

Fisiología del Ejercicio



BLOQUE 2 Respuesta cardiovascular y respiratoria al ejercicio

Tema 6 Sistema pulmonar durante el ejercicio

Prof. Juan Manuel Moreno Ayuso
Departamento de Fisiología
Facultad de Medicina, Espinardo (Murcia)



Objetivos del tema

1. Identificar los principales factores que regulan la ventilación pulmonar durante el ejercicio.
2. Describir la dinámica de la respiración durante el ejercicio.
3. Representar de forma gráfica las relaciones entre la ventilación pulmonar y el consumo de oxígeno durante el ejercicio incremental.
4. Explicar el efecto Bohr y sus beneficios durante la actividad física.
5. Describir cómo la hiperventilación aumenta el tiempo de apnea, pero puede tener consecuencias peligrosas en el buceo deportivo.

Objetivos del tema (continuación)

6. Describir los mecanismos que regulan el pH del ambiente interno.
7. Identificar los efectos del ejercicio físico en el estado ácido-base del organismo.
8. Identificar los ácidos que se producen durante el ejercicio.
9. Describir el efecto del incremento de la ventilación alveolar durante el ejercicio.

Contenido

1. Regulación de la ventilación en el ejercicio
2. Respuesta ventilatoria al ejercicio
 - 2.1. Antes del ejercicio
 - 2.2. Durante el ejercicio
 - 2.2.1. Ejercicio de intensidad constante
 - 2.2.2. Ejercicio de intensidad creciente
 - 2.3. En la recuperación
3. Difusión y transporte en el ejercicio
 - 3.1. Cambios en la difusión.
 - 3.2. Cambios en el transporte de oxígeno

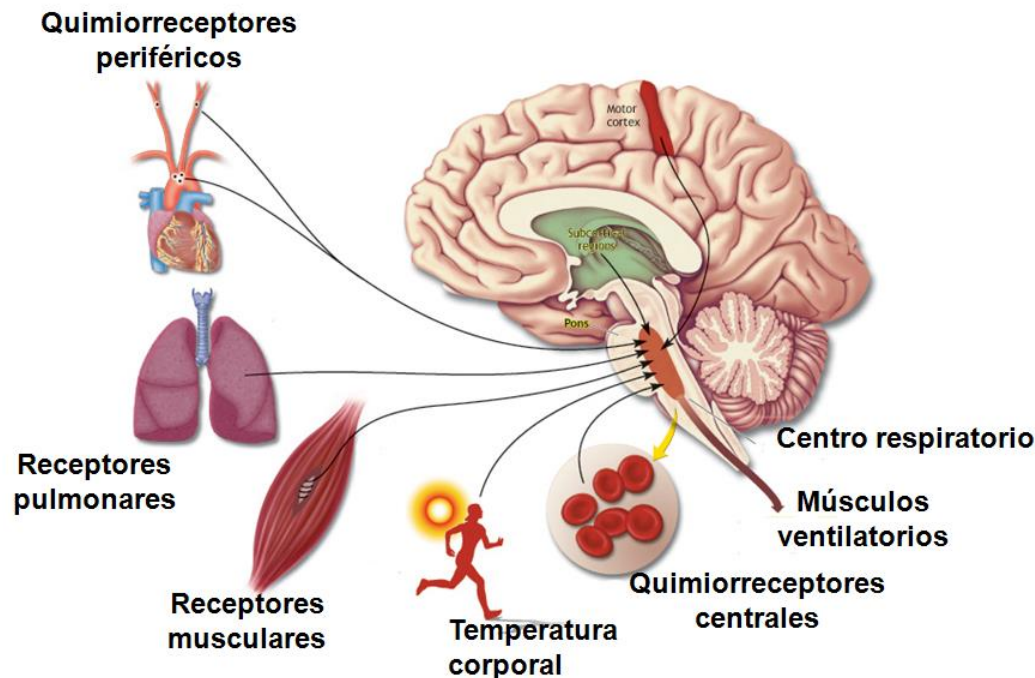
Contenido (continuación)

4. Irregularidades respiratorias
5. Limitaciones respiratorias al rendimiento
6. Defensa frente a los cambios en la concentración de H^+ : amortiguadores, pulmones y riñones
 - 6.1. Definición ácidos y bases
 - 6.2. Amortiguadores
 - 6.3. Amortiguamiento ventilatorio
 - 6.4. Amortiguamiento renal
 - 6.5. pH durante ejercicio intenso

1. REGULACIÓN DE LA VENTILACIÓN EN EL EJERCICIO

Los músculos respiratorios están regulados, a través de neuronas motoras, por un centro respiratorio (**centro inspiratorio** y **centro espiratorio**).

- Este centro establece el ritmo y la profundidad de la respiración.



2. RESPUESTA RESPIRATORIA AL EJERCICIO

La respuesta pulmonar al ejercicio tiene como función principal el **control homeostático** de la concentración de los gases en la sangre arterial.

El sistema respiratorio, durante el ejercicio, ha de realizar las siguientes funciones:

- Contribuir a **oxigenar** y disminuir el **grado de acidez** de una sangre venosa mixta marcadamente hipercapnica e hipoxémica.
- Mantener un bajo grado de **resistencia vascular pulmonar** para evitar el paso de agua al espacio intersticial pulmonar → edema.

El sistema respiratorio trabaja en estrecha relación con el sistema cardiovascular para atender adecuadamente la mayor demanda de oxígeno de los territorios musculares activos.

2.1. ANTES DEL EJERCICIO

En condiciones de reposo,

- La **frecuencia respiratoria** (FR) alcanza valores medios de 12 respiraciones por minuto.
- El **volumen corriente** (VC) suele ser de 0,5 litros de aire por cada respiración.



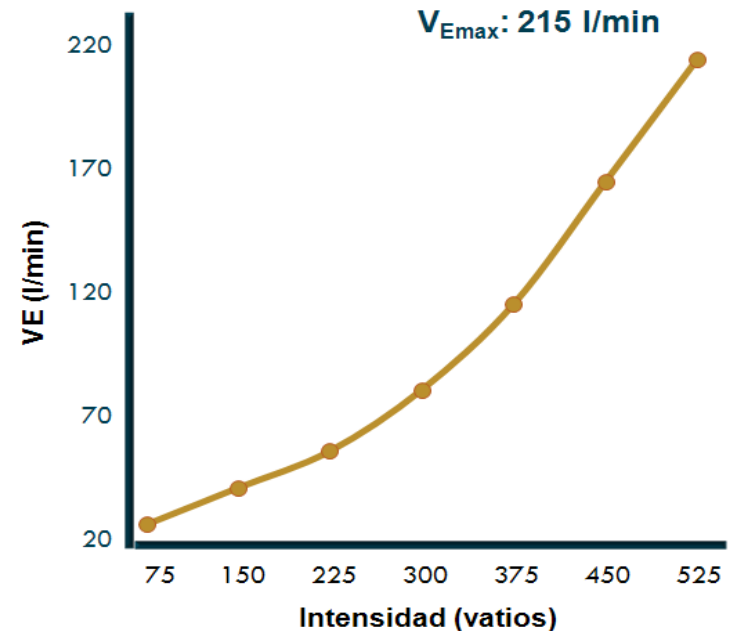
En estas condiciones, el volumen de aire respirado cada minuto, o **ventilación minuto** (VE) es:

$$VE \text{ (l/min)} = FR \times VC = 12 \times 0,5 = 6 \text{ l/min}$$

2.2. DURANTE EL EJERCICIO

La ventilación minuto puede aumentar significativamente incrementando la **frecuencia** de las respiraciones, la **profundidad** de las mismas, o **ambas**.

