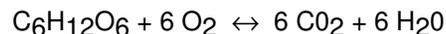


Capítulo 7 PARTE 1/3

7.1 ¿POR QUE RESPIRA UN HOMBRE?

Aunque esta pregunta parezca trivial, la respuesta sólo se tendrá si se revisa cómo, de qué manera, las CELULAS que componen el cuerpo de un hombre utilizan la ENERGIA que les llega con los alimentos. Ya sea que ingiera carbohidratos, proteínas, grasas o, como es habitual, una dieta mixta, estos entrarán en una ruta metabólica común, como muestra la Fig. 7.1. ¿Dónde, de toda esta cadena, se utiliza oxígeno? Al final, en la unión de 2 átomos de hidrógeno con 1/2 molécula de oxígeno para formar agua. ¿De dónde han venido esos hidrógenos? Pues de "arriba", de los aminoácidos, los monosacáridos y los ácidos grasos. Mientras tanto, se han ido formado moléculas de ATP, que serán las encargadas de ceder la energía necesaria para realizar TRABAJO, como es el trabajo químico de la biosíntesis de nuevos compuestos, el trabajo de crear y mantener gradientes y el trabajo muscular, como ya se señaló en el Cap. 2

Es ya clásico decir que el ATP es la MONEDA del metabolismo: al ATP se lo GANA mediante la OXIDACION de los alimentos y se lo PIERDE cuando se utiliza energía. En el caso de la glucosa, por ejemplo, la reacción AEROBICA es:



y el balance energético final es:



De la hidrólisis del ATP se obtendrá la energía, pero, como en cualquier proceso termodinámico, parte se podrá utilizar como trabajo y parte se perderá como CALOR. Lo cierto es que por cada mol de glucosa consumida se obtienen 2872 Joule o, lo que es lo mismo, 686 calorías. Si, como sabemos, el peso molecular de la glucosa es 180, el cociente 686/180 nos da la cantidad de calorías por gramo de glucosa y que es igual a 3,81 cal/g. Por comodidad, se usa la cifra de 4 cal/g de glucosa, que es una aproximación.

INDICE - Parte 1	Pág.
7.1 ¿POR QUE RESPIRA UN HOMBRE?	1
7.2 RESPIRACION EN UNA CÉLULA AISLADA Y EN EL HOMBRE	2
7.3 INTERCAMBIO DE GASES EN LOS ALVEOLOS	6
- DIFUSION DE OXIGENO A NIVEL ALVEOLAR	12

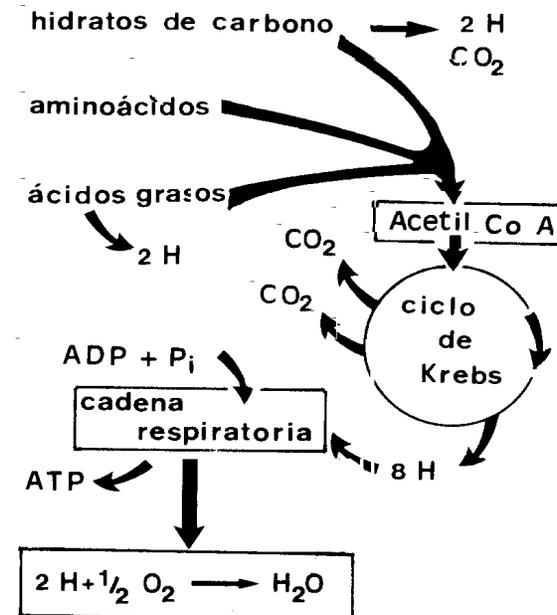
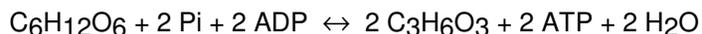


FIG. 7.1 ESQUEMA GENERAL DE LA RESPIRACION AEROBIA. QUE MUESTRA EL CICLO DE KREBS, LA CADENA RESPIRATORIA Y SU ACOPLAMIENTO CON LA FOSFORILACION OXIDATIVA. NOTESE LA UTILIZACION DE 1/2 O₂ PARA COMBINARSE CON 2 H+ Y FORMAR AGUA

¿Para que ha sido necesario, entonces, el OXIGENO? En última instancia, para unirse con los hidrógenos provenientes de la glucosa, por ejemplo, y formar agua: sacar HIDROGENO de la glucosa es, claro, una OXIDACION.

¿No hay forma de quitarle HIDROGENO a la glucosa en ausencia de oxígeno? Si, en condiciones ANAEROBIAS se produce:



Como se ve, la reacción produce sólo 2 moléculas de ATP, mientras la reacción aeróbica produce 36. La anoxia y la muerte de una célula en ausencia de oxígeno se producirá porque el sistema de producción de energía es insuficiente para las necesidades energéticas de ESA célula. El hombre RESPIRA, entonces, para llevar oxígeno a las células y lograr una producción de energía más eficiente.

7.2 RESPIRACION EN UNA CÉLULA AISLADA Y EN EL HOMBRE

Si volvemos a la célula aislada y "navegando" en un inmenso mar, tal como la describimos en Cap. 1, será fácil aceptar que esa célula puede obtener su oxígeno de aquel que se encuentra DISUELTO en el agua y que penetra al interior celular por simple DIFUSION. Cuando se forma el "MAR INTERIOR" de los animales más evolucionados, ya es necesario disponer de algún sistema de conduzca el oxigeno desde el medio exterior al medio interno. Así, la cucaracha, un insecto que ha resistido los embates de la amas de casa por siglos, tiene más de 20 traqueas que comunican el aire con la cavidad celomática, un sistema muy eficiente que le permite incorporar el O₂ con poco trabajo.

Para el hombre la situación es mucho más compleja. Su CONSUMO DE OXIGENO es bastante alto, del orden de los 250 mL de O₂ por minuto en reposo y de hasta 4000 mL de O₂ por minuto durante el ejercicio. El medio en que vive el hombre, y de donde toma el O₂, es suficiente para proveérselo, ya que el AIRE tiene 20,98% de O₂. Por lo tanto, si su sistema respiratorio funcionara con un 100% de eficiencia, bastaría incorporar 1250 mL de AIRE por minuto y, de allí, sacar los 250 mL de O₂ que se necesitan. Esto no es así (Fig. 7.2) y el hombre tiene unas 16 INSPIRACIONES Y ESPIRACIONES por minuto y en cada una se mueven unos 500 mL de aire, por lo que es fácil calcular que un hombre, en reposo, moviliza unos 8000 mL/min de aire para obtener sus 250 mL/min de O₂.

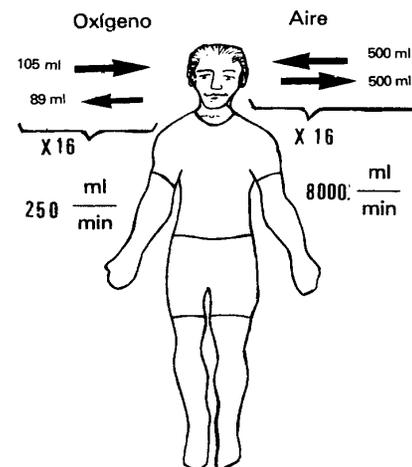


FIG. 7.2 UN HOMBRE ADULTO CONS UME ALREDEDOR DE 200 mL/min DE O₂. A LA DERECHA: EL MOVIMIENTO DE AIRE, A LA IZQUIERDA, EL DE OXIGENO

Tan importante como llevar oxígeno a todas las células del cuerpo es disponer de un sistema que se encargue de eliminar al exterior el DIOXIDO DE CARBONO (CO₂) que se produce en las células. Si se examina la reacción de la glucosa en presencia de oxígeno, que mostramos más arriba, se puede ver que, por cada molécula de glucosa, se producen 6 moléculas de CO₂ y se consumen 6 moléculas de O₂.

La relación:

$$CR = \frac{\text{CO}_2 \text{ producido}}{\text{O}_2 \text{ consumido}}$$

se llama COCIENTE RESPIRATORIO y, en el ejemplo de la glucosa, es igual a 1. Si en un hombre se mide el CO₂ producido y el O₂ consumido y se encuentra un CR de 1, es una clara indicación de que está logrando TODA su energía de los carbohidratos. Esto no es, por lo general, así y un hombre, CON ALIMENTACION MIXTA, tiene un cociente respiratorio de 0,825, ya que las aminoácidos de las proteínas tienen una relación CO₂ / O₂ de 0,83 y los ácidos grasos una relación de 0,71. Lo cierto es, entonces, que un hombre adulto debe eliminar (0,825 · 250 mL) = 206 mL de CO₂ por minuto.

- **Viaje, en el hombre, de una molécula de oxígeno desde la atmósfera al interior de una célula.**

Como se ve en la Fig. 7.3, lo primero que ocurre es el pasaje de una masa de aire, a través de la boca, nariz, tráquea y bronquios hasta llegar a los ALVEOLOS, verdadero órgano respiratorio en el hombre. Esa masa de aire se moviliza como un FLUJO VISCOSO, en que cada molécula no se mueve individualmente y a la azar, sino en conjunto como en la filtración, por ejemplo (Fig. 2.21) La FUERZA IMPULSORA para este flujo es la diferencia de presión entre el exterior y el alvéolo y ésta se produce por la expansión del tórax y el descenso del diafragma de cada inspiración.

En su pasaje por las vías respiratorias este aire fresco se ha ido mezclando con el aire que ya estaba en los pulmones y que constituye el ESPACIO MUERTO. De ese modo, la concentración de O₂ alveolar es menor a la del aire atmosférico. Los alvéolos están formados por un epitelio de tipo CERRADO, que no permite que pase con facilidad ni Na⁺ ni K⁺, pero sí agua y también gases como el O₂, el CO₂ y el N₂. Es el LIMITE entre el exterior y el compartimento corporal. El O₂

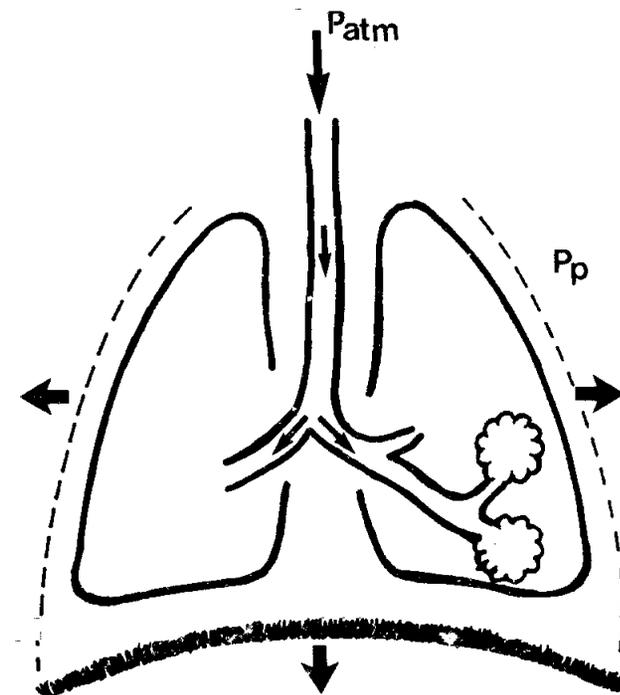


FIG. 7.3 EL AIRE EN LA TRAQUEA Y LOS BRONQUIOS TIENE UN FLUJO VISCOSO Y LLEGA A LOS ALVEOLOS (ALV) POR LA DIFERENCIA DE PRESION (Patm – Palv) CREADA POR LA EXPANSION DE LA CAJA TORACICA Y EL DESCENSO DEL DIAFRAGMA

atraviesa la membrana alveolar por DIFUSION SIMPLE, siendo la fuerza impulsora la diferencia de PRESIONES PARCIALES de O_2 que existe entre la luz del alvéolo y el plasma que se encuentra en el CAPILAR PULMONAR. De este modo, el O_2 llega a la sangre que proviene de la ARTERIA PULMONAR (Fig. 7.5), en donde se DISUELVE en el agua plasmática, del mismo modo que, como vimos en el Cap. 1, el O_2 de un cilindro se disolvía en el agua de un recipiente.

El O_2 es muy poco soluble en el agua ya que, como ya vimos, la concentración máxima que puede alcanzar está dada por la PRESION PARCIAL del O_2 y por el coeficiente de solubilidad. En las condiciones habituales, el agua plasmática sólo puede albergar, en disolución física, unos 3 mL de O_2 por cada litro. Para cubrir los requerimientos mínimos de 250 mL de O_2 por minuto, habría que "vaciar" de O_2 a ¡83 litros de plasma en 1 minuto! No hay, obviamente, ni la más mínima posibilidad de que eso ocurra. Lo que hay es, si, un reservorio intravascular de O_2 formado por la HEMOGLOBINA (Hb), que está en el interior de los glóbulos rojos y que tiene la capacidad de tomar 1,34 mL de O_2 por cada gramo de Hb. Como la concentración habitual de Hb en el hombre es de unos 15 g/dL (150 g de Hb por cada litro de sangre), se puede calcular que la Hb puede contener 201 mL de O_2 por cada litro de sangre, que es unas 67 veces más de lo que puede albergar el plasma. Habría que "vaciar", siguiendo con la idea, 1,24 litros de sangre en un minuto, cosa que es más lógica.

De todas maneras, a este sistema respiratorio, con su Hb, hay que agregarle, para que funcione, un SISTEMA DE DISTRIBUCION Y MEZCLA encargado de llevar el oxígeno desde el capilar pulmonar hasta el capilar periférico, allí descargarlo y regresar a tomar más O_2 . Esto lo cumple eficientemente el SISTEMA CIRCULATORIO del hombre, que lo transporta a través de las VENAS PULMONARES a la AURICULA IZQUIERDA, de allí al VENTRICULO IZQUIERDO, a la AORTA y a los CAPILARES PERIFERICOS. Allí la Hb libera al O_2 , éste sale del glóbulo rojo, vuelve a disolverse en el agua plasmática, atraviesa, por difusión, la pared capilar, llega al intersticio y de allí, otra vez por difusión, pasa al interior celular.

La cantidad de sangre que se mueve, a través de la aorta, es de unos 5 litros por minuto. Como la VOLEMIA (volumen sanguíneo) es también de unos 5 litros, es fácil decir que UN glóbulo rojo da la vuelta completa al sistema circulatorio en 60 segundos. ¿Podría existir un sistema de transporte de O_2 SIN Hb? Si, pero las presiones parciales de O_2 en el aire tendrían que ser enormemente más

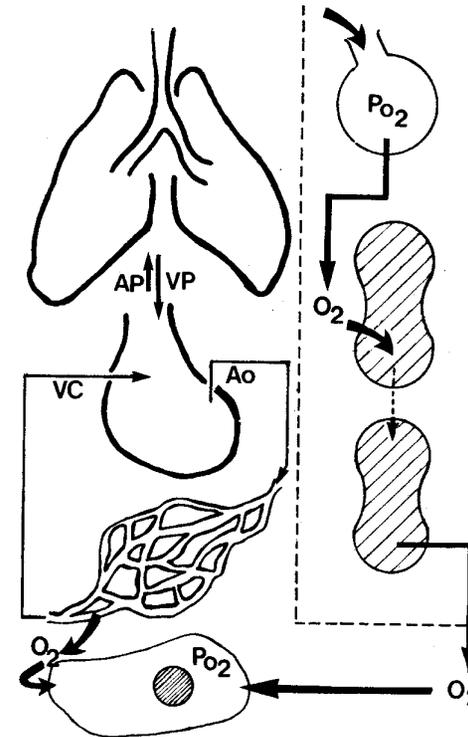


FIG. 7.5 ESQUEMA DEL CAMINO SEGUIDO POR EL OXIGENO. A LA IZQUIERDA EL SISTEMA CIRCULATORIO LO LLEVA POR LAS VENAS PULMONARES (VP) A LA AURICULA IZQUIERDA, DE ALLI AL VENTRICULO IZQUIERDO Y, POR LA AORTA (Ao) A LOS CAPILARES PERIFERICOS Y A LOS TEJIDOS. LA SANGRE VENOSA, CON PARTE DEL O_2 VUELVE POR LAS VENAS CAVAS (VC) A LA AURICULA DERECHA Y DE ALLI AL VENTRICULO DERECHO Y POR LA ARTERIA PULMONAR A LOS PULMONES. ALA DERECHA, EL O_2 PASA DE LA FASE GASEOSA EN QUE SE ENCUENTRA EN EL ALVEOLO AL AGUA PLASMATICA, DONDE SE DISUELVE. DE ALLI ES TOMADO POR LA Hb DE LOS ERITROCITOS Y TRANSPORTADO A LOS CAPILARES, DONDE VUELVE A DISOLVERSE EN EL AGUA PLASMATICA E INTERSTICIAL

