub> espirado ya que no será cuantificado en su totalidad el CO<sub>2</sub> procedente de los pulmones (5).

La capnografía posibilita la detección de la pérdida de aire por fallo del tubo endotraqueal, que se constata en el capnograma porque la pendiente descendente de la meseta se mezcla con la parte descendente del capnograma. De este modo, el capnograma nos puede informar de que el manguito del tubo endotraqueal o de la traqueostomía está desinflado o pinchado, o bien que la vía aérea artificial es demasiado pequeña para el tamaño del paciente (7).

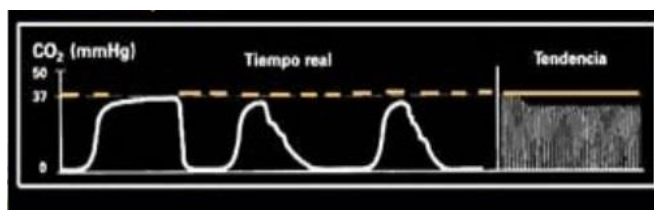


Figura 9. Capnograma en el sello inadecuado del tubo endotraqueal (7).

Permite también comprobar que los parámetros pautados son correctos y que el paciente se encuentra correctamente adaptado a la modalidad ventilatoria seleccionada. En caso de no ser así, la capnografía nos permitiría detectar rápidamente esa desadaptación del paciente al ventilador, permitiendo modificar los parámetros así como asegurar un nivel adecuado de sedación-relajación-analgésia del paciente (1, 24).

La aparición de una serie de hendiduras en la meseta de la onda puede ser reflejo de que la acción de los relajantes musculares está comenzando a ceder y el paciente está empezando a retomar su ventilación espontánea, observándose así la ventilación espontánea del paciente “sobreimpresa” sobre la ventilación controlada. Estas hendiduras se caracterizan porque su profundidad es inversamente proporcional al grado de acción del fármaco. Su localización es relativamente constante en cada paciente, pero no tienen por qué estar presentes en cada respiración (7, 34).

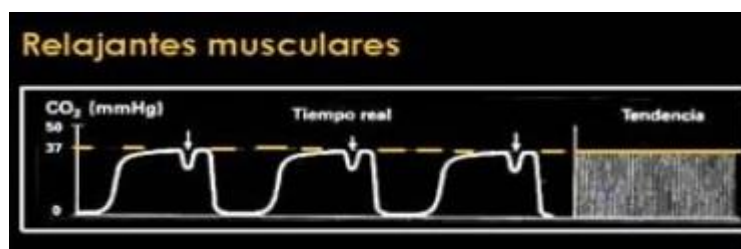


Figura 10. Capnograma que refleja el cese de la acción de los relajantes musculares (7).

En pacientes intubados especialmente sensibles a fluctuaciones del CO<sub>2</sub>, como es el caso de neonatos y de pacientes con sospecha de hipertensión intracraneal (HTIC), la capnografía ejerce un papel relevante permitiendo detectar la hipoventilación o la hiperventilación que agravarían su situación (2). La monitorización capnográfica de este tipo de situaciones se explicará más detalladamente en el siguiente apartado.

Los pacientes con respiración espontánea pero que precisan de un apoyo ventilatorio (VMNI) mediante sistemas de presión positiva, bien sea CPAP o BIPAP, también deben estar correctamente monitorizados para garantizar un buen estado pulmonar. Para ello, se recomienda la utilización simultánea de la pulsioximetría y la capnografía (1, 24).

Asimismo, se debe poner en práctica la monitorización capnográfica en pacientes sometidos a ventilación manual con ambú (mascarilla autohinchable con reservorio) ya que permite asegurar que la técnica de sellado de la mascarilla es adecuada y no se producen pérdidas de aire. Asimismo, permite garantizar que el volumen empleado es el que precisa el paciente, evitando hiperventilación, hipoventilación e incluso apnea accidental <sup>(1, 24)</sup>.

El capnograma puede revelar la obstrucción del flujo de gas espirado mediante un cambio en la pendiente del extremo ascendente de la onda del capnograma, cuyas causas más frecuentes son la obstrucción del extremo espiratorio del circuito en pacientes con ventilación mecánica, o bien la presencia de un cuerpo extraño en la vía aérea superior o el broncoespasmo en pacientes con ventilación espontánea <sup>(7)</sup>.

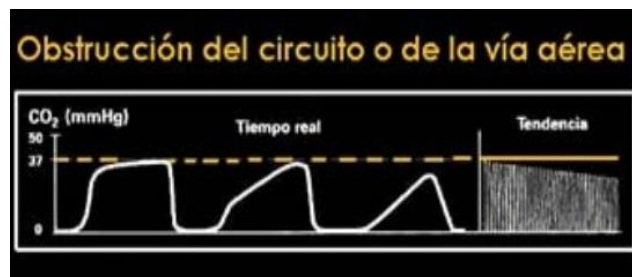


Figura 11. Capnograma en la obstrucción del circuito ventilatorio o de la vía aérea <sup>(7)</sup>.

Igualmente, resaltar que una elevación de la línea basal del CO<sub>2</sub> espirado indica habitualmente reinhalación, cuyas causas más frecuentes son: defecto en la válvula espiratoria del respirador o del equipo de anestesia, circuitos de reinhalación parciales, flujo inspiratorio inadecuado, tiempos espiratorios insuficientemente cortos y funcionamiento inadecuado del sistema de absorción de CO<sub>2</sub> <sup>(7)</sup>.



Figura 12. Capnograma durante la reinhalación de CO<sub>2</sub> <sup>(1)</sup>.

### 3.3.4 Monitorización diagnóstico-terapéutica del broncoespasmo

La aplicación más relevante de la capnografía en pacientes con respiración espontánea es la monitorización diagnóstico-terapéutica del broncoespasmo, tanto la crisis asmática como la reagudización de la enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC) <sup>(1, 2, 24)</sup>.

Durante una crisis de broncoespasmo, se produce un aumento de la pendiente de la meseta alveolar del capnograma, que se corresponde con la fase III. El ángulo de inclinación de dicha pendiente será directamente proporcional a la gravedad del cuadro clínico, siendo mayor cuanto mayor es la severidad de la crisis. Esto es debido a que el vaciado alveolar es asimétrico, produciéndose más lentamente en las zonas broncoespásticas, razón por la que la fase III del capnograma tiene apariencia de aleta de tiburón, sirviendo así el capnógrafo de herramienta diagnóstica en el broncoespasmo <sup>(1, 2)</sup>.

Además, gracias a las tendencias capnográficas se puede valorar en tiempo real los cambios ventilatorios que presenta el paciente durante la asistencia médica y la eficacia del tratamiento <sup>(1, 2)</sup>.

De esta forma, en la fase inicial del broncoespasmo (crisis leve), el paciente mantendrá una taquipnea compensadora que provocará una hiperventilación para mantener su oxigenación, y por tanto, el EtCO<sub>2</sub> presentará niveles bajos. Si el cuadro no se resuelve con los broncodilatadores, la taquipnea se mantendrá en una segunda fase (crisis moderada), mientras el EtCO<sub>2</sub> comenzará a subir para alcanzar una tercera fase (crisis grave), en la que la taquipnea va desapareciendo y dando paso a una bradipnea por agotamiento, que junto con el cuadro de broncoespasmo provocará una hipoventilación y, por tanto, una elevación desmesurada del EtCO<sub>2</sub>, pasando por valores falsamente normales (> 45 mmHg), hasta que la situación se revierta con el tratamiento. En caso de no revertirse, el EtCO<sub>2</sub> caerá progresivamente hasta llegar a límites normales o más bajos inclusive, debido simplemente a la respiración superficial tipo *gasping* por extremo agotamiento, que pronostica la PCR <sup>(1, 2, 24)</sup>.

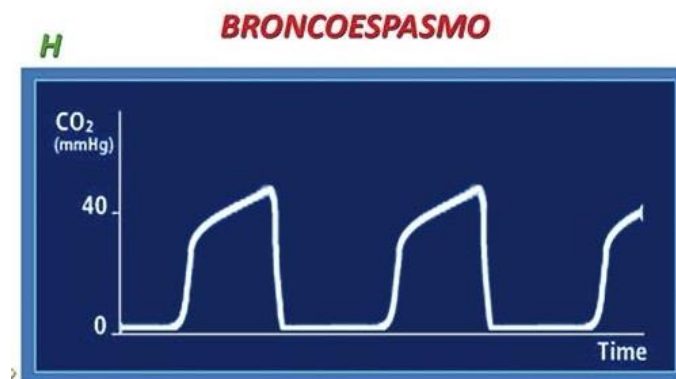


Figura 13. Capnograma en el broncoespasmo <sup>(1)</sup>.

### 3.3.5 Monitorización de alteraciones del patrón respiratorio

En pacientes no intubados se puede emplear la capnografía, junto con la pulsioximetría, para monitorizar de forma continua la función y el patrón respiratorio del paciente (1, 24).

Un problema ventilatorio grave que permite detectar el capnógrafo es la apnea, que aparece como la ausencia del cualquier tipo de onda, siempre teniendo en cuenta que el sistema funcione adecuadamente (34).

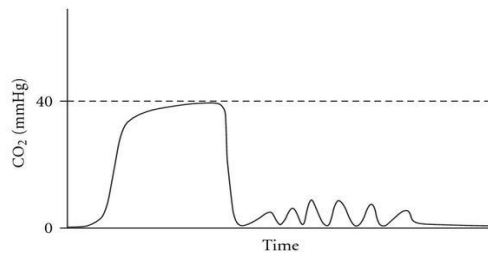


Figura 14. Capnograma en la apnea (34).

Por otro lado, una disminución progresiva de los niveles de EtCO<sub>2</sub> puede ser signo de hiperventilación (5, 7). Se puede establecer así que niveles por debajo de 35 mmHg pueden tener su origen en una hiperventilación del paciente (3).



Figura 15. Capnograma en la hiperventilación (1).

Se puede utilizar también para monitorizar estados de hipoventilación causada por intoxicaciones etílicas, drogas, fármacos, accidente cerebrovascular, etc. (1, 2, 24)

Un aumento de la EtCO<sub>2</sub> a lo largo del tiempo puede ser debido a hipoventilación, que se puede detectar asimismo mediante la capnometría al detectar niveles de EtCO<sub>2</sub> superiores a 45 mmHg (3, 7).



Figura 16. Capnograma en la hipoventilación (1).

Esto es especialmente de gran utilidad en pacientes que requieren de analgesia opiode, puesto que la depresión respiratoria inducida por estos fármacos puede causar daño neurológico o incluso la muerte <sup>(8)</sup>.

Los fármacos opiáceos inhiben el quimiorreceptor sensible a cambios en el CO<sub>2</sub> arterial, lo que dificulta la detección temprana de la hipercapnia por parte del organismo y como consecuencia la respuesta compensatoria ante dicha situación. Asimismo, estos analgésicos actúan directamente en el centro respiratorio modificando la frecuencia y el ritmo respiratorio, de forma que las respiraciones se vuelven más lentas e irregulares <sup>(8)</sup>.

Sin embargo, la identificación de este cuadro no es precisamente fácil. Además, desde que a más pacientes se les indica oxigenoterapia durante y tras la intervención quirúrgica, los pulsioxímetros no son considerados el mejor método para detectar tempranamente el deterioro del esfuerzo respiratorio <sup>(8, 18)</sup>. La pulsioximetría detecta la desaturación de oxígeno y la hipoxemia, pero sería inadecuado y potencialmente peligroso emplearla como único método para detectar la hipoventilación alveolar, ya que esto puede suceder en presencia de una saturación de oxígeno normal en la medición del pulsioxímetro <sup>(18)</sup>.

Diversos estudios han demostrado que la pulsioximetría y la inspección visual son métodos que presentan importantes limitaciones en procedimientos de sedoanalgesia ya que no permiten detectar cambios en el patrón respiratorio y la desaturación constituye un signo tardío de depresión respiratoria <sup>(17)</sup>. Es más, hay estudios que insinúan que la aplicación de oxigenoterapia, esencial en la sedación profunda, puede enmascarar la hipoxemia, retrasando la detección de los episodios de hipoventilación en aquellos casos en los que únicamente se emplea el pulsioxímetro <sup>(17, 18)</sup>.

La capnografía, sin embargo, posibilita una detección precoz de un notable número de episodios de hipoventilación que no son identificados por inspección visual ni pulsioximetría. Una alteración en la curva de la capnografía constituye el primer signo de alarma de depresión respiratoria, seguido de un aumento de EtCO<sub>2</sub> y finalmente un descenso de la saturación de oxígeno <sup>(17)</sup>.

Aunque es cierto que muchos de los episodios que se detectan con el uso del capnógrafo y el capnómetro no son cuadros de depresión respiratoria clínicamente significativa, son situaciones de hipoventilación y de riesgo potencial que hay que tener en cuenta para evitar la progresión hacia la citada depresión respiratoria. Un manejo adecuado de las situaciones mencionadas evitará la necesidad de utilizar maniobras avanzadas sobre la vía aérea <sup>(17)</sup>.

De este modo, se puede afirmar que la capnografía es más sensible que la pulsioximetría en la detección del compromiso respiratorio, que ha llevado a la *American Society of Anesthesiologists* a incluir la capnografía y la capnometría en los estándares de la monitorización del paciente sometido a analgesia básica <sup>(18, 19)</sup>.



### 3.3.6 La capnografía como método complementario en la monitorización de la perfusión

Tal y como se ha descrito anteriormente, la medición del CO<sub>2</sub> exhalado puede verse afectada por 3 factores, entre los cuales se encuentra la perfusión. Por tanto, la capnografía nos puede proporcionar información en diferentes situaciones y cuadros clínicos relacionados con este proceso <sup>(1)</sup>.

De este modo, se puede emplear la capnografía como método complementario a la tensión arterial y la frecuencia cardíaca en la monitorización de la perfusión y, por tanto, del estado hemodinámico. Es utilizada en estados de shock e hipovolemias súbitas, por rotura de aneurisma por ejemplo, en los que se observa un descenso brusco de los valores recogidos por el capnógrafo. Asimismo, se puede emplear como monitor de perfusión en situaciones de tromboembolismo pulmonar (TEP) <sup>(1, 2, 24)</sup>.

El EtCO<sub>2</sub> puede ser una medida indirecta del rendimiento cardíaco y de la circulación pulmonar. En pacientes con una ventilación y perfusión normales, el EtCO<sub>2</sub> se correlaciona con la concentración de CO<sub>2</sub> arterial. Una EtCO<sub>2</sub> decreciente con onda normal en presencia de una ventilación sin cambios, indica un menor CO<sub>2</sub> excretado en los alvéolos <sup>(8, 34)</sup>. El CO<sub>2</sub> es un gas altamente soluble, por lo que si llega a los pulmones se intercambiará rápidamente. Un descenso en el EtCO<sub>2</sub> puede indicar falta de circulación pulmonar debido al bajo rendimiento cardíaco (hipotensión o shock) o bien a una obstrucción en la circulación pulmonar, como es el caso del TEP. Una medición del CO<sub>2</sub> arterial en estos casos demostraría un incremento de los niveles normales de la PaCO<sub>2</sub> <sup>(8)</sup>.

### 3.3.7 Monitorización de estados metabólicos

La capnografía permite valorar la respuesta a la hipotermia, tanto accidental como terapéutica, así como detectar la presencia y gravedad de la cetoacidosis diabética, la gastroenteritis aguda y cuadros de deshidratación <sup>(1, 2, 24)</sup>.

Un estudio realizado en el servicio de urgencias del Hospital General Gregorio Marañón entre abril de 2006 y enero de 2007 propuso evaluar la relación entre el EtCO<sub>2</sub> y el bicarbonato en plasma en niños con gastroenteritis aguda y acidosis metabólica <sup>(35)</sup>.

Para comprenderlo, hay que tener presente que en pacientes con una función pulmonar normal, el EtCO<sub>2</sub> se relaciona estrechamente con la presión arterial de CO<sub>2</sub> (PaCO<sub>2</sub>), permaneciendo de 2 a 5 mmHg por debajo de ésta <sup>(1, 4, 5, 33, 34, 36)</sup>. Asimismo, señalar que existe una relación íntima entre los valores de la presión alveolar de CO<sub>2</sub> y la PaCO<sub>2</sub> <sup>(35)</sup>.

La compensación fisiológica de la acidosis metabólica se logra con un aumento de la frecuencia respiratoria que provoca un incremento del volumen minuto, aumentando así la eliminación del dióxido de carbono. Esto causa una disminución de la presión alveolar de CO<sub>2</sub> y por lo tanto, también de la presión arterial de CO<sub>2</sub> <sup>(35)</sup>.

El presente estudio demuestra que existe una fuerte correlación lineal entre esta PaCO<sub>2</sub> y el bicarbonato plasmático y, por ello, se puede estimar el grado de acidosis metabólica y deshidratación a partir del CO<sub>2</sub> espirado que se obtiene con la capnografía <sup>(35)</sup>.

De esta manera, cuanto menor sea el EtCO<sub>2</sub>, menor serán la PaCO<sub>2</sub> y la concentración de bicarbonato en plasma, por lo que mayor será el grado de acidosis metabólica y de deshidratación del paciente <sup>(35)</sup>.

Por tanto, se puede emplear la capnografía como método no cruento para estimar de forma precoz la gravedad del cuadro de acidosis metabólica y deshidratación del paciente, tanto al sospechar de un cuadro de gastroenteritis aguda como tras el tratamiento con fluidoterapia intravenosa, sin necesidad de llevar a cabo la venopunción <sup>(35)</sup>.

### 3.3.8 Estimación de la PaCO<sub>2</sub>

La PetCO<sub>2</sub> no es un reflejo exacto de la PaCO<sub>2</sub> obtenida mediante gasometría arterial, pero sí se correlaciona con la misma existiendo una diferencia de 2-5 mmHg a favor de la arterial <sup>(1, 4, 5, 33, 34, 36)</sup>. Esta diferencia de concentración se debe a causas fisiológicas: la existencia del espacio muerto en la vía aérea y el *shunt* fisiológico secundario al drenaje de las venas de Tebesio directamente al ventrículo izquierdo y a la propia circulación bronquial, con drenaje directo a los pulmones sin pasar por el alvéolo <sup>(1)</sup>.

Los valores normales de la PaCO<sub>2</sub> varían entre 35 a 45 mmHg y cabe resaltar que su medición es un indicador fiable de una adecuada ventilación <sup>(33, 34)</sup>.

En pacientes sanos, la diferencia entre la PetCO<sub>2</sub> y la PaCO<sub>2</sub> es normalmente inferior a 5 mmHg <sup>(36)</sup>. Sin embargo, en aquellos que presentan patología pulmonar con alteración en la relación ventilación/perfusión, dicha diferencia aumenta en 10 mmHg o más, por lo que la PetCO<sub>2</sub> obtenida con el capnógrafo deja de ser un fiel reflejo de la PaCO<sub>2</sub> <sup>(34, 36)</sup>.

Las propiedades del intercambio gaseoso del pulmón dependen del equilibrio entre la ventilación y la perfusión, que asegura que cantidades iguales de aire y sangre ingresen a la porción respiratoria de los pulmones, manteniendo así las presiones parciales de O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> en sangre arterial dentro del rango normal <sup>(25, 26)</sup>.

Sin embargo, cuando se producen cambios en la ventilación, en la perfusión o en ambos procesos, el cociente V/Q se modificará y como consecuencia también variarán la PaO<sub>2</sub> y la PaCO<sub>2</sub>, difiriendo esta última de la PetCO<sub>2</sub> <sup>(25, 37)</sup>.

Cuando la **relación V/Q es baja** o menor que lo normal, la PetCO<sub>2</sub> se ve incrementada. Esto ocurre en situaciones en las que la ventilación se encuentra reducida (por asma o EPOC por ejemplo) o la perfusión está aumentada (tras una embolia pulmonar donde el flujo es derivado a zonas indemnes) y por tanto no hay suficiente ventilación para proporcionar el oxígeno necesario a los capilares pulmonares, de forma que parte de la sangre venosa no

se oxigena <sup>(25, 33, 37)</sup>. Cuando la V/Q es baja, la P<sub>O<sub>2</sub></sub> disminuye y la P<sub>CO<sub>2</sub></sub> aumenta, pudiendo contribuir ello al desarrollo de hipoxemia e hipercapnia <sup>(37)</sup>.

Por el contrario, cuando la **relación V/Q es alta** o mayor que lo normal, la PetCO<sub>2</sub> disminuye. Esto sucede cuando se produce un incremento en la ventilación o cuando la perfusión está disminuida (en el enfisema donde se produce una destrucción de las paredes de los capilares pulmonares), de forma que se incrementa la ventilación del espacio muerto fisiológico donde no se produce el intercambio gaseoso <sup>(33, 37)</sup>. Hay mucho más oxígeno disponible en los alvéolos del que puede ser difundido a la sangre. Así, parte de la ventilación “se desperdicia” y la sangre no se oxigena lo suficiente al pasar por los alvéolos <sup>(25)</sup>, por lo que la P<sub>O<sub>2</sub></sub> aumentará y la P<sub>CO<sub>2</sub></sub> disminuirá con respecto a los valores normales <sup>(37)</sup>.

