

# FISIOLOGÍA RESPIRATORIA RELACIÓN VENTILACIÓN/PERFUSIÓN

## RESPIRATORY PHYSIOLOGY: VENTILATION/ PERFUSION RELATIONSHIP

Dra. Aida Milinarsky Topaz<sup>1</sup>, Dra. Viviana Lezana Soya<sup>1</sup>, Dr. Nicolás Johnson García<sup>2</sup>

1. Pediatra Broncopulmonar Infantil. Universidad de Valparaíso.

2. Pediatra Broncopulmonar Infantil. Hospital Dr. Gustavo Fricke, Universidad de Valparaíso.

### INTRODUCCIÓN

El principal objetivo del sistema respiratorio es mantener un intercambio gaseoso, entre el aire alveolar y la sangre capilar, para permitir un adecuado aporte de oxígeno (O<sub>2</sub>) y remoción del dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) al organismo.

Las alteraciones de la relación entre la ventilación y el flujo sanguíneo (V/Q) en diversas regiones del pulmón altera la transferencia tanto de O<sub>2</sub> como de CO<sub>2</sub>. En efecto, el trastorno de la relación V/Q es la principal causa fisiopatológica de la insuficiencia respiratoria en el niño.

En el pulmón normal, hay desajuste V/Q porque la perfusión y la ventilación son heterogéneas. Tanto la ventilación como la perfusión son mayores en las bases que en los ápices (cuando un sujeto está en posición vertical). Sin embargo, la diferencia entre la ventilación apical y basal es menor que la diferencia entre la perfusión apical y basal.

El cociente medio entre ventilación alveolar y el flujo sanguíneo (V/Q) es de 0.8 en el pulmón normal. La relación global V/Q representa el promedio de múltiples situaciones que existen en diferentes territorios alveolares. El cociente V/Q en el pulmón puede oscilar desde casi 0 (no ventilado) a infinito (no perfundido).

Las alteraciones de V/Q se pueden dividir en tres tipos:

- Cortocircuito (Shunt): unidad alvéolo capilar no ventilada (V/Q=0)
- Alteración V/Q: discordancia de ventilación y perfusión en la unidad alvéolo/ capilar
- Espacio muerto: unidad alvéolo capilar no perfundida (V/Q= infinito)

### RELACIONES VENTILACIÓN/PERFUSIÓN (V/Q)

Los gases respiratorios deben difundir a través de la barrera alvéolo-capilar para que ocurra intercambio de gases. Para una difusión óptima, la ventilación alveolar debe ser proporcional a la perfusión pulmonar. La presión de (PO<sub>2</sub>) y presión de dióxido de carbono (PCO<sub>2</sub>)

### RESUMEN

Las alteraciones de la relación entre la ventilación y el flujo sanguíneo (V/Q) en diversas regiones del pulmón alteran el aporte de oxígeno (O<sub>2</sub>) y remoción del dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) al organismo. Fisiológicamente existen diferencias regionales en la relación V/Q. Determinadas patologías pueden alterar esta relación, produciendo tres escenarios distintos: Cortocircuito (*Shunt*), Alteración V/Q y aumento del espacio muerto. Para evaluar estos escenarios y realizar una aproximación diagnóstica son de utilidad el estudio de los gases arteriales y venosos, la diferencia alveolo arterial y la respuesta al suministrar O<sub>2</sub>.

**Palabras claves:** Fisiología pulmonar, relación ventilación perfusión, alteración ventilación perfusión, análisis de gases.

### ABSTRACT

Alterations in the ventilation perfusion relationship (V/Q) in various lung regions alter the supply of oxygen (O<sub>2</sub>) and the removal of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) in the body. Physiologically, there are regional differences in the V/Q ratio. Certain pathologies can alter this relationship, producing three different scenarios: Shunt, V/Q mismatch and dead space increased. To evaluate these scenarios and carry out a diagnostic approach, it is useful to study arterial and venous gasometry, the alveolar arterial difference and the response to oxygen supplying.