elevadas. A la presión atmosférica de 760 mm Hg y con una proporción de O₂ en el aire de alrededor del 21%, solo se podría vivir sin Hb si la sangre circulara mucho más rápido. ¿Cuánto más rápido? Alrededor de 67 veces más, ya que esa es la capacidad de transporte de la sangre con respecto a la del plasma solo. Es bastante difícil imaginar un volumen minuto de 5 litros . 67 = 335 litros/min y, suponiendo que el corazón pudiera trabajar a esa frecuencia, verlo latir (80 . 67) = ¡ 5360 veces por minuto !

- Pasos o etapas de la respiración

Lo que se ha hecho en los párrafos anteriores no es más que una DESCRIPCION GENERAL de lo que ocurre con el O₂ en el hombre y algo similar se podría hacer con el CO₂ en su viaje desde las células hasta el exterior, pero no nos dice nada POR QUE esto ocurre, cuáles son los mecanismos y fuerzas involucradas, etc., etc. Más grave aún, todos esos cálculos de la capacidad de transporte... ¿cómo se hicieron? Es necesario, ahora, entrar en las bases físicas de la RESPIRACION. Se suele considerar que en la respiración hay 4 pasos o etapas que constituyen temas diferentes:

- 1) MECANICA RESPIRATORIA, en la que se describen los procesos relacionados con la entrada y salida de aire de los pulmones.
- 2) INTERCAMBIO DE GASES EN LOS ALVEOLOS, en la que se estudia la difusión de O₂ y CO₂ en la membrana respiratoria.
- 3) TRANSPORTE DE GASES POR LA SANGRE, que incluye todas las maneras en que los gases son transportado y entregados a las células.
- 4) CONTROL Y REGULACION DE LA RESPIRACION, donde se explica cómo se ajusta la respiración a las distintas necesidades.

Esta división es también aplicable a las situaciones clínicas que pueden llevar, en un momento dado, a una INSUFICIENCIA RESPIRATORIA, entendiéndose por tal cualquier condición que limite la capacidad de proveer oxígeno a las células o expulsar el dióxido de carbono. En este capítulo nos ocuparemos de los puntos 2) y 3), pensando que si se comprende estos puntos primero, se podrá entender mucho más fácilmente los restantes, tratados, con detalle, en los libros de Fisiología de Sistemas.

7.3 INTERCAMBIO DE GASES EN LOS ALVEOLOS

El intercambio de gases a nivel alveolar se realiza por DIFUSION SIMPLE, sin intervención de transportadores ni mecanismos activos. En esas condiciones, el flujo de O₂ y de CO₂ se realiza de acuerdo a la **Ley de Fick** (Cap.1), representada en la ecuación general

$$J_{\text{neto}} = D \cdot A \cdot \frac{C_1 - C_2}{\Delta x}$$

Como se trata de gases, las concentraciones son reemplazadas por PRESIONES PARCIALES, que tienen un manejo algo especial. Por lo tanto, en este momento el lector DEBE volver a leer los párrafos:

1) 1.11 CONCENTRACION DE GASES EN SOLUCIONES Y LIQUIDOS BIOLÓGICOS

- Composición del aire atmosférico (Cap. 1)
- Presión atmosférica (Cap. 1)
- Gases en solución (Cap. 1).

2) - Pérdida de agua por respiración (Cap. 3)

3) - Notas aparte: ¿QUE ES PRESION DE VAPOR? (Cap. 3) HUMEDAD RELATIVA (Cap. 3)

Con estos elementos hay que responder algunas preguntas:

Pregunta a) La Tabla 1.X del Cap. 3 muestra la composición del aire atmosférico SECO. ¿Cuál sería su composición si estuviera, a 37 °C, SATURADO de vapor de agua?

Respuesta: Con el agregado de AGUA, en forma de vapor, el total de constituyentes, como en cualquier mezcla, sigue dando un total de 100% y la PRESION TOTAL sigue siendo de 760 mm Hg, pero lo que el agregado de agua lo que ha hecho es disminuir la participación del O₂, el CO₂ y los otros gases en el total (Fig. 7.6). Como la PRESION DE VAPOR a 37 °C es de 47 mm Hg, se calcula:

$$P \text{ de O}_2 + P \text{ de CO}_2 + P \text{ de N}_2 = P \text{ total} - P \text{ vapor de agua}$$

$$P \text{ de O}_2 + \text{CO}_2 + \text{N}_2 = 760 \text{ mm Hg} - 47 \text{ mm Hg} = 713 \text{ mm Hg}$$

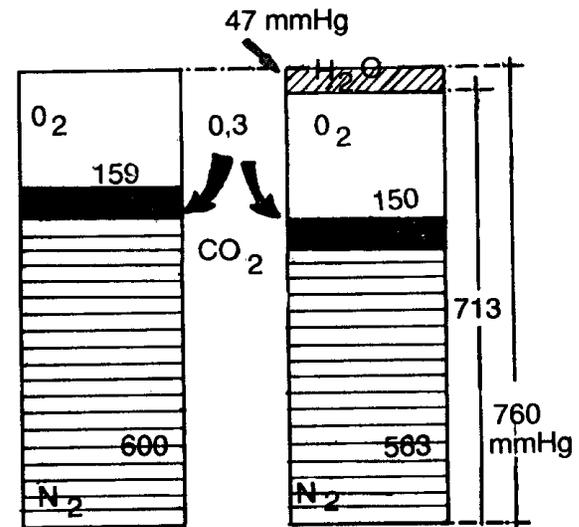


FIG. 7.6 PRESIONES PARCIALES DE CADA UNO DE LOS GASES EN EL AIRE SECO (A) Y EN EL AIRE HUMEDO (B) TODOS LOS VALORES SON EN mm Hg

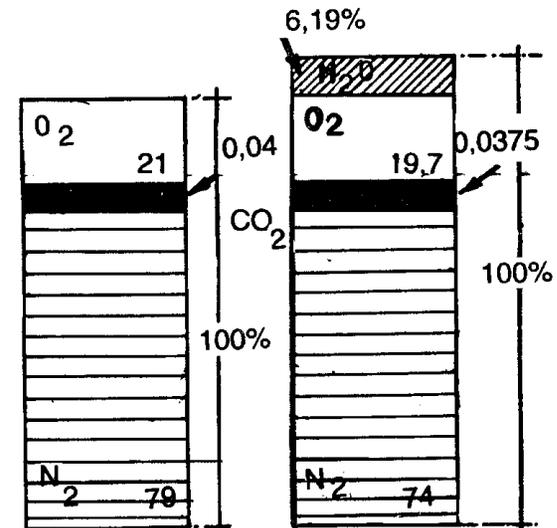


FIG. 7.7 COMPOSICION DEL AIRE ATMOSFERICO SECO (A) Y HUMEDO (B) TODOS LOS VALORES SON EN % DEL TOTAL

(en N₂ se han incluido, por comodidad, los "OTROS GASES" - argón, xenón, etc. que, como el nitrógeno, son inertes).

Estos 713 mm Hg es la presión de los gases O₂, CO₂ y N₂ en ESTA mezcla, en la que no está incluido el vapor de agua. El O₂, el CO₂ y el N₂, siguen, cada uno, manteniendo la misma PROPORCION que tenían en el aire seco. Por lo tanto, la presión parcial de O₂ será el producto de la presión total por la proporción ocupada por el oxígeno en la mezcla:

$$PO_2 = 713 \text{ mm Hg} \cdot 0,2098 = 149,58 \text{ mm Hg} \approx 150 \text{ mm Hg}$$

y, en general:

$$PO_2 = (P_{\text{atmosférica}} - P_{\text{vapor}}) \cdot \text{Vol. O}_2\% / 100$$

Si el aire está **saturado de vapor de agua**:

$$PO_2 = (760 \text{ mm Hg} - 47 \text{ mm Hg}) \cdot 21\% / 100$$

$$PO_2 \approx 150 \text{ mm Hg}$$

Con el mismo razonamiento se puede calcular la presión parcial de los otros gases y construir la Tabla 7.I. Nótese que para el CO₂ la diferencia, en valores absolutos, entre seco y húmedo es muy pequeña y, en fisiología, se usa el valor de PCO₂ del aire, seco o húmedo, como igual a 0,3 mm Hg.

Si ahora se quiere calcular los **VOLUMENES %** (Fig. 7.7) de cada uno de los gases cuando el aire está **saturado de vapor**, se puede razonar que el agregado del vapor de agua ha aumentado el volumen total, que esta ahora formado por O₂ + CO₂ + N₂ + AGUA y, en consecuencia, el VOLUMEN PORCENTUAL de cada uno de los gases tiene que haber disminuido.

Así, para el O₂

$$760 \text{ mm Hg} \dots\dots 20,98 \%$$

$$713 \text{ mm Hg} \dots\dots x = 19,68 \%$$

Del mismo modo se obtiene el Volumen % de los otros gases y se completa la Tabla 7.I

TABLA 7.1 COMPOSICION DEL AIRE ATMOSFERICO

	SECO		HUMEDO *	
	Volumen (%)	Presión parcial (mm Hg)	Volumen (%)	Presión parcial (mm Hg)
O ₂	20,98	159,44	19,68	149,59
CO ₂	0,04	0,30	0,0375	0,285
N ₂	78,98	600,25	74,09	583,13
VAPOR DE AGUA*	-	-	6,19	47

* Se refiera al aire en equilibrio con el agua a 37 °C

Pregunta b) En Fisiología es frecuente expresar el VOLUMEN de un gas en dos condiciones diferentes:

- **BTPS:** Es un gas o mezcla de gases a la temperatura del cuerpo humano (37 - 38 °C) y saturado de vapor a esa temperatura (47 mm Hg) y se la llama BTPS por las siglas en ingles: B (Body: cuerpo), T (temperatura), P (presión: 1 Atm), S (saturado de vapor de agua).

- **STPD:** Es volumen de esa misma masa de gas a la misma presión, pero a 0 °C y seco. Su sigla es STPD por de S (standard), T (temperatura), P (presión) y D (dry: seco)

Si se tiene, por ejemplo, 250 mL de aire en condiciones BTPS, ¿qué volumen ocupará en condiciones STPD?

Respuesta: hay que razonar que, al pasar de una condición a otra se podrá cambiar el volumen, pero no se cambiará, por supuesto, el número de moléculas. Entonces, si llamamos:

BTPS = condición 1 ; STPD = condición 2

podemos decir:

$$P_1 \cdot V_1 = R \cdot T_1 \cdot n$$

$$P_2 \cdot V_2 = R \cdot T_2 \cdot n$$

de donde

$$\frac{P_1 \cdot V_1}{T_1} = \frac{P_2 \cdot V_2}{T_2} \dots \dots \dots$$

y como la **condición 1 (BTPS)** tiene:

$$P_1 = 760 \text{ mm Hg}$$

$$V_1 = 250 \text{ mL}$$

$$T_1 = 273 + 37 = 310 \text{ }^\circ\text{K}$$

y la **condición 2 (STPD)** tiene:

$$P_2 = 760 - 47 = 713 \text{ mm Hg}$$

$$V_2 = ?$$

$$T_2 = 273 \text{ }^\circ\text{K}$$

podemos calcular el volumen como:

$$V_2 = \frac{P_1 \cdot V_1 \cdot T_2}{T_1 \cdot P_2}$$

$$V_2 = \frac{760 \text{ mm Hg} \cdot 250 \text{ mL} \cdot 273 \text{ }^\circ\text{K}}{310 \text{ }^\circ\text{K} \cdot 713 \text{ mm Hg}} = 234,67 \text{ mL} \bullet\bullet\bullet\bullet$$

¿Qué fue lo que se hizo? Simplemente, a ese volumen de aire, quitarle el agua (pasarlo de S a D), cambiarle la temperatura (de 37 °C a 0 °C) y ahora calcular el nuevo volumen.

Pregunta c) El AIRE SECO y el AIRE SATURADO de vapor de agua no son las únicas condiciones en que puede estar el aire. Así, por ejemplo, el aire que respiramos tiene, generalmente, un 20 a un 40 % de HUMEDAD RELATIVA, dependiendo de la región y la época del año. Hay veces que respiramos con 0% de humedad y también las hay en que respiramos con 100% de humedad, pero no son situaciones frecuentes. ¿Cuál será la PO₂ del aire, a nivel del mar, pero con 30% de humedad relativa?

Respuesta: Como se vio en Cap 3, la humedad relativa es una forma de expresar la presión de vapor y éste depende de la temperatura. A 37 °C, si hay 100% de humedad, es que hay 47 mm de Hg de presión de vapor. Si a 37 °C hay 50% de humedad, la presión de vapor será de 23,5 mm Hg. Entonces, para responder a la pregunta anterior hay que saber a qué temperatura está el aire y cuál es la PRESION DE VAPOR PARA ESA TEMPERATURA. En la Tabla 4.II se muestran las presiones y supongamos que el aire de la pregunta, con 30% de humedad, tiene una temperatura de 25 °C. Le corresponde una presión de vapor de 23,73 mm Hg y por lo tanto:

100 % de humedad (a 25 °C) 23,73 mm Hg

30 % de humedad (a 25 C) x = 7,12 mm Hg

TABLA 7.II PRESION DE VAPOR DEL AGUA A DIFERENTES TEMPERATURAS (Indica a que presión se el vapor de agua cuando una mezcla gaseosa está saturada de vapor de agua)

TEMPERATURA (grados C)	PRESION (mm Hg)
0	4,58
5	6,53
10	9,20
15	12,77
20	17,52
25	23,73
30	31,80
37	47,04
40	55,29
100	760

INTENTE RESOLVER LOS PROBLEMAS
1, 2 Y 3 DEL FINAL DEL CAPITULO

Con este dato de la presión de vapor podemos hacer el mismo razonamiento que en la pregunta a)

$$PO_2 = (P_{\text{atmosférica}} - P_{\text{vapor}}) \cdot \text{Vol O}_2\% / 100$$

El " **Vol O₂** " que figura aquí es el del del aire seco (20,98 ≈ 21 %) y

$$PO_2 (30\% \text{ hum. y } 25^\circ \text{ C}) = (760 - 7,12) \cdot 0,21 \approx 158 \text{ mm Hg}$$

Pregunta d) Una persona subió en el teleférico de Mérida (Venezuela) y en la última estación, cercana a los 5000 metros de altura, sintió todos los síntomas del mal de altura: cefalea, disnea (falta de aire), taquicardia, obnubilación, etc. ¿A qué se debe esto? Los que lo acompañaban dicen que en la altura "hay menos oxígeno": ¿es eso cierto?

Respuesta: La explicación es falsa. Lo que hay, si se quiere hablar de ese modo, es MENOS AIRE y la PRESION ATMOSFERICA es inferior a los 760 mm Hg. Sin embargo, la proporción de O₂ sigue siendo de unos 21 volúmenes %. Como a 5000 metros la presión atmosférica es de 405 mm Hg, la PO₂, suponiendo, para hacer fácil el cálculo, que es aire seco, será:

$$PO_2 = P_{\text{atm}} \cdot \text{Vol O}_2\% / 100 = 405 \text{ mm Hg} \cdot 0,21 \%$$

$$PO_2 = 85 \text{ mm Hg}$$

Comparada con la PO₂ del aire seco a nivel del mar, que, como vimos, es de 150 mm Hg, el FLUJO OXIGENO a nivel alveolar estará disminuido y la DISOLUCION DE OXIGENO en plasma también, lo que lo lleva a una HIPOXIA, con sus síntomas característicos. La persona mejora si, aún a esa altura, se le hace respirar oxígeno puro.

- DIFUSION DE OXIGENO A NIVEL ALVEOLAR

Conociendo ahora lo que significa una presión parcial, se puede escribir la Ley de Fick como:

$$J_{\text{neto O}_2} = D \cdot A \cdot \frac{PO_2(\text{alv}) - PO_2(\text{cap})}{\Delta x}$$

donde

TABLA 7.III COMPOSICION DEL AIRE ALVREOLAR EN COMPARACION CON EL AIRE ATMOSFERICO SECO Y HUMEDO

	AIRE ATMOSFERICO SECO	AIRE ATMOSFERICO HUMEDO*	AIRE ALVEOLAR
	Presión parcial (mm Hg)	Presión parcial (mm Hg)	Presión parcial (mm Hg)
	y Volumen (5)	y Volumen (5)	y Volumen (5)
O₂	159,44 20,98	149,59 19,68	104 13,06
CO₂	0,30 0,04	0,285 0,0375	40 5,3
N₂	600,25 78,98	563,13 74,06	569 74,9
Vapor de agua	-	47 6,19	47 6,19
Total	760 100	760 100	760 100

* Se refiere al aire en equilibrio con el agua a 37 °C

$PO_{2(alv)}$ es la presión parcial de O_2 en el alvéolo pulmonar

$PO_{2(cap)}$ es la presión parcial de O_2 en capilar pulmonar

Δx es la distancia que hay entre la luz del alvéolo y la luz del capilar

A es el área total de intercambio

D es el coeficiente de difusión del O_2 a través de todas las estructuras que éste atraviesa

- Presión parcial de O_2 en el alvéolo.

En la Tabla 4.III se puede ver la composición del AIRE ALVEOLAR. Es evidente que difiere del aire atmosférico SECO en:

a) Tiene VAPOR DE AGUA a saturación, lo que lo aproxima a la composición del aire húmedo. Esto es debido a que el aire alveolar está en equilibrio con el agua del capilar pulmonar

b) La proporción y presión parcial del O_2 es menor que la del aire, aun la del aire húmedo. Eso es debido a que el aire atmosférico se ha mezclado con el aire que quedó en el espacio muerto y a que el oxígeno que llegó con el aire fresco es continuamente removido hacia la sangre, disminuyendo su concentración en el alvéolo.

c) La proporción y la presión parcial del CO_2 es mayor que la del aire. Esto es debido a la difusión de CO_2 desde la sangre hacia el alvéolo y a que éste no es instantáneamente expulsado hacia el exterior.

- Presión parcial de O_2 en el capilar pulmonar

Si se observa la Fig. 7.8 será fácil deducir que la PO_2 en el capilar no puede ser la misma cuando la sangre recién entra en contacto con el alvéolo que cuando se aleja de él: entrará sangre con bajo PO_2 y saldrá sangre con alto PO_2 : la PO_2 cambia de 40 mm Hg hasta 104 mm Hg, punto en que se llega al EQUILIBRIO con la PO_2 del aire alveolar. ¿Cuál sería el valor de PO_2 capilar que habría que poner en la ley de Fick? Es un valor promedio, pero de ninguna manera $104-40/2$. Eso se podría hacer sólo si la PO_2 cambiara, de un extremo a otro, en forma lineal. Como no es sí, el valor de la PO_2 capilar está más cerca de 104 mm Hg y, en reposo, se lo suele tomar como próxima a 90 mm Hg.

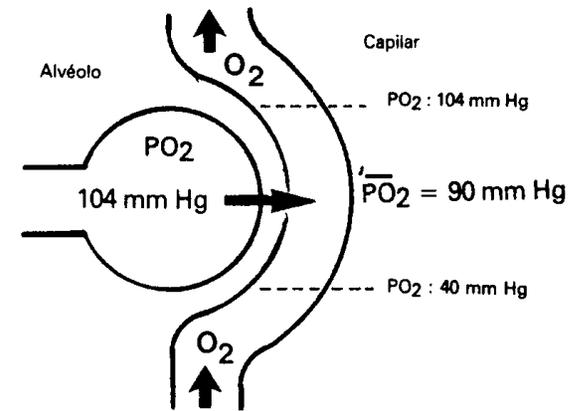


FIG. 7.8 DIFUSION DEL O_2 DE LOS ALVEOLOS A LOS CAPILARES. LA SANGRE QUE PASO POR LOS ALVEOLOS TIENE UNA PO_2 QUE ESTA EN EQUILIBRIO CON LA PO_2 ALVEOLAR. LA PO_2 MEDIA INDICA LA PRESION EN EL CAPILAR QUE SE USA PARA EL CALCULO DE LA DIFERENCIA DE PRESION

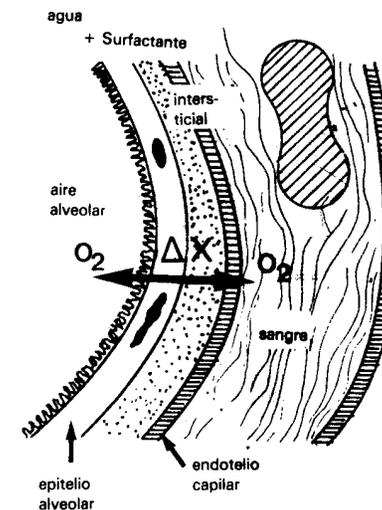


FIG. 7.9 ESQUEMA DE LAS ESTRUCTURAS QUE DEBE ATRAVESAR EL O_2 DESDE LA LUZ ALVEOLAR A LA SANGRE

- Distancia que hay entre la luz del alvéolo y la luz del capilar

La distancia que debe recorrer el O₂ está dada por el espesor de las capas epiteliales y por las capas de líquido que hay a ambos lados (Fig 7.9). En el alvéolo hay una capa de agua que normalmente lo recubre por su cara interior y en esa capa de agua hay moléculas de una sustancia tensioactiva (que modifica la tensión superficial del agua) llamada SURFACTANTE. (Ver nota aparte: PAPEL DEL SURFACTANTE PULMONAR). De todos modos, en un sujeto sano, la distancia Δx no suele ser mayor a los 0,2 μm .