Si lo que se necesita es conocer información exacta sobre la capacidad del intercambio de gases a nivel pulmonar, es decir, obtener información sobre la P<sub>O<sub>2</sub></sub> y la P<sub>CO<sub>2</sub></sub>, hoy en día el método de referencia es la gasometría arterial. Pero si lo que se precisa es conocer de forma continua la saturación de oxígeno y la presión arterial de CO<sub>2</sub>, el pulsioxímetro y el capnógrafo son dos instrumentos válidos y útiles para resolver este problema siempre que exista una correcta ventilación y perfusión del paciente <sup>(29)</sup>.

Para comenzar a utilizar la capnografía, se debe llevar a cabo en primer lugar una gasometría arterial para medir los gases en sangre (P<sub>O<sub>2</sub></sub> y P<sub>CO<sub>2</sub></sub>) y poder correlacionar simultáneamente ambos valores y calcular su gradiente <sup>(5)</sup>.

Se concluye así que la principal ventaja de la capnografía sobre la gasometría arterial es la habilidad de proveer una monitorización continua del CO<sub>2</sub> cuando la ventilación y la perfusión son adecuadas, por lo que a pesar de que la capnografía no puede sustituir la gasometría arterial, puede reducir la frecuencia en que esta última es requerida <sup>(31)</sup>.

### 3.4 INTERPRETACIÓN DEL CAPNOGRAMA

Una vez comprendido el capnograma y conocidas las principales aplicaciones clínicas y alteraciones capnográficas, se puede proceder a la interpretación de los valores obtenidos con el capnógrafo.

A continuación se describen los pasos a seguir para llevar a cabo una correcta interpretación del capnograma:

#### 1. Verificar la presencia de CO<sub>2</sub>

Si resulta evidente la presencia de CO<sub>2</sub>, hay que pasar directamente al siguiente punto.

Si por el contrario no se detecta CO<sub>2</sub> espirado, hay que sospechar de:

- Intubación esofágica si se acaba de colocar el tubo endotraqueal o cualquier dispositivo alternativo a la intubación.
- Extubación del paciente, desconexión del circuito ventilatorio o completa obstrucción del sistema (acodamiento, secreciones o broncoespasmo severo) en aquellos casos en los que el paciente estaba intubado.
- Puede deberse a apnea o paro cardiorrespiratorio <sup>(38, 39)</sup>.
- Únicamente cuando todas las posibilidades anteriormente citadas han sido descartadas tras un examen clínico, hay que sospechar de fallo en el monitor. En este caso, una forma rápida de confirmar el correcto funcionamiento del capnógrafo o bien del capnómetro, consiste en retirar el sensor de CO<sub>2</sub> o el puerto de muestra y exhalar en él, confirmando la presencia de CO<sub>2</sub> <sup>(38)</sup>.

#### 2. Línea de base inspiratoria (Fase I)

Esta línea siempre debería registrar un valor cero puesto que el aire inspirado está prácticamente libre de CO<sub>2</sub>. En caso de registrar valores mayores, se debe pensar que el paciente está reinhalando CO<sub>2</sub> <sup>(38, 39)</sup>.

#### 3. Flujo espiratorio (Fase II)

La fase II del capnograma debe representarse mediante un trazado ascendente casi vertical.

En caso de no ser así y observarse una pendiente menos inclinada, hay que sospechar de una obstrucción del flujo aéreo, bien por fenómeno mecánico (acodamiento del TET) o enfermedad pulmonar, como es el caso del EPOC o el broncoespasmo. Estas mismas situaciones pueden tener también efectos sobre el primer tramo de la meseta, creando un trazo como si le hubieran quitado una cuña a la meseta.

Asimismo, señalar que la fase II del capnograma se vuelve más prolongada cuando un capnógrafo tipo *sidestream* toma la muestra de gas demasiado despacio o cuando el capnógrafo tiene una respuesta muy lenta en el tiempo y la frecuencia respiratoria es alta <sup>(38, 39)</sup>.

#### 4. Meseta espiratoria (Fase III)

Son varias las situaciones que pueden provocar variaciones en esta tercera fase del capnograma:

- Cuando se observa un aumento en la pendiente de la meseta espiratoria, debemos sospechar de un incremento en la resistencia de las vías respiratorias, tal y como ocurre en el broncoespasmo. Cuanto más severo es el cuadro obstructivo, mayor será el desnivel de la meseta <sup>(1, 2, 38, 39)</sup>.
- El aumento gradual del CO<sub>2</sub> puede deberse a:
  - Una hipoventilación.
  - Un incremento del metabolismo, tal y como sucede en situaciones de fiebre, sepsis o estados hipermetabólicos, como la hipertermia maligna.
  - La aplicación de bicarbonato o la liberación de torniquetes también pueden aumentar la inclinación de la meseta espiratoria <sup>(38, 39)</sup>.
- Por el contrario, una disminución gradual de dicho gas puede ser consecuencia de:
  - Una hiperventilación.
  - Una disminución del metabolismo y por tanto, un descenso del consumo de oxígeno así como una disminución de la temperatura corporal (hipotermia) <sup>(38, 39)</sup>.
  - Baja perfusión, como ocurre en situaciones de tromboembolismo pulmonar, shock o hipotensión <sup>(8)</sup>.
- Una disminución brusca del EtCO<sub>2</sub> pero sin llegar hasta cero puede ser debido a:
  - Fugas en el circuito.
  - Obstrucción parcial de la vía aérea <sup>(40)</sup>.
- La presencia de hendiduras en la meseta espiratoria es signo de que la acción de los relajantes musculares está comenzando a ceder <sup>(7, 38)</sup>.
- Si la pendiente descendente de la meseta se mezcla con la parte descendente del capnograma, sospecharemos de un sello inadecuado del tubo endotraqueal <sup>(7)</sup>.

#### 5. Flujo inspiratorio (fase IV)

La fase IV del capnograma debe ser bastante pendiente, casi vertical.

Sin embargo, cuando se dispone de una válvula inspiratoria incompetente, se produce un descenso lento, observándose en la fase IV del capnograma una pendiente más inclinada y más prolongada en el tiempo puesto que esta situación permite que el CO<sub>2</sub> se acumule en la rama inspiratoria del circuito.

Por último, cabe resaltar como curiosidad que con el uso conjunto del capnógrafo y el electrocardiograma se pueden diagnosticar oscilaciones cardiogénicas. Estas oscilaciones se observan al final de la meseta y durante el extremo descendente (fase IV). Se producen por una pequeña compresión que los latidos cardíacos causan al chocar contra el pulmón <sup>(38, 39)</sup>.

## 4.2 PÓSTER SOBRE CAPNOGRAFÍA

La bibliografía empleada para la elaboración del presente póster se basa en la utilizada en la guía. Las gráficas incluidas en el póster son de elaboración propia.

