

SECCIÓN VII

FISIOLOGÍA INTEGRADA

CAPÍTULO 23 Análisis integrado de la respuesta del organismo al ejercicio

CAPÍTULO 24 Ergoespiometría: paradigma de análisis integrado de la respuesta del organismo al ejercicio

Capítulo 23

Análisis integrado de la respuesta del organismo al ejercicio



De forma constante, a lo largo de los capítulos anteriores se ha insistido en la idea de integración, a fin de entender cómo el organismo responde al ejercicio. De forma elemental, la idea integradora que persigue este capítulo se plasma en dos sistemas: sistema de aporte de oxígeno y sistema de aporte de energía. Los componentes individuales del sistema de aporte de oxígeno se abordan, principalmente, en los capítulos 2 y 4 (bombeo y distribución del oxígeno), en los capítulos 6 y 8 (captación del oxígeno) y en el capítulo 7 (transporte del oxígeno). En cuanto a los componentes individuales del sistema de aporte de energía, éstos se abordan en el capítulo 13 (asimilación del combustible) y en los capítulos 15 y 16 (liberación y utilización de sustratos). Durante un ejercicio de intensidad submáxima y duración prolongada se produce una alteración de la homeostasis, de manera que es necesario controlar determinadas variables: estado ácido-básico (cap. 12), glucemia (caps. 15 y 18) y concentración de electrolitos (caps. 9, 11 y 18). Finalmente, el control tanto del movimiento como de los aparatos y sistemas del organismo es regulado por el sistema nervioso (caps. 20 y 21).

INTRODUCCIÓN

En los capítulos precedentes se ha expuesto cómo cada sistema o aparato contribuye a que el organismo en su conjunto responda de forma adecuada al estrés que supone el ejercicio, principalmente el dinámico. Se ha centrado la atención en esta forma de ejercicio, debido a tres razones:

1. Es la forma más habitual en que se mueve cualquier animal, incluido el ser humano.
2. Desde el punto de vista de la salud, el ejercicio dinámico es el que se aconseja en todos los programas de prescripción de ejercicio.
3. Desde el punto de vista fisiológico, el ejercicio realizado con una gran cantidad de musculatura activa pero con un desarrollo moderado de fuerza involucra a todos los órganos, incluso a los que aparentemente no intervienen directamente, por ejemplo, el riñón o el aparato digestivo. Desde el punto de vista de una concepción fisiológica, el ejercicio dinámico de duración prolongada es verdaderamente un reto intelectual.

En este capítulo se tratará de forma integrada cómo se ajustan los órganos y sistemas para poder llevar a cabo el movimiento, variando lo menos posible las condiciones del medio interno. El medio interno es un concepto acuñado por Claude Bernard, a partir del cual Cannon estableció

el concepto de homeostasis. Ésta consiste en las reacciones que se producen en el organismo ante un cambio en las condiciones internas o externas y que tienen por objeto mantener o restaurar las condiciones del medio interno en relación con unas variables determinadas. A lo largo de los capítulos precedentes se han visto algunas de estas variables: equilibrio ácido-básico (cap. 12), glucemia (caps. 15 y 18) y concentración de electrolitos (caps. 9, 11 y 18). El ejercicio físico es una de estas condiciones que alteran el equilibrio del medio interno y, por lo tanto, la homeostasis. No obstante, esta variación de la homeostasis no constituye en realidad una alteración, sino una necesidad. Por esto, se puede decir que durante el ejercicio dinámico de larga duración el organismo entra en un nuevo estado de equilibrio.

La visión de integración que se ofrece en este capítulo determina que los órganos y tejidos se agrupen funcionalmente, a fin de que el **sistema locomotor** pueda desarrollar y mantener la contracción-relajación de la musculatura implicada.

El sistema de aporte de oxígeno (SAO) estaría formado por un sistema de captación (aparato respiratorio), un sistema de transporte (sangre) y un sistema de bombeo y distribución (sistema cardiovascular). El objetivo «conjunto» del SAO es suministrar el oxígeno necesario para la realización de los procesos de oxidación-reducción. El sistema de aporte de energía (SAE) estaría constituido por un sistema de

asimilación del combustible (aparato digestivo) y un mecanismo de liberación y utilización de energía (metabolismo y sistema endocrino). Aunque el sentido unitario del SAO es fácil de comprender, no lo es tanto la integración del aparato digestivo, el metabolismo y el sistema endocrino. Por lo tanto, en este capítulo se tratará de forma integrada el papel funcional del SAO y del SAE durante el ejercicio. El «nuevo estado de la homeostasis» durante el ejercicio prolongado determina que tanto el SAO como el SAE deben responder de forma integrada.

Finalmente, la visión integrada en este capítulo permite formular la siguiente pregunta: ¿dónde y cómo se integra toda la información para que el organismo responda de forma coordinada? Una primera aproximación general conduce a la idea de que es el sistema nervioso central (SNC) el que realiza esta función fundamental. Como se ha visto en los capítulos correspondientes a la regulación de cada uno de los sistemas y aparatos, el sistema nervioso es imprescindible para el control de las funciones de cada uno de ellos. La **figura 23-1** muestra un esquema simple de la integración. La señal de retroalimentación indicaría al sistema de control sobre la situación global del organismo, con el objeto de ajustar la relación demanda/aporte de energía. A fin de simplificar, se han omitido del esquema otros órganos, igualmente importantes, que pueden intervenir (p. ej., el riñón).

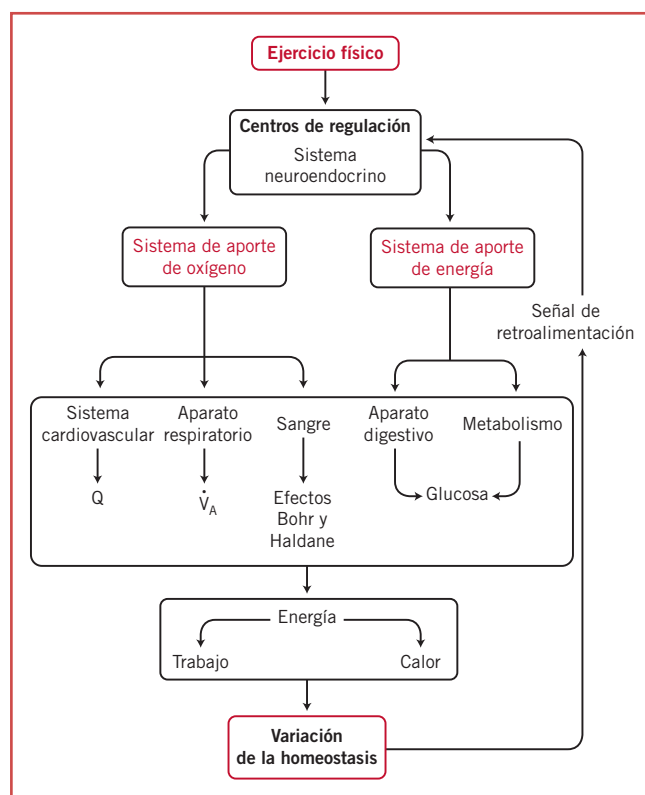


Figura 23-1. Visión integrada de la respuesta al ejercicio. Se muestra cómo la acción coordinada de los dos grandes sistemas considerados (sistema de aporte de oxígeno y sistema de aporte de energía) permite la realización de un determinado trabajo. La mayor actividad generalizada del organismo condiciona una variación de la homeostasis, que es analizada por los centros de control. Q: gasto cardíaco; V_A : ventilación alveolar. (Efectos Bohr y Haldane: v. Introducción, cap. 7.)

SISTEMA DE APOORTE DE OXÍGENO

■ Concepto y parámetros del sistema de aporte de oxígeno

Cada uno de los aparatos o sistemas que intervienen para que el oxígeno **llegue** a todos los territorios según la demanda metabólica de éstos determina uno o varios parámetros que, en un primer análisis elemental, son los siguientes: ventilación, gasto cardíaco y hemoglobina (**Fig. 23-2**).

El **aparato respiratorio** controla la cantidad de aire que ambos pulmones movilizan en la unidad de tiempo. El **sistema cardiovascular** controla la cantidad de sangre que el corazón bombea y que la circulación distribuye en la unidad de tiempo. La **hemoglobina** interviene controlando la cantidad de oxígeno transportada por cada 100 mL de volumen de sangre. El resultado final de la respuesta integrada permite que los tejidos realicen el consumo de oxígeno ($\dot{V}O_2$) en función de sus necesidades metabólicas. En reposo, el $\dot{V}O_2$ de todo el organismo en conjunto es de alrededor de 300 mL/min en valores absolutos o de 3 mL/kg/min en valores relativos al peso corporal. En esfuerzo, el $\dot{V}O_2$ se incrementa proporcionalmente a la intensidad del esfuerzo, hasta alcanzar valores de 10 a 15 veces los de reposo (de los 300 mL/min en reposo a los 4.500 mL/min en esfuerzos máximos en individuos jóvenes entrenados). A continuación se describen brevemente los mecanismos que permiten este incremento tan notable del $\dot{V}O_2$ (**Fig. 23-3**):

1. La ventilación se multiplica por unas 12 veces (de 6 L/min a 72 L/min). En atletas, durante un esfuerzo intenso se pueden alcanzar ventilaciones de hasta 150 L/min.

2. La concentración de oxígeno arterial implica un hecho muy importante: el aumento del $\dot{V}O_2$ total no puede realizarse a expensas de una mayor concentración de oxígeno, pues la hemoglobina se encuentra saturada prácticamente al 100% en reposo. Sin embargo, sí aumenta la extracción de oxígeno por los tejidos, como lo demuestra el aumento de la diferencia arteriovenosa de oxígeno (se multiplica por 3):

- Diferencia arteriovenosa en reposo: 20 mL/100 mL – 15 mL/100 mL = 5 mL/100 mL.
- Diferencia arteriovenosa en esfuerzo: 20 mL/100 mL – 5 mL/100 mL = 15 mL/100 mL.

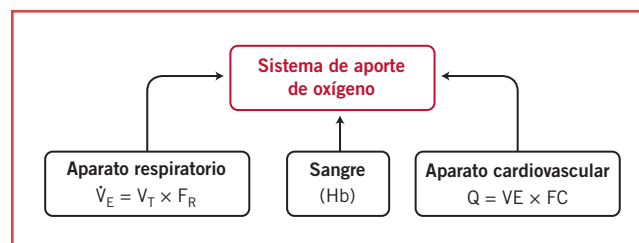


Figura 23-2. Elementos integrantes del sistema de aporte de oxígeno así como de las variables que determinan la acción de cada uno de ellos en el suministro del oxígeno a los tejidos y órganos. FC: frecuencia cardíaca; F_R : frecuencia respiratoria; Hb: hemoglobina; Q: gasto cardíaco; V_T : volumen corriente; V_E : ventilación total; V_E : volumen de eyección o sistólico.

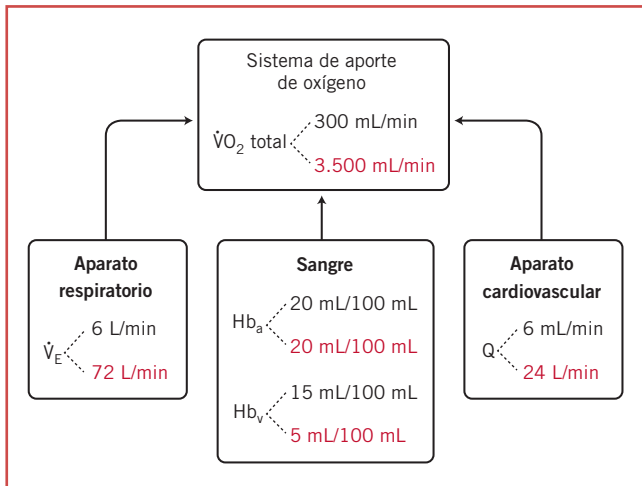


Figura 23-3. Esquema simplificado del mecanismo de incremento del consumo de oxígeno ($\dot{V}O_2$ total) en más de 10 veces. La ventilación total (\dot{V}_E) aumenta 12 veces, y el gasto cardíaco (Q), 4 veces; la saturación de la sangre venosa (Hb_V) desciende 3 veces. Las cifras resaltadas en rojo corresponden a los valores alcanzados o de partida durante un ejercicio intenso. Hb_A : saturación de la sangre arterial.

En atletas, esta diferencia arteriovenosa de oxígeno puede alcanzar, en algunos casos, los 18 mL/100 mL.

3. El gasto cardíaco se multiplica por 4 veces (6 L/min a 24 L/min). En casos de atletas de fondo, el gasto cardíaco puede llegar a estar próximo a los 40 L/min.

Por lo tanto, cuando una persona realiza un ejercicio físico, aumentan las necesidades metabólicas de los músculos y, por consiguiente, el $\dot{V}O_2$ local y total, puesto que la masa muscular representa un elevado porcentaje del peso total. Este aumento del $\dot{V}O_2$ se debe a un incremento de la ventilación total, un aumento del gasto cardíaco y un incremento de la diferencia arteriovenosa de oxígeno, los que quedan multiplicados por un valor correspondiente a la intensidad del ejercicio. Por último, el aumento del $\dot{V}O_2$ muscular no podría producirse si la distribución de la sangre fuera la misma que en reposo. El flujo sanguíneo se deriva hacia el territorio muscular, y puede multiplicarse hasta por unas 50 veces.

■ Modelo de control de la función del sistema de aporte de oxígeno

El funcionamiento coordinado del aparato respiratorio y del sistema cardiovascular durante un ejercicio dinámico permite al organismo el aporte y la utilización del oxígeno. Al ser imprescindibles el sistema cardiovascular y el aparato respiratorio en el funcionamiento integrado, la forma de control no puede adscribirse sólo a uno de ellos. Tanto la ventilación como el gasto cardíaco son objeto de control de los sistemas de regulación descritos en los capítulos 4 y 8.

De cualquier manera, el modelo de respuesta obedece a una función lineal. Las relaciones gasto cardíaco/intensidad y presión arterial media/intensidad siguen una función lineal (Fig. 1-6 del cap. 1 y Fig. 2-14 del cap. 2). La relación ventilación alveolar/intensidad también sigue una función

lineal. Como se expuso en los capítulos correspondientes, se admite la relación lineal gasto cardíaco/intensidad, pero no sucede lo mismo con la relación ventilación/intensidad. Como se ha señalado en el capítulo 8, a partir de una determinada intensidad, la ventilación experimenta un incremento considerable y deja de guardar una relación lineal con la intensidad.

Las razones de ese diferente comportamiento de los mecanismos de regulación cardiovascular y respiratoria son desconocidas. Con independencia de las justificaciones fisiológicas tradicionales dadas (intento de compensación de la acidosis metabólica mediante hiperventilación), se desconoce la explicación al mencionado diferente comportamiento cardiovascular y respiratorio. Se podría argumentar (v. Difusión y relación ventilación/perfusión, cap. 7) que existe una desproporción entre la ventilación y la perfusión, de manera que los mecanismos de regulación respiratoria pueden determinar una mayor respuesta ventilatoria, mientras que los mecanismos de control cardiovascular se encuentran limitados. De cualquier forma, y efectuando una simplificación, se puede admitir como modelo la función lineal:

$$\text{Variable del SAO} = ax + b$$

Un modelo lineal del SAO permite realizar incrementos de una determinada variable en función de las necesidades y, además, es sencillo para explicar las diferencias a consecuencia del entrenamiento. Para una misma variable del SAO, un mayor valor de la pendiente implica una pérdida de la eficiencia para una misma intensidad relativa. Por otra parte, cualquier «pérdida» del comportamiento lineal podría significar una señal para que los mecanismos de gobierno del SAO puedan modificar la respuesta.

SISTEMA DE APOORTE DE ENERGÍA

■ Concepto y parámetros del sistema de aporte de energía

La visión integrada del aparato digestivo, el metabolismo y el sistema neuroendocrino es más compleja y menos intuitiva que la realizada para el SAO. El aparato digestivo permite asimilar los nutrientes complejos, adquiridos del entorno, en moléculas simples (monosacáridos, aminoácidos y triacilglicéridos) (Fig. 23-4). Aunque cada célula y cada tejido disponen de la capacidad para «controlar» el metabolismo, se hace necesario un sistema que controle el aporte energético al organismo en su conjunto. Esta función es desarrollada por el sistema neuroendocrino.

Así como en el caso del SAO se puede adscribir un parámetro para cada uno de los sistemas, no se puede hacer lo mismo en el caso del SAE. Por ello, en la figura 23-4 no aparecen variables para cada uno de los sistemas. El aparato digestivo, con la excepción de su papel en la hidratación, permanece **silente** durante el ejercicio físico. No obstante, la actividad del hígado durante el ejercicio es fundamental, pues interviene en el control de la glucemia y en el aporte de glucosa a los tejidos. La liberación y la utilización de la ener-

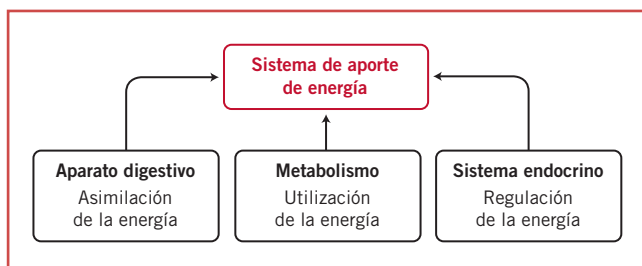


Figura 23-4. Elementos integrantes del sistema de aporte de energía. A diferencia del sistema de aporte de oxígeno, es difícil adscribir una variable simple a cada uno de los elementos.

gía de los combustibles puede ser estimada por la relación: producción de dióxido de carbono/consumo de oxígeno ($\dot{V}CO_2/\dot{V}O_2$) (cociente respiratorio). El cociente respiratorio puede indicar o sugerir la actividad metabólica global y el control neuroendocrino de ésta. Sin embargo, el cociente respiratorio es un indicador del tipo de combustible empleado, no de la actividad del SAE.

■ Modelo de control de la función del sistema de aporte de energía

El funcionamiento coordinado del hígado, el metabolismo y el sistema endocrino durante el ejercicio de intensidad submáxima y duración prolongada tiene por objeto el control de la concentración de glucosa en sangre.

El hígado es el único órgano capaz de liberar glucosa a la sangre mediante un mecanismo complejo, tanto de regulación interna (enzimática) como externa (hormonal). Así, el hígado es el regulador de la glucemia. Durante el ejercicio, la glucemia es una variable que debe mantenerse constante. La acción de las hormonas «amplifica» la señal de retrocontrol celular y además permite integrar los metabolismos de diferentes tipos de tejidos y órganos. Las hormonas glucorreguladoras son operativas sobre los tejidos adiposo y muscular y también actúan en el hígado. La **figura 23-5** muestra un esquema de control de la glucemia durante un ejercicio prolongado (v. también la **Fig. 18-5 B** del cap. 18). Con fines prácticos, el control de la absorción intestinal es muy importante en ejercicios muy prolongados.

HOMEOSTASIS DURANTE EL EJERCICIO

■ Concepto de homeostasis y mecanismo de funcionamiento

La homeostasis es un concepto más complejo que el definido en la introducción, pues no todas las variables tienen el mismo intervalo de fluctuación. En efecto, algunas variables de la homeostasis pueden oscilar considerablemente y, en otras, un mínimo cambio puede conducir a la muerte. Por lo tanto, las variables se pueden clasificar en:

1. *Variables plásticas u oscilatorias*: son aquellas que, aun siendo variables fisiológicas que son objeto de control, pue-

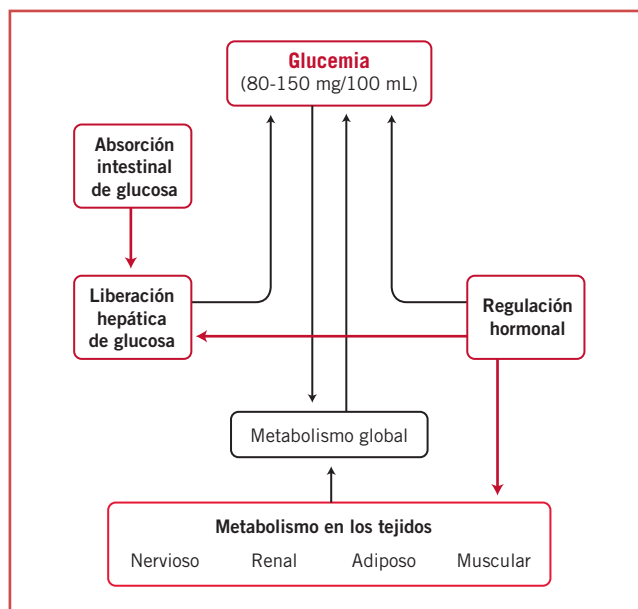


Figura 23-5. Desde el punto de vista de la homeostasis, durante un ejercicio de duración prolongada, el objetivo es el control de la glucemia. En la figura se ha resaltado, con flechas de color rojo, la importancia de la regulación hormonal sobre el hígado, la actividad metabólica de órganos y tejidos activos y la absorción intestinal.

den presentar una oscilación grande pero momentánea respecto al valor de referencia. Cuanto mayor es la amplitud de la oscilación, mejor garantizan la supervivencia del animal. Por ejemplo, el gasto cardíaco y la ventilación pueden incrementarse de forma considerable durante el ejercicio dinámico (**Fig. 23-3** y caps. 4 y 9).

2. *Variables rígidas o reguladas*: son aquellas que deben mantenerse dentro de límites muy estrechos, pues una ligera variación conduce a la muerte de forma muy rápida. Son ejemplos de este tipo de variables la temperatura y las concentraciones de determinados iones (protones, calcio y potasio).

Así, para mantener la homeostasis, determinadas variables prevalecen sobre otras, por lo que a las variables rígidas o reguladas se las denomina prioritarias, y a las plásticas u oscilatorias, no prioritarias.

El mecanismo de control o regulación de una determinada variable fisiológica debe poseer los siguientes elementos: sensor, controlador o centro de regulación y efector. La **figura 16-1** del capítulo 16 muestra, de forma genérica, la organización de los elementos citados; cuando el mecanismo se extiende a todo el medio interno, se produce la homeostasis, es decir, desde la perspectiva del modelo presentado, la tendencia a mantener el valor de referencia. Las compensaciones que se producen a consecuencia de la perturbación pueden realizarse a corto, medio o largo plazo. Por ello, para mantener el equilibrio del medio interno, las variables de mayor prioridad pueden conducir a cambios en el valor de referencia de otra variable de menor prioridad.

Múltiples ejemplos de la vida cotidiana responden al modelo de funcionamiento presentado (temperatura ambiente

de una habitación, cisterna de un váter, etc.). La cisterna de un váter representa una buena analogía. La entrada y la salida de agua se encuentran bajo el control de la «bolla» que regula las válvulas de entrada y salida. Cuando el nivel del agua se ajusta al de referencia, la válvula de entrada se bloquea, impidiendo la entrada de agua. Ajustando la bolla, se puede regular el nivel de referencia. Cuando se acciona la válvula de salida, la bolla desciende y se abre la válvula de entrada, permitiendo el llenado de la cisterna, y se vuelve a reproducir el ciclo.

■ Necesidad de respuesta integrada

La actividad física, por ligera que sea, desencadena una serie de cambios funcionales que determinan un nuevo estado de equilibrio. Estos cambios pueden ser momentáneos, temporales y desaparecer después del ejercicio: son las **respuestas** o **ajustes**. Sin embargo, cuando las variaciones (de la estructura y/o de la función) permanecen en el tiempo, facilitando una respuesta mejor frente al mismo estímulo, se habla de **adaptaciones**. Así, tanto durante el ejercicio como en el período de postejercicio o recuperación, la homeostasis se modifica y el organismo entra en un nuevo estado de equilibrio dinámico, cuyo objeto es atender a la mayor demanda. Por lo tanto, el ejercicio físico pone de manifiesto la respuesta integrada del organismo, ya sea de forma inmediata o permanente. A continuación se expone un ejemplo elemental, experimentado por cualquier persona, para justificar el por qué de la integración.

Cuando una persona realiza una actividad como la carrera, su organismo demanda una mayor energía, que se traduce en un incremento del $\dot{V}O_2$ proporcional a la demanda. Ello se consigue gracias a la integración de todos los aparatos. Puede comprenderse intuitivamente que el SAO incrementará el suministro de oxígeno modificando los parámetros de cada uno de los sistemas que lo componen: gasto cardíaco, ventilación alveolar y extracción de oxígeno de la hemoglobina. Cualquier persona ha experimentado que subir cinco pisos determina que su corazón vaya más deprisa (aumento de la frecuencia cardíaca) y que su respiración se acelere (aumento de la frecuencia respiratoria). Esto es lo más evidente, aunque además se realicen otros ajustes que la persona no es capaz de percibir, como el incremento del volumen sistólico o del volumen alveolar. Si el ejercicio es de intensidad moderada-intensa, entonces el incremento de la extracción de oxígeno se traduce en una modificación en la conformación de la hemoglobina. La mayor actividad del SAO se coordina con el incremento funcional del SAE. El resultado de la integración del SAO y el SAE es el incremento del $\dot{V}O_2$ y del $\dot{V}CO_2$, a consecuencia de la aceleración del metabolismo.

■ Necesidad de regulación integrada

La coordinación de la respuesta del organismo en su conjunto al ejercicio puede quedar ilustrada en el perfecto ajuste

del corazón y el aparato respiratorio. En un análisis inicial, se puede decir que el SNC es el sistema que inicia y mantiene el incremento del $\dot{V}O_2$ y, por consiguiente, se constituye en el mecanismo integrador del nuevo estado de equilibrio determinado por el ejercicio.

Dentro del SNC, diversas estructuras morfofuncionales podrían intervenir en la coordinación del sistema cardiovascular, el aparato respiratorio y el aparato locomotor. La información procesada por el SNC es ejecutada a través del sistema nervioso vegetativo o autónomo (SNA). La acción del SNA se dirige hacia el control de variables tan importantes como la temperatura, la frecuencia cardíaca, la presión arterial o la ventilación. En la **figura 23-1** se muestra la organización del SAO y el SAE para intentar mantener la homeostasis durante el ejercicio físico. Todos los parámetros que determinan un nuevo estado de la homeostasis se coordinan prioritariamente para atender al tejido protagonista del movimiento —el musculoesquelético—, de tal forma que:

1. El SAO puede abastecer de oxígeno suficiente a fin de cubrir las necesidades del organismo, al tiempo que elimina dióxido de carbono.
2. El SAE acelera las rutas de obtención de energía. Como consecuencia del incremento de producción de energía, también se genera más calor. Como la temperatura debe permanecer estable (variaciones máximas de hasta 4 °C), es necesario perder el exceso de calor.
3. Ambos sistemas trabajan de forma coordinada para que el **aparato locomotor** pueda desarrollar el trabajo.

Aunque existen otras formas de eliminar el calor (v. Termorregulación, cap. 15), la evaporación es un proceso altamente eficaz (por cada litro de agua evaporada, el entorno absorbe 600 kcal de calor). Sin embargo, presenta el inconveniente de que un exceso de pérdida de líquido puede conducir a la deshidratación. Para paliar esta situación, el organismo dispone de mecanismos neurohormonales (hormona antidiurética-sed, aldosterona) que, operando de forma conjunta, intentan ahorrar agua (descenso de la diuresis) y condicionan al animal hacia la ingestión de líquido (caps. 9 y 11). El aparato digestivo, en esta situación de pérdida de líquido, adquiere un papel de considerable relevancia, ya que interviene de forma definitiva en la reposición hidroelectrolítica (cap. 13).



Para que el lector compruebe la necesidad de alcanzar un estado de equilibrio (homeostasis) durante el ejercicio, se propone la siguiente pregunta:

- ❖ Durante un esfuerzo estable (30 min) realizado en el laboratorio, el consumo de oxígeno promedio ($\dot{V}O_2$) es de 1.712,7 mL/min.
- ❖ ¿Qué variables deben permanecer relativamente constantes para poder mantener este $\dot{V}O_2$?

En el **sitio web** del libro, el lector encontrará tanto información como preguntas relativas a la respuesta integrada durante el ejercicio (sección VII, Fisiología integrada).



PROCESOS PATOLÓGICOS Y RESPUESTA INTEGRADA AL EJERCICIO

A lo largo de los capítulos anteriores se ha expuesto cómo el ejercicio puede servir como método de diagnóstico de diversos trastornos (principalmente, v. recuadros en los capítulos de fisiología cardiovascular y respiratoria). El hecho de ser el ejercicio una actividad del animal que integra diversas funciones fisiológicas determina que se pueda aplicar cuando se produce una alteración de alguna función. Como se ha señalado, el SAO es un sistema integrado relativamente fácil de comprender. Cuando se produce una alteración en alguno de sus componentes, los componentes no afectados intentan compensar la deficiencia de la función. De forma general, la respuesta integrada al ejercicio se manifiesta del siguiente modo en relación con los numerosos trastornos del sistema cardiovascular, del aparato respiratorio o de la sangre:

1. *Trastornos del sistema cardiovascular:* de forma concreta, un fallo de bombeo se intenta compensar con un incremento de la cantidad de aire movilizado por el aparato respiratorio. Es decir, aumenta la ventilación, sobre todo a expensas de la frecuencia respiratoria.

2. *Trastornos del aparato respiratorio:* cuando se produce una alteración del aparato respiratorio que desencadena hipoxemia, la actividad de la bomba se incrementa, en un intento de contrarrestar la deficiencia de oxígeno en sangre arterial. Es cierto que, si el trastorno se hace crónico, el organismo tiene otra alternativa: aumentar la eritropoyesis.

3. *Trastornos de la sangre:* concretamente, si existe una deficiencia en el número de glóbulos rojos (anemia), el intento de compensación se lleva a cabo mediante una hiperfunción del sistema cardiovascular y del aparato respiratorio.

Estos ejemplos elementales sirven para describir y comprender cómo el funcionamiento integrado del organismo se puede poner de manifiesto mediante el ejercicio cuando se analiza un determinado trastorno del SAO.

En el capítulo 24 se exponen los procedimientos para analizar la respuesta integrada al ejercicio, que se pueden aplicar a personas sanas o enfermas.

Se observa, por lo tanto, que el ejercicio, además de poner en marcha a todos los componentes del SAO y del SAE, determina la participación de órganos y tejidos que *a priori* pueden parecer superfluos, como el riñón, la piel o el tubo digestivo. La participación de cualquiera de ellos adquiere igual relevancia o incluso más que el sistema cardiovascular o el aparato respiratorio, sobre todo durante los esfuerzos prolongados.

En resumen, el ejercicio constituye la única actividad que pone absolutamente a todos los órganos y tejidos «en marcha», incluso el que pueda parecer más insignificante. Al mismo tiempo, se debe producir una coordinación entre esta nueva situación de homeostasis y los patrones de movimiento (Fig. 23-6). Por este motivo, en esta figura

se ha resaltado la participación de los centros relacionados con el control del movimiento (sistema sensitivomotor) y con la regulación de variables rígidas (sistema neuroendocrino).

■ Mecanismos de integración

¿Qué mecanismos explican la coordinación tan perfecta que se produce durante la respuesta integrada del organismo al ejercicio? En los capítulos sobre regulación cardiovascular y respiratoria se ha expuesto un doble mecanismo de regulación: prealimentación (*feedforward*) y retroalimentación (*feedback*). La acción del comando central, al tiempo que envía las órdenes para el control del movimiento (selección, ejecución y mantenimiento de los programas motores), paralelamente desarrolla las órdenes a los sistemas que regulan el control del suministro de la energía y el oxígeno necesarios. Este mecanismo central (*feedforward*) explica, por ejemplo, las respuestas de anticipación al ejercicio de la ventilación, gasto cardíaco y movilización de los sustratos energéticos. La hipótesis del **comando central** señala que existiría un mecanismo ancestral del ser vivo que le permite «disponer» de su organismo de forma inmediata para reacciones de huida o agresión. El comando central intervendría en:

- El reclutamiento de unidades motoras en relación con la demanda.
- El análisis de la información periférica de origen diverso.
- El envío de las órdenes de ejecución.

La **figura 23-6** muestra de forma esquemática y simple el mecanismo teórico de control de la respuesta ho-

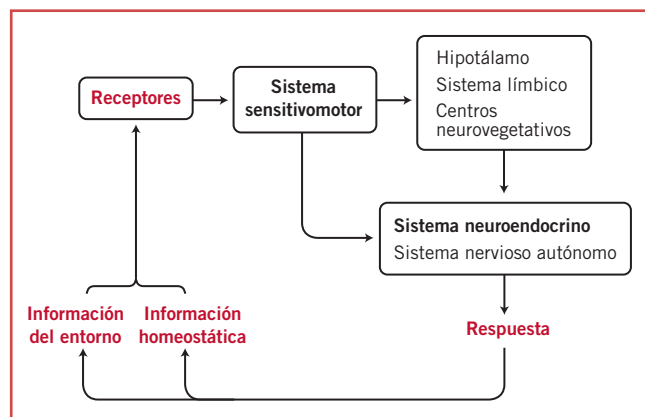


Figura 23-6. Representación esquemática del control de la homeostasis y del movimiento durante el ejercicio. Los centros de regulación reciben información, procedente de diversos receptores, tanto del entorno como de las variables que se deben ajustar para mantener la nueva situación de la homeostasis.

meostática integrada ante el ejercicio físico. Obviamente, a fin de simplificar el esquema, se han omitido todas aquellas estructuras que intervienen en la ejecución y el control del movimiento (cerebelo, ganglios basales, tallo encefálico y corteza). Se desconoce la localización del comando central, pero es probable que el gobierno de la homeostasis radique en el complejo anatomofuncional formado por el sistema límbico, el hipotálamo y el SNA. La importancia relativa del comando central y de la retroalimentación periférica en la determinación de la respuesta integrada al ejercicio dependería del tipo de ejercicio, la intensidad, la duración y la efectividad respecto a la demanda metabólica.

¿Qué señales intervienen en el modelo propuesto? Es necesario tener presente la considerable cantidad de variables que podrían intervenir en la coordinación de las respuestas cardiovascular, respiratoria y metabólica. Así, es probable que el mecanismo de retroalimentación se ponga en marcha a través de un número limitado de señales, facilitando así la «interpretación» correcta por los sistemas de control. Entre otras variables, se ha sugerido que podrían intervenir las siguientes: presión arterial media (PAM), flujo inspiratorio (volumen corriente/tiempo de inspiración $[V_T/T_i]$), glucemia y temperatura central.

Las variables indicadas (PAM, V_T/T_i , glucemia y temperatura central), y probablemente otras, son procesadas por el sistema nervioso, en conjunción con la información procedente de los receptores, para el control del movimiento. Se está lejos de conocer cómo y dónde se procesa toda esta información. Prueba de la complejidad es el análisis que realiza el SNC durante el ejercicio y que se puede poner de manifiesto por la percepción subjetiva del ejercicio. No obstante, como se ha apuntado anteriormente, el complejo formado por el sistema límbico, el hipotálamo y el SNA sería deter-

minante para adecuar la respuesta homeostática al patrón del movimiento.

La considerable actividad simpática determina el ajuste cardiovascular y la movilización de los sustratos energéticos. El SNA simpático permite activar en gran proporción todos los sistemas y atender a la mayor demanda, aumentando la sensibilidad de los mecanismos intrínsecos de regulación. La función vegetativa, al igual que la somática, se encuentra sujeta a los procesos bioeléctricos y, por consiguiente, a una entrada en fatiga sináptica. Sin embargo, el organismo soslaya esta eventualidad gracias al sistema neuroendocrino, que permite mantener un elevado grado de respuesta durante un período de tiempo muy prolongado. Lógicamente, el incremento de la demanda determina una liberación de hormonas catabólicas cuyo objetivo es incrementar la sensibilidad de las reacciones metabólicas alejadas del equilibrio y de los ciclos metabólicos, como el de glucosa/ácidos grasos. Sin embargo, como anteriormente se ha puesto de relieve, una de las variables que debe permanecer estable es la concentración de glucosa en sangre. Ello determina el hecho fundamental de que, aunque la concentración de insulina desciende (disminuye la relación insulina/glucagón), cuando el ejercicio se prolonga, alcanza unos valores constantes, precisamente para que no se produzca un descenso de la concentración de glucosa.

En resumen, la respuesta coordinada al ejercicio está determinada por los siguientes factores: *a)* la activación y la sensibilidad de los centros nerviosos a la señal de retroalimentación; *b)* la velocidad con la que los centros nerviosos procesan la información y la ejecutan, y *c)* la respuesta tisular a la información procesada. Lógicamente, todos estos factores dependen, de manera considerable, del grado de adaptación.



RESUMEN

- ◆ La respuesta integrada del organismo al ejercicio dinámico tiene por objeto facilitar la producción de energía. El sistema de aporte de oxígeno (SAO) suministra el comburente, es decir, el oxígeno. El sistema de aporte de energía (SAE) aporta el combustible para que se obtenga energía.
- ◆ El SAO integra: al aparato respiratorio, que interviene controlando la cantidad de aire suministrado al organismo; al sistema cardiovascular, que regula la cantidad de sangre que circula por los tejidos y órganos, y a la hemoglobina, que –en definitiva– transporta el oxígeno.
- ◆ La versatilidad del SAO como sistema integrado está determinada por las posibilidades de variación de cada uno de los componentes y por su modelo matemático. Así, en un esfuerzo de intensidad moderada, el aparato cardiovascular puede multiplicar el gasto cardíaco por 4; el aparato respiratorio incrementa la ventilación en 12 veces, y la capacidad de transporte del oxígeno aumenta 3 veces.
- ◆ El SAE integra: al aparato digestivo, que asimila los nutrientes; al metabolismo, que permite la utilización de la energía de

los sillares estructurales, y al sistema neuroendocrino, que aumenta la sensibilidad de los mecanismos de regulación interna de las reacciones metabólicas.

- ◆ El control de la glucemia es fundamental durante la realización de un ejercicio de intensidad submáxima y duración prolongada, pues el tejido nervioso es dependiente de glucosa en esta situación. El funcionamiento del hígado en la glucemia es crucial.
- ◆ Durante el ejercicio se produce un nuevo estado de equilibrio. Si los cambios son momentáneos y temporales y desaparecen después del ejercicio, se denominan respuestas o ajustes. Cuando las variaciones permanecen en el tiempo, facilitando una mejor respuesta frente al mismo estímulo, se habla de adaptación.
- ◆ La necesidad de respuesta integrada determina, de forma inexcusable, una regulación también integrada. La dificultad radica, precisamente, en saber cómo y dónde se integra dicha regulación. El sistema límbico-hipotalámico puede ser el sistema integrador.

BIBLIOGRAFÍA GENERAL COMENTADA

Russek M. Introducción. Regulación y control. En: Muñoz Martínez EJ, García X, eds. Fisiología, Unidad XII: Integración de funciones. México: Ediciones científicas universitarias, 1998.

Visión general de los mecanismos de regulación, a partir de los conceptos de equilibrio, estado estable y valor de referencia.

Waldrop TG, Eldridge FL, Iwamoto GA, Mitchel JH. Central neural control of respiration and circulation during exercise. En: Rowell LB, Shepherd JT, eds. Hand book of physiology, sec. 12. Exercise: regulation and integration of multiple systems. American Physiological Society. New York: Oxford University Press, 1996.

Revisión muy interesante sobre los mecanismos de control nervioso de la respiración y la circulación durante el ejercicio, realizada por cuatro investigadores de reconocido prestigio. La breve pero ilustrativa reseña histórica es particularmente interesante para conocer en qué punto se encuentra el conocimiento respecto a la integración cardiorrespiratoria.

Wasserman K, Hansen JE, Sue DY, Whipp BJ, Casaburi R. Physiology of exercise. En: Lea & Febiger, eds. Principles of exercise testing and interpretation, 2ª ed. Philadelphia: Waverly, 1994.

La idea de integración de estos autores queda reflejada en la famosa ilustración de la cadena de engranajes entre la ventilación, la circulación y el músculo.

OTRAS LECTURAS

Ekelund LG. Circulatory and respiratory adaptation during prolonged exercise of moderate intensity in the sitting position. Acta Physiol Scand 1967;69:327-40.

Ekelund LG. Circulatory and respiratory adaptation during prolonged exercise. Acta Physiol Scand Suppl 1967;292:1-38.

Eldridge FL, Millhorn DE, Kiley JP, Waldrop TG. Stimulation by central command of locomotion, respiration and circulation during exercise. Respir Physiol 1985;59:313-37.

Flatt JP. Integration of the overall response to exercise. Int J Obes Relat Metab Disord 1995;19 (suppl 4):S31-40.

Gunther B. The concept of homeostasis: from Claude Bernard to Walter Cannon. Rev Med Chil 1981;109:484-5.

Kim J, Saidel GM, Cabrera ME. Multi-scale computational model of fuel homeostasis during exercise: effect of hormonal control. Ann Biomed Eng 2007;35:69-90.

Kjaer M, Engfred K, Fernandes A, Secher NH, Galbo H. Regulation of hepatic glucose production during exercise in humans: role of sympathoadrenergic activity. Am J Physiol 1993;265:E275-83.

Kjaer M, Keiding S, Engfred K, Rasmussen K, Sonne B, Kirkegaard P et al. Glucose homeostasis during exercise in humans with a liver or kidney transplant. Am J Physiol 1995;268:E636-44.

Koulmann N, Bigard AX. Interaction between signalling pathways involved in skeletal muscle responses to endurance exercise. Pflugers Arch 2006;452:125-39.

Victor RG, Secher NH, Lyson T, Mitchell JH. Central command increases muscle sympathetic nerve activity during intense intermittent isometric exercise in humans. Circ Res 1995;76:127-31.

Viru A. The mechanism of training effects: a hypothesis. Int J Sports Med 1984;5:219-27.

Waldrop TG, Eldridge FL, Iwamoto GA, Mitchell JH. Central neural control of respiration and circulation during exercise. En: Rowell LB, Shepherd JT, eds. Hand book of physiology, sec. 12. Exercise: regulation and integration of multiple systems. American Physiological Society. New York: Oxford University Press, 1996.

Winder WW, Hagberg JM, Hickson RC, Ehsani AA, McLane JA. Time course of sympathoadrenal adaptation to endurance exercise training in man. J Appl Physiol 1978;45:370-4.