- Area total de intercambio

La superficie de TODOS los alvéolos es de unos 70 metros cuadrados. Sin embargo no toda esta superficie puede, en un momento dado, ser considerada como funcionante. En primer lugar, no todos los segmentos del pulmón están sometidos a la misma diferencia de presión. Un ejemplo típico lo constituyen las bases pulmonares, donde el descenso del diafragma produce una mayor expansión que en los vértices. En segundo lugar, pueden existir alvéolos que estén recibiendo aire, pero que tengan una perfusión sanguínea insuficiente. En los dos casos, el AREA DE INTERCAMBIO no será la superficie anatómica de los alvéolos. Hay cálculos que indicarían que, EN REPOSO, el área de intercambio FUNCIONALMENTE ACTIVA no es mayor a los 14 m².

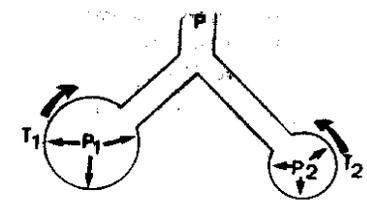
- Coeficiente de difusión del O₂

El O₂, como todos los gases, atraviesa sin dificultad, por ser liposoluble, las membranas celulares. En esas condiciones, para la difusión de O₂ desde el alvéolo a la sangre, se da una situación inversa a la que se describió para el Na⁺, por ejemplo (Cap. 1): el FACTOR LIMITANTE para la difusión del O₂ no está ahora en la pared celular sino en el AGUA misma. A qué VELOCIDAD "viaja" el O₂ por el agua es lo que hay que saber. Pero, el O₂ que está EN EL ALVEOLO en una fase GASEOSA y, en cambio, en el agua plasmática esta en una fase ACUOSA. ¿Que ha tenido que ocurrir, entonces, antes que el O₂ viaje por el agua? Ha tenido que DISOLVERSE en ella. Se acepta, para lo que estamos discutiendo, que LA DIFUSIBILIDAD DE UN GAS ES DIRECTAMENTE PROPORCIONAL A SU SOLUBILIDAD EN AGUA. En la Tabla 4.IV. se muestran los coeficientes de solubilidad de los diferentes gases. En base a lo anterior podemos decir, por ejemplo, que el CO₂ es 20 veces más DIFUSIBLE que el O₂.

PAPEL DEL SURFACTANTE PULMONAR

Los alvéolos pueden ser considerados como esferas huecas recubiertas, por su interior, de una capa de AGUA y con un diámetro promedio de 280 μm . Como esferas tienen una superficie dada por $4\pi r^2$ y un volumen dado por $4/3\pi r^3$, lo que hace una relación superficie-volumen $S/V = 1/3 r$, indicando que cuando más pequeño sea el radio mayor será la relación superficie volumen, lo que facilita el intercambio gaseoso. Por supuesto que habrá alvéolos más pequeños y alvéolos más grandes, pero lo cierto es que cada uno guarda su volumen constante a través de tiempo. Lo interesante es, como en cualquier esfera no rígida (pompa de jabón, gota de agua, etc.), que en los alvéolos debe existir, para que se pueda hablar de un diámetro constante, un equilibrio entre la presión P que tiende a distenderlos y la tensión t que tiende a colapsarlos. La LEY DE LAPLACE establece que $t = P \cdot r$, donde r es, en este caso, el radio de los alvéolos. Para

$$P_1 = \frac{t_1}{r_1}$$
$$P_2 = \frac{t_1}{r_1}$$



todos los alvéolos pulmonares deberá cumplirse:

Y como la presión es la misma para todos los alvéolos ($P_1 = P_2$),

$$t/r = \text{constante}$$

El problema es que el agua que recubre los alvéolos tiene una tensión superficial constante de alrededor de 70 dinas/cm, y de no existir algún otro factor, los alvéolos de pequeño diámetro tenderían a cerrarse ya que su tensión, para su radio, sería mayor de lo que necesitan para soportar la presión P. El SURFACTANTE es un fosfolípido que está presente en el líquido que recubre el alvéolo y que actúa, como los detergentes, disminuyendo la tensión superficial. La característica notable es que, cuando el radio del alvéolo tiende a disminuir, su efecto es más intenso, por lo que la tensión superficial del agua disminuye. De ese modo, hace que la tensión sea menor en los alvéolos pequeños y estos mantengan su diámetro. La ausencia congénita de surfactante pulmonar da origen a un grave problema pulmonar conocido como SINDROME DE LA MEMBRANA HIALINA.

Capacidad de difusión del pulmón

Por lo que se ha visto en los párrafos anteriores, tratar de aplicar, con todas sus variables, la Ley de Fick en un pulmón es mucho más complicado que en los recipientes que usábamos en el Cap. 2. Calcular así un Coeficiente de Difusión o una Permeabilidad es, si no imposible, por lo menos poco real y práctico. Por ello, se calcula lo que se llama la CAPACIDAD DE DIFUSION PULMONAR (DO₂). Así:

$$DO_2 = \frac{\text{mL/min consumidos}}{PO_{2\text{alv}} - PO_{2\text{cap}}}$$

Si un hombre adulto, en reposo, "gasta" 250 mL de O₂ por minuto y si los valores de PO₂ en el alvéolo y en el capilar son los que ya señaláramos, su DO₂ será:

$$DO_2 = \frac{250 \text{ mL/min de O}_2}{104 \text{ mm Hg} - 90 \text{ mm Hg}} = 17,8 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{mm Hg}^{-1}$$

Los límites normales del DO₂ están entre 17 y 20 mL de O₂ por minuto y por milímetro de mercurio y cambia en numerosas condiciones fisiológicas y patológicas.

**FIN DE LA PARTE 1
DEL CAP. 7
CONTINUA PARTE 2**

