

## ***UNIDAD V: Fisiología Respiratoria***

### ***Capítulo 46: ADAPTACIONES RESPIRATORIAS AL EJERCICIO***

*Martin Colacilli y Nelio Bazán*

---

Las adaptaciones al ejercicio a nivel respiratorio tienen como objetivo sostener la actividad metabólica a nivel celular. El entrenamiento produce adaptaciones celulares como un aumento del tamaño y número de mitocondrias y por lo tanto de enzimas oxidativas que demandarán una provisión creciente de oxígeno en trabajos físicos sostenidos. El efecto del incremento del trabajo de resistencia, es el desarrollo de la capacidad de las células musculares de extraer un mayor porcentual de oxígeno de la sangre arterial. La comprensión de estos mecanismos interesa a los fines de entender el concepto de entrenamiento deportivo específico. Aumentando la intensidad y la duración de los estímulos de entrenamiento, y sosteniendo su especificidad, se garantizan las transformaciones adaptativas de este sistema fisiológico.

---

#### **Efecto de la actividad física sobre el aparato respiratorio.**

##### **Respuesta ventilatoria al ejercicio.**

VO<sub>2</sub>max.

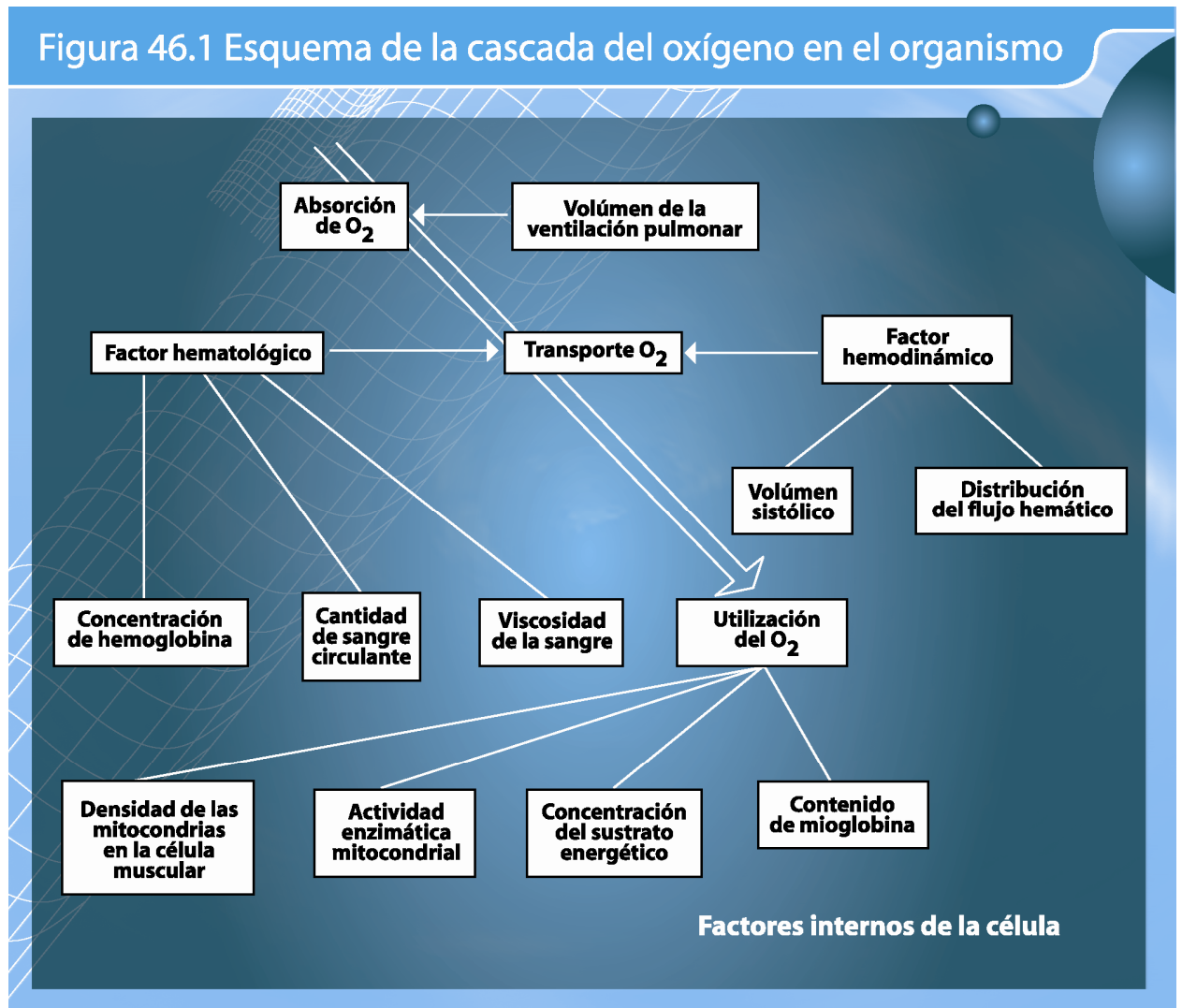
Capacidad de difusión de oxígeno.

Gases sanguíneos.

##### **Regulación de la ventilación.**

El ser humano tiene un metabolismo esencialmente aeróbico, donde la respiración mitocondrial juega un importante rol. El  $O_2$  necesario para la oxidación de las moléculas de actil-CoA en el ciclo de los ácidos tricarboxílicos provistas por los diferentes sustratos metabólicos da lugar a la síntesis de moléculas de alto contenido energético como el ATP y CP. Los productos catabólicos resultantes de la respiración mitocondrial son:  $CO_2$  y  $H_2O$ . Durante el ejercicio, el organismo produce energía de manera más rápida aunque menos eficiente a través de la vía glucolítica con producción de ácido láctico.

**Figura 46.1: Esquema de la cascada del oxígeno en el organismo.**



### *Efecto de la actividad física sobre el aparato respiratorio*

El ejercicio incrementa la frecuencia y amplitud de respiración (polipnea e hiperpnea), a veces incluso, antes de iniciar el movimiento en sí, como respuesta a estímulos centrales que desencadenan una hiperventilación. Se intenta suplir la demanda aumentada de oxígeno durante la actividad física y para ello el entrenamiento produce adaptaciones en el sistema

respiratorio aumentando el volumen pulmonar, la capacidad inspiratoria y reduciendo el volumen pulmonar residual (Belman, 1980; Robinson, 1982). Una mayor ventilación máxima se debe tanto a aumentos del volumen corriente como de la frecuencia respiratoria. Como consecuencia se produce una economía ventilatoria, la persona entrenada respira de manera más eficaz que un sedentario. La frecuencia respiratoria (FR) en reposo es de 12 a 20 respiraciones por minuto (rpm) pero durante el ejercicio intenso la puede alcanzar 35-45 r.p.m. llegando hasta 60-70 r.p.m. en deportistas de alto nivel.

El volumen mínimo respiratorio (VMR) es la cantidad de aire que entra y sale del aparato respiratorio; es el producto de la frecuencia respiratoria por el volumen corriente. En un atleta entrenado, el VMR aumenta extraordinariamente durante las actividades intensas porque aumenta tanto la frecuencia como el volumen corriente. Hay taquipnea (aumento de la frecuencia respiratoria por encima de los valores normales de reposo) e hiperpnea (aumento de la amplitud respiratoria).

La realización de trabajos que exijan sostener un alto porcentaje del  $VO_{2max}$ , traen aparejados un aumento de la ventilación y un aumento de los volúmenes respiratorios para mantener las concentraciones apropiadas de  $O_2$  y  $CO_2$ . Ya que aumentan los requerimientos de  $O_2$  y se necesita eliminar la producción excesiva de  $CO_2$  mediante la ventilación alveolar.