- Durante el ejercicio intenso, la **FR** de varones sanos y jóvenes suele ser de 35 a 45 respiraciones por minuto.
- Durante el ejercicio, es frecuente hallar cifras de **volumen corriente** de 2 o más litros de aire.

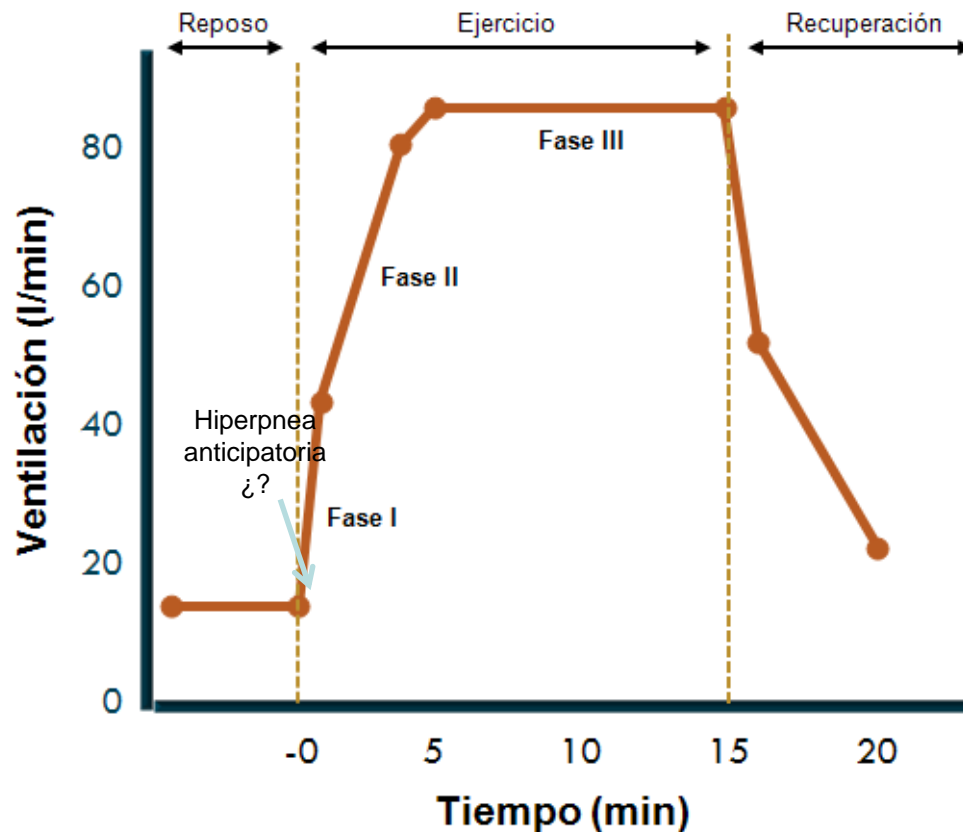


- Estos cambios en la **ventilación pulmonar**, pueden producirse:
 - En actividades físicas de **intensidad constante**.
 - En actividades físicas de **intensidad creciente**.

2.2.1. Ventilación en el ejercicio de tipo estable

La ventilación se modifica **antes, durante y después del ejercicio.**

En la respuesta ventilatoria a una carga constante, se distinguen tres fases:



- **Fase I.** La ventilación aumenta bruscamente.
- **Fase II.** La ventilación aumenta más gradualmente.
- **Fase III.** Fase de estabilización.

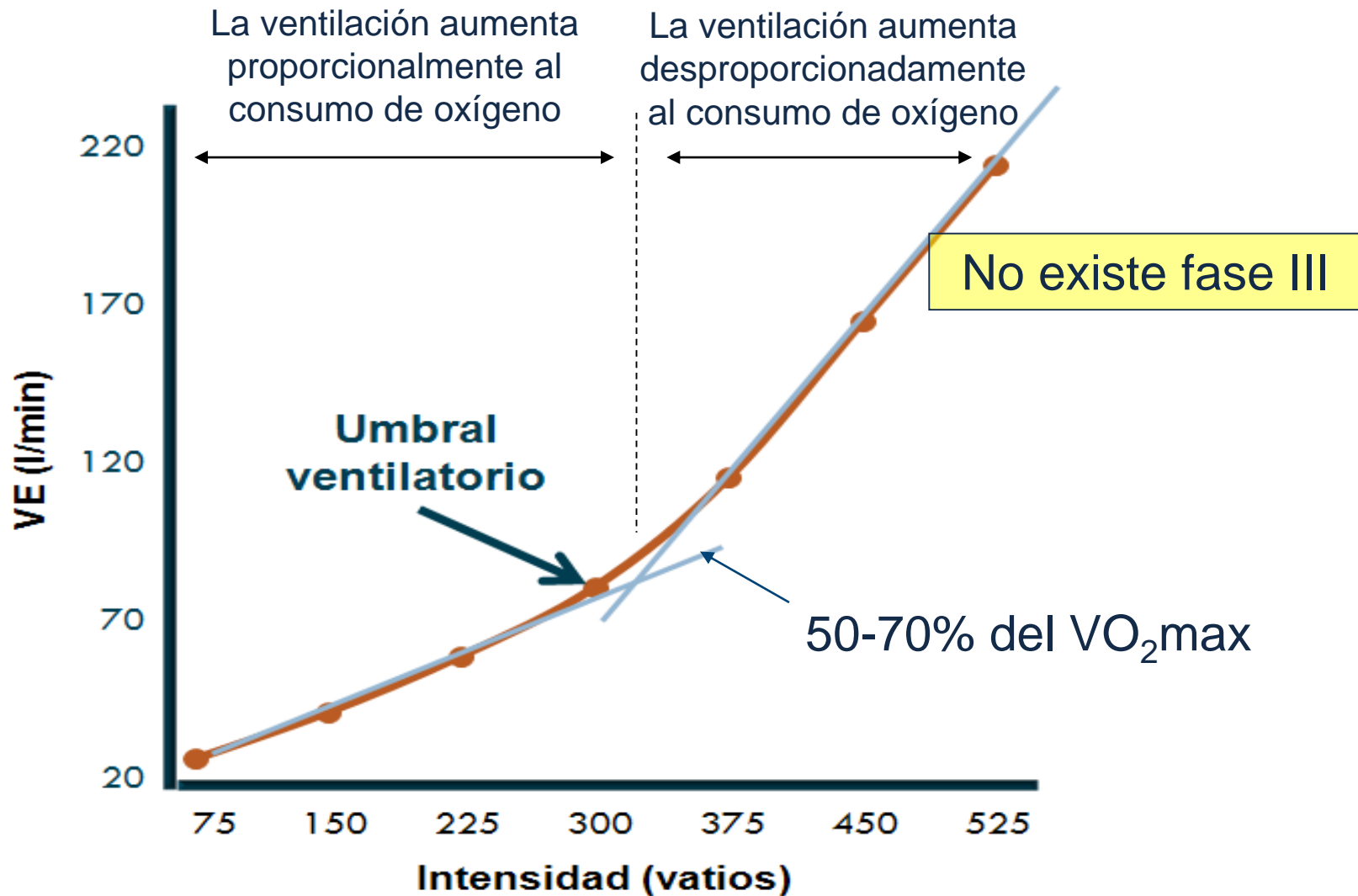
Durante un ejercicio a intensidad baja o moderada ($\dot{V}O_2 < 2,5$ l/min), la ventilación pulmonar aumenta de modo lineal con el consumo de oxígeno; en esta situación la ventilación aumenta por el incremento del VC, y FR.