**Palabras claves:** Lung physiology, ventilation perfusion ratio, ventilation perfusion mismatch, blood gas analysis.

alveolares están determinadas por la relación entre ventilación y perfusión alveolar. La ventilación alveolar lleva O<sub>2</sub> hacia el pulmón y elimina CO<sub>2</sub>, de modo similar, la sangre venosa mixta lleva CO<sub>2</sub> al pulmón y capta O<sub>2</sub> alveolar.

En circunstancias normales la ventilación alveolar es de alrededor de 4 a 6 l/min, y el flujo sanguíneo pulmonar (que es igual al gasto cardiaco) tiene un rango similar, por tanto, la V/Q global en el pulmón tiene un rango de 0.8 a 1.2.

### DISTRIBUCIÓN REGIONAL DE LA VENTILACIÓN ALVEOLAR

En el pulmón normal coexisten zonas con diferentes V/Q. En sujetos sanos, en posición de pie o sentados erguidos, las regiones inferiores del pulmón ventilan más que las regiones superiores. Las diferencias regionales de la ventilación dependen principalmente de los efectos de la fuerza de gravedad; las regiones del pulmón más bajas (regiones declives), por un mayor efecto de la fuerza de gravedad en la presión intrapleural, están relativamente mejor ventiladas que las regiones superiores (regiones no declives). La presión intrapleural es

menos negativa en las regiones declives que en las regiones no declives; esta diferencia de presión determina que la presión transpulmonar o presión de distensión (presión alveolar menos presión intrapleural) sea mayor en las regiones superiores del pulmón, por tanto los alvéolos de regiones superiores tienen más volumen. Es esta diferencia de volumen lo que lleva a la diferencia de ventilación entre alvéolos; los alvéolos en las partes inferiores del pulmón, que tienen menos volumen, tienen un mayor cambio de volumen por cada inspiración y por cada espiración por tanto están mejor ventilados que los alvéolos en regiones superiores. A Capacidad Residual Funcional (FRC), el alvéolo en la parte superior del pulmón se encuentra en una porción menos empujada de la curva presión-volumen alveolar, es decir es menos adaptable; y el alvéolo más adaptable se encuentra en la región inferior del pulmón (Figura 1).

#### Autor para correspondencia:

Dr. Nicolás Johnson García  
njohnsong@gmail.com

### DISTRIBUCIÓN REGIONAL DE LA VENTILACIÓN ALVEOLAR

La fuerza de gravedad afecta la resistencia vascular pulmonar local y la perfusión relativa de diferentes regiones del pulmón. En un sujeto sano sentado erguido o de pie, hay mayor flujo sanguíneo por unidad de volumen (por cada alvéolo) hacia las regiones inferiores del pulmón (Figura 2). Si el sujeto se acuesta, este patrón de perfusión regional se altera, el flujo sanguíneo por unidad de volumen es mayor en las regiones más declives del pulmón; por ejemplo, si el sujeto se sostiene sobre el lado izquierdo, el pulmón izquierdo recibiría más flujo sanguíneo por unidad de volumen que el que recibiría el pulmón derecho. La razón de este gradiente de perfusión regional del pulmón es la fuerza de gravedad. Por efecto de la gravedad la resistencia al flujo de sangre es más baja en regiones inferiores del pulmón por un mayor reclutamiento o distensión de vasos en estas regiones (2). Las regiones más bajas del pulmón reciben tanto mejor ventilación como mejor perfusión que las más altas (Figura 3).

### CONSECUENCIAS DE LAS PROPORCIONES V/Q ALTA Y BAJA

Las alteraciones de la proporción entre V/Q, darán lugar a cambios de la PO<sub>2</sub> y PCO<sub>2</sub> alveolares, así como del aporte de gases a los pulmones o la eliminación de gases desde estos últimos (Figura 4) (2,3).