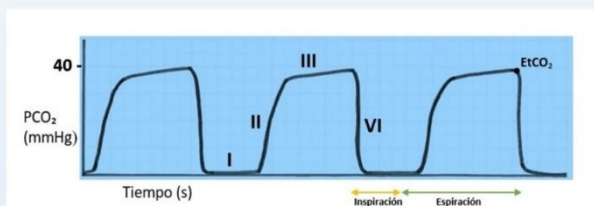
# GUÍA RÁPIDA SOBRE INTERPRETACIÓN DE LA CAPNOGRAFÍA

**Capnografía:** Método de monitorización no invasivo que consiste en la medición continua y representación gráfica en tiempo real del CO<sub>2</sub> exhalado a lo largo del tiempo.

### CAPNOGRAMA NORMAL

Valores normales de EtCO<sub>2</sub>: 35 - 45 mmHg

En pacientes con la relación V/Q normal la EtCO<sub>2</sub> es 2-5 mmHg < PaCO<sub>2</sub>



**FASE I:** Final de inspiración – Comienzo de espiración. PCO<sub>2</sub> = 0.  
**FASE II:** Inicio de espiración. Rápido ↑PCO<sub>2</sub>.  
**FASE III:** Meseta alveolar. ↑ lento y progresivo, hasta alcanzar EtCO<sub>2</sub>.  
**FASE IV:** Fase inspiratoria. Rápido ↓PCO<sub>2</sub> hasta 0.

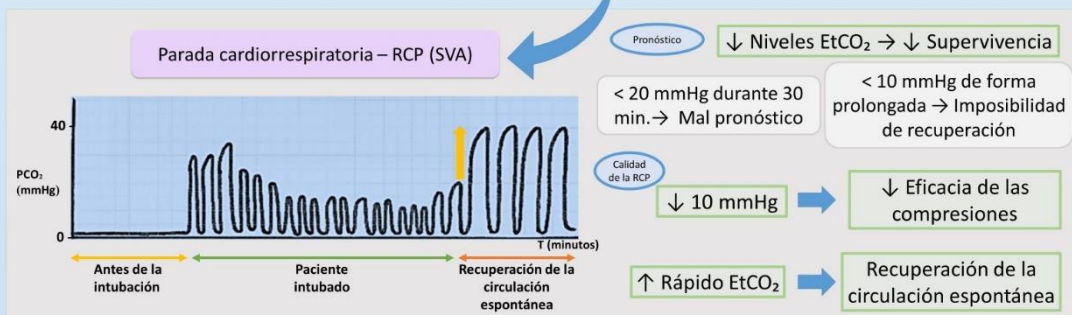
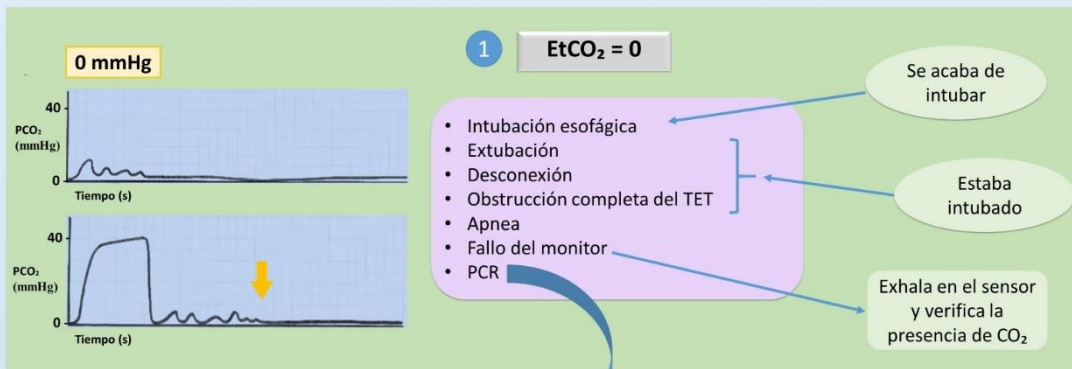
3 factores que influyen

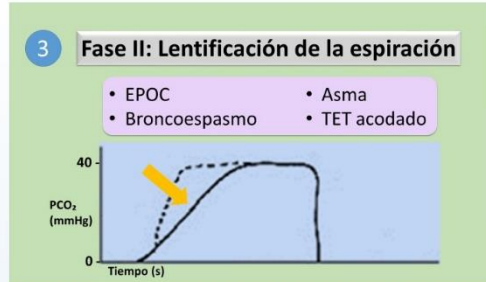
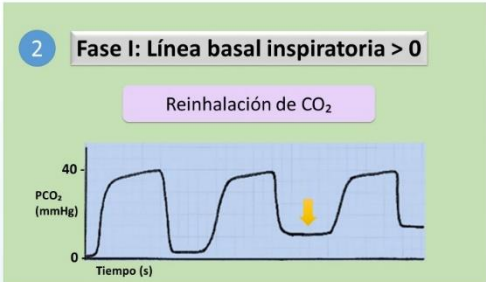
- Ventilación
- Metabolismo
- Perfusión

#### DEFINICIONES

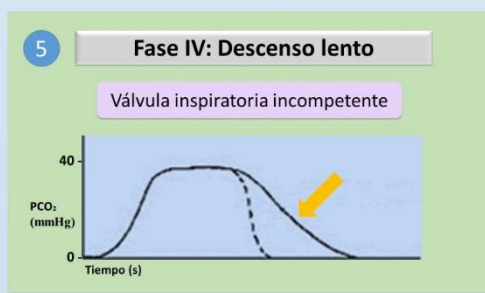
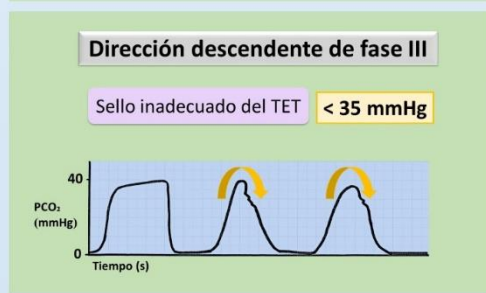
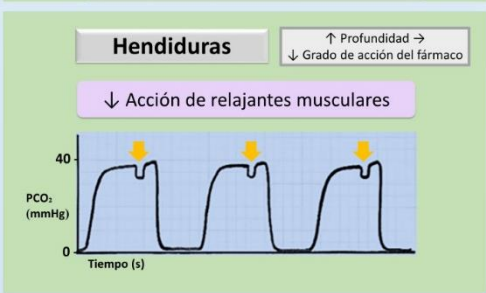
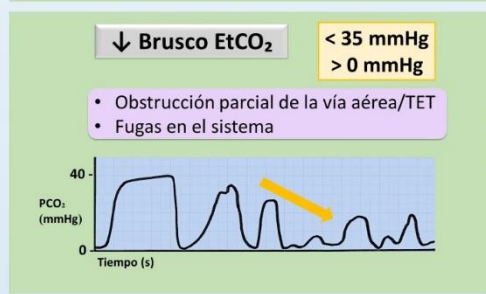
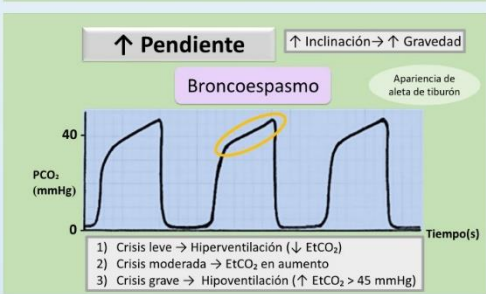
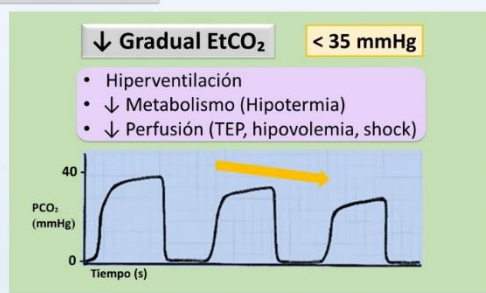
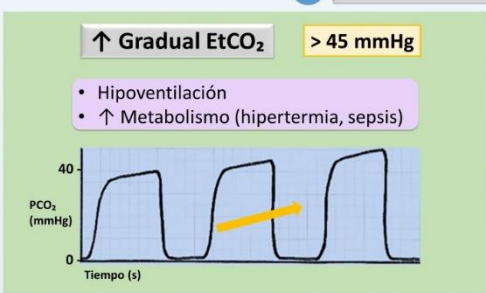
- ✓ PCO<sub>2</sub>: presión parcial de CO<sub>2</sub> exhalado.
- ✓ EtCO<sub>2</sub> (end-tidal CO<sub>2</sub>): presión parcial de CO<sub>2</sub> al final de la espiración, momento en que este valor es máximo (valor que registra el capnógrafo).
- ✓ Equilibrio V/Q (ventilación/perfusión): los alvéolos están correctamente ventilados y perfundidos, permitiendo un adecuado intercambio gaseoso. Se produce en ausencia de patologías, sin alteración en la ventilación ni en la perfusión.