### *La ventilación*

Los aumentos de  $H^+$  libres en los líquidos extracelulares y en el plasma, estimulan el centro respiratorio, causando un aumento inmediato de la ventilación alveolar lo que reduce rápidamente el  $PO_2$  alveolar y causa la salida del  $CO_2$ . En el ejercicio la producción de protones puede ser muy elevada y los sistemas de amortiguación son llevados al límite, presentándose una disminución del pH. En esos casos el entrenamiento es agotador y necesita de una motivación considerable. Durante el ejercicio podemos distinguir tres fases de la ventilación pulmonar:

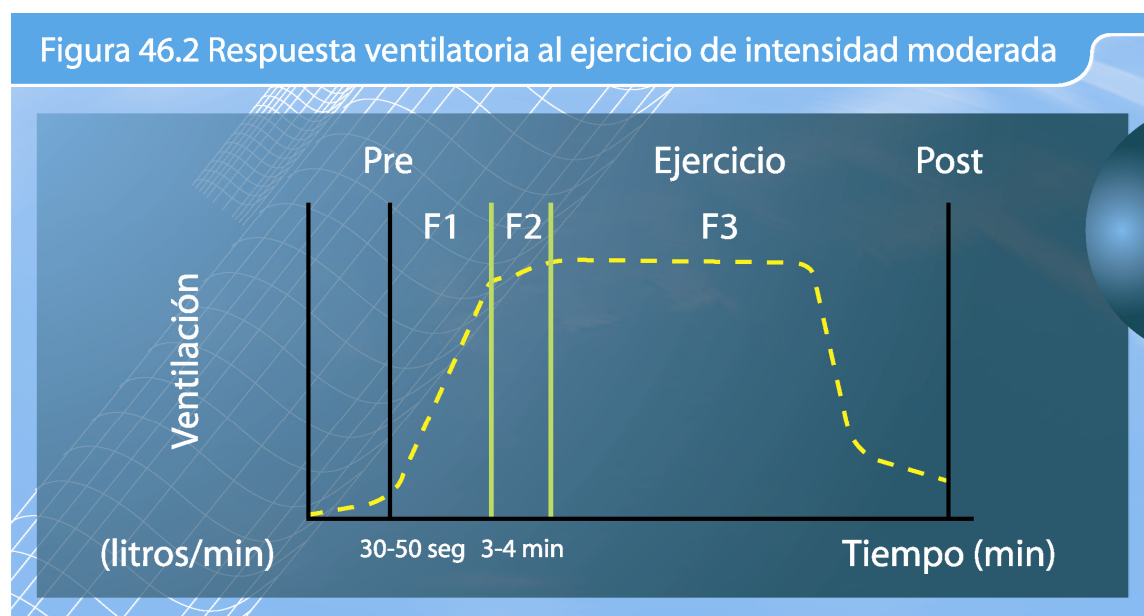
- FASE I: la ventilación aumenta en forma brusca, incluso antes de iniciado el movimiento, puede durar de 30 a 50 segundos. En algunos casos la competencia se realiza dentro de este período.
- FASE II: el aumento se hace más gradual, y dura aproximadamente unos 3 a 4 minutos.
- FASE III: Si el ejercicio es continuo y de intensidad leve o moderada, tiende a estabilizarse.

### *Respuesta ventilatoria al ejercicio*

Durante el ejercicio leve o moderado el volumen espirado (VE) aumenta en forma lineal con respecto al consumo de  $O_2$  ( $\dot{V}O_2$ ) y a la producción de  $CO_2$  ( $VCO_2$ ). En estos casos el cociente  $VE/\dot{V}O_2$  es igual a 20 - 25. El aumento de la ventilación surge por la necesidad de eliminar el  $CO_2$  producido para lo cual el incremento será mayor en el volumen corriente que en la frecuencia respiratoria. Cuando el ejercicio es muy intenso y se instala una acidosis metabólica, la relación  $VE/\dot{V}O_2$  se hace curvilínea y el aumento de la VE es a expensas de la FR. Al no alcanzarse la fase III se produce un aumento desproporcionado de

la VE en relación al  $VO_2$ , el cociente  $VE/VO_2$  puede llegar a 35 - 40. El punto en el cual se produce esa respuesta desproporcionada es el *umbral ventilatorio* y corresponde aproximadamente entre el 55 al 65 % de la  $VO_{2max}$ . Durante la recuperación post ejercicio se produce una primera fase de disminución brusca de la VE y otra fase de disminución gradual. Con respecto a la relación ventilación y perfusión pulmonar (V/Q) podemos decir que en el ejercicio ligero se mantiene semejante al del reposo (0.8), en el moderado tanto la VE como la perfusión se hacen mucho más uniformes en todo el pulmón, hay un reclutamiento de los capilares pulmonares y un aumento del diámetro de los mismos. En el ejercicio intenso hay un aumento desproporcionado de la VE con lo cual la relación V/Q llega a veces a 5.

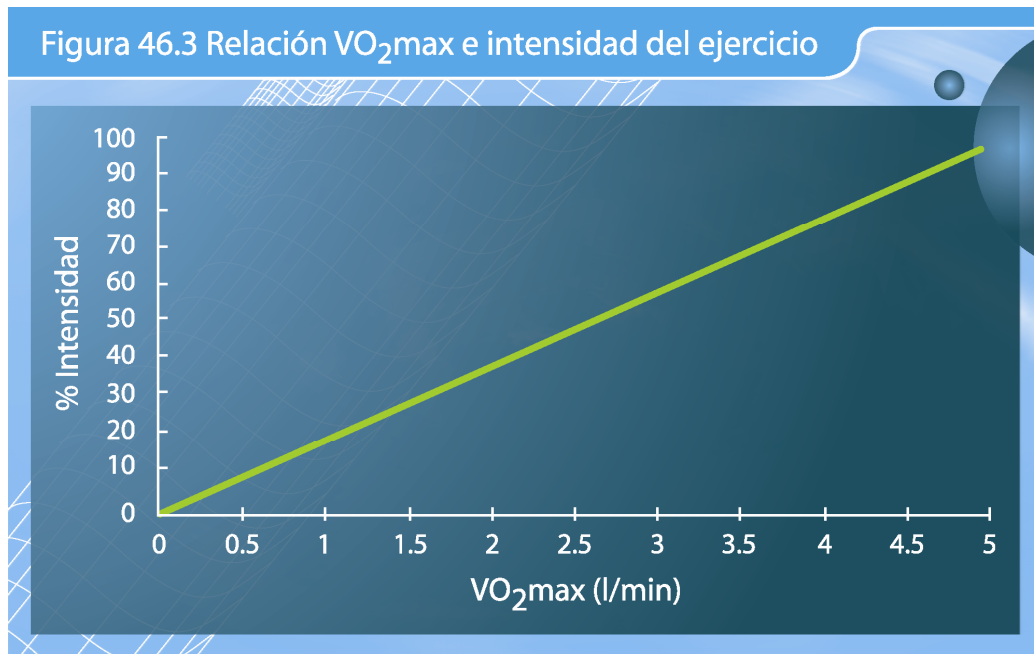
De todos modos la capacidad respiratoria máxima es cerca del 50 % mayor que la ventilación pulmonar alcanzada durante el ejercicio máximo, aportando un elemento de seguridad para los deportistas. Significa que hay aún margen para una ventilación adicional en caso de ejercicios en situaciones críticas como el entrenamiento en altura.



### $\dot{V}O_{2max}$ .

El consumo de  $O_2$  y la ventilación pulmonar total sufren modificaciones antes, durante y después del ejercicio. El consumo normal de  $O_2$  para un adulto joven en reposo es de 250 ml/min pero en un atleta puede aumentar a 4000 o 5000 ml/min. El  $VO_{2max}$  aumenta en un 15 a 30 % en los primeros 3 meses de entrenamiento intensivo y se puede llegar a un incremento del 50 % en un periodo de 2 años. Los corredores de maratón presentan un  $VO_{2max}$  un 45 % superior al de las personas sin entrenamiento. Sin embargo se debe recordar que existe una determinación genética en estos atletas. Tienen mayor tamaño torácico en relación al tamaño corporal con fuertes músculos respiratorios.

**Figura 46.3: Relación  $\text{VO}_2\text{max}$  e intensidad del ejercicio.**



#### *Capacidad de difusión de oxígeno*

La capacidad de difusión del  $\text{O}_2$  (23 ml /min) casi se triplica en el ejercicio máximo (64 ml/min) por el aumento de la superficie de intercambio. Esto se debe principalmente a que se incrementa el flujo sanguíneo a través de los capilares pulmonares aumentando las zonas perfundidas y por lo tanto brindando mayor superficie de difusión. En estado de reposo la duración del tránsito del eritrocito en contacto con la membrana alveolar es de 0.75 segundos y la  $\text{PO}_2$  del capilar y del alvéolo se igualan en los primeros 0.25 segundos. En el ejercicio al aumentar el flujo sanguíneo el tiempo de tránsito disminuye de 0.75 segundos a 0.50 o algo menos manteniéndose la capacidad de difusión.