El O<sub>2</sub> es suministrado al alvéolo mediante ventilación alveolar, es extraído del alvéolo conforme se difunde hacia la sangre capilar pulmonar y es transportado por el flujo sanguíneo arterial. El CO<sub>2</sub> es llevado al alvéolo en la sangre venosa mixta, difunde a los alvéolos desde el capilar pulmonar y se elimina mediante la ventilación alveolar. Las presiones parciales alveolares de O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> están determinadas por la relación V/Q. Si la V/Q en una unidad alvéolo-capilar se incrementa, el aporte de O<sub>2</sub> y la eliminación de CO<sub>2</sub> aumentarán, por tanto, la PO<sub>2</sub> alveolar aumentará, y la PCO<sub>2</sub> alveolar disminuirá. Si la V/Q en una unidad alvéolo-capilar disminuye, el aporte O<sub>2</sub> y la eliminación de CO<sub>2</sub> disminuirán, por tanto la PO<sub>2</sub> alveolar disminuirá y la PCO<sub>2</sub> alveolar aumentará (2,3).

En el diagrama oxígeno-dióxido de carbono (Figura 5), se muestra las diferencias de las presiones alveolares de O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> para diferentes proporciones V/Q, desde una proporción cero al infinito. Las alteraciones con proporciones V/Q bajas son la principal causa de insuficiencia respiratoria en el niño. Estas unidades tienen una PO<sub>2</sub> alveolar baja, que se traduce en hipoxemia, y una PCO<sub>2</sub> alveolar alta,

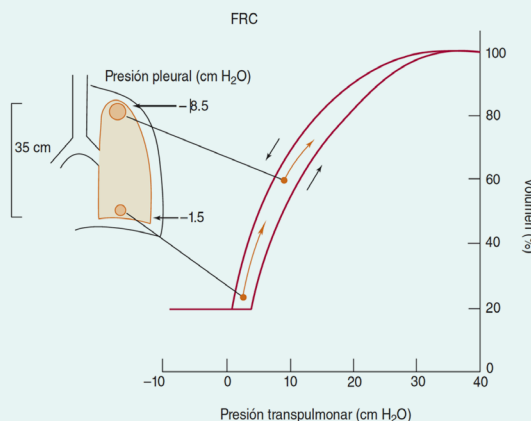


Figura 1. Cualquier cambio de la presión transpulmonar durante un ciclo respiratorio normal causará un mayor cambio de volumen en el alvéolo de la región del pulmón más baja que en el alvéolo en la región superior. Adaptado de Milic-Emili (1)

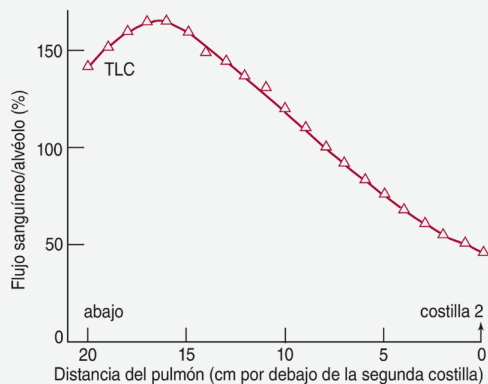


Figura 2. Efecto de la gravedad en el flujo sanguíneo pulmonar. Adaptado de West (3)