### PRINCIPALES ALTERACIONES CAPNOGRÁFICAS





**4 Fase III: Meseta espiratoria**



## 5. DISCUSIONES Y CONCLUSIONES

1. La capnografía es un método de monitorización no invasivo que proporciona información sobre la hemodinámica, el metabolismo y el estado ventilatorio del paciente. Por ello, un correcto análisis de los datos obtenidos con la capnografía por parte de enfermería contribuirá a aumentar la calidad de los cuidados <sup>(4)</sup>.
2. A lo largo de este Trabajo Fin de Grado, se ha constatado la gran diversidad de aplicaciones clínicas de la capnografía en distintos ámbitos de la atención sanitaria así como se han mencionado las múltiples sociedades científicas reconocidas a nivel mundial que recomiendan el empleo del capnógrafo en determinadas situaciones de la práctica clínica.
3. La formación insuficiente sobre la capnografía de un importante porcentaje de profesionales del colectivo de enfermería y la escasez de Guías Clínicas en las que se incorporen conocimientos basados en evidencia científica acerca del manejo del capnógrafo/capnómetro, evidencian la necesidad de elaborar una guía-póster que facilite su empleo.
4. A través de la elaboración de esta guía-póster se pretende sistematizar los conocimientos requeridos y ayudar en la interpretación de los valores obtenidos, sirviendo de este modo como documento de apoyo y consulta en la práctica clínica.
5. La representación visual a través del póster realizado permite reforzar los conocimientos aportados en la presente Guía y ayudar en la actuación de enfermería a través de su implantación en diferentes unidades y/o servicios de la asistencia sanitaria.
6. Cabe resaltar la ausencia de estudios definitivos que establezcan un nivel de evidencia científica concreto sobre el empleo del capnógrafo en situaciones de broncoespasmo, TEP, hipovolemias súbitas o estados metabólicos, a pesar de haberse mencionado importantes ventajas en diversas investigaciones.
7. No se incluyen presentaciones comerciales en la descripción de los tipos de capnógrafos/capnómetros puesto que pueden variar en cada unidad y ámbito de atención sanitaria así como producirse modificaciones en el tiempo que no quedarían reflejadas en el presente trabajo.
8. Se recomienda la realización de cursos formativos y actualizados dirigidos a los profesionales de enfermería que potencien un uso correcto de la monitorización capnográfica durante la asistencia al paciente, así como investigaciones sobre nuevas recomendaciones de la capnografía que mejoren la calidad de la atención e incrementen la seguridad en la vigilancia del paciente.



## 6. AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a Elena Irigaray su total disponibilidad, apoyo y dedicación a la hora de guiarme en la realización de este trabajo.

Agradecer también al doctor Juan Pedro Tirapu por sus consejos y disposición a ayudar siempre que lo necesitaba.

Y a mi familia y amigos por sus ánimos en estos cuatro años de carrera.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

1. Barrado Muñoz L, Barroso Matilla S, Patón Morales G, Sánchez Carro J. Capnografía, la evolución en la monitorización del paciente crítico. Zona TES [Internet]. 2013; (1): 16-23. Disponible en: [http://www.zonates.com/es/revista-zona-tes/menu-  
revista/numeros-anteriores/vol-2--num-1--enero-marzo-2013/articulos/capnografia,-  
la-evolucion-en-la-monitorizacion-del-paciente-critico.aspx](http://www.zonates.com/es/revista-zona-tes/menu-<br/>revista/numeros-anteriores/vol-2--num-1--enero-marzo-2013/articulos/capnografia,-<br/>la-evolucion-en-la-monitorizacion-del-paciente-critico.aspx)
2. Díez-Picazo LD, Barrado-Muñoz L, Blanco-Hermo P, Barroso-Matilla S, Espinosa Ramírez S. La capnografía en los servicios de emergencia médica. Semergen [Internet]. 2009; 35(3): 138-43. doi: 10.1016/S1138-3593(09)70721-X.
3. Haines LE. Continuous-waveform capnography: A crucial tool for ED clinicians. Am Nurse Today [Internet]. 2017 [citado 3 de mayo de 2017]; 12(1): 6-8. Disponible en: [https://www.americannursetoday.com/wp-content/uploads/2016/12/ant1-  
Capnography-1218.pdf](https://www.americannursetoday.com/wp-content/uploads/2016/12/ant1-<br/>Capnography-1218.pdf)
4. Clemente López FJ. Ventilación mecánica. Guía práctica para enfermería [Internet]. 2014 [citado 18 de abril de 2017]. Disponible en: <http://www.enfermeriaespira.es/>
5. Cambra Lasaosa FJ, Pons Ódena M. Pulsioximetría y capnografía. An Pediatr (Barc) [Internet]. 2003; 59(3): 259-64. doi: 10.1016/S1695-4033(03)78176-4
6. Emerging uses of capnography in emergency medicine [Internet]. Masimo. 2013 [citado 5 de mayo de 2017]. Disponible en: [http://www.masimo.com/globalassets/image/emma/capnometer/lab7849a  
whitepa  
per\\_emerging\\_uses\\_of\\_capnometry\\_in\\_emergency\\_medicine.pdf](http://www.masimo.com/globalassets/image/emma/capnometer/lab7849a_whitepa<br/>per_emerging_uses_of_capnometry_in_emergency_medicine.pdf)
7. Williams Jiménez Y. Capnografía en emergencias. Lex Artis ad Hoc. International Scientific Journal [Internet]. 2013; (2): 19-25. Disponible en: [http://docplayer.es/35111356-Capnografia-en-emergencias-williams-jimenez-yara-  
enfermera-hospital-clinico-san-carlos-unidad-de-cirugia-cardiaca-y-vascular.html](http://docplayer.es/35111356-Capnografia-en-emergencias-williams-jimenez-yara-<br/>enfermera-hospital-clinico-san-carlos-unidad-de-cirugia-cardiaca-y-vascular.html)

8. Casey G. Capnography: monitoring CO<sub>2</sub>. Nurs N Z [Internet]. 2015; 21(9): 20-4. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/26638570>
9. Nolan JP, Soar J, Zidemn DA, Biarent D, Bossaert LL, Deakin C, et al. European Resuscitation Council Guidelines for Resuscitation 2010. Section 1. Executive summary. Resuscitation [Internet]. 2010; 81(10): 1219-76. doi: 10.1016/j.resuscitation.2010.08.021
10. Soar J, Nolan JP, Böttiger BW, Perkins GD, Lott C, Carli P, et al. European Resuscitation Council Guidelines for Resuscitation 2015. Section 3. Adult advanced life support. Resuscitation [Internet]. 2015; 95: 100-47. doi: 10.1016./j.resuscitation.2015.07.016
11. Aguilera-Eguía R, Rojas-Sepúlveda C, Aguayo-Alcayaga G, Sánchez-León D. Niveles de evidencia y grados de recomendación en kinesiología; una comparación entre cinco sistemas de clasificación: estudio piloto. Rev Soc Esp Dolor [Internet]. 2015; 22(5): 205-11. doi: 10.4321/S1134-80462015000500004
12. Primo J. Niveles de evidencia y grados de recomendación (I/II). Enfermedad inflamatoria intestinal al día [Internet]. 2003; 2(2): 39-42. Disponible en: <http://www.svpd.org/mbe/niveles-gradoss.pdf>
13. Aguayo -Albasini JL, Flores-Pastor B, Soria-Aledo V. Sistema GRADE: clasificación de la calidad de la evidencia y graduación de la fuerza de la recomendación. Cir Esp [Internet]. 2014; 92(2): 82-8. doi: 10.1016/j.ciresp.2013.08.002
14. Comité de neumonología crítica. Guías de Práctica Clínica de la AARC. Capnografía/capnometría durante la ventilación mecánica. Capítulo de Kinesiología en el Paciente Crítico. [Internet]. 2011. Disponible en: <http://ckpc-cnc.sati.org.ar/files/GuiasdePracticaClinicadelAARCCapnografiayCapnometriaduranteLaVentilacionMecanica.pdf>

15. Walsh BK, Crotwell DN, Restrepo RD. Capnography/Capnometry During Mechanical Ventilation: 2011. *Respir Care* [Internet]. 2011; 56(4): 503-9. doi: 10.4187/respcare.01175
16. American Heart Association. Aspectos destacados de la actualización de las guías de la AHA para RCP y ACE de 2015 [Internet]. 2015 [citado 18 de abril de 2017]. Disponible en: <http://eccguidelines.heart.org/wp-content/uploads/2015/10/2015-AHA-Guidelines-Highlights-Spanish.pdf>
17. Mora Capín A, Míguez Navarro C, López López R, Marañón Pardillo R. Utilidad de la capnografía en la monitorización durante procedimientos de sedoanalgesia. Influencia de la administración de oxígeno en los parámetros monitorizados. *An Pediatr (Barc)* [Internet]. 2014; 80(1): 41-6. doi: 10.1016/j.anpedi.2013.05.002
18. Cacho G, Pérez-Calle JL, Barbado A, Lledó JL, Ojea R, Fernández-Rodríguez CM. Capnography is superior to pulse oximetry for the detection of respiratory depression during colonoscopy. *Rev Esp Enferm Dig* [Internet]. 2010; 102(2): 86-9. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20361844>
19. American Society of Anesthesiologists. Standards for basic anesthetic monitoring [Internet]. 2015. Disponible en: <http://www.asahq.org/quality-and-practice-management/standards-and-guidelines>
20. Tanaka PP, Tanaka M, Drover DR. Detection of respiratory compromise by acoustic monitoring, capnography, and brain function monitoring during monitored anesthesia care. *J Clin Monit Comput* [Internet]. 2014; 28(6): 561-6. doi: 10.1007/s10877-014-9556-8
21. Calvo Vecino JM, del Valle Hernández E, Ramírez Rodríguez JM, Loinaz Seguro C, Martín Traperó C, Nogueiras Quintas C, et al. Etapa intraoperatorio: monitorización rutinaria. En: Ministerio de Sanidad, Servicios Sociales e Igualdad. Instituto Aragonés de

- Ciencias de la Salud, editores. Vía clínica de recuperación intensificada en cirugía abdominal (RICA) [Internet]. 2014. p. 42.
22. Tortora GJ, Derrickson B. Principios de anatomía y fisiología. 13ª edición. Madrid: Editorial Médica Panamericana; 2013. 1300 p.
23. Stanfield CL. Principios de fisiología humana. 4ª edición. Madrid: Editorial Pearson; 2011. 767 p.
24. Morales Carbonell MA, Domínguez Picón F (dir). Uso de la capnografía en urgencias. Monitorización en el paciente crítico [curso experto universitario en atención al trauma grave en Internet]. Universidad Internacional de Andalucía; 2014 [citado 18 de abril de 2017]. Disponible en: [http://dspace.unia.es/bitstream/handle/10334/3425/0610\\_Morales.pdf?sequence=1](http://dspace.unia.es/bitstream/handle/10334/3425/0610_Morales.pdf?sequence=1)
25. Reiriz Palacios J. Sistema respiratorio [Internet]. Colegio Oficial de enfermeras y enfermeros de Barcelona. 2015 [citado 18 de abril de 2017]. 27p. Disponible en: <https://www.infermeravirtual.com/files/media/file/97/Sistema%20respiratorio.pdf?1358605945>
26. Porth CM. Fisiopatología. Salud-enfermedad: un enfoque conceptual. 7ª edición. Madrid: Editorial Médica Panamericana; 2006. 1616 p.
27. (CO<sub>2</sub>) Dióxido de carbono [Internet]. Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes. Ministerio de agricultura, alimentación y medio ambiente. 2007. Disponible en: <http://www.prtr-es.es/CO2-Dioxido-de-carbono,15590,11,2007.html>
28. Aprea F. Capnometría/Capnografía: Conceptos básicos para una correcta interpretación [Internet]. Sociedad Española de Anestesia y Analgesia veterinaria. 2016. Disponible en: <http://seaav.org/capnometriacapnografia-conceptos-basicos-para-una-correcta-interpretacion/>