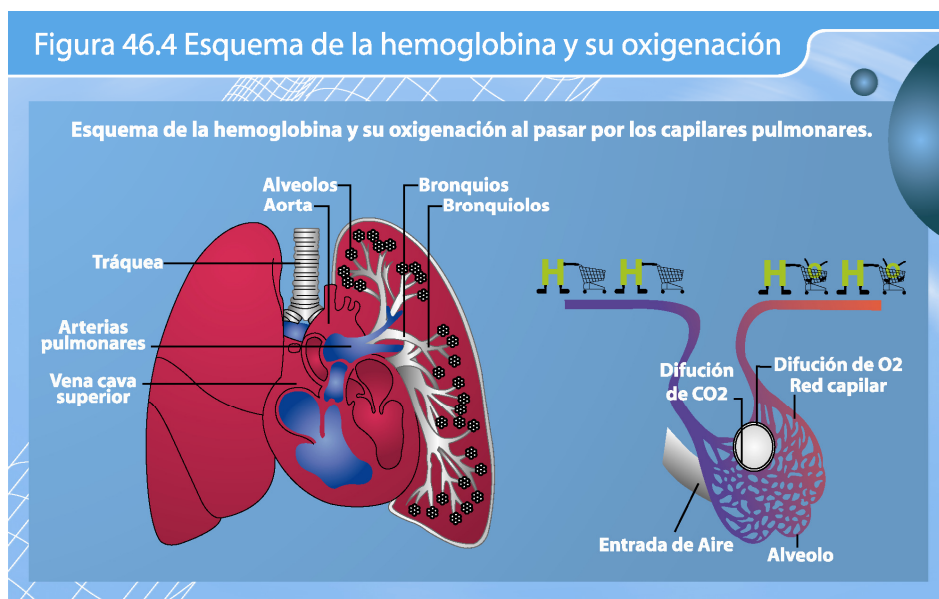
#### *Gases sanguíneos*

Tanto la  $\text{PO}_2$  como la  $\text{PCO}_2$  se mantienen casi normales, lo que indica gran capacidad del sistema respiratorio para oxigenar la sangre y lavar el dióxido de carbono incluso durante el ejercicio máximo. En el ejercicio la respiración se estimula principalmente por mecanismos en el sistema nervioso central, desde el centro respiratorio, estimulado por las mismas señales que se transmiten desde el cerebro a los músculos para producir movimientos, y por señales sensoriales propias hacia el centro respiratorio generadas en los músculos en contracción y las articulaciones en movimiento.

Durante el ejercicio la hemoglobina aumenta 5-10 % debido a la pérdida de líquidos y al pasaje de los mismos desde el compartimiento vascular al muscular que produce

hemoconcentración. La diferencia arteriovenosa está aumentada debido a la mayor extracción de  $O_2$  por parte de las células musculares activas. El aumento de hidrogeniones, del  $CO_2$ , de la temperatura y del 2,3 DPG desplazan la curva de disociación de la hemoglobina hacia la derecha (efecto Bohr). La mioglobina que facilita el transporte de  $O_2$  en el interior de la célula muscular hasta la mitocondria parece aumentar sus concentraciones gracias al entrenamiento de resistencia. El transporte de  $CO_2$  desde la célula hasta los pulmones se realiza principalmente por el sistema del bicarbonato, aunque algo va disuelto en plasma y por otro lado los glóbulos rojos también actúan en su remoción.