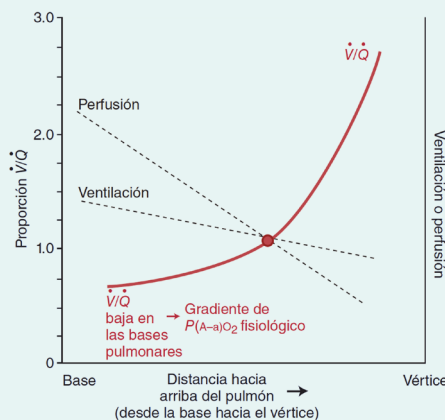
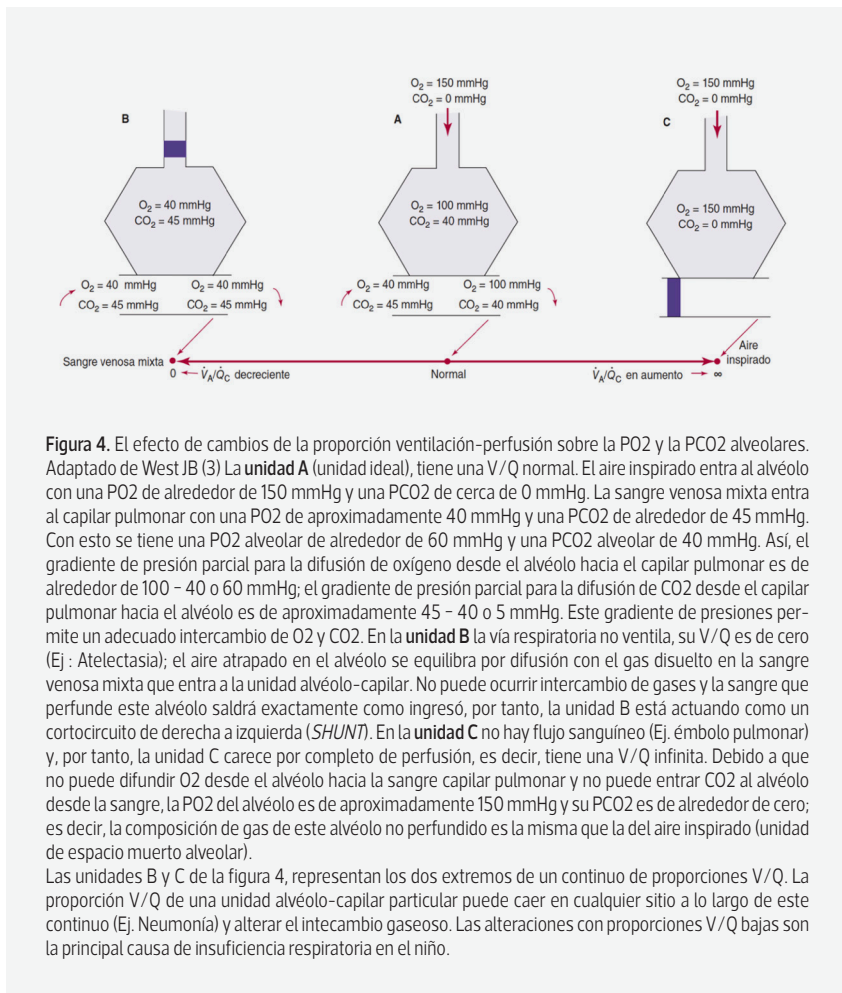


Figura 3. Diferencias regionales de las proporciones de V/Q. Las regiones más bajas del pulmón reciben tanto mejor ventilación como perfusión que las más altas. El gradiente de perfusión desde la parte baja hacia la parte alta del pulmón es mayor que el gradiente de ventilación, esto determina que la proporción V/Q es relativamente baja en regiones más declives del pulmón, y más alta en las regiones superiores. Adaptado de Kibble (4)



que se traduce en hipercapnia si no hay hiperventilación alveolar que la compense.