29. Giner J, Casan P. Determinación de la pulsioximetría y de la capnografía en el laboratorio de función pulmonar. Arch Bronconeumol [Internet]. 2004 [citado 18 de abril de 2017]; 40(7): 311-4. doi: 10.1016/S0300-2896(04)75531-3
30. Piraino T. Volumetric Capnography. AARC Times [Internet]. 2016 [citado 5 de mayo de 2017]; 40(7): 5-8. Disponible en: CINAHL Complete.
31. Oliveira PM, Moreira MM. Capnography: A Feasible Tool in Clinical and Experimental Settings. Respir Care [Internet]. 2015; 60(11): 1711-3. doi: 10.4187/respcare.04504
32. CapOne [Internet]. Nihon Kohden. Tokio; 2007 [citado 19 de mayo de 2017]. Disponible en: <http://www.nihonkohden.de/productos/monitorizacion-de-pacientes/monitores-monoparametricos/capnografia/capone.html?L=2>
33. Ramos Gómez LA, Benito Vales S. Fundamentos de la ventilación mecánica [Internet]. Barcelona: Marge Médica Books; 2012 [citado 3 de mayo de 2017]. 257 p. Disponible en: <http://www.fundamentosventilacionmecanica.com/>
34. Soliveres Ripoll J, Solaz Roldán C, Richart Aznar MT, Marín García ME, Martí Ballesteros F. Capnografía. En: Gallego López JM, Soliveres Ripoll J, Carrera Hueso JA, Solaz Roldán C. Monitorización Clínica. Consejo de Enfermería de la Comunidad Valenciana [Internet]. Alicante; 2009. p. 79-90. Disponible en: [http://www.bibliotecadigitalcecova.com/contenido/revistas/cat6/pdf/libro\\_61.pdf](http://www.bibliotecadigitalcecova.com/contenido/revistas/cat6/pdf/libro_61.pdf)
35. Solana García MJ, López López R, Adrián Gutiérrez J, Peñalba Cítores A, Guerrero Soler M, Marañón Pardillo R. Utilidad del empleo de la capnografía en la gastroenteritis aguda. An Pediatr (Barc) [Internet]. 2008; 68(4): 342-5. doi: 10.1157/13117704
36. Peláez Fernández J, Cerdeño Impuesto V, Jiménez Lendínez M. Monitorización no invasiva de la PaCO<sub>2</sub> en pacientes críticos con ventilación mecánica. Med Intensiva [Internet]. 2000; 24(7): 293-9. doi: 10.1016/S0210-5691(00)79608-2

37. González-Moya Rodríguez de Mondelo E, Arnedillo Muñoz A, Picazo Sotos L. Fallo respiratorio agudo. En: Barranco Ruiz F, Blasco Morilla J, Mérida Morales A, Muñoz Sánchez MA, Jareño Chaumel A, Cozar Carrasco J, editores. Principios de urgencias, emergencias y cuidados críticos [Internet]. Editorial Alhulia; 1999. p. 1572. Disponible en: <http://tratado.uninet.edu/c0202i.html>
38. Labrada Despaigne A. Capnografía como método esencial en la cirugía laparoscópica. En: Herrera López I, editora. Anestesia en cirugía de mínimo acceso [Internet]. 1ª Edición. La Habana: Editorial Ciencias Médicas; 2010. Disponible en <http://gsdl.bvs.sld.cu/cgi-bin/library?e=d-00000-00---off-0cirugia--00-0----0-10-0---0---0direct-10---4-----0-1|--11-es-50---20-about---00-0-1-00-0-0-11-1-OutfZz-8-00&a=d&cl=CL1&d=HASH017fb626c61469739be306c6.13.4>
39. Benumof JL. Interpretation of capnography. AANA J [Internet]. 1998; 66(2): 169-76. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/9801479>
40. Fernández Rodríguez PM, Díez Casado ND. Guía rápida de interpretación de la capnografía. En congreso SEEUE de 2015. 2015. Disponible en: <http://congreso2015.enfermeriadeurgencias.com/wp-content/uploads/2015/11/001.GU%C3%8DA-RAPIDA-DE-INTERPRETACI%C3%93N-DE-LA-CAPNOGRAF%C3%8DA.pdf>
41. Gorostidi M, Santamaría R, Alcázar R, Fernández-Fresnedo G, Galcerán JM, Goicoechea M, et al. Documento de la Sociedad Española de Nefrología sobre las guías KDIGO para la evaluación y el tratamiento de la enfermedad renal crónica. Nefrología (Madr.) [Internet]. 2014; 34(3): 302-16. doi: 10.3265/Nefrologia.pre2014.Feb.12464

## 8. ANEXOS

ANEXO 1: Nivel de evidencia científica y grado de recomendación según el sistema GRADE.

Niveles de evidencia		
Grado	Calidad de la evidencia	Significado
A	Alta	Existe confianza en que el efecto verdadero esté próximo al efecto estimado
B	Moderada	Es probable que el efecto verdadero esté próximo al estimado, pero es posible que sea diferente
C	Baja	El efecto verdadero puede ser significativamente diferente al estimado
D	Muy baja	El efecto estimado es muy incierto y, con frecuencia, será erróneo
Grados de recomendación		
Grado	Expresión	Significado
Nivel 1	Se recomienda	La mayoría de los pacientes deberían recibir la acción recomendada
Nivel 2	Se sugiere	Muchos pacientes deberían recibir la acción recomendada, aunque un porcentaje significativo puede ser objeto de una aproximación distinta
Sin grado		Esta expresión se utiliza, en general, para recomendaciones basadas en el sentido común y sobre temas en los que la aplicación de la evidencia no es adecuada

Figura 17. Escala del sistema GRADE <sup>(41)</sup>.



ANEXO 2: Diferentes tipos y modelos de capnógrafos y capnómetros.



Figuras 18 y 19. Capnógrafo tipo mainstream para ventilación espontánea (en este caso adaptado a gafas nasales) (fuente propia)



Figura 20. Capnógrafo tipo mainstream para paciente intubado (fuente propia).



Figura 21. Capnógrafo tipo microstream para paciente con ventilación espontánea (fuente propia).



Figura 22. Capnógrafo tipo microstream para paciente intubado (fuente propia).



Figura 23. Capnómetro conectado con ambú (fuente propia).



Figura 24. Capnómetro (fuente propia).



Figura 25. Monitor de la UCI-A del CHN. En blanco se representa la capnografía: el capnograma, el CO<sub>2</sub> tele-espírotorio y la frecuencia respiratoria (fuente propia).

### ANEXO 3:

Tablas 2 y 3. Eventos clínicos y mecánicos asociados con alteraciones en la EtCO<sub>2</sub> (24).

EtCO <sub>2</sub> ↑	EtCO <sub>2</sub> ausente	EtCO <sub>2</sub> ↓
Hipoventilación	Intubación esofágica	Hiperventilación
Hipertermia maligna	Extubación	Hipotermia
↑ Actividad muscular (temblor, convulsión)		↓ Actividad muscular (Relajante muscular)
En RCP: ↑ GC		En PCR: ↓ GC
↑ Producción de CO <sub>2</sub>		↓ Perfusión pulmonar: TEP
Inyección de bicarbonato sódico		Broncoespasmo
Efecto de broncodilatadores		Obstrucción de vía aérea o TET
Intubación bronquial		Apnea
Parálisis muscular		Fuga en el circuito
Depresión respiratoria		Desconexión del ventilador
Obstrucción parcial de la vía aérea		Extubación
Reinhalación		

Factor técnico o falla de máquina	Errores técnicos
Absorbedor de CO <sub>2</sub> saturado	Desconexión del circuito
Flujo de gas fresco inadecuado	Fuga
Válvulas defectuosas	Mal funcionamiento del ventilador
Ventilación defectuosa	