El **equivalente ventilatorio para el oxígeno ($V_E/\dot{V}O_2$)** representa la relación entre la ventilación minuto y el consumo de oxígeno. Este índice es una medida de la economía de la respiración porque refleja la cantidad de aire respirado por la cantidad de oxígeno consumido.

Los adultos jóvenes sanos mantienen un $V_E/\dot{V}O_2$ de alrededor de 25 durante el ejercicio submáximo hasta alrededor del 55% del $\dot{V}O_{2\text{máx}}$.

Durante el ejercicio de estado estable, el **equivalente ventilatorio para el dióxido de carbono ($V_E/\dot{V}CO_2$)** también permanece relativamente constante porque la ventilación pulmonar elimina el dióxido de carbono producido durante la respiración celular..

2.2.2. Ventilación en ejercicios de intensidad progresivamente creciente



En la figura anterior, se puede ver que, **a medida que aumenta el consumo de oxígeno en el ejercicio, la ventilación minuto aumenta al final de forma desproporcionada.**

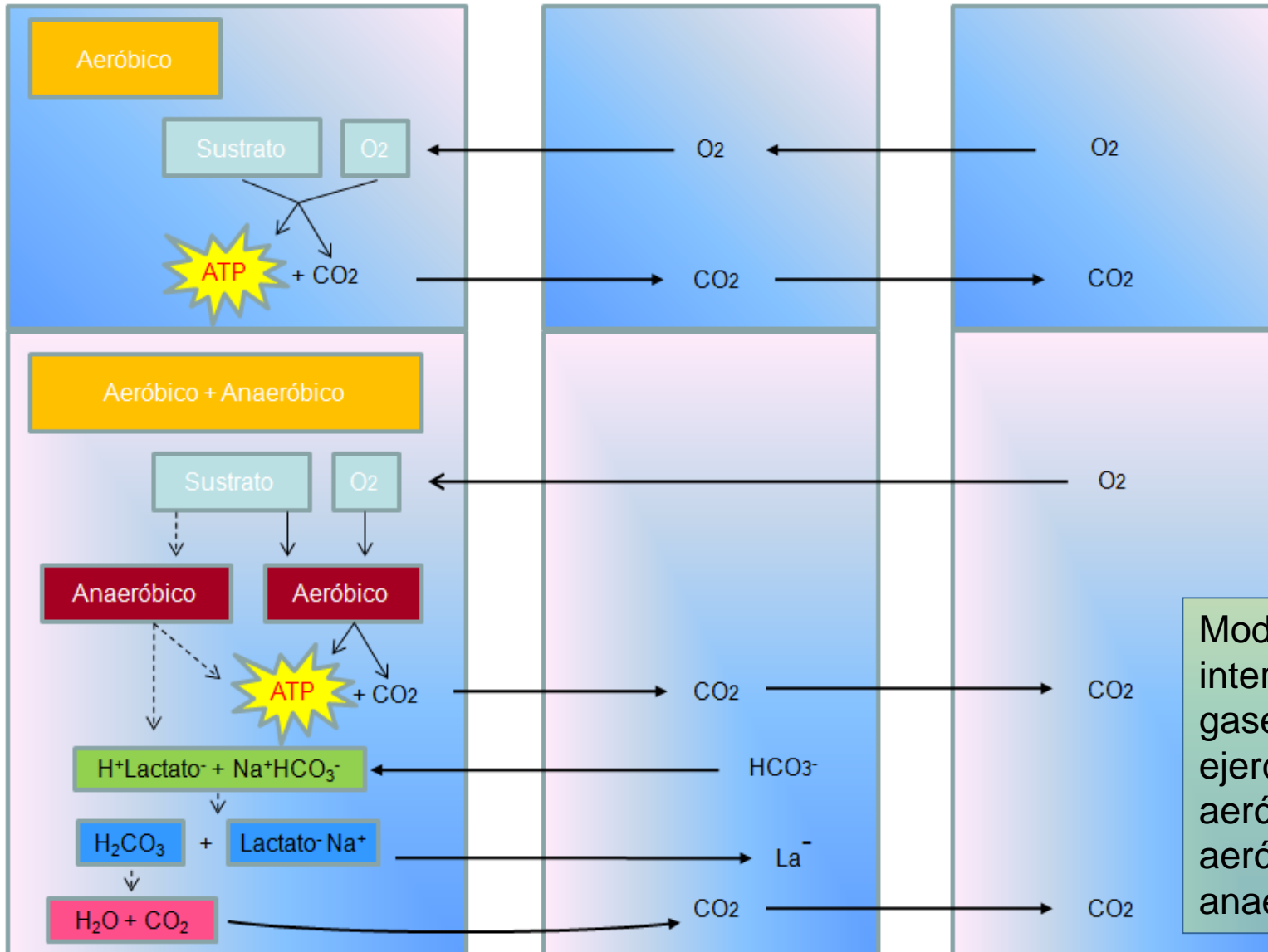
Al punto en el que la ventilación pulmonar aumenta desproporcionadamente con respecto al consumo de oxígeno durante un ejercicio incremental se le denomina **umbral ventilatorio (V_T)**.

A esta intensidad de ejercicio, la ventilación pulmonar ya **no puede acoplarse** con la demanda de oxígeno celular. Más bien, **el “exceso” en la ventilación se relaciona directamente con el aumento de la producción de dióxido de carbono** por el amortiguamiento del lactato que comienza a acumularse por el metabolismo anaeróbico.

Músculo

Sangre

Pulmones



Modelo de intercambio de gases durante ejercicio aeróbico y aeróbico-anaeróbico.

El exceso de dióxido de carbono no metabólico liberado en la reacción de amortiguación estimula la ventilación pulmonar, que **hace aumentar de forma desproporcionada el VE/VO_2** .

El **cociente de intercambio respiratorio (VCO_2/VO_2)** es mayor a **1,00** cuando el dióxido de carbono adicional es exhalado debido al amortiguamiento del ácido láctico.

Patrón respiratorio en ejercicios de intensidad creciente

A bajas intensidades de ejercicio el aumento de VE en sujetos sanos se produce por:

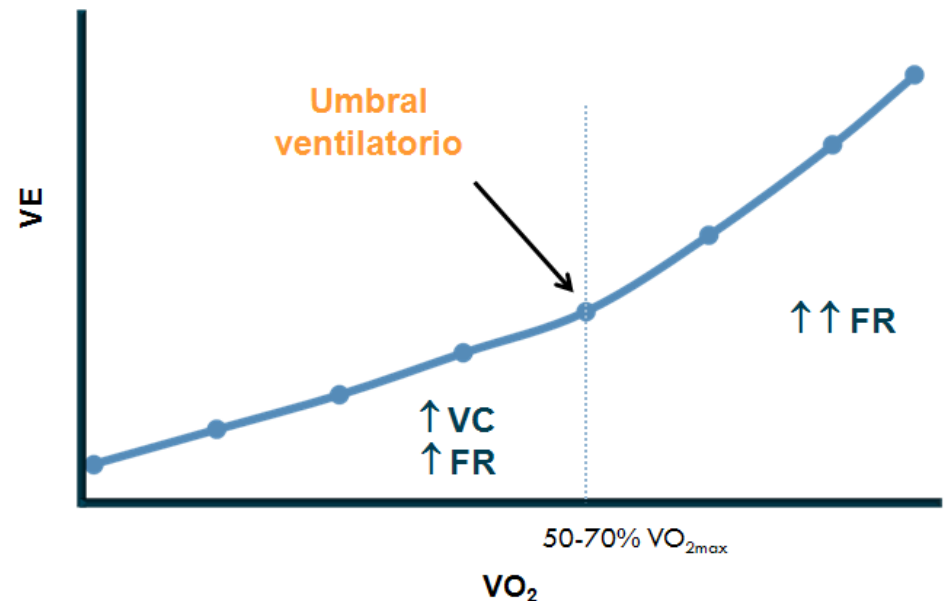
- incrementos tanto del **VC** como de la **FR**.

En ejercicios de alta intensidad, se produce por:

- un aumento, casi exclusivo, de la FR, mientras el VC permanece constante o aumenta ligeramente.

La FR aumenta desde el reposo hasta el esfuerzo máximo. Se observan valores de 35 a 45 respiraciones por minuto en varones jóvenes y sano, y de 60 hasta 70 rpm en atletas muy entrenados.

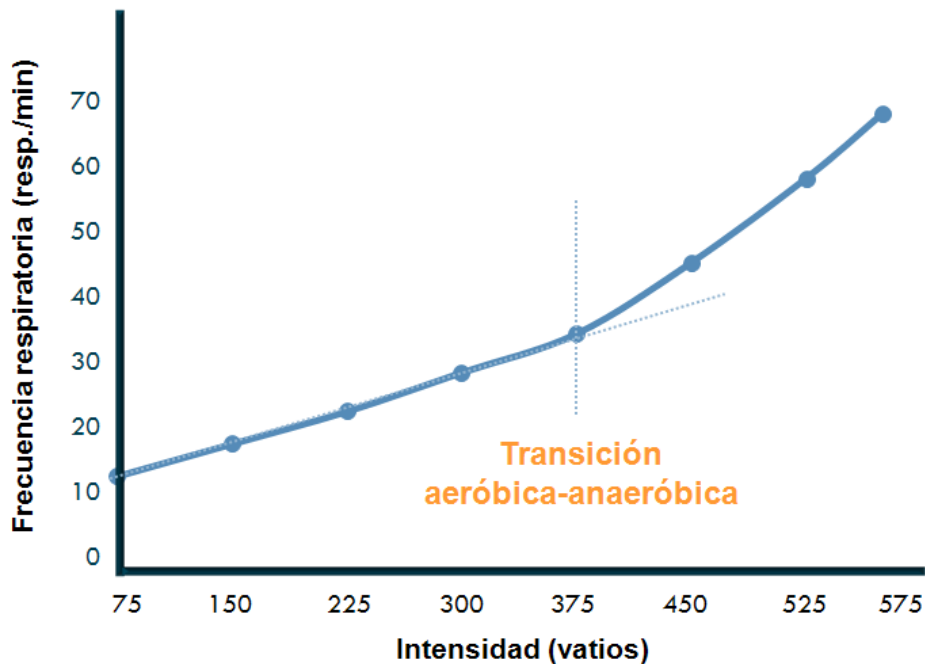
Patrón taquipneico



Patrón respiratorio (continuación)

Este incremento de la FR con la intensidad del esfuerzo no es lineal.

- Existe un punto en el que la FR aumenta desproporcionadamente.
- Este punto parece estar relacionado con la **transición aeróbica-anaeróbica**:

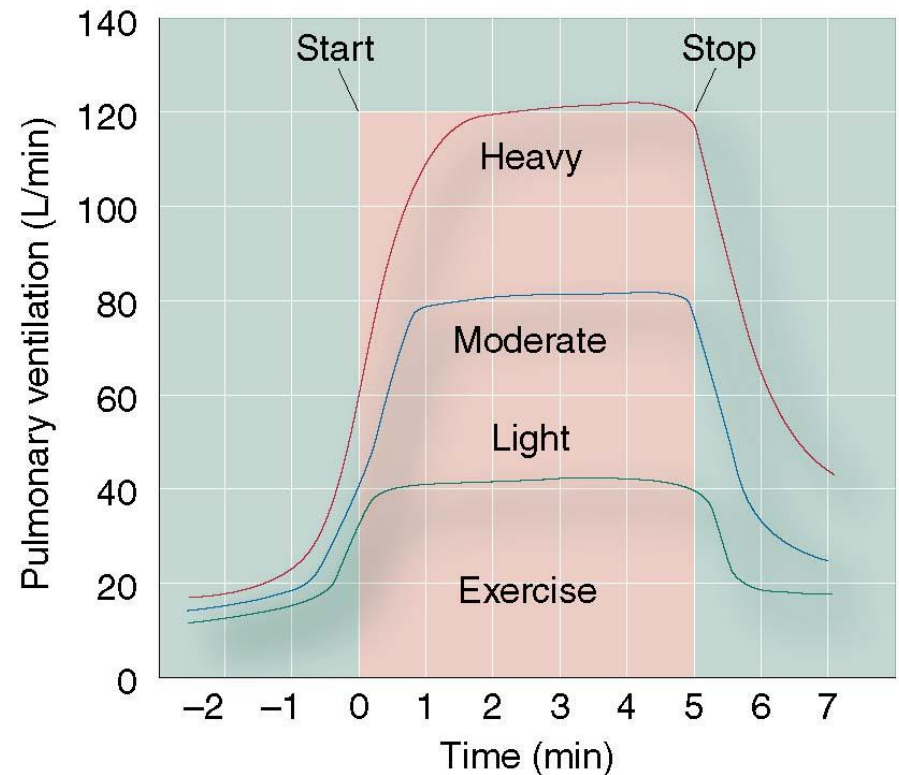


- Por ello, la taquipnea puede considerarse un índice de la aparición de acidosis metabólica en el ejercicio.

2.3. LA VENTILACIÓN DURANTE LA RECUPERACIÓN POSTEJERCICIO

Durante la recuperación tienen lugar principalmente dos cambios en la ventilación:

- Tan pronto como cesa el ejercicio **desciende bruscamente** la **VE**.
- Seguidamente el **descenso** se produce de forma más **gradual** hasta volver a los valores de reposo.



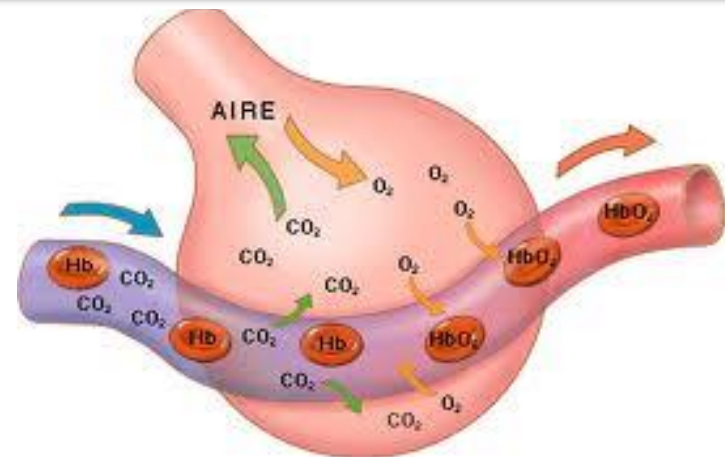
3. DIFUSIÓN Y TRANSPORTE DE LOS GASES EN EL EJERCICIO

3.1. CAMBIOS EN LA DIFUSIÓN DE GASES RESPIRATORIOS DURANTE EL EJERCICIO

El intercambio de gases se produce a través de la membrana respiratoria mediante un proceso de **difusión**.

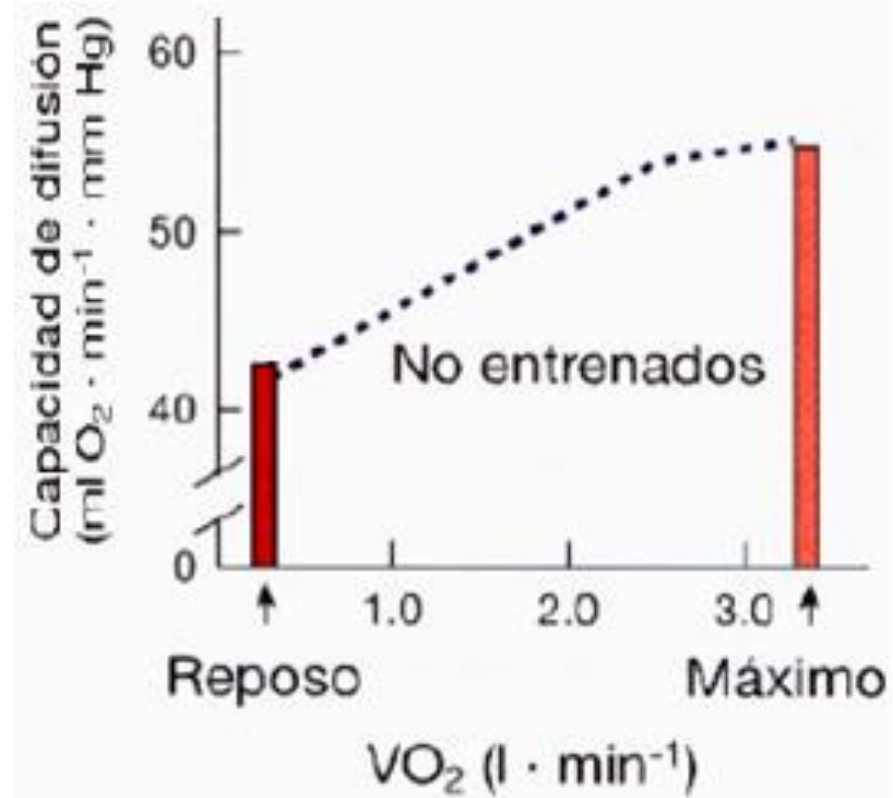
La capacidad de difusión de un gas se define como el volumen de gas que difundirá a través de una membrana para un gradiente de 1 mmHg en un minuto (ml/min/mmHg).

El ejercicio induce un aumento en la superficie de difusión.