**EVALUACIÓN DE LAS RELACIONES V/Q**

**Aumento del espacio muerto: V/Q ALTA**

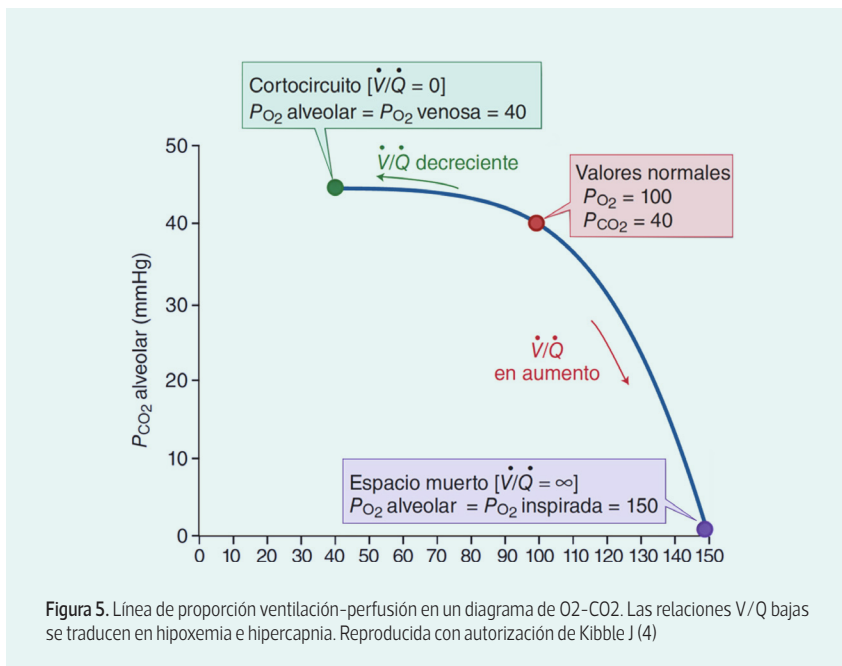
Gases arteriales: cuando disminuye o se suprime la perfusión de un territorio alveolar ventilado, la situación es similar a la de las vías aéreas, donde hay ventilación sin hematosis, constituyéndose un espacio muerto fisiológico. Si el aumento de este espacio muerto es leve o moderado, este puede ser compensado con el aumento de la ventilación/ minuto, de manera que el volumen de aire que llega a los alvéolos bien perfundidos continúa siendo normal, de esta forma los gases arteriales se mantienen normales, aunque con un mayor gasto energético en ventilación. Si por su magnitud el espacio muerto capta gran parte de la ventilación se produce hipoxemia y retención de CO<sub>2</sub> por hipoventilación de las regiones que mantienen el intercambio gaseoso (3,4).

La medición del espacio muerto es indirecta y relativamente compleja, por lo que su uso sólo se realiza en investigación.

**V/Q Disminuida:**

Diferencia alveolo-arterial: al producirse mezcla de sangre capilar de distintos territorios alveolares con diferentes presiones y contenidos de O<sub>2</sub>, lo que se promedia no son las presiones del gas, sino los contenidos; y de la suma de estos contenidos se infiere la presión de O<sub>2</sub> de la mezcla. Esto se debe a que el contenido de la mezcla es la suma de las moléculas de O<sub>2</sub> aportadas por los diferentes territorios alveolo-capilares y, por la forma de la curva de la hemoglobina, es decir un mismo contenido se asocia a diferentes presiones según el punto de la curva en que está cada territorio alveolar contribuyendo a la mezcla (2,3).

Al mezclarse la sangre de las unidades con V/Q bajo con la de las unidades que reciben mayor ventilación, se produce una corrección que tiene un efecto limitado sobre la baja PaO<sub>2</sub> o hipoxemia, pero muy marcado sobre el aumento de PaCO<sub>2</sub> o hipercapnia, presentes en la sangre de la zona alterada. En el caso del O<sub>2</sub>, esto se debe a que, con una PO<sub>2</sub> sobre 90 mmHg, la hemoglobina se encuentra casi completamente saturada. Por ello, el incremento de PO<sub>2</sub> de la zona hiperventilada prácticamente no aumenta el contenido de O<sub>2</sub> como para corregir lo suficiente la disminución del contenido de O<sub>2</sub> de la mezcla. En cambio, la disminución de la presión de CO<sub>2</sub> se acompaña de una disminución proporcional del contenido de CO<sub>2</sub>, cuyo efecto corrector en la mezcla de sangre arterial será, en consecuencia, importante.