**Figura 46.4: Esquema de la hemoglobina y su oxigenación al pasar por los capilares pulmonares.**



### ***Regulación de la ventilación***

Los mecanismos responsables de la hiperventilación que se produce en el ejercicio son:

- *Estímulo central:* Proviene del centro respiratorio y del hipotálamo.
- *Potenciación a corto plazo:* Es un mecanismo no sensorial intrínseco que provoca una amplificación de la respuesta ventilatoria a cualquier estímulo. Se encuentra en las neuronas del tronco cerebral.
- *Mecanismo de retroalimentación:* Integrado por dos grupos:
  - Retroalimentación respiratoria: quimiorreceptores centrales, periféricos y receptores en músculos respiratorios, pulmones y vías aéreas.
  - Retroalimentación no respiratoria: receptores en músculos, senos carotídeos, receptores venosos y cardíacos.

- *Mecanismos termorregulatorios*: algunos de estos mecanismos predominan en cierta fase:
  - FASE I: predominan el estímulo central potenciado por la retroalimentación muscular.
  - FASE II: se le suman la potenciación a corto plazo, la acción del potasio en los senos carotídeos y la de los gases sanguíneos.
  - FASE III: actúan todos los mecanismos.
  - En la recuperación:
    - Fase rápida: desaparición del comando central y de los mecanismos de retroalimentación muscular.
    - Fase lenta: desaparición de la potenciación a corto plazo, manteniéndose el factor estimulador (aumento de potasio) y los otros mecanismos que se van a ir ajustando hasta llegar al estado basal.

### Lo Importante...

- Los ajustes del sistema respiratorio que se producen durante la realización del esfuerzo, una vez que el esfuerzo cesa, vuelven a su estado de reposo.
- La frecuencia respiratoria en reposo es de 12 a 20 respiraciones por minuto (rpm) pero durante el ejercicio intenso la puede alcanzar 35-45 rpm. llegando hasta 60-70 rpm. en deportistas de alto nivel.
- Ante esfuerzos y entrenamientos sostenidos con frecuencia en el tiempo, a medio y largo plazo, el organismo se adapta produciendo cambios anatómicos y fisiológicos, provocando un aumento en el nivel funcional.
- Durante el ejercicio leve o moderado el volumen espirado (VE) aumenta en forma lineal con respecto al consumo de O<sub>2</sub> (VO<sub>2</sub>) y a la producción de CO<sub>2</sub> (VCO<sub>2</sub>).
- En estos casos el cociente VE/VO<sub>2</sub> es igual a 20 - 25. El aumento de la ventilación surge por la necesidad de eliminar el CO<sub>2</sub> producido para lo cual el incremento será mayor en el volumen corriente que en la frecuencia respiratoria.
- Cuando el ejercicio es muy intenso y se instala una acidosis metabólica, la relación VE/VO<sub>2</sub> se hace curvilínea y el aumento de la VE es a expensas de la FR.
- El organismo puede rendir más ante esfuerzos de media y larga duración.
- Las adaptaciones mas importantes son el aumento de la superficie respiratoria y la ampliación de la red capilar pulmonar (mejora de la relación V/Q), y la mejora de la capacidad difusora alveolo-capilar
- La eficiencia de los pulmones es mayor, la frecuencia respiratoria disminuye y la capacidad pulmonar aumenta.
- El VO<sub>2</sub>max aumenta en un 15 a 30 % en los primeros 3 meses de entrenamiento intensivo y se puede llegar a un incremento del 50 % en un periodo de 2 años.

### BIBLIOGRAFÍA

Belman MJ. (1980). *Ventilatory muscle training improves exercise capacity in COPD patients*. Am. Rev. Respir. Dis.; 121:273

Bachman JC. (1968). *Pulmonary function changes which accompany athletic training programs*. Res. Quart.; 39:235.

Boutellier U, Baechel R, Kudent A y otros. (1992). *The respiratory system as an exercise limiting factor in normal trained subjects*. Eur. J. Appl. Physiol.; 65:347-353.

Dempsey J, Hanson P, Pegelow D y otros. (1982). *Limitations to exercise capacity and endurance: pulmonary system*. Can. J. Exerc. Physiol.; 7(1):4-13.

Grimby G. (1969). *Respiration in exercise*. Med. Sci. Sports.; 1:9.

Robinson EP. (1982). *Improvement in ventilatory muscle functions with running*. J. Appl. Physiol.; 52:1400.

Sady S y otros. (1984). *Physiological characteristics of high-ability prepubescent wrestlers*. Med. Sci. Sports Exerc.; 16:72.