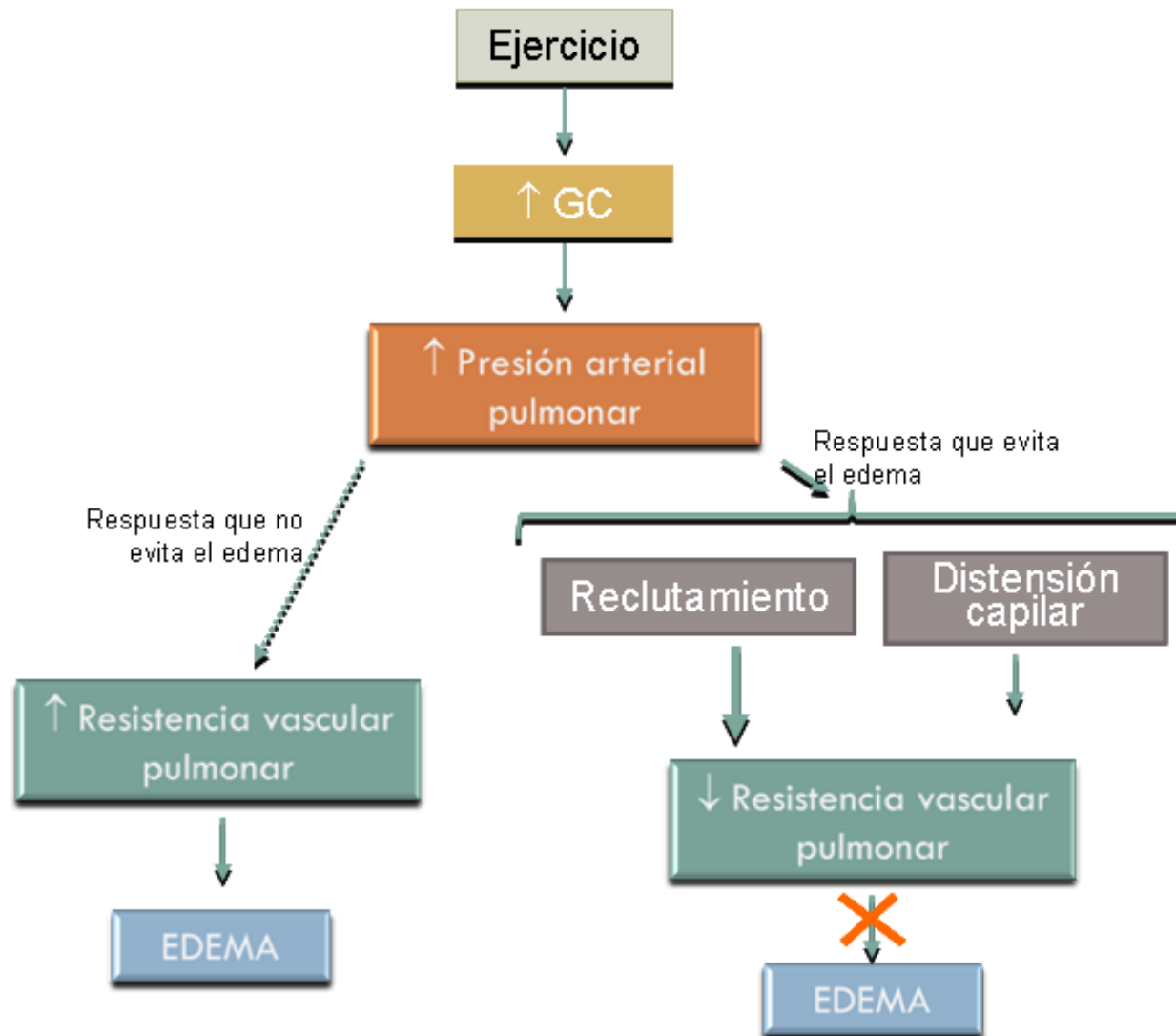
Durante el ejercicio:

- Se produce una **apertura de capilares pulmonares cerrados en reposo**.
- Además, se produce una **mayor dilatación de los capilares ya abiertos**.



La capacidad de difusión aumenta de forma casi lineal con el aumento de la intensidad del ejercicio, llegando a hacer una meseta cerca del esfuerzo máximo

¿Cómo se evita el edema pulmonar durante el ejercicio?



3.2. CAMBIOS EN EL TRANSPORTE DE GASES RESPIRATORIOS: TRANSPORTE DE O₂.

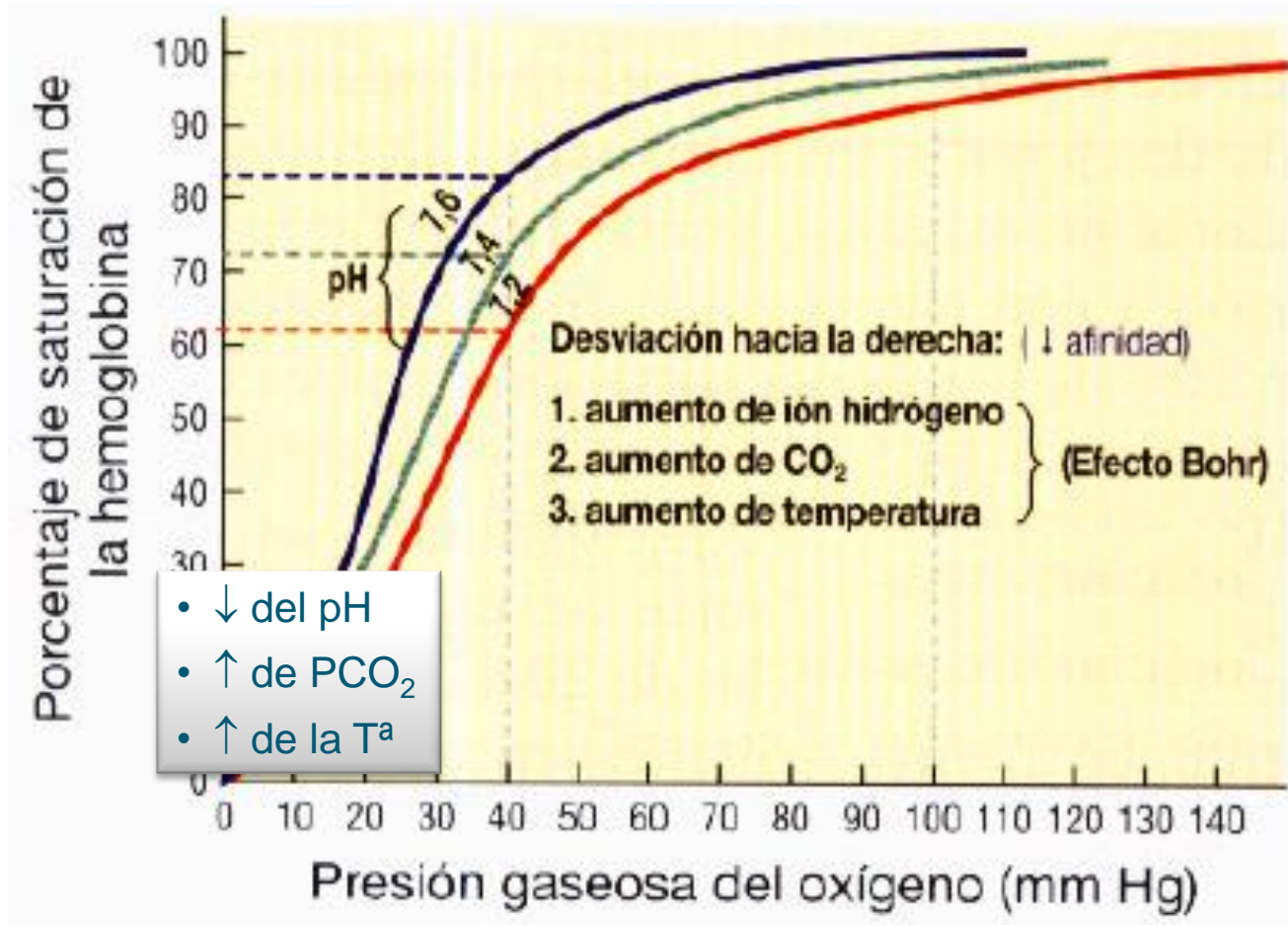
Durante el ejercicio, la concentración de Hb de la sangre aumenta entre un 5-10% (debido a la pérdida de líquidos desde la sangre a los músculos activos).

- La concentración de la Hb cambia de 15 gramos por 100 ml de sangre (situación de reposo) a \approx 16 gramos de Hb por 100 ml de sangre.

1 gramo de Hb puede transportar \sim 1.34 ml de O₂

- Como resultado de esta hemoconcentración del 10%, la capacidad de transporte de oxígeno de la Hb puede aumentar desde 20 ml a \sim 22 ml de O₂ por cada 100 ml de sangre.

Durante el ejercicio, diversos factores desplazan la curva de disociación de la Hb hacia la derecha (**efecto Bohr**).



4. IRREGULARIDADES RESPIRATORIAS DURANTE EL EJERCICIO

Disnea. Respiración corta.

Incapacidad para reajustar la $p\text{CO}_2$ y el pH sanguíneos.



Hiperventilación. Incremento en la ventilación que sobrepasa la necesidad metabólica de oxígeno.

Maniobra de Valsalva.



5. LIMITACIONES RESPIRATORIAS AL RENDIMIENTO

Distintos parámetros fisiológicos indican que normalmente el sistema respiratorio no parece limitar el rendimiento aeróbico:

Relación ventilación/perfusión (VE/Q)			
	reposo		ejercicio máximo
VE	5 l/min	→	200 l/min (aumenta 35 veces)
Q	5 l/min	→	30 l/min (aumenta 6 veces)
VE/Q	1	→	6,66 (aumenta 6 veces)

Equivalente respiratorio (VE/VO ₂)			
	reposo		ejercicio máximo
VE	5 l/min	→	200 l/min (aumenta 35 veces)
VO ₂	0,25 l/min	→	5 l/min (aumenta 20 veces)
VE/VO ₂	20	→	40 (aumenta 2 veces)

- La VE no limita el rendimiento aeróbico.
- La capacidad de aumentar la ventilación pulmonar es relativamente mayor que la capacidad de aumentar el metabolismo oxidativo.

Sin embargo, estudios más recientes:

- Confirman que en sujetos no entrenados o moderadamente entrenados, no parece haber limitación del sistema respiratorio.
- En atletas **altamente entrenados** en resistencia aeróbica, ciertos datos, como la disminución de la PO₂ y la imposibilidad de mantener la homeostasis del equilibrio ácido-base sugieren la existencia de limitación respiratoria o pulmonar.

6. REGULACIÓN DEL PH

6.1. Definición de ácidos y bases

- Las moléculas que contienen átomos de hidrógeno que pueden **liberar** iones **hidrógeno** en una solución reciben el nombre de **ácidos**.
 - Ejemplo: el **ácido clorhídrico** (HCl) se ioniza en el agua para formar iones hidrógeno (H^+) e iones cloruro (Cl^-).
 - Ejemplo: el **ácido carbónico** (H_2CO_3) se ioniza en el agua y forma H^+ e iones bicarbonato (HCO_3^-).
- Una **base** es un ión o una molécula que puede **aceptar** un H^+ .
 - Ejemplo: el ión **bicarbonato**, HCO_3^- , es una base ya que puede aceptar un H^+ para formar H_2CO_3 .

Las **proteínas** del organismo también funcionan como bases ya que algunos de los aminoácidos que las forman tienen cargas negativas netas que aceptan fácilmente H^+ .

Son tres los sistemas que regulan la concentración de H^+ en los líquidos orgánicos para evitar tanto la acidosis como la alcalosis.

1. Los **sistemas de amortiguación acidobásicos** químicos de los líquidos orgánicos.

Se combinan de forma inmediata con un **ácido** o con una **base** para evitar cambios excesivos en la concentración de H^+ .

2. El **centro respiratorio**, que regula la eliminación de CO_2 (y por tanto de H_2CO_3) del líquido extracelular.

3. Los **riñones**, que pueden excretar una orina tanto ácido como alcalina, lo que permite normalizar la concentración de H^+ en el líquido extracelular en casos de acidosis o alcalosis.

6.2. Amortiguadores

Un amortiguador es cualquier sustancia capaz de unirse de manera reversible a los H^+ .



La **hemoglobina** de los eritrocitos amortigua los H^+ producidos por la reacción del CO_2 con H_2O .

- Cada ión H^+ amortiguado por la hemoglobina genera un ión **bicarbonato** en el interior del eritrocito que sale del mismo.
- Las grandes cantidades de **bicarbonato** producidas a partir del CO_2 metabólico crean el **sistema de amortiguadores de pH extracelular más importante del cuerpo**.

6.2.1. Amortiguador bicarbonato

El sistema de amortiguamiento del bicarbonato está formado por el **ácido carbónico** y **bicarbonato de sodio** en solución. Durante el amortiguamiento, el ácido clorhídrico (ácido fuerte) se convierte en ácido carbónico, mucho más débil, al combinarse con bicarbonato de sodio en la siguiente reacción:



El bicarbonato de sodio en el plasma ejerce una fuerte acción de amortiguamiento sobre el **ácido láctico** para formar lactato de sodio y ácido carbónico.



Cualquier **incremento** en la **concentración de H⁺** por la disociación de ácido carbónico hace que la reacción de disociación se mueva en dirección inversa y libre dióxido de carbono en solución:

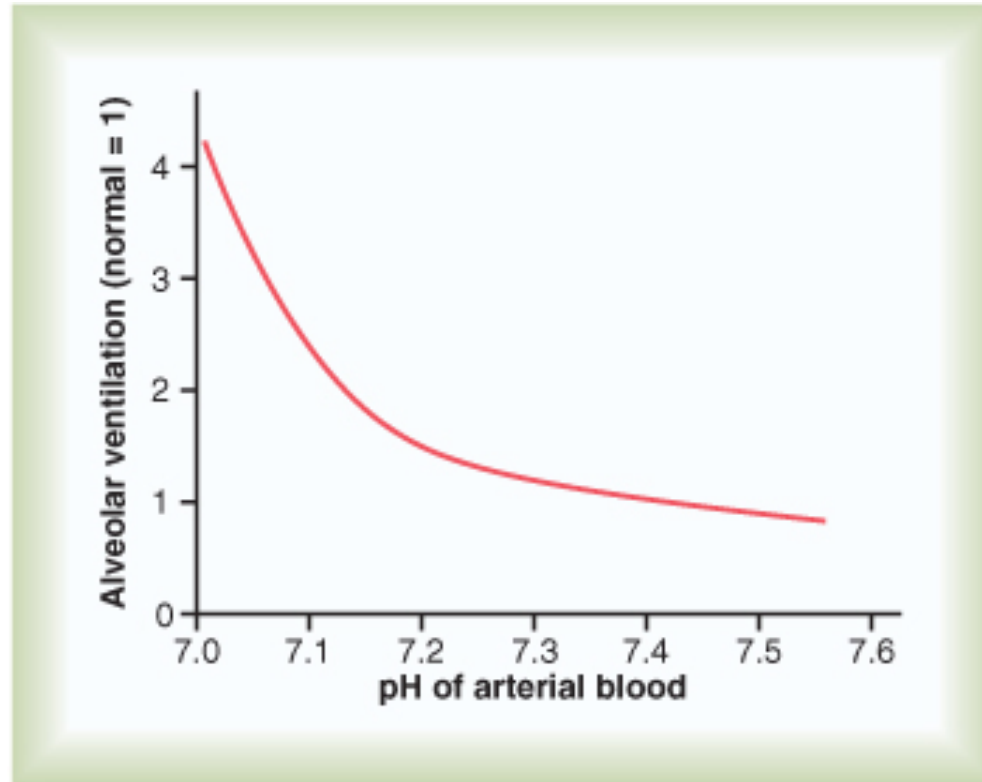


Un incremento de dióxido de carbono plasmático o en la concentración de H⁺ **estimula inmediatamente la ventilación** para eliminar el exceso de dióxido de carbono.

A la inversa, una disminución en la concentración plasmática de H⁺ **inhibe el estímulo ventilatorio** y mantiene el dióxido de carbono, que luego se combina con agua para aumentar la acidez (ácido carbónico) y normalizar el pH.



- El aumento de la concentración de H^+ estimula la ventilación alveolar



- La magnitud de la ventilación por unidad de cambio del pH es mucho mayor cuando los valores del pH son bajos

La compensación respiratoria al ascenso del pH no es tan eficaz como su respuesta a una reducción acentuada del pH

6.3. Amortiguamiento ventilatorio

El aumento de la cantidad de H^+ libres en el líquido extracelular y en el plasma, estimula directamente el centro respiratorio para incrementar la ventilación alveolar (**hiperventilación**).

Este rápido ajuste reduce la P_{CO_2} alveolar y hace que el dióxido de carbono sea eliminado de la sangre. Los niveles bajos de dióxido de carbono en plasma aceleran la recombinación H^+ y de HCO_3^- , por lo que disminuye la concentración de H^+ libres en el plasma, aumentando la **alcalinidad**.

Por el contrario, al reducir la ventilación alveolar normal (**hipoventilación**) se incrementa la **acidez** de la sangre.

La magnitud potencial del amortiguamiento ventilatorio es el doble del efecto combinado de todos los amortiguadores químicos del cuerpo.

6.4. Amortiguamiento renal

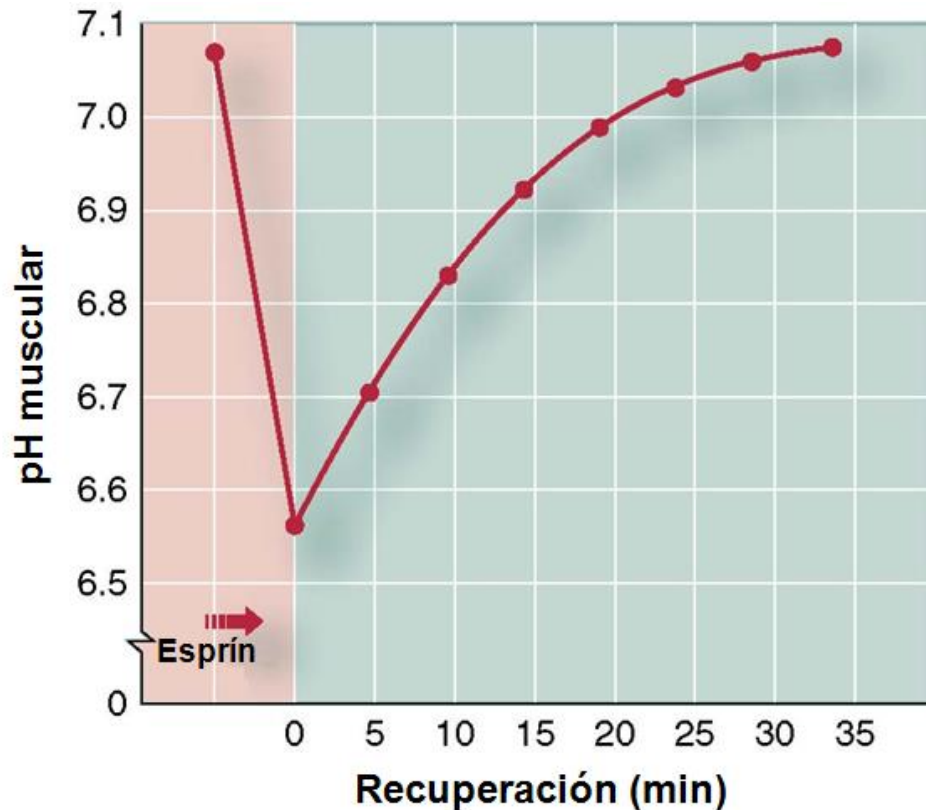
Los amortiguadores químicos solo afectan de modo temporal el exceso de ácido.

La excreción de H^+ por los riñones, aunque relativamente lenta, proporciona una **importante defensa a largo plazo** que mantiene la reserva de amortiguadores del cuerpo conocida como **reserva alcalina**.

En este punto, los riñones son los guardianes finales que preservan la función normal.

Los túbulos renales regulan la acidez a través de reacciones químicas complejas que segregan amoníaco e H^+ en la orina y luego reabsorben álcalis, cloruro y bicarbonato.

6.5. pH durante el ejercicio intenso



La **regulación ácido-base** es más difícil durante ejercicios intensos breves repetitivos que elevan el lactato a niveles superiores a 20 mM.

Recuperación de los niveles de pH:

- Por la amortiguación química (principalmente ión bicarbonato).
- Eliminación respiratoria del exceso de dióxido de carbono.