La diferencia alveolo-arterial de oxígeno se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$DA-aO_2 = (PIO_2 - PaCO_2/0,8) - PaO_2$$

Donde DA-aO<sub>2</sub> es la diferencia alveolo-arterial de O<sub>2</sub>, PIO<sub>2</sub> es la presión inspirada de O<sub>2</sub>, PaCO<sub>2</sub> es la presión arterial de CO<sub>2</sub>, 0,8 es un factor de corrección y PaO<sub>2</sub> es la presión arterial de oxígeno.

Sus valores normales con FiO<sub>2</sub> de 0,21, es de 5-6 torr en adolescentes y algo mayor en niños y lactantes, y es debida a los cortocircuitos anatómicos. La DA-aO<sub>2</sub> aumenta al respirar con FiO<sub>2</sub> elevadas, y en el recién nacido, sobre todo en prematuros, debido a la mayor distancia que existe entre los sáculos alveolares inmaduros y los capilares, a la heterogeneidad de la relación V/Q y al estrechamiento de las vías respiratorias en supino. La DA-aO<sub>2</sub> también aumenta en las enfermedades que producen efecto de mezcla venosa y/o cortocircuito pulmonar (5,6)

En las alteraciones con V/Q disminuida, la DA-aO<sub>2</sub> aumenta, ya que, al mismo tiempo que cae la PaO<sub>2</sub> por efecto de la admisión venosa, la hiperventilación de los territorios más normales aumenta la PaO<sub>2</sub> promedio. Este hecho es muy importante en clínica, ya que si solo se observa la PaO<sub>2</sub>, una disminución de V/Q bien compensada pasa inadvertida. En cambio, la DA-aO<sub>2</sub> aumentada es el índice más sensible de V/Q disminuido.

Se debe tener en consideración que la administración de oxígeno que necesitan estos pacientes distorsiona la medición de este indicador. Esto se debe a que la diferencia de presión entre alveolo y arteria es básicamente generada por la disminución del contenido arterial de O<sub>2</sub> secundaria a la admisión venosa. Cuando se aporta oxígeno extra el proceso de captación de este gas por la Hb, se desarrolla en la parte horizontal de la curva de disociación, es decir un pequeño cambio de contenido se traduce por un gran cambio de presión, lo que magnifica artificialmente la DA-aO<sub>2</sub>, aunque el trastorno V/Q no haya variado. Para estas situaciones se pueden utilizar otros índices, uno que resulta útil por su simplicidad es la relación entre presión arterial de O<sub>2</sub> y la fracción inspirada de O<sub>2</sub> (PaFi). Por ejemplo: con una PaO<sub>2</sub> normal de 90 y respirando aire, la relación será de 90 / 0,21 = 428; si existe alteración pulmonar con V/Q bajo que disminuya la PaO<sub>2</sub> a la mitad, la relación caerá también a la mitad. Al administrar oxígeno subirán tanto la fracción inspirada como la PaO<sub>2</sub> y la relación cambiará nada o poco. En cambio, si el daño pulmonar empeora caerá la PaO<sub>2</sub> y como la fracción inspirada de oxígeno se mantiene igual, la relación se reducirá aún más. Los cambios de fracción inspirada

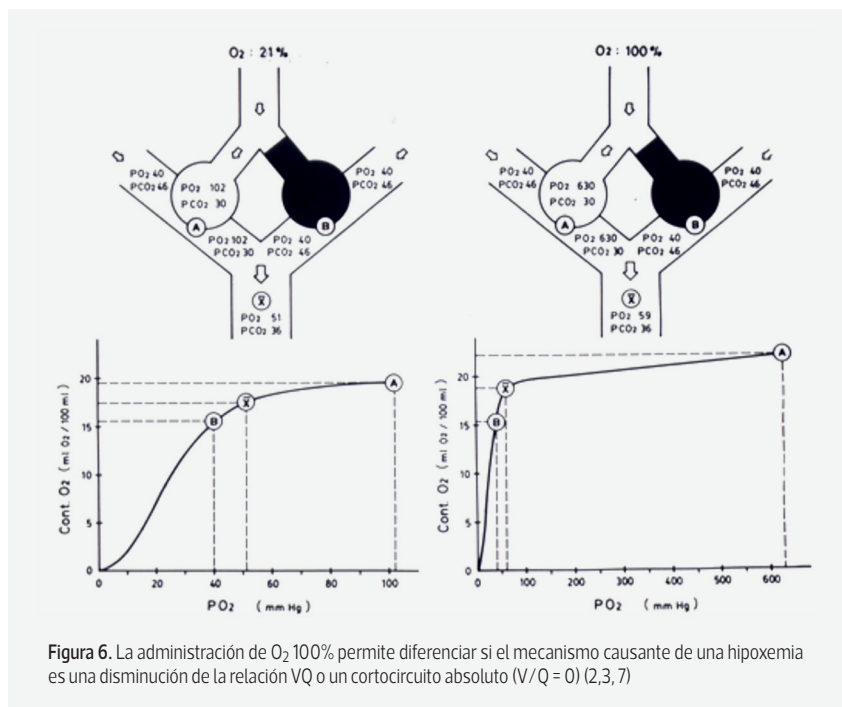


Figura 6. La administración de O<sub>2</sub> 100% permite diferenciar si el mecanismo causante de una hipoxemia es una disminución de la relación V/Q o un cortocircuito absoluto (V/Q = 0) (2,3, 7)

de oxígeno no cambian la PaFi y mientras que las variaciones de V/Q modifican la relación marcadamente.

#### Cortocircuito (Shunt): V/Q=0

En los casos con cortocircuito (Figura 6), la administración de 100% de O<sub>2</sub> modifica escasamente la PO<sub>2</sub> de la sangre mezclada. Esto se debe a que la sangre proveniente de la unidad B, y no se ha puesto en contacto con el O<sub>2</sub> administrado y por lo tanto no ha modificado su bajo contenido de O<sub>2</sub>. Por otra parte, el pequeño aumento de contenido de O<sub>2</sub> producido por el O<sub>2</sub> 100% en la unidad A no es suficiente como para compensar el bajo contenido de O<sub>2</sub> de la unidad B.

#### CONCLUSIONES

La cuantificación de las distintas posibilidades de relación V/Q que pueden existir en los millones de unidades alveolares pulmonares es compleja, en todas las personas sanas, existe algún desbalance V/Q. Esta compleja distribución varía ante influencias gravitacionales, cambios en la posición corporal y por cambios en el volumen pulmonar. Algunas patologías producen un franco desequilibrio V/Q, el cual corresponde al mecanismo de falla respiratoria más frecuente en pediatría. Para realizar una aproximación diagnóstica, junto con reconocer la fisiopatología, es de utilidad comprender el estudio de los gases arteriales y venosos, la DA-aO<sub>2</sub> y la respuesta al suministrar oxígeno.

#### REFERENCIAS

1. International Review of Sciences: Respiratory Physiology. London, England: Butterworth; 1974:105-137
2. Levitsky M. Pulmonary Physiology. McGraw-Hill Education, 9th Edition, 2018
3. West J. Pulmonary Pathophysiology. Wolters Kluwer, 9th Edition, Chapter 2 Gas Exchange, 2017
4. Kibble J, Halsey CR. The Big Picture, Medical Physiology. New York: McGraw-Hill, 2009.
5. Shapiro B. Aplicaciones Clínicas de los gases sanguíneos. 5ta edición 1997 Editorial Médica Panamericana. Buenos Aires Cap 6 Pp 94-104.
6. Balfour Lynn IM, Davies JC. Acute respiratory failure. Kendig's disorders of the respiratory tract in children. 7.a ed. Filadelfia: Saunders-Elsevier; 2006. p. 224-42.
7. Cruz Mena E. Aparato Respiratorio: Fisiología y Clínica. Escuela de Medicina Universidad Católica. Capítulo 3 Ventilación e intercambio gaseoso. 2008.