FISIOLOGÍA DEL EJERCICIO. Fundamentos

Grado en Ciencias de la Actividad Física y el Deporte

Dr. Rafael A. Casuso

Universidad Loyola Andalucía

Fisiología del Ejercicio. Fundamentos

Dr. Rafael A. Casuso Pérez
Universidad Loyola Andalucía

Material docente elaborado para la asignatura de Fisiología del Ejercicio del Grado en Ciencias de la Actividad Física y del Deporte.

Primera edición: julio de 2026
Versión: 1.0
Fecha de revisión final: julio de 2026

Declaración sobre el uso de inteligencia artificial:

Durante la elaboración de este material docente se han utilizado herramientas de inteligencia artificial generativa como apoyo en tareas de redacción, organización y revisión del texto. El documento final ha sido leído, revisado, corregido y validado por el autor, quien asume la responsabilidad académica e intelectual de la obra.

Prefacio

Este libro, *Fisiología del Ejercicio. Fundamentos.*, nace como un material de apoyo a la docencia de la asignatura de Fisiología del Ejercicio en el contexto del Grado en Ciencias del Deporte, aunque también puede resultar útil para estudiantes de máster u otras titulaciones afines.

El **texto no pretende sustituir a las clases ni ofrecer un desarrollo exhaustivo de todos los contenidos de la materia**. Su objetivo principal es servir como una guía de estudio que ayude a organizar, repasar y comprender los aspectos fundamentales del funcionamiento del organismo durante el ejercicio físico.

El contenido se estructura en varios bloques que permiten avanzar desde las bases fisiológicas generales hasta situaciones más aplicadas. El primer bloque se inicia con un repaso de aspectos esenciales de la fisiología celular, del sistema nervioso somático y autónomo, de la fisiología muscular y de los fundamentos relacionados con el entrenamiento de fuerza. A partir de ahí, el segundo bloque aborda el metabolismo energético y su regulación, prestando especial atención al papel del sistema endocrino durante el ejercicio y al entrenamiento de resistencia. El tercer bloque se centra en los sistemas cardiovascular, respiratorio y sanguíneo, fundamentales para comprender el transporte de oxígeno, nutrientes y productos metabólicos durante el esfuerzo. Finalmente, el cuarto bloque introduce el estudio del entrenamiento en condiciones especiales, como la hipoxia, el calor y el frío, situaciones que modifican la respuesta fisiológica y obligan al organismo a ajustar sus mecanismos de regulación. En un último bloque, se expone una tabla resumen de los conceptos tratados en cada tema, pensada para facilitar el repaso y la organización de la información más relevante.

A lo largo de los capítulos se presentan los principales conceptos, sistemas y mecanismos fisiológicos implicados en la respuesta y adaptación al ejercicio. En algunos casos, determinados procesos se explican de forma general, sin entrar en todos los pasos o detalles moleculares que los componen. Por ello**, es importante que el estudiante complete la lectura de este texto con las explicaciones, ejemplos, matices y ampliaciones que se desarrollarán en clase**.

La intención de este material es facilitar la comprensión de la lógica interna de la Fisiología del Ejercicio: cómo responde el cuerpo ante una demanda física, cómo se coordinan los distintos sistemas orgánicos y cómo estas respuestas permiten mantener el rendimiento, la homeostasis y la adaptación al entrenamiento. Más que memorizar datos aislados, se invita al estudiante a relacionar ideas, interpretar procesos y construir una visión integrada del organismo en movimiento.

Espero que este libro sea una herramienta útil para acompañar el aprendizaje, resolver dudas iniciales y reforzar los contenidos trabajados en el aula. Su verdadero valor dependerá del uso activo que cada estudiante haga de él: leyendo con atención, contrastando con las clases, preguntando, relacionando conceptos y aplicando los conocimientos a situaciones reales del ejercicio, el entrenamiento y la salud.

Índice

Sección	Título	Páginas
Tema 1	Repaso de fisiología celular	3-16
Tema 2	Control motor voluntario	17-28
Tema 3	Sistema nervioso autónomo	29-40
Tema 4	Músculo esquelético: la contracción muscular	41-53
Tema 5	Entrenamiento de fuerza	54-74
Tema 6	Metabolismo energético durante el ejercicio	77-90
Tema 7	Control hormonal durante el ejercicio	91-105
Tema 8	Fatiga durante el ejercicio	106-120
Tema 9	Sistema cardiovascular	123-140
Tema 10	Sistema pulmonar	141-155
Tema 11	La sangre y el sistema inmunológico	156-172
Tema 12	Fisiología del entrenamiento aeróbico y anaeróbico	173-196
Tema 13	Ejercicio y entrenamiento en condiciones hipóxicas	199-227
Tema 14	Ejercicio y entrenamiento en condiciones de calor	228-242
Tabla T1	Repaso de fisiología celular	244-246
Tabla T2	Control motor voluntario	247-248
Tabla T3	Sistema nervioso autónomo	249-250
Tabla T4	Músculo esquelético: la contracción muscular	251-252
Tabla T5	Entrenamiento de fuerza	253-254
Tabla T6	Metabolismo energético durante el ejercicio	255-256
Tabla T7	Control hormonal durante el ejercicio	257-259
Tabla T8	Fatiga	260-262
Tabla T9	Sistema cardiovascular	263-264
Tabla T10	Sistema pulmonar	265-266
Tabla T11	La sangre y el sistema inmunológico	267-268
Tabla T12	Fisiología del entrenamiento aeróbico y anaeróbico	269-271
Tabla T13	Ejercicio y entrenamiento en condiciones hipóxicas	272-273
Tabla T14	Ejercicio y entrenamiento en condiciones de calor	274-276

BLOQUE I.

FISIOLOGÍA DE LOS TEJIDOS EXCITABLES

ÍNDICE DE BLOQUE I

Tema 1. Repaso de Fisiología Celular

Tema 2. Control motor voluntario

Tema 3. Sistema nervioso autónomo

Tema 4. Músculo esquelético: la contracción muscular

Tema 5. Entrenamiento de la Fuerza

Tema 1. Repaso de fisiología celular

Bloque I-Homeostasis

1. Introducción a la fisiología humana

La fisiología humana es la disciplina que estudia cómo funciona el organismo en condiciones normales. Su interés principal no es solo describir estructuras, sino explicar los mecanismos que permiten que las células, los tejidos, los órganos y los sistemas trabajen de forma coordinada para mantener la vida.

Se trata de una ciencia integradora, porque analiza el cuerpo como una unidad funcional. Esto significa que las funciones del organismo no dependen de elementos aislados, sino de la relación continua entre todos sus niveles de organización. Así, la fisiología ayuda a entender cómo el organismo obtiene energía, intercambia sustancias con el medio, regula sus funciones y se adapta a los cambios internos y externos.

Otro aspecto esencial es que el cuerpo humano debe mantener unas condiciones internas relativamente estables para que las células puedan vivir y funcionar correctamente. Esa estabilidad se consigue mediante mecanismos de regulación continuos, que constituyen la base del estudio fisiológico y que más adelante se concretan en el concepto de homeostasis.

En conjunto, la fisiología humana proporciona la base para comprender tanto el funcionamiento normal del cuerpo como las alteraciones funcionales que aparecen en la enfermedad. Por ello, es una materia fundamental en ciencias de la salud y también el punto de partida para entender después la respuesta del organismo al ejercicio.

2. Niveles de organización del organismo humano

El organismo humano se estructura en niveles de organización que van desde lo más simple hasta lo más complejo. Esta organización permite entender cómo los procesos básicos se integran progresivamente hasta dar lugar al funcionamiento global del cuerpo.

El primer nivel es el nivel químico, formado por átomos, iones y moléculas. Estas sustancias constituyen la base material de la vida y participan en procesos esenciales como el metabolismo, la obtención de energía y la regulación del medio interno.

A continuación se encuentra el nivel celular. La célula es la unidad estructural y funcional básica del organismo, ya que en ella se realizan las funciones vitales fundamentales. Aunque existen muchos tipos celulares, todas comparten mecanismos básicos que permiten su supervivencia y actividad.

Las células se agrupan para formar tejidos, que son conjuntos de células semejantes que colaboran en una función concreta. Los principales tejidos del cuerpo humano son el epitelial, el conectivo, el muscular y el nervioso.

La combinación de distintos tejidos da lugar a los órganos, estructuras anatómicas con funciones específicas. A su vez, varios órganos que trabajan de forma coordinada constituyen los sistemas o aparatos, como el sistema cardiovascular, respiratorio, nervioso o digestivo.

El nivel más alto es el del organismo en su conjunto, donde todos los sistemas se integran para mantener la vida. Desde el punto de vista fisiológico, lo importante es entender que estos niveles no actúan de forma aislada, sino de manera interdependiente, de modo que una alteración en uno de ellos puede repercutir sobre los demás.

3. El concepto de medio interno

El medio interno es el entorno líquido que rodea y baña a las células del organismo. Desde el punto de vista fisiológico, este concepto es fundamental porque las células no están en contacto directo con el medio externo, sino que dependen de ese entorno interno para recibir oxígeno, nutrientes y señales reguladoras, y para eliminar productos de desecho.

El medio interno se relaciona principalmente con el líquido extracelular, que incluye el plasma sanguíneo y el líquido intersticial. El plasma actúa como medio de transporte dentro de la sangre, mientras que el líquido intersticial constituye el entorno inmediato de las células.

La importancia del medio interno reside en que debe mantenerse en condiciones relativamente estables para que las células puedan funcionar con normalidad. Variables como la concentración de nutrientes, la cantidad de agua, los electrolitos, el pH o la temperatura deben mantenerse dentro de límites compatibles con la vida celular.

Por tanto, una de las funciones esenciales del organismo es conservar la estabilidad del medio interno. Todos los sistemas corporales contribuyen, de forma directa o indirecta, a este objetivo. Cuando el medio interno se altera de forma importante, la función celular se compromete y pueden aparecer trastornos funcionales o enfermedad.

4. Homeostasis: definición y principios generales

La homeostasis es la capacidad del organismo para mantener relativamente constantes las condiciones del medio interno, a pesar de los cambios del entorno externo y de las variaciones que genera la propia actividad del cuerpo. No significa ausencia de cambios, sino mantenimiento de un equilibrio dinámico dentro de unos límites compatibles con la vida.

Las variables fisiológicas no permanecen totalmente fijas, sino que oscilan alrededor de unos valores de referencia. Mientras esas variaciones se mantengan dentro de un rango normal, las células, tejidos y órganos pueden funcionar correctamente. Cuando se superan esos límites, aparece una alteración funcional que puede dar lugar a enfermedad.

Para que exista homeostasis deben intervenir varios elementos básicos. En primer lugar, una variable regulada que debe mantenerse dentro de ciertos límites. En segundo lugar, un punto de ajuste o valor de referencia. Además, son necesarios mecanismos que detecten las desviaciones y respuestas que actúen para corregirlas.

El mecanismo más frecuente de regulación es la retroalimentación negativa, por la cual un cambio en una variable desencadena respuestas que tienden a oponerse a esa alteración y devolverla a su rango normal. De forma menos habitual existe también la retroalimentación positiva, en la que la respuesta amplifica el cambio inicial durante un tiempo limitado.

La homeostasis depende de la acción coordinada de múltiples sistemas de regulación y constituye uno de los principios centrales de la fisiología. Gracias a ella, el organismo puede mantener la estabilidad interna y adaptarse de forma continua a las exigencias del medio.

5. Sistemas de control fisiológico

El mantenimiento de la homeostasis requiere la existencia de sistemas de control fisiológico capaces de detectar cambios en el medio interno y generar respuestas adecuadas para corregirlos. Gracias a estos sistemas, el organismo puede funcionar como una unidad integrada y ajustar continuamente la actividad de sus células, tejidos y órganos.

Todo sistema de control fisiológico presenta tres elementos básicos. En primer lugar, un sensor o receptor, encargado de detectar cambios en una variable determinada. En segundo lugar, un centro integrador, que recibe la información, la compara con un valor de referencia y decide la respuesta. Por último, uno o varios efectores, que ejecutan la acción correctora para restablecer el equilibrio.

Estos sistemas pueden actuar de forma local, regulando procesos en una región concreta del cuerpo, o de forma sistémica, coordinando respuestas que afectan a varios órganos o sistemas a la vez. Esta doble forma de control permite que la regulación fisiológica sea a la vez precisa y global.

Los dos grandes sistemas de control del organismo son el sistema nervioso y el sistema endocrino. El sistema nervioso actúa de forma rápida y precisa mediante impulsos eléctricos y señales nerviosas. El sistema endocrino lo hace a través de hormonas liberadas al medio interno, por lo que sus respuestas suelen ser más lentas, pero también más duraderas y amplias.

Además de estos sistemas generales, muchas células y tejidos poseen mecanismos de autorregulación, lo que aporta mayor capacidad de adaptación y estabilidad. En conjunto, la coordinación entre todos estos sistemas permite mantener el equilibrio interno y responder de forma eficaz a los cambios del organismo y del entorno.

6. Bases químicas del organismo humano

El funcionamiento del organismo humano se apoya en una base química formada por agua, electrolitos y moléculas orgánicas. Estas sustancias constituyen el sustrato material de las células y hacen posibles los procesos fisiológicos esenciales.

El componente más abundante es el agua, que representa la mayor parte del peso corporal. Su importancia radica en que actúa como disolvente, medio de transporte y participante directa en muchas reacciones químicas. Gracias al agua, las sustancias pueden mantenerse en solución y desplazarse por el organismo.

Junto al agua se encuentran los electrolitos, como sodio, potasio, calcio o cloruro. Estos iones son fundamentales para mantener la osmolaridad, el volumen de los líquidos corporales, la excitabilidad de las células y muchos procesos de transporte y comunicación celular.

Entre las moléculas orgánicas destacan los hidratos de carbono, los lípidos, las proteínas y los ácidos nucleicos. Los hidratos de carbono y los lípidos cumplen una función energética importante. Las proteínas desempeñan funciones estructurales, de transporte, regulación y catálisis. Los ácidos nucleicos contienen la información genética necesaria para la actividad y reproducción celular.

Otro aspecto esencial es el equilibrio ácido-base, ya que el mantenimiento de un pH adecuado es imprescindible para el funcionamiento normal de las proteínas y de las reacciones químicas del organismo. Del mismo modo, la obtención y utilización de energía a partir de los nutrientes resulta indispensable para sostener todas las funciones celulares.

En conjunto, estas bases químicas permiten mantener la estructura del organismo, asegurar el metabolismo celular y conservar la estabilidad del medio interno.

7. Equilibrio y estado estacionario

El organismo humano es un sistema abierto, ya que intercambia continuamente materia y energía con el entorno. Entran agua, nutrientes y oxígeno, y se eliminan productos de desecho, dióxido de carbono y calor. A pesar de este intercambio constante, muchas variables internas se mantienen dentro de límites relativamente estables.

Esta situación se explica mediante el concepto de estado estacionario. Un estado estacionario es una condición en la que una variable permanece globalmente constante a lo largo del tiempo, aunque exista un flujo continuo de entrada y salida. Es decir, no significa ausencia de movimiento o intercambio, sino mantenimiento de un balance dinámico.

Es importante diferenciar el estado estacionario del equilibrio químico. En el equilibrio químico no hay flujo neto de sustancias, mientras que en el organismo sí existe un intercambio continuo. Por tanto, el cuerpo humano no vive en equilibrio químico, sino en un estado estacionario regulado.

Cuando las entradas y salidas de una sustancia o variable se compensan, se mantiene la estabilidad. Si las entradas superan a las salidas, se produce un balance positivo; si ocurre lo contrario, aparece un balance negativo. Los sistemas reguladores se encargan de ajustar estos balances para conservar la homeostasis.

Por ello, el concepto de estado estacionario ayuda a entender cómo el organismo puede mantenerse estable sin dejar de intercambiar continuamente materia y energía con el medio.

Bloque II-Tejidos

1. Concepto de tejido y nivel tisular de organización

El nivel tisular constituye un escalón fundamental en la organización del organismo humano, ya que integra células con características similares que cooperan para realizar funciones específicas. Un tejido puede definirse como un conjunto de células semejantes, junto con sus productos extracelulares, organizados estructuralmente y coordinados funcionalmente para desempeñar una función determinada.

Los tejidos representan el nivel en el que se establece de forma clara la relación entre estructura y función. Las características de las células y de la matriz extracelular condicionan las propiedades funcionales del tejido, permitiendo su especialización en tareas como protección, soporte, contracción, transporte o conducción de señales. De este modo, las células dejan de actuar de forma aislada y pasan a integrarse en unidades funcionales más complejas.

Desde el punto de vista fisiológico, los tejidos contribuyen al mantenimiento de la homeostasis mediante la interacción coordinada de distintos tipos celulares. Además, constituyen la base sobre la que se forman los órganos y sistemas, por lo que el nivel tisular representa una etapa clave en la complejidad estructural y funcional del organismo.

2. Tipos básicos de tejidos

En el organismo humano se distinguen cuatro tipos fundamentales de tejidos: epitelial, conectivo, muscular y nervioso. Esta clasificación se basa en diferencias estructurales y funcionales que permiten a cada uno desempeñar funciones específicas dentro del organismo. Aunque son distintos entre sí, todos contribuyen de manera coordinada al funcionamiento global del cuerpo.

El tejido epitelial está formado por células muy unidas entre sí y con escasa matriz extracelular. Se especializa en funciones de revestimiento, protección, absorción y secreción, por lo que recubre superficies corporales, tapiza cavidades internas y forma glándulas. El tejido conectivo,

en cambio, presenta células más separadas y una abundante matriz extracelular, lo que le permite desempeñar funciones de soporte, unión, protección, transporte, almacenamiento y defensa.

El tejido muscular está especializado en la contracción y permite generar fuerza y movimiento. Gracias a esta propiedad participa en el desplazamiento corporal, la circulación sanguínea y el movimiento de sustancias dentro de órganos. El tejido nervioso, por su parte, se encarga de la recepción, integración y transmisión de información, haciendo posible la coordinación del organismo y la respuesta a estímulos internos y externos.

La interacción entre estos cuatro tipos de tejidos permite formar órganos y sistemas en los que cada uno aporta una función concreta. Por ello, el estudio de los tejidos es esencial para comprender cómo se organiza el cuerpo y cómo se mantiene la homeostasis.

3. Tejido epitelial

El tejido epitelial está formado por células estrechamente unidas entre sí, con escasa matriz extracelular, y se encarga de recubrir superficies corporales, tapizar cavidades internas y formar glándulas. Esta disposición compacta le permite actuar como una barrera continua entre el medio interno y el externo, y explica sus funciones de protección, absorción, secreción, intercambio y filtración.

Entre sus características generales destacan la alta cohesión celular, la polaridad de sus células, la presencia de una membrana basal, la ausencia de vasos sanguíneos y su elevada capacidad de renovación. Estas propiedades permiten que el epitelio funcione como una estructura dinámica y selectiva, adaptada a distintas necesidades según su localización.

Los epitelios de revestimiento se clasifican según el número de capas celulares y la forma de sus células. Así, pueden ser simples, estratificados o seudoestratificados, y sus células pueden ser planas, cúbicas o cilíndricas. Esta clasificación refleja la relación entre estructura y función: los epitelios más delgados favorecen el intercambio, mientras que los más gruesos ofrecen mayor protección.

Además, el tejido epitelial puede especializarse en funciones secretoras y formar el epitelio glandular. Las glándulas endocrinas liberan sus productos a la sangre, mientras que las exocrinas lo hacen hacia superficies o cavidades a través de conductos. Junto a ello, las células epiteliales pueden presentar especializaciones como microvellosidades, que aumentan la superficie de absorción, o cilios, que facilitan el desplazamiento de sustancias sobre la superficie celular. En conjunto, el tejido epitelial constituye una interfaz esencial entre el organismo y su entorno.

4. Tejido conectivo

El tejido conectivo se caracteriza por presentar células dispersas inmersas en una abundante matriz extracelular, que constituye el principal componente estructural del tejido. A diferencia del epitelio, aquí no predominan las células, sino la matriz, formada por sustancia fundamental y fibras. Esta organización explica sus funciones de soporte, unión, protección, transporte, almacenamiento y defensa.

La matriz extracelular está compuesta por una sustancia fundamental amorfa y por fibras colágenas, elásticas y reticulares. La sustancia fundamental actúa como medio de intercambio entre la sangre y las células, mientras que las fibras aportan resistencia, elasticidad y soporte estructural. La proporción y disposición de estos componentes determinan las propiedades mecánicas de cada tipo de tejido conectivo.

Entre las células del tejido conectivo destacan los fibroblastos, encargados de sintetizar la matriz extracelular, así como adipocitos, macrófagos y otras células relacionadas con el almacenamiento

y la defensa. Esta diversidad celular permite que el tejido conectivo participe tanto en funciones estructurales como en respuestas inmunitarias y procesos de reparación.

El tejido conectivo puede clasificarse en conectivo propiamente dicho y conectivo especializado. El conectivo propiamente dicho incluye el tejido laxo y el denso, mientras que entre las formas especializadas se encuentran el tejido adiposo, el cartílago, el tejido óseo y la sangre. Cada una de estas variedades presenta una organización particular adaptada a su función, lo que refleja la gran versatilidad del tejido conectivo y su importancia en la organización y mantenimiento del organismo.

5. Tejido muscular

El tejido muscular está especializado en la contracción, propiedad que le permite generar fuerza y producir movimiento. Esta capacidad se basa en la presencia de proteínas contráctiles dentro de sus células, que transforman la energía química en trabajo mecánico. Gracias a ello, el tejido muscular participa no solo en el movimiento del cuerpo, sino también en el desplazamiento de sustancias dentro del organismo y en el mantenimiento de la postura.

Las células musculares presentan varias propiedades funcionales características: excitabilidad, contractilidad, extensibilidad y elasticidad. Estas propiedades permiten que el músculo responda a estímulos, genere tensión, se estire sin dañarse y recupere su forma original tras la contracción o el estiramiento. Todo ello hace posible que el tejido muscular se adapte a distintas demandas funcionales.

Se distinguen tres tipos principales de tejido muscular. El músculo esquelético está formado por fibras largas, estriadas y multinucleadas, y se encarga del movimiento voluntario del cuerpo. El músculo cardíaco presenta células estriadas, cortas y ramificadas, y su contracción involuntaria y rítmica permite el bombeo de la sangre. El músculo liso está constituido por células fusiformes sin estriaciones visibles y se localiza en la pared de órganos huecos, donde produce contracciones involuntarias y sostenidas.

Las diferencias estructurales entre estos tipos musculares se relacionan directamente con su función. El músculo esquelético permite movimientos rápidos y precisos, el cardíaco asegura una actividad continua y coordinada, y el músculo liso mantiene funciones internas como la propulsión del contenido de vísceras y la regulación del calibre de los vasos. En conjunto, el tejido muscular es esencial para la actividad física, la circulación y múltiples funciones vitales del organismo.

6. Tejido nervioso

El tejido nervioso está especializado en la recepción, integración y transmisión de información mediante señales eléctricas y químicas. Constituye la base del sistema nervioso y permite coordinar las funciones del organismo, así como responder a estímulos procedentes tanto del medio interno como del externo. Su organización en redes de comunicación hace posible una regulación rápida y precisa de múltiples procesos fisiológicos.

Este tejido está formado por dos tipos celulares principales: las neuronas y las células gliales. Las neuronas son células excitables encargadas de generar y conducir impulsos nerviosos. Presentan un cuerpo celular, dendritas que reciben información y un axón que transmite la señal hacia otras células. Gracias a esta organización, pueden comunicar distintas regiones del organismo y participar en circuitos complejos de integración funcional.

Las células gliales, aunque no generan impulsos nerviosos como las neuronas, son esenciales para el funcionamiento del tejido nervioso. Proporcionan soporte estructural, protección, regulación del entorno químico y ayuda en los procesos de reparación. La interacción entre neuronas y glía

garantiza un medio adecuado para la actividad nerviosa y contribuye a la eficacia de la transmisión de señales.

Desde el punto de vista funcional, el tejido nervioso destaca por dos propiedades fundamentales: la excitabilidad, que permite responder a estímulos mediante cambios eléctricos, y la conductividad, que permite propagar esos cambios a lo largo de la célula y transmitirlos a otras células. En conjunto, estas características convierten al tejido nervioso en el principal sistema de control e integración del organismo.

7. Membranas corporales, reparación tisular y envejecimiento

Las membranas corporales son estructuras formadas por la combinación de tejido epitelial y tejido conectivo que recubren superficies, delimitan cavidades y protegen órganos. Entre ellas destacan las membranas mucosas, que tapizan cavidades comunicadas con el exterior; las serosas, que recubren cavidades internas cerradas y reducen la fricción entre órganos; la membrana cutánea, que corresponde a la piel; y las membranas sinoviales, presentes en las articulaciones y encargadas de producir líquido sinovial.

Los tejidos poseen además capacidad de reparación frente a lesiones. Esta reparación puede producirse por regeneración, cuando las células dañadas son sustituidas por otras del mismo tipo y se recupera la estructura original, o por cicatrización, cuando el tejido lesionado es reemplazado por tejido conectivo fibroso. El predominio de uno u otro mecanismo depende del tipo de tejido, de la extensión del daño y del aporte sanguíneo disponible.

La eficacia de la reparación tisular está condicionada por distintos factores, como el estado nutricional, la irrigación sanguínea, la presencia de infecciones, la edad y la capacidad proliferativa del tejido afectado. Por ello, no todos los tejidos tienen la misma capacidad de recuperación, y algunos regeneran con facilidad mientras que otros tienden más a la fibrosis.

Con el envejecimiento, los tejidos experimentan cambios estructurales y funcionales progresivos, como una menor capacidad regenerativa, alteraciones en la matriz extracelular y una reducción de la elasticidad y resistencia. Estos cambios aumentan la susceptibilidad a lesiones y enlentecen la reparación.

Bloque III- Fisiología Celular

1. La célula como unidad estructural y funcional del organismo

La célula es la unidad estructural y funcional básica del organismo humano. Todas las funciones fisiológicas dependen, en último término, de la actividad coordinada de las células, aunque estas presenten una gran diversidad de formas y funciones. A pesar de esa especialización, todas comparten características comunes: intercambian sustancias con el medio, obtienen y utilizan energía, sintetizan componentes celulares y responden a señales del entorno.

Desde el punto de vista fisiológico, la célula debe entenderse como un sistema dinámico y abierto, que intercambia de forma continua materia, energía e información con el medio extracelular. Para poder sobrevivir y desempeñar su función, necesita mantener un medio intracelular relativamente estable, distinto del medio externo. Esta estabilidad depende en gran medida de la membrana plasmática, que actúa como una barrera selectiva y regula de forma precisa el paso de sustancias y señales.

La célula constituye la base de toda la fisiología, ya que en ella se apoyan el metabolismo, la regulación del medio interno, la comunicación y la integración funcional de tejidos y órganos. Por eso, el estudio de la fisiología celular y de la membrana es fundamental para comprender después los mecanismos de transporte, los gradientes iónicos y la excitabilidad celular.

2. Organización estructural de la célula

La célula presenta una organización estructural especializada que permite el desarrollo de sus funciones fisiológicas. De forma general, puede distinguirse en tres componentes principales: la membrana plasmática, el citoplasma y el núcleo. Cada uno de ellos desempeña funciones concretas, pero todos actúan de manera integrada para mantener la actividad celular.

El citoplasma incluye el citosol y los orgánulos celulares, donde tienen lugar numerosas reacciones metabólicas. Esta organización interna permite la compartimentación de funciones, de modo que distintos procesos puedan desarrollarse de forma simultánea y ordenada. Entre los orgánulos destacan las mitocondrias, por su papel en la producción de energía, y otros sistemas membranosos implicados en la síntesis, modificación y transporte de sustancias.

El núcleo contiene el material genético y regula la expresión de proteínas, condicionando así la estructura y la función celular. Además, la célula cuenta con un citoesqueleto que contribuye al mantenimiento de la forma, al transporte intracelular y a los cambios morfológicos asociados a la función. En conjunto, esta organización estructural proporciona el soporte necesario para que la célula mantenga su medio interno y responda de forma adecuada a las demandas del organismo.

3. Membrana plasmática: estructura y composición

La membrana plasmática es la estructura que separa el medio intracelular del medio extracelular y permite una interacción controlada entre ambos. No actúa como una barrera pasiva, sino como una estructura dinámica que regula de forma precisa el intercambio de sustancias, la comunicación celular y el mantenimiento de un medio interno distinto del exterior.

Está formada por una bicapa lipídica en la que se insertan proteínas. Los lípidos de membrana, por su carácter anfipático, se organizan de manera que sus regiones hidrofílicas quedan orientadas hacia los medios acuosos y sus regiones hidrofóbicas hacia el interior de la membrana. Esta disposición explica que la membrana actúe como una barrera semipermeable, permitiendo con mayor facilidad el paso de moléculas liposolubles y dificultando el de sustancias polares o cargadas.

Las proteínas de membrana son las responsables de la mayor parte de las funciones específicas. Algunas atraviesan la membrana y actúan como canales, transportadores o bombas, mientras que otras se localizan en su superficie y participan en funciones de soporte y regulación. Gracias a esta combinación de lípidos y proteínas, la membrana presenta una organización flexible y dinámica, descrita por el modelo de mosaico fluido.

Además, la membrana es asimétrica, ya que sus dos caras no tienen la misma composición, y selectiva, porque no todas las sustancias la atraviesan con la misma facilidad. Estas propiedades son esenciales para mantener diferencias químicas y eléctricas entre el interior y el exterior celular, base de procesos como el transporte de sustancias, la señalización y la excitabilidad celular.

4. Propiedades físico-químicas de la membrana plasmática

Las propiedades funcionales de la membrana plasmática dependen de su estructura físico-química. La bicapa lipídica y las proteínas de membrana determinan qué sustancias pueden atravesarla, en qué dirección y con qué facilidad. Gracias a estas propiedades, la célula puede mantener diferencias de concentración y de carga eléctrica entre el medio intracelular y el extracelular.

Cuando existe una diferencia en la concentración de una sustancia entre ambos lados de la membrana, se establece un gradiente de concentración. Si la sustancia tiene carga eléctrica, a este

gradiente se suma la influencia del gradiente eléctrico, dando lugar a un gradiente electroquímico. Este gradiente representa la fuerza neta que impulsa el movimiento de los iones a través de la membrana.

La difusión es el movimiento pasivo de sustancias a favor de su gradiente. En el caso de las moléculas pequeñas y liposolubles, este paso puede producirse directamente a través de la bicapa. Sin embargo, la mayoría de los iones y moléculas polares requieren proteínas específicas, debido a la permeabilidad selectiva de la membrana. Esta selectividad es fundamental para conservar la composición interna de la célula.

Como consecuencia de la distribución desigual de iones y de la permeabilidad selectiva, se genera una diferencia de potencial eléctrico entre el interior y el exterior celular. Aunque esta separación de cargas es pequeña, tiene una gran importancia fisiológica, ya que constituye la base de la excitabilidad celular y de los fenómenos eléctricos que se estudiarán en temas posteriores.

5. Transporte de sustancias a través de la membrana plasmática

La membrana plasmática actúa como una barrera selectiva, por lo que la célula necesita mecanismos específicos para intercambiar sustancias con el medio extracelular. Estos mecanismos permiten incorporar nutrientes, eliminar desechos, regular la composición interna y mantener los gradientes electroquímicos necesarios para la función celular.

El transporte puede ser pasivo o activo. El transporte pasivo se realiza a favor del gradiente electroquímico y no requiere un consumo directo de energía. Dentro de él se incluyen la difusión simple, propia de moléculas pequeñas y liposolubles, y la difusión facilitada, que utiliza proteínas transportadoras para mover sustancias que no pueden atravesar directamente la bicapa lipídica. La difusión facilitada es específica y saturable, ya que depende del número de transportadores disponibles.

El transporte activo, en cambio, desplaza sustancias en contra de su gradiente electroquímico y requiere un aporte de energía. En el transporte activo primario, la energía procede directamente del ATP y permite el funcionamiento de bombas de membrana. En el transporte activo secundario, la energía deriva de un gradiente previamente creado, de modo que el paso de una sustancia a favor de su gradiente impulsa el transporte de otra en contra del suyo.

También es importante distinguir entre canales y transportadores. Los canales forman poros selectivos que permiten un paso rápido de sustancias cuando están abiertos, mientras que los transportadores actúan mediante cambios conformacionales y presentan una velocidad más limitada. En conjunto, todos estos mecanismos hacen posible que la célula mantenga su estabilidad interna y genere las condiciones necesarias para la señalización y la excitabilidad.

6. Transporte de agua, osmolaridad y tonicidad

El agua es el componente más abundante del organismo y su movimiento a través de la membrana es esencial para mantener el volumen celular y la estabilidad del medio intracelular. Este movimiento depende de la distribución de solutos a ambos lados de la membrana, ya que el agua se desplaza por ósmosis hacia el compartimento con mayor concentración efectiva de partículas disueltas.

Para expresar esta capacidad de atraer agua se utilizan los conceptos de osmolaridad y osmolalidad, que reflejan la concentración total de partículas osmóticamente activas. Sin embargo, desde el punto de vista funcional resulta especialmente importante la tonicidad, que describe el efecto real de una solución sobre el volumen celular. Así, una solución isotónica no

modifica el volumen celular, una hipertónica provoca salida de agua y encogimiento celular, y una hipotónica produce entrada de agua e hinchazón.

La tonicidad depende sobre todo de los solutos no penetrantes, es decir, aquellos que no atraviesan con facilidad la membrana y mantienen un gradiente osmótico sostenido. Por el contrario, los solutos penetrantes tienden a equilibrarse entre ambos lados y su efecto osmótico suele ser transitorio. Por ello, el movimiento de agua está estrechamente ligado al transporte de solutos y a la permeabilidad selectiva de la membrana.

Aunque el agua puede atravesar la bicapa lipídica, en muchas células este paso se facilita gracias a las acuaporinas, canales específicos que aumentan notablemente la permeabilidad al agua. Gracias a estos mecanismos, la célula puede responder con rapidez a cambios osmóticos del medio.

7. Gradientes iónicos y compartimentos intra- y extracelular

Una característica fundamental de la célula viva es que el medio intracelular y el medio extracelular no tienen la misma composición iónica. En general, el interior celular contiene una mayor concentración de potasio y de aniones orgánicos, mientras que el exterior presenta concentraciones más elevadas de sodio, cloruro y calcio. Esta distribución desigual de iones es esencial para el funcionamiento celular.

Los gradientes iónicos se originan por la acción conjunta de varios factores. Por un lado, la membrana plasmática presenta una permeabilidad selectiva, de manera que algunos iones atraviesan la membrana con mayor facilidad que otros. Por otro, existen mecanismos de transporte activo que utilizan energía para mantener diferencias de concentración entre ambos compartimentos. Además, la presencia de aniones no difusibles en el interior celular contribuye a conservar esta distribución asimétrica.

Estos gradientes no representan un equilibrio estático, sino un estado estacionario dinámico que requiere un gasto continuo de energía. Los iones tienden de forma constante a moverse según sus gradientes, pero ese movimiento es compensado por la actividad de bombas y sistemas de transporte. Gracias a ello, la célula puede conservar una composición interna estable a pesar del intercambio continuo con el entorno.

Desde el punto de vista fisiológico, los gradientes iónicos constituyen una forma de energía potencial almacenada. Además de contribuir al mantenimiento del volumen celular, son la base de la diferencia de potencial eléctrico a través de la membrana. Por ello, resultan imprescindibles para la excitabilidad de neuronas y fibras musculares y para comprender, en los temas siguientes, el potencial de membrana y el potencial de acción.

Bloque IV-Excitabilidad de las membranas celulares

1. Concepto de excitabilidad celular

La excitabilidad celular es la capacidad que tienen determinadas células de responder a un estímulo mediante cambios rápidos y reproducibles en su potencial de membrana. Esta propiedad permite a la célula detectar señales, transformarlas y, en muchos casos, transmitir información a otras células. Por ello, la excitabilidad constituye la base fisiológica de funciones como la transmisión nerviosa, la contracción muscular y la actividad eléctrica del corazón.

No todas las células del organismo son excitables en el mismo grado. Las neuronas y las células musculares son los ejemplos más representativos de células excitables, ya que pueden generar respuestas eléctricas rápidas e incluso potenciales de acción. Otras células también presentan

potencial de membrana y responden a estímulos, pero sus cambios eléctricos suelen ser más lentos y graduales, sin llegar a desencadenar verdaderos potenciales de acción.

La respuesta eléctrica de una célula depende de la acción de un estímulo, que puede ser de naturaleza eléctrica, química, mecánica o térmica. Este estímulo modifica la permeabilidad de la membrana a determinados iones y produce cambios en el potencial de membrana, como despolarización o hiperpolarización. Si el cambio alcanza una intensidad suficiente, puede iniciarse una respuesta activa.

La excitabilidad depende directamente de la existencia de gradientes iónicos a ambos lados de la membrana y de la presencia de canales iónicos que regulan el paso selectivo de estos iones. Por tanto, el potencial de membrana y la actividad de los canales iónicos son la base inmediata de la excitabilidad celular y del comportamiento eléctrico de los tejidos excitables.

2. Bases iónicas del potencial de membrana

El potencial de membrana se origina por la distribución desigual de iones entre el medio intracelular y el medio extracelular. En general, el interior celular contiene una mayor concentración de potasio y aniones orgánicos, mientras que el exterior es rico en sodio, cloruro y calcio. Estas diferencias de concentración no son casuales, sino que se mantienen gracias a mecanismos de transporte activo y constituyen la base energética de la actividad eléctrica celular.

La membrana plasmática presenta una permeabilidad selectiva, de modo que no todos los iones la atraviesan con la misma facilidad. En condiciones de reposo, la membrana es mucho más permeable al potasio que al sodio o al calcio, lo que hace que el potasio tenga un papel predominante en la determinación del potencial de membrana. Esta permeabilidad diferencial es uno de los factores fundamentales que explican por qué el interior de la célula es eléctricamente negativo respecto al exterior.

El movimiento de los iones a través de la membrana está determinado por dos fuerzas: el gradiente químico, que impulsa a los iones desde donde están más concentrados hacia donde lo están menos, y el gradiente eléctrico, que depende de la diferencia de cargas entre ambos lados de la membrana. La combinación de ambas fuerzas constituye el gradiente electroquímico, que determina la dirección y magnitud del flujo iónico.

Cada ion tiende a mover el potencial de membrana hacia su propio potencial de equilibrio, pero su influencia real depende de la permeabilidad de la membrana a ese ion. Por ello, aunque varios iones participan en la generación del potencial de membrana, no todos contribuyen por igual. En conjunto, el potencial de membrana resulta del equilibrio dinámico entre gradientes iónicos y permeabilidad selectiva, y constituye la base de todos los fenómenos eléctricos de las células excitables.

3. Potencial de membrana en reposo

El potencial de membrana en reposo es la diferencia de potencial eléctrico que existe entre el interior y el exterior de la célula cuando esta no está generando señales eléctricas activas. En la mayoría de las células excitables, el interior celular es negativo con respecto al exterior. Este potencial no es un estado estático, sino una situación dinámica mantenida por la distribución desigual de iones y por la permeabilidad selectiva de la membrana.

El ion que más influye en el potencial de reposo es el potasio, ya que en condiciones basales la membrana es especialmente permeable a él. El potasio tiende a salir de la célula siguiendo su gradiente químico, pero al hacerlo deja cargas negativas en el interior, lo que genera una fuerza eléctrica que se opone a su salida. El resultado es un equilibrio dinámico que sitúa el potencial de reposo cerca del potencial de equilibrio del potasio.

Aunque en menor medida, otros iones también participan en este potencial. El sodio contribuye a que el potencial de reposo sea algo menos negativo de lo que sería si solo dependiera del potasio, ya que existe una pequeña entrada continua de este ion. El cloruro también puede intervenir en la estabilización del potencial de membrana, dependiendo del tipo celular y de su distribución a ambos lados de la membrana.

El mantenimiento a largo plazo del potencial de reposo depende de la bomba sodio-potasio, que conserva los gradientes iónicos al expulsar sodio e introducir potasio mediante transporte activo. Gracias a la acción conjunta de esta bomba, de los gradientes iónicos y de la permeabilidad selectiva, la célula mantiene una polarización estable que constituye el punto de partida para la excitabilidad y para la generación de respuestas eléctricas.

4. Propiedades pasivas de la membrana y respuestas locales

La membrana plasmática puede analizarse como un sistema eléctrico pasivo, cuyas propiedades determinan cómo se comportan los cambios de potencial antes de que se genere un potencial de acción. Estas propiedades dependen de la estructura de la membrana y del medio intra y extracelular, y explican la forma en que la célula responde a estímulos subumbrales e integra la información eléctrica.

Entre las propiedades pasivas más importantes destacan la resistencia y la capacitancia de la membrana. La resistencia refleja la oposición al paso de corriente iónica y depende del número de canales abiertos, mientras que la capacitancia expresa la capacidad de la membrana para almacenar carga eléctrica. Juntas determinan la velocidad y la amplitud con que cambia el potencial de membrana ante un estímulo.

Cuando un estímulo no alcanza el umbral, produce una respuesta pasiva o local, es decir, una despolarización o hiperpolarización de amplitud variable y proporcional a la intensidad del estímulo. Estas respuestas, también llamadas potenciales graduados, no siguen la ley del todo o nada y se atenúan progresivamente con la distancia y con el tiempo. Por ello, su propagación es limitada y recibe el nombre de conducción electrotónica.

A pesar de su carácter decremental, las respuestas locales tienen gran importancia fisiológica porque permiten la integración de señales. Pueden sumarse en el espacio y en el tiempo, de modo que varios estímulos débiles pueden combinarse y producir una despolarización suficiente para alcanzar el umbral. Así, las propiedades pasivas de la membrana y las respuestas locales constituyen el paso previo necesario para la excitación activa y la generación del potencial de acción.

5. Umbral de excitación y potencial de acción

El umbral de excitación es el nivel crítico de despolarización que debe alcanzar la membrana para que se inicie un potencial de acción. Representa el punto a partir del cual la entrada de iones despolarizantes, sobre todo sodio, supera a las fuerzas que estabilizan la membrana. Mientras no se alcance ese nivel, la respuesta permanece local y graduada; cuando se supera, se desencadena una respuesta eléctrica activa.

La respuesta local actúa así como el paso intermedio entre las propiedades pasivas de la membrana y la excitación activa. Si la despolarización es suficiente, se abren de forma masiva canales dependientes de voltaje y se inicia el potencial de acción. Si no se alcanza el umbral, la respuesta se atenúa y desaparece sin propagarse. Por ello, el umbral funciona como un mecanismo de selección que evita respuestas frente a estímulos débiles o aleatorios.

El potencial de acción es una variación rápida, transitoria y estereotipada del potencial de membrana que se propaga sin pérdida de amplitud. Se caracteriza por seguir el principio de todo

o nada: una vez alcanzado el umbral, su amplitud y forma son prácticamente independientes de la intensidad del estímulo. Esto lo diferencia claramente de los potenciales graduados.

Durante el potencial de acción se distinguen varias fases: una despolarización rápida, una repolarización y, en muchas células, una hiperpolarización transitoria posterior. Estas fases reflejan cambios secuenciales en la permeabilidad de la membrana a distintos iones. En conjunto, el potencial de acción constituye la señal eléctrica básica de las células excitables y permite la transmisión rápida y fiable de información en el sistema nervioso y en el tejido muscular.

6. Bases iónicas, períodos refractarios y propagación del potencial de acción

El potencial de acción depende de cambios secuenciales y transitorios en la permeabilidad de la membrana a distintos iones, sobre todo sodio y potasio. La despolarización rápida se produce por la apertura masiva de canales de sodio dependientes de voltaje, que permiten la entrada de sodio al interior celular. Poco después, estos canales se inactivan y se abren canales de potasio, cuya salida favorece la repolarización de la membrana y, en muchos casos, una hiperpolarización transitoria posterior.

Tras un potencial de acción aparecen los períodos refractarios, durante los cuales la célula presenta una capacidad reducida o nula para generar otro potencial. En el período refractario absoluto no puede desencadenarse un nuevo potencial de acción, porque los canales de sodio se encuentran inactivados. En el período refractario relativo, sí puede producirse otro potencial, pero solo ante estímulos más intensos de lo normal, ya que parte de los canales aún no se ha recuperado y la conductancia al potasio sigue elevada.

Estos períodos refractarios son fundamentales porque limitan la frecuencia de descarga de la célula y aseguran que la propagación del potencial de acción se realice en una sola dirección. Gracias a ello, la señal eléctrica no retrocede sobre la región ya activada y la transmisión de la información resulta más ordenada y eficaz.

La propagación del potencial de acción se produce por corrientes locales que despolarizan regiones adyacentes de la membrana hasta alcanzar su umbral. De este modo, el potencial de acción se regenera sucesivamente a lo largo de la célula y se transmite sin decremento. La velocidad de propagación depende de factores como el diámetro de la fibra y las propiedades eléctricas de la membrana, y constituye la base de la comunicación rápida en neuronas y células musculares.

7. Conducción en fibras mielínicas y codificación de la información nerviosa

En muchas fibras nerviosas, el axón está rodeado por una vaina de mielina, formada por capas de membrana de células gliales que actúan como aislante eléctrico. Esta mielina no es continua, sino que presenta interrupciones periódicas llamadas nodos de Ranvier, donde se concentran numerosos canales de sodio dependientes de voltaje. Gracias a esta organización, el potencial de acción no se genera en toda la membrana, sino principalmente en los nodos.

En las fibras mielínicas, la señal eléctrica se transmite mediante conducción saltatoria. Esto significa que la corriente se desplaza rápidamente bajo la mielina y el potencial de acción se regenera de nodo en nodo. Este mecanismo aumenta mucho la velocidad de conducción y reduce el gasto energético, ya que los intercambios iónicos se concentran en regiones limitadas de la membrana. Por ello, la mielinización es una adaptación fundamental para la transmisión rápida y eficiente de la información nerviosa.

La información nerviosa no se codifica en la amplitud del potencial de acción, ya que este sigue la ley del todo o nada, sino en otros parámetros del patrón de descarga. Uno de los más importantes es la frecuencia de potenciales de acción: estímulos más intensos o prolongados generan una

mayor frecuencia de descarga. Además, la intensidad del estímulo puede codificarse mediante el reclutamiento progresivo de más fibras.

También intervienen mecanismos de integración temporal y espacial. La integración temporal ocurre cuando varios estímulos sucesivos se suman en el tiempo, mientras que la integración espacial resulta de la suma de estímulos procedentes de distintas regiones de la membrana. Gracias a estos mecanismos, el sistema nervioso puede transformar estímulos físicos y químicos en patrones de actividad eléctrica que permiten la percepción, el control motor y la coordinación funcional del organismo.

8. Variaciones tisulares

Aunque los principios básicos del potencial de membrana y de la excitabilidad son comunes, existen diferencias importantes entre los distintos tejidos excitables. En las neuronas, el potencial de acción es breve y permite una transmisión rápida y precisa de la información. En el músculo esquelético, la señal eléctrica está estrechamente acoplada a la contracción. En el músculo cardíaco, el potencial de acción es más prolongado e incluye una fase de meseta, lo que favorece una contracción rítmica sostenida. En el músculo liso, la excitabilidad es más variable y puede modularse por factores nerviosos, hormonales y locales.

Estas diferencias se deben a variaciones en los tipos de canales iónicos presentes, en sus propiedades cinéticas y en la organización funcional de cada tejido. Gracias a ello, cada tipo celular puede adaptar su comportamiento eléctrico a su función específica dentro del organismo. Así, la excitabilidad no se expresa igual en todos los tejidos, sino que se ajusta a las necesidades de la transmisión nerviosa, la contracción voluntaria, la actividad cardíaca o la motilidad visceral.

Bibliografía

Fox SI. Fisiología Humana. 15ª ed. McGraw-Hill Interamericana; 2021.

Hall JE, Guyton AC. *Guyton Y Hall : Tratado de Fisiología Médica*. 14ª ed. Elsevier España; 2021.

Kim KS, Seeley RJ, Sandoval DA. Signalling from the periphery to the brain that regulates energy homeostasis. *Nat Rev Neurosci*. 2018;19:185.

Koeppen BM. Berne Y Levy. Fisiología. [New edition]. Elsevier; 2024.

Ganong Fisiología Médica. McGraw-Hill Education LLC; 2025.

Vacher H, Mohapatra DP, Trimmer JS. Localization and targeting of voltage-dependent ion channels in mammalian central neurons. *Physiol Rev*. 2008;88:1407.

Silverthorn DU. *Fisiología Humana Un Enfoque Integrado*. Ed. 8. Editorial Médica Panamericana; 2019.

Tema 2. Control motor voluntario

1. Introducción al sistema motor somático

1.1. Concepto de sistema motor somático

El sistema motor somático es el conjunto de estructuras del sistema nervioso encargadas de generar, regular y ejecutar el movimiento voluntario, así como de mantener la postura corporal y permitir la interacción eficaz con el entorno. Su acción final se ejerce sobre el músculo esquelético, que constituye el efector principal de este sistema.

Desde un punto de vista funcional, el sistema motor somático integra información procedente de múltiples niveles del sistema nervioso —médula espinal, tronco encefálico, cerebelo, ganglios basales y corteza cerebral— para producir respuestas motoras precisas, coordinadas y adaptadas a la tarea. Estas respuestas pueden ser voluntarias, automáticas o reflejas, y suelen coexistir durante la realización de cualquier movimiento humano.

El sistema motor somático permite no solo la ejecución de gestos técnicos complejos, sino también la adaptación continua del movimiento a cambios internos (fatiga, estado muscular) y externos (terreno, oponentes, implementos).

1.2. Función del sistema motor en el control del movimiento y la postura

Las funciones principales del sistema motor somático pueden agruparse en tres grandes ámbitos:

- Producción del movimiento voluntario, que incluye tanto movimientos simples como acciones complejas y altamente coordinadas.
- Mantenimiento de la postura y del equilibrio, tanto en situaciones estáticas como dinámicas.
- Regulación del tono muscular, necesario para estabilizar las articulaciones y preparar al músculo para la acción.

El movimiento humano no es el resultado de la activación aislada de un músculo, sino de la coordinación entre múltiples grupos musculares, organizados funcionalmente como agonistas, antagonistas y sinergistas. El sistema nervioso ajusta continuamente la intensidad y el momento de activación de cada músculo para lograr una acción eficiente.

Durante el ejercicio físico, el control postural adquiere especial relevancia, ya que debe garantizar la estabilidad corporal al mismo tiempo que se ejecutan movimientos rápidos o potentes. Este control se basa en la integración de información sensorial procedente de los sistemas propioceptivo, vestibular y visual, que permite realizar ajustes motores constantes, muchas veces de forma inconsciente.

1.3. Organización general del control motor

El control motor presenta una organización jerárquica y distribuida, en la que participan distintos niveles del sistema nervioso con funciones complementarias:

- Nivel espinal, responsable de la ejecución final del movimiento mediante las motoneuronas y de la integración de reflejos.
- Nivel subcortical, que incluye el tronco encefálico, el cerebelo y los ganglios basales, implicados en la regulación del tono, la postura, la coordinación y la automatización del movimiento.
- Nivel cortical, encargado de la planificación, programación y control consciente de los movimientos voluntarios.

A pesar de esta organización jerárquica, el control motor no funciona de manera estrictamente lineal. Existen múltiples vías de retroalimentación que permiten ajustar el movimiento mientras se está ejecutando, lo que resulta esencial para la precisión y la adaptación a situaciones cambiantes.

Esta organización explica por qué el aprendizaje motor, la repetición de gestos técnicos y la mejora del rendimiento dependen tanto de adaptaciones neurales como musculares. El sistema motor somático es, por tanto, un elemento clave no solo en la ejecución del movimiento, sino también en su optimización a través del entrenamiento.

2. Organización funcional del sistema nervioso motor

2.1. Neuronas motoras: motoneuronas alfa y gamma

La organización funcional del sistema nervioso motor se articula en torno a las neuronas motoras, que constituyen el elemento esencial mediante el cual el sistema nervioso ejerce su control sobre el músculo esquelético. Estas neuronas se localizan fundamentalmente en la médula espinal y en determinados núcleos motores del tronco encefálico, y su actividad determina la ejecución final del movimiento.

Las motoneuronas alfa son las responsables directas de la contracción muscular, ya que inervan las fibras musculares extrafusales. La activación de estas neuronas provoca el acortamiento de las fibras musculares y la generación de fuerza, siendo por tanto el mecanismo final común de producción del movimiento. En función del número de motoneuronas activadas y de su patrón de descarga, el sistema nervioso puede regular la intensidad y la duración de la contracción muscular.

Junto a las motoneuronas alfa, el sistema nervioso motor incluye las motoneuronas gamma, que inervan las fibras intrafusales de los husos musculares. Estas neuronas no participan directamente en la generación de fuerza, sino que regulan la sensibilidad del huso muscular al estiramiento. De este modo, permiten que la información propioceptiva procedente del músculo se mantenga activa tanto en reposo como durante la contracción.

La activación coordinada de motoneuronas alfa y gamma resulta esencial para el control eficaz del movimiento, ya que asegura una retroalimentación sensorial continua que permite ajustar la contracción muscular en función de las exigencias de la tarea motora.

2.2. Vía final común y convergencia sináptica

Las motoneuronas alfa reciben la denominación de vía final común del sistema nervioso motor, ya que todas las señales que regulan la actividad muscular convergen necesariamente sobre ellas. Esto implica que la respuesta motora observable es siempre el resultado de la integración de múltiples influencias nerviosas, tanto de origen periférico como central.

Sobre cada motoneurona alfa confluyen aferencias sensoriales procedentes de receptores musculares y tendinosos, conexiones interneuronales espinales y señales descendentes procedentes de centros supraespinales. Estas aferencias pueden ser excitadoras o inhibitorias, y su integración determina el nivel de activación final de la motoneurona.

La convergencia sináptica permite al sistema nervioso ajustar de forma precisa la respuesta muscular, modulando la fuerza desarrollada y la coordinación entre distintos grupos musculares. Este mecanismo resulta fundamental para la adaptación del movimiento a las demandas mecánicas del ejercicio y para la estabilidad del sistema músculo-esquelético durante la actividad física.

2.3. Papel de las interneuronas espinales

Las interneuronas espinales desempeñan un papel central en la organización funcional del sistema nervioso motor, ya que permiten integrar y modular la información nerviosa antes de que esta alcance a las motoneuronas. Estas neuronas se localizan en la sustancia gris de la médula espinal y forman circuitos complejos que coordinan la actividad motora.

A través de las interneuronas se establecen mecanismos de excitación e inhibición que regulan la relación entre músculos agonistas y antagonistas. Gracias a estos circuitos, la activación de un músculo puede ir acompañada de la inhibición de su antagonista, facilitando la ejecución fluida y eficiente del movimiento.

Además, las interneuronas espinales constituyen la base de los circuitos reflejos y participan activamente en la integración de la información sensorial y motora. De este modo, la médula espinal actúa no solo como una vía de transmisión, sino como un auténtico centro de procesamiento y control del movimiento, especialmente relevante en el mantenimiento de la postura y en la ejecución de movimientos automáticos durante la actividad física.

3. Unidad motora y control de la contracción muscular

3.1. Concepto de unidad motora

La unidad motora constituye la unidad funcional básica del sistema neuromuscular y está formada por una motoneurona alfa y el conjunto de fibras musculares extrafusales que inerva. Todas las fibras musculares pertenecientes a una misma unidad motora se contraen de manera simultánea cuando la motoneurona alfa descarga potenciales de acción.

Este concepto es fundamental para comprender cómo el sistema nervioso controla la fuerza y el movimiento, ya que la contracción muscular no se produce fibra a fibra, sino mediante la activación coordinada de unidades motoras. El número de fibras musculares inervadas por una motoneurona puede variar considerablemente en función del músculo y de su función, lo que condiciona el grado de control motor que puede ejercerse sobre él.

En músculos implicados en movimientos finos y precisos, como los de la mano, las unidades motoras suelen ser pequeñas, con pocas fibras musculares por motoneurona. Por el contrario, en músculos destinados a la producción de fuerza, como los extensores de la rodilla, las unidades motoras son más grandes y una sola motoneurona puede inervar un número elevado de fibras musculares.

3.2. Tipos de unidades motoras

Las unidades motoras no son todas iguales, sino que presentan características funcionales distintas en función del tipo de fibras musculares que inervan. Desde un punto de vista funcional, pueden

diferenciarse unidades motoras adaptadas a la producción de fuerza rápida y unidades motoras más resistentes a la fatiga.

Algunas unidades motoras están formadas por fibras musculares de contracción lenta, que desarrollan menor fuerza pero presentan una elevada resistencia a la fatiga. Estas unidades motoras participan de forma preferente en el mantenimiento de la postura y en actividades de baja intensidad y larga duración. Otras unidades motoras están compuestas por fibras de contracción rápida, capaces de generar grandes niveles de fuerza y potencia, pero con una menor resistencia a la fatiga, siendo especialmente relevantes en acciones explosivas propias de muchas disciplinas deportivas.

La coexistencia de distintos tipos de unidades motoras dentro de un mismo músculo permite al sistema nervioso adaptar la respuesta muscular a las exigencias de cada tarea, seleccionando las unidades motoras más adecuadas en función de la intensidad y la duración del esfuerzo.

3.3. Reclutamiento de unidades motoras

El reclutamiento de unidades motoras es uno de los principales mecanismos mediante los cuales el sistema nervioso regula la fuerza desarrollada por un músculo. Este proceso consiste en la activación progresiva de un mayor número de unidades motoras a medida que aumentan las demandas de fuerza.

En condiciones normales, el reclutamiento sigue un orden relativamente predecible, de modo que las unidades motoras más pequeñas y resistentes a la fatiga se activan primero, mientras que las unidades motoras de mayor tamaño y mayor capacidad de producción de fuerza se incorporan progresivamente conforme aumenta la intensidad del esfuerzo. Este principio permite una utilización eficiente del músculo y retrasa la aparición de la fatiga.

Durante la actividad física, el patrón de reclutamiento de unidades motoras se adapta a las características del ejercicio. En esfuerzos de baja intensidad predominan las unidades motoras lentas, mientras que en acciones de alta intensidad o explosivas se requiere la activación de unidades motoras rápidas para alcanzar los niveles de fuerza necesarios.

3.4. Frecuencia de descarga y control de la fuerza

Además del reclutamiento de unidades motoras, el sistema nervioso puede regular la fuerza muscular mediante la modificación de la frecuencia de descarga de las motoneuronas alfa. Este mecanismo se basa en el hecho de que una mayor frecuencia de potenciales de acción provoca una mayor suma de las contracciones individuales de las fibras musculares, incrementando la fuerza desarrollada.

Cuando la frecuencia de descarga es baja, la contracción muscular es débil y discontinuada. A medida que aumenta la frecuencia, las contracciones se superponen y se produce una contracción más intensa y sostenida. En situaciones de máxima exigencia, la elevada frecuencia de descarga permite alcanzar niveles elevados de tensión muscular.

En la práctica deportiva, la regulación combinada del reclutamiento de unidades motoras y de la frecuencia de descarga permite ajustar con gran precisión la producción de fuerza a las demandas del movimiento. El entrenamiento induce adaptaciones neurales que mejoran la capacidad del sistema nervioso para reclutar unidades motoras de forma más eficaz y aumentar la frecuencia de descarga, contribuyendo así a las mejoras en el rendimiento, especialmente en ejercicios de fuerza y potencia.

4. Receptores sensoriales musculares y articulares

4.1. Huso muscular: estructura y función

El huso muscular es el principal receptor sensorial implicado en el control de la longitud muscular y en la regulación del tono. Se localiza en el interior del músculo esquelético, dispuesto en paralelo a las fibras musculares extrafusales responsables de la contracción, y constituye un elemento clave en el control reflejo y postural del movimiento.

Desde el punto de vista estructural, el huso muscular está formado por fibras musculares especializadas denominadas fibras intrafusales. Estas fibras presentan una región central no contráctil, donde se sitúan los elementos sensitivos, y extremos polares contráctiles que reciben inervación motora de las motoneuronas gamma. Esta organización permite que el huso muscular ajuste su sensibilidad en función del estado funcional del músculo.

La información sensorial generada en el huso muscular se transmite a la médula espinal a través de fibras aferentes primarias y secundarias. Las fibras primarias informan principalmente sobre la velocidad del estiramiento muscular, mientras que las fibras secundarias aportan información relacionada con la longitud muscular mantenida. Gracias a esta doble vía, el sistema nervioso dispone de información tanto dinámica como estática sobre el estado del músculo.

Durante el movimiento voluntario y el ejercicio físico, la coactivación de motoneuronas alfa y gamma permite que el huso muscular continúe siendo sensible incluso cuando el músculo se contrae. De este modo, se garantiza una retroalimentación sensorial continua que resulta esencial para el ajuste fino del movimiento y para el mantenimiento de la estabilidad postural.

4.2. Órgano tendinoso de Golgi

El órgano tendinoso de Golgi es un receptor sensorial localizado en la unión músculo-tendinosa y especializado en detectar cambios en la tensión desarrollada por el músculo. A diferencia del huso muscular, que responde principalmente al estiramiento, el órgano tendinoso de Golgi informa sobre la fuerza generada durante la contracción muscular.

Este receptor se dispone en serie con las fibras musculares extrafusales y se activa cuando aumenta la tensión transmitida al tendón, ya sea por contracción activa del músculo o por fuerzas externas. La información sensorial se conduce hacia la médula espinal a través de fibras aferentes de tipo Ib, que establecen sinapsis con interneuronas espinales.

La activación del órgano tendinoso de Golgi suele producir un efecto inhibidor sobre las motoneuronas del músculo que genera la tensión, contribuyendo a regular la fuerza desarrollada y a proteger el sistema músculo-tendinoso frente a cargas excesivas. Este mecanismo tiene una especial relevancia en actividades que implican elevados niveles de fuerza o tensión muscular.

En el contexto del ejercicio físico y del entrenamiento, el órgano tendinoso de Golgi desempeña un papel importante en la modulación de la fuerza y en la prevención de lesiones. Las adaptaciones neurales inducidas por el entrenamiento pueden modificar la respuesta de este receptor, permitiendo una mayor tolerancia a la tensión sin comprometer la integridad del tejido músculo-tendinoso.

4.3. Otros receptores propioceptivos: articulares y cutáneos

Además de los receptores musculares y tendinosos, el control motor se apoya en la información procedente de otros receptores periféricos, entre los que destacan los receptores articulares y los receptores cutáneos. Los receptores articulares se localizan en las cápsulas y ligamentos de las articulaciones y proporcionan información relacionada con la posición y el movimiento articular, especialmente en los extremos del rango de movimiento.

Los receptores cutáneos aportan información táctil y de presión que resulta relevante para el control motor, especialmente durante la interacción con el entorno. En muchas acciones motoras, como el apoyo del pie en el suelo o el agarre de objetos, la información cutánea complementa la propiocepción muscular y articular, contribuyendo a una ejecución más precisa del movimiento.

La integración de la información procedente de estos receptores permite al sistema nervioso construir una representación sensorial completa del estado del aparato locomotor, esencial para la regulación del movimiento y la postura.

4.4. Papel de la información aferente en el control motor

La información aferente procedente de los receptores sensoriales periféricos constituye un elemento fundamental del control motor. Esta información permite al sistema nervioso ajustar continuamente la actividad muscular en función de los cambios que se producen durante el movimiento, tanto en condiciones estáticas como dinámicas.

A nivel espinal, la información aferente participa directamente en la generación y modulación de los reflejos, mientras que a niveles superiores contribuye a la regulación del movimiento voluntario y al aprendizaje motor. En el ejercicio físico, esta retroalimentación sensorial resulta imprescindible para mantener la coordinación, la estabilidad y la eficiencia del movimiento.

Un adecuado funcionamiento de los sistemas sensoriales periféricos mejora el control postural, la precisión del gesto motor y la capacidad de adaptación a situaciones cambiantes. Por ello, el entrenamiento que estimula la propiocepción y el control sensorial constituye una herramienta clave tanto para la mejora del rendimiento como para la prevención de lesiones.

5. Reflejos espinales y control del movimiento

5.1. El arco reflejo como unidad funcional

El reflejo espinal constituye la forma más básica de control motor y representa una respuesta automática e involuntaria del sistema nervioso ante un estímulo sensorial específico. Desde el punto de vista funcional, el reflejo se organiza a través del arco reflejo, que integra de manera secuencial un receptor sensorial, una vía aferente, uno o varios centros de integración en la médula espinal, una vía eferente y un órgano efector.

La estructura del arco reflejo permite respuestas rápidas, ya que la información sensorial puede generar una respuesta motora sin necesidad de la intervención consciente de los centros superiores. No obstante, la actividad refleja no es rígida ni inmodificable, sino que puede ser modulada por aferencias descendentes procedentes del encéfalo, lo que permite adaptar la respuesta refleja a las necesidades de la tarea motora.

En la actividad física, el arco reflejo constituye la base del control postural y de muchas respuestas automáticas que contribuyen a la estabilidad y a la eficiencia del movimiento.

5.2. Reflejo miotático

El reflejo miotático, o reflejo de estiramiento, es el reflejo espinal más simple y uno de los más importantes en el control del movimiento. Se produce cuando un músculo es estirado de forma rápida, desencadenando una contracción refleja del mismo músculo que se opone al estiramiento.

El receptor sensorial implicado en este reflejo es el huso muscular. El estiramiento del músculo activa las fibras aferentes que transmiten la información hacia la médula espinal, donde establecen

una sinapsis directa con las motoneuronas alfa que inervan el músculo estirado. Esta organización monosináptica permite una respuesta rápida y eficaz.

El reflejo miotático desempeña un papel fundamental en el mantenimiento del tono muscular y de la postura. Durante la actividad física, contribuye a estabilizar las articulaciones y a ajustar la longitud muscular frente a perturbaciones externas o cambios bruscos en la carga.

5.3. Regulación del reflejo miotático

La intensidad del reflejo miotático no es constante, sino que puede ser regulada por el sistema nervioso en función del contexto motor. Esta regulación se produce principalmente a través de la actividad de las motoneuronas gamma, que ajustan la sensibilidad del huso muscular al estiramiento.

La coactivación de motoneuronas alfa y gamma permite que el huso muscular continúe proporcionando información sensorial durante la contracción muscular, evitando la pérdida de sensibilidad propioceptiva. De este modo, el reflejo miotático puede adaptarse tanto a situaciones de reposo como a movimientos voluntarios.

Durante el ejercicio físico, la modulación del reflejo miotático resulta esencial para adaptar el tono muscular y la rigidez articular a las exigencias de cada tarea, contribuyendo a la eficacia del movimiento y a la prevención de lesiones.

5.4. Reflejo miotático inverso

El reflejo miotático inverso se desencadena cuando aumenta de forma excesiva la tensión desarrollada por el músculo y está mediado por el órgano tendinoso de Golgi. A diferencia del reflejo miotático, este reflejo produce una inhibición de la actividad del músculo que genera la tensión.

La información sensorial procedente del órgano tendinoso de Golgi se transmite a la médula espinal a través de fibras aferentes que establecen sinapsis con interneuronas inhibitorias. Estas interneuronas reducen la actividad de las motoneuronas alfa del músculo implicado, regulando así la fuerza desarrollada.

Este reflejo desempeña un papel importante en la protección del sistema músculo-tendinoso frente a tensiones excesivas y en la distribución de la carga entre diferentes músculos durante la actividad física.

5.5. Reflejo de retirada y reflejo extensor cruzado

El reflejo de retirada es un reflejo espinal polisináptico que se activa ante estímulos potencialmente nocivos y provoca una retirada rápida de la extremidad afectada mediante la activación de los músculos flexores y la inhibición de los extensores. Este reflejo cumple una función protectora y permite minimizar el daño tisular.

De forma asociada al reflejo de retirada aparece el reflejo extensor cruzado, que afecta a la extremidad contralateral. Mientras la extremidad estimulada se flexiona, la extremidad opuesta se extiende para mantener el equilibrio y la estabilidad postural. Este mecanismo resulta especialmente relevante en actividades que implican soporte del peso corporal.

Ambos reflejos ponen de manifiesto la complejidad de los circuitos espinales y el papel fundamental de las interneuronas en la coordinación intersegmentaria del movimiento.

5.6. Integración de los reflejos en el movimiento voluntario y el ejercicio

Aunque los reflejos espinales se caracterizan por su automatismo, su actividad se integra de forma funcional con el control voluntario del movimiento. Las señales descendentes procedentes de los centros superiores pueden modular la intensidad y la expresión de los reflejos, permitiendo su adaptación a las exigencias de la tarea motora.

Durante el ejercicio físico, los reflejos espinales contribuyen a la estabilidad, la coordinación y la eficiencia del movimiento. El entrenamiento puede modificar la respuesta refleja y mejorar la integración entre control reflejo y voluntario, optimizando el rendimiento motor y reduciendo el riesgo de lesión.

6. Integración espinal del movimiento

6.1. La médula espinal como centro integrador del control motor

La médula espinal no debe entenderse únicamente como una vía de transmisión de información entre el encéfalo y la periferia, sino como un centro integrador fundamental del control motor. En ella convergen aferencias sensoriales procedentes de los receptores periféricos, señales descendentes de los centros supraespinales y circuitos locales que permiten generar respuestas motoras adaptadas a las exigencias de cada situación.

A nivel espinal se integran reflejos, patrones de activación muscular y ajustes posturales automáticos que constituyen la base del movimiento humano. Esta integración permite respuestas rápidas y eficientes, especialmente importantes en actividades que requieren estabilidad y adaptación inmediata frente a perturbaciones externas.

En la actividad física, la médula espinal desempeña un papel clave en la regulación del tono muscular y en la coordinación de los músculos implicados en el mantenimiento de la postura y en la ejecución de movimientos automáticos.

6.2. Coordinación intermuscular a nivel espinal

La coordinación intermuscular es el resultado de la acción integrada de múltiples circuitos espinales que regulan la relación funcional entre distintos músculos y grupos musculares. A través de interneuronas excitadoras e inhibitorias, la médula espinal ajusta la activación relativa de músculos agonistas, antagonistas y sinergistas.

Este control permite que los músculos trabajen de forma coordinada, evitando activaciones innecesarias o contraproducentes que podrían dificultar el movimiento. La inhibición recíproca constituye uno de los mecanismos fundamentales de esta coordinación, facilitando la activación del músculo agonista mientras se reduce la actividad del antagonista.

Durante la actividad física y el deporte, una coordinación intermuscular eficaz mejora la eficiencia mecánica del movimiento, reduce el gasto energético y contribuye a la estabilidad articular, aspectos esenciales para el rendimiento y la prevención de lesiones.

6.3. Control espinal del tono muscular y la postura

El tono muscular se define como el estado de ligera contracción permanente que presentan los músculos en reposo y constituye un elemento esencial para el mantenimiento de la postura y la preparación para el movimiento. El control del tono muscular depende en gran medida de la integración espinal de la información sensorial y motora.

A través de los reflejos espinales, especialmente del reflejo miotático, la médula espinal regula el grado de activación muscular necesario para mantener la postura frente a la gravedad y a perturbaciones externas. La sensibilidad del huso muscular y la actividad de las motoneuronas gamma desempeñan un papel central en este proceso.

En situaciones dinámicas propias del ejercicio físico, el control espinal del tono permite ajustar la rigidez muscular y articular en función de las demandas de la tarea. Este ajuste continuo resulta fundamental para garantizar la estabilidad corporal y la eficacia del movimiento, especialmente en acciones que implican cambios rápidos de dirección, velocidad o carga.

7. Control supraespinal del movimiento

7.1. Papel del tronco encefálico en el control postural

El tronco encefálico constituye un elemento esencial del control supraespinal del movimiento, ya que actúa como un centro integrador entre la información sensorial, los circuitos espinales y las estructuras superiores del encéfalo. Su función principal en el control motor está relacionada con la regulación del tono muscular, la postura y los ajustes posturales automáticos que acompañan al movimiento voluntario.

A través de sus núcleos y vías descendentes, el tronco encefálico ejerce una influencia constante sobre la médula espinal, modulando la actividad de las motoneuronas y de los circuitos reflejos. Este control resulta fundamental para mantener la estabilidad corporal frente a la gravedad y para responder de forma rápida a perturbaciones externas, como cambios inesperados en la base de apoyo o en la carga aplicada al cuerpo.

Durante la actividad física, el papel del tronco encefálico es especialmente relevante en movimientos que requieren equilibrio dinámico y control postural continuo, como la carrera, los saltos o los cambios rápidos de dirección. Estos ajustes suelen producirse de forma inconsciente y permiten que el movimiento voluntario se ejecute sobre una base postural estable.

7.2. Función del cerebelo en la coordinación del movimiento

El cerebelo desempeña un papel clave en la coordinación y regulación del movimiento, actuando como un sistema de control que compara el movimiento planificado con el movimiento realmente ejecutado. Su función principal no es iniciar la contracción muscular, sino ajustar la precisión, la sincronización y la fluidez de la acción motora.

Para ello, el cerebelo recibe información procedente de la corteza cerebral, que refleja la intención motora, y de los sistemas sensoriales periféricos, que informan sobre el estado real del aparato locomotor. Al integrar ambas fuentes de información, el cerebelo puede detectar discrepancias y generar señales correctoras que modulan la actividad de los centros motores.

En el ejercicio físico y el deporte, la función cerebelosa resulta esencial para la ejecución eficaz de gestos técnicos complejos, especialmente aquellos que requieren una coordinación precisa entre diferentes segmentos corporales. El cerebelo contribuye además al ajuste del movimiento en tiempo real y a la adaptación a situaciones cambiantes del entorno.

7.3. Ganglios basales y automatización del gesto motor

Los ganglios basales forman parte del sistema de control supraespinal del movimiento y participan principalmente en la selección, iniciación y automatización de los programas motores. A diferencia de otras estructuras motoras, los ganglios basales no actúan directamente sobre las

motoneuronas espinales, sino que modulan la actividad de la corteza cerebral a través de circuitos funcionales cerrados.

Una de las funciones más relevantes de los ganglios basales es facilitar la ejecución fluida del movimiento voluntario, regulando su inicio y continuidad. Asimismo, intervienen en la automatización de los gestos motores aprendidos, permitiendo que movimientos repetidos se realicen con menor demanda de control consciente.

En el ámbito de la actividad física, la automatización del gesto motor es un factor clave del rendimiento, ya que libera recursos atencionales y mejora la eficacia del movimiento. El entrenamiento sistemático favorece la implicación de los ganglios basales en el control motor, contribuyendo a una ejecución más estable, económica y precisa de las acciones deportivas.

8. Corteza cerebral y movimiento voluntario

8.1. Áreas corticales implicadas en el control motor

La corteza cerebral representa el nivel superior del control motor y es responsable de la planificación, programación y control consciente del movimiento voluntario. A diferencia del control espinal y subcortical, que actúa de forma predominantemente automática, la corteza permite adaptar el movimiento a objetivos específicos y a situaciones cambiantes del entorno.

Las áreas corticales implicadas en el control motor participan en la elaboración de programas motores que determinan qué músculos se activan, en qué secuencia y con qué intensidad. Estas áreas no actúan de forma aislada, sino en interacción constante con estructuras subcorticales y con la médula espinal, lo que permite una ejecución motora flexible y ajustada a las demandas de la tarea.

En el contexto de la actividad física, la corteza cerebral resulta especialmente relevante en la adquisición de nuevas habilidades motoras y en la adaptación consciente del movimiento durante el aprendizaje técnico.

8.2. Planificación y programación del movimiento

Antes de que se produzca la contracción muscular, el sistema nervioso elabora un plan motor que define las características generales del movimiento. Este proceso de planificación implica la selección del objetivo, la anticipación de las consecuencias del movimiento y la organización temporal y espacial de la acción motora.

La programación del movimiento consiste en transformar el plan motor en patrones específicos de activación muscular que puedan ser ejecutados por los niveles inferiores del sistema nervioso. Una vez establecido el programa, este se transmite a las estructuras subcorticales y espinales, que se encargan de su ejecución y ajuste.

Durante el ejercicio físico, la planificación y programación del movimiento permiten adaptar el gesto motor a las exigencias técnicas de cada disciplina, así como realizar ajustes conscientes ante cambios en la estrategia o en las condiciones de la tarea.

8.3. Control consciente, retroalimentación y aprendizaje motor

La corteza cerebral participa activamente en el control consciente del movimiento, especialmente en fases iniciales del aprendizaje motor. Durante este proceso, la información sensorial

procedente de la ejecución del movimiento se utiliza para evaluar el resultado de la acción y realizar correcciones posteriores.

A medida que una habilidad motora se practica de forma repetida, el control cortical directo disminuye y el movimiento se vuelve más automático, delegándose progresivamente en estructuras subcorticales y espinales. Este proceso de automatización mejora la eficiencia del movimiento y reduce la carga cognitiva asociada a su ejecución.

El aprendizaje motor depende de la interacción entre el control cortical consciente y los mecanismos automáticos de regulación del movimiento. La práctica sistemática y el feedback adecuado favorecen la consolidación de patrones motores eficaces, permitiendo una ejecución más precisa, estable y adaptada a las demandas del rendimiento deportivo.

9. Integración del control neural del movimiento en la actividad física y el deporte

9.1. Integración del control reflejo y voluntario durante el ejercicio

El movimiento humano durante la actividad física no es el resultado exclusivo del control voluntario ni de la acción aislada de los reflejos, sino de la integración funcional de ambos mecanismos. El sistema nervioso combina continuamente la información procedente de los circuitos reflejos espinales con las órdenes voluntarias originadas en los centros supraespinales, permitiendo una ejecución motora eficaz y adaptada a las demandas del ejercicio.

Durante la realización de una acción motora, los reflejos espinales contribuyen al mantenimiento del tono muscular, la estabilidad articular y la respuesta rápida frente a perturbaciones externas, mientras que el control voluntario permite ajustar el movimiento a objetivos específicos. Esta interacción resulta especialmente evidente en actividades deportivas que requieren precisión técnica y adaptación constante al entorno.

9.2. Adaptaciones neurales al entrenamiento

El entrenamiento físico produce adaptaciones significativas a nivel neural que contribuyen de forma decisiva a la mejora del rendimiento. Estas adaptaciones se manifiestan principalmente como una mayor eficacia en la activación de las unidades motoras, una mejora de la coordinación intermuscular y una regulación más precisa de los reflejos espinales.

En fases iniciales del entrenamiento, las mejoras en el rendimiento se deben en gran medida a adaptaciones del sistema nervioso, incluso antes de que se produzcan cambios estructurales en el músculo. El sistema nervioso aprende a reclutar de forma más eficiente las unidades motoras, a aumentar la frecuencia de descarga y a coordinar mejor la acción de los diferentes grupos musculares implicados en el movimiento. Asimismo, el entrenamiento favorece la automatización de los gestos técnicos, reduciendo la dependencia del control consciente y mejorando la economía del movimiento.

9.3. Control neural, rendimiento y prevención de lesiones

Un control neural eficaz del movimiento constituye un factor clave tanto para el rendimiento deportivo como para la prevención de lesiones. La adecuada integración entre control reflejo y voluntario permite una ejecución motora estable, precisa y adaptada a las exigencias mecánicas de cada disciplina deportiva.

La mejora del control neuromuscular y postural contribuye a una mejor distribución de las cargas, a una mayor estabilidad articular y a una respuesta más eficaz ante situaciones imprevistas,

reduciendo el riesgo de lesión. Por ello, los programas de entrenamiento que incluyen ejercicios de coordinación, propiocepción y control postural resultan especialmente beneficiosos.

Bibliografía

Bostan AC, Strick PL. The basal ganglia and the cerebellum: nodes in an integrated network. *Nat Rev Neurosci*. 2018;19:338.

Ebbesen CL, Brecht M. Motor cortex—to act or not to act? *Nat Rev Neurosci*. 2017;18:694.

Fox SI. Fisiología Humana. 15ª ed. McGraw-Hill Interamericana; 2021.

Katch VL, MacArdle WD, Katch FI. *Fisiología Del Ejercicio : "Fundamentos"*. 4ª ed. Editorial Médica Panamericana; 2014.

López Chicharro J, Fernández Vaquero A. *Fisiología Del Ejercicio*. 4a ed. Editorial Médica Panamericana; 2023.

Proske U, Gandevia SC. The proprioceptive senses: their roles in signaling body shape, body position and movement, and muscle force. *Physiol Rev*. 2012;92:1651.

Silverthorn DU. *Fisiología Humana Un Enfoque Integrado*. Ed. 8. Editorial Médica Panamericana; 2019

Wilmore JH, Kenney WL, Costill DL. *Fisiología del Deporte y el Ejercicio*. 5th ed. Editorial Médica Panamericana; 2014.

Tema 3. Sistema nervioso autónomo

1. Introducción y concepto general del sistema nervioso autónomo

El sistema nervioso autónomo constituye la parte del sistema nervioso encargada de regular de forma involuntaria la actividad de los órganos viscerales, los vasos sanguíneos y las glándulas. Su función principal es mantener la estabilidad del medio interno y permitir que el organismo se adapte de manera adecuada a las demandas cambiantes del entorno, tanto en condiciones de reposo como durante el ejercicio físico.

A diferencia del sistema nervioso somático, que controla de forma voluntaria la musculatura esquelética, el sistema nervioso autónomo actúa de manera automática y continua, modulando la actividad de los efectores viscerales sin necesidad de control consciente. Esta regulación es esencial para garantizar el correcto funcionamiento de sistemas como el cardiovascular, respiratorio, digestivo y termorregulador.

El sistema nervioso autónomo no actúa de forma aislada, sino en estrecha interacción con otras divisiones del sistema nervioso. Recibe información procedente de centros superiores del encéfalo y de receptores periféricos, e integra estas señales para generar respuestas motoras viscerales adaptadas a las necesidades del organismo. Gracias a esta organización, el sistema nervioso autónomo puede ajustar de forma precisa la actividad de los órganos internos en función del estado fisiológico y del nivel de actividad física.

Desde un punto de vista funcional, el sistema nervioso autónomo desempeña un papel clave en el control de la homeostasis. Regula variables fundamentales como la presión arterial, la frecuencia cardíaca, el flujo sanguíneo regional y la actividad metabólica de los tejidos. Durante el ejercicio, estas funciones adquieren una especial relevancia, ya que permiten satisfacer el aumento de las demandas energéticas y garantizar el aporte adecuado de oxígeno y nutrientes a los músculos activos.

En el ámbito de las Ciencias de la Actividad Física y del Deporte, el estudio del sistema nervioso autónomo resulta imprescindible para comprender la respuesta fisiológica al ejercicio, los mecanismos de adaptación al entrenamiento y los procesos de recuperación. La regulación autonómica condiciona de forma directa el rendimiento físico y la capacidad del organismo para tolerar y adaptarse al esfuerzo.

2. Organización general del sistema nervioso autónomo

2.1. Neuronas motoras autónomas: neuronas preganglionares y posganglionares

La organización funcional del sistema nervioso autónomo se basa en una vía eferente característica formada por dos neuronas dispuestas en serie: una neurona preganglionar y una neurona posganglionar. Esta disposición contrasta con la vía motora somática, en la que una única motoneurona conecta directamente el sistema nervioso central con el músculo esquelético.

Las neuronas preganglionares tienen su cuerpo celular en el sistema nervioso central, concretamente en el tronco encefálico o en la médula espinal, y sus axones se dirigen hacia los ganglios autónomos. En estos ganglios se produce la sinapsis con las neuronas posganglionares, cuyos axones inervan directamente los órganos efectores viscerales.

Esta organización en dos neuronas permite un mayor grado de modulación de la respuesta autonómica, ya que la información procedente del sistema nervioso central puede integrarse y distribuirse a través de múltiples neuronas posganglionares, adaptando la respuesta a las necesidades funcionales de cada órgano.

2.2. Vía eferente autonómica y comparación con la vía motora somática

La vía eferente autonómica presenta diferencias estructurales y funcionales claras respecto a la vía motora somática. Mientras que el sistema somático controla la musculatura esquelética de forma voluntaria y mediante una conexión directa, el sistema nervioso autónomo regula los órganos viscerales de forma involuntaria y a través de una vía sináptica intermedia.

Desde el punto de vista funcional, esta organización permite que un mismo estímulo central produzca respuestas distribuidas y coordinadas en distintos órganos, facilitando la regulación global del organismo. Además, la transmisión en el sistema nervioso autónomo suele ser más lenta que en el sistema somático, lo que se ajusta a la naturaleza reguladora y sostenida de las funciones viscerales.

Estas diferencias explican por qué las respuestas autonómicas, como el aumento de la frecuencia cardíaca o la redistribución del flujo sanguíneo, se producen de forma progresiva y modulada, en función de la intensidad y duración del esfuerzo.

2.3. Ganglios autónomos y tipos de organización sináptica

Los ganglios autónomos constituyen estructuras clave en la organización del sistema nervioso autónomo, ya que en ellos se establece la sinapsis entre neuronas preganglionares y posganglionares. Estos ganglios pueden situarse próximos al sistema nervioso central o cerca del órgano efector, dependiendo de la división autonómica considerada.

Desde el punto de vista funcional, los ganglios autónomos no actúan únicamente como estaciones de relevo, sino que permiten la integración y modulación de la señal nerviosa. Una sola neurona preganglionar puede establecer sinapsis con múltiples neuronas posganglionares, lo que amplifica la respuesta autonómica y facilita una regulación coordinada de distintos tejidos.

La organización sináptica en los ganglios autónomos contribuye a la diversidad de respuestas del sistema nervioso autónomo y permite adaptar la intensidad y el alcance de la respuesta a las demandas fisiológicas del organismo.

2.4. Órganos efectores viscerales y características de la respuesta autonómica

Los órganos efectores del sistema nervioso autónomo incluyen el músculo liso, el músculo cardíaco y las glándulas. A diferencia del músculo esquelético, estos efectores presentan una actividad basal continua, conocida como tono autonómico, que es modulada de forma constante por el sistema nervioso.

La respuesta autonómica puede ser excitadora o inhibidora en función del tipo de receptor presente en el tejido efector y de la división autonómica activada. De este modo, un mismo neurotransmisor puede producir efectos diferentes según el órgano sobre el que actúe, lo que confiere al sistema nervioso autónomo una gran versatilidad funcional.

Durante el ejercicio físico, la modulación de los órganos efectores viscerales permite ajustar variables clave como el ritmo cardíaco, el diámetro de los vasos sanguíneos y la actividad metabólica de los tejidos, asegurando una respuesta fisiológica adecuada al esfuerzo.

3. Divisiones del sistema nervioso autónomo

3.1. División simpática: organización general

La división simpática del sistema nervioso autónomo participa de forma predominante en la preparación del organismo para situaciones que requieren una elevada activación fisiológica, como el ejercicio físico, el estrés o la respuesta frente a estímulos intensos. Su organización anatómica y funcional permite una activación rápida y coordinada de múltiples órganos y sistemas.

Las neuronas preganglionares simpáticas tienen su origen en la médula espinal, concretamente en los segmentos torácicos y lumbares superiores. Desde allí, sus axones se dirigen hacia los ganglios simpáticos, donde establecen sinapsis con las neuronas posganglionares. Esta disposición favorece una amplia distribución de la señal simpática y una respuesta global del organismo.

La organización de la división simpática permite modular funciones clave como la actividad cardiovascular, el metabolismo energético y la redistribución del flujo sanguíneo, aspectos esenciales para afrontar las demandas del ejercicio físico.

3.2. División parasimpática: organización general

La división parasimpática del sistema nervioso autónomo está implicada principalmente en la regulación de las funciones viscerales en condiciones de reposo y recuperación. Su actividad contribuye al mantenimiento de la homeostasis y a la conservación de la energía, favoreciendo procesos como la digestión y la recuperación tras el esfuerzo.

Las neuronas preganglionares parasimpáticas se localizan en el tronco encefálico y en los segmentos sacros de la médula espinal. Sus axones se dirigen hacia ganglios situados próximos o incluso dentro del órgano efector, lo que da lugar a una regulación más específica y localizada de la actividad visceral.

La división parasimpática desempeña un papel fundamental en los procesos de recuperación y adaptación al entrenamiento, regulando la disminución progresiva de la frecuencia cardíaca y la restauración del equilibrio fisiológico tras el ejercicio.

3.3. Comparación anatómica y funcional entre las divisiones simpática y parasimpática

Las divisiones simpática y parasimpática presentan diferencias anatómicas y funcionales que condicionan su modo de actuación. La división simpática se caracteriza por una organización que facilita respuestas amplias y generalizadas, mientras que la parasimpática ejerce una regulación más focalizada y específica sobre los órganos efectores.

Desde un punto de vista funcional, ambas divisiones no actúan de forma independiente, sino que mantienen una interacción constante que permite ajustar la actividad visceral a las necesidades del organismo. En muchos órganos, la actividad simpática y parasimpática ejerce efectos opuestos, lo que posibilita una regulación fina y dinámica de la función.

Durante el ejercicio físico, predomina la actividad simpática, mientras que en fases de reposo y recuperación aumenta la influencia parasimpática. El equilibrio entre ambas divisiones es un indicador importante del estado funcional del sistema nervioso autónomo y de la capacidad de adaptación del organismo al esfuerzo.

4. División simpática del sistema nervioso autónomo

4.1. Origen medular y trayecto de las fibras simpáticas

La división simpática del sistema nervioso autónomo tiene su origen en la médula espinal, concretamente en los segmentos torácicos y lumbares superiores. En estos niveles se localizan los cuerpos celulares de las neuronas preganglionares simpáticas, cuyos axones abandonan la médula espinal a través de las raíces anteriores de los nervios espinales.

Tras salir de la médula, las fibras preganglionares simpáticas se dirigen hacia los ganglios del sistema simpático, donde pueden establecer sinapsis con neuronas posganglionares o continuar su trayecto hacia otros ganglios. Esta disposición anatómica permite que la señal simpática se distribuya de forma amplia y coordinada, facilitando una respuesta global del organismo ante situaciones de activación fisiológica.

4.2. Ganglios paravertebrales y tronco simpático

Los ganglios paravertebrales forman parte del tronco simpático, una estructura longitudinal que se extiende a ambos lados de la columna vertebral. En estos ganglios, las fibras preganglionares simpáticas pueden sinaptar con neuronas posganglionares que inervan distintos órganos y tejidos.

La organización del tronco simpático permite que las fibras simpáticas procedentes de un determinado segmento medular puedan influir en órganos situados a distintos niveles del cuerpo. Esta característica favorece una activación coordinada de múltiples sistemas, como el cardiovascular, el respiratorio y el musculoesquelético.

Durante el ejercicio físico, la activación del tronco simpático contribuye al aumento de la frecuencia cardíaca, a la vasoconstricción en territorios no activos y a la redistribución del flujo sanguíneo hacia los músculos implicados en el esfuerzo.

4.3. Ganglios colaterales y nervios esplácnicos

Además de los ganglios paravertebrales, la división simpática incluye ganglios colaterales situados por delante de la columna vertebral. Las fibras preganglionares simpáticas que se dirigen a estos ganglios lo hacen a través de los nervios esplácnicos, estableciendo sinapsis con neuronas posganglionares que inervan órganos abdominales y pélvicos.

Esta organización permite una regulación eficaz de la actividad visceral, especialmente en situaciones que requieren una redistribución del flujo sanguíneo y una modificación del metabolismo energético. La activación simpática de los órganos abdominales durante el ejercicio contribuye a reducir su actividad funcional, priorizando el aporte de recursos a los músculos activos.

4.4. Médula suprarrenal y sistema simpaticoadrenal

La médula suprarrenal constituye un elemento particular dentro de la división simpática del sistema nervioso autónomo, ya que actúa como un ganglio simpático modificado. Las fibras preganglionares simpáticas inervan directamente las células de la médula suprarrenal, que responden liberando catecolaminas a la circulación sanguínea.

La liberación de adrenalina y noradrenalina desde la médula suprarrenal amplifica y prolonga los efectos de la activación simpática, permitiendo una respuesta hormonal que complementa la acción neural directa. Este sistema simpaticoadrenal desempeña un papel fundamental durante el ejercicio físico, facilitando el aumento del gasto cardíaco, la movilización de sustratos energéticos y la adaptación metabólica al esfuerzo.

En conjunto, la división simpática del sistema nervioso autónomo presenta una organización anatómica y funcional orientada a la preparación del organismo para la acción, siendo especialmente relevante en la respuesta fisiológica al ejercicio físico.

5. División parasimpática del sistema nervioso autónomo

5.1. Origen craneosacro de las fibras parasimpáticas

La división parasimpática del sistema nervioso autónomo presenta un origen anatómico diferente al de la división simpática, conocido como origen craneosacro. Las neuronas preganglionares parasimpáticas se localizan en núcleos específicos del tronco encefálico y en los segmentos sacros de la médula espinal.

Desde el tronco encefálico, las fibras parasimpáticas preganglionares abandonan el sistema nervioso central formando parte de determinados nervios craneales, mientras que las fibras de origen sacro emergen de la médula espinal para inervar órganos pélvicos. Esta disposición anatómica condiciona una distribución más específica y localizada de la actividad parasimpática.

5.2. Nervios craneales parasimpáticos

Las fibras parasimpáticas craneales se distribuyen a través de varios nervios craneales, entre los que destacan el nervio oculomotor, el facial, el glosofaríngeo y el vago. A través de estos nervios, la división parasimpática regula funciones como la actividad cardíaca, la secreción glandular y la motilidad del aparato digestivo.

Las fibras preganglionares parasimpáticas asociadas a estos nervios establecen sinapsis en ganglios situados próximos o dentro del órgano efector, lo que permite un control preciso de la función visceral. Esta organización favorece respuestas localizadas y específicas, ajustadas a las necesidades fisiológicas del organismo.

5.3. Nervio vago y control parasimpático visceral

El nervio vago constituye el principal nervio parasimpático del organismo y desempeña un papel central en la regulación de la actividad visceral. A través de sus extensas ramificaciones, el nervio vago inerva el corazón, los pulmones y gran parte del aparato digestivo, modulando funciones esenciales para el mantenimiento de la homeostasis.

En condiciones de reposo, la actividad vagal ejerce una influencia predominante sobre la frecuencia cardíaca, manteniéndola en valores relativamente bajos. Tras el ejercicio físico, la reactivación parasimpática mediada por el nervio vago contribuye a la recuperación cardiovascular y a la restauración del equilibrio fisiológico.

La magnitud y rapidez de esta recuperación vagal se utilizan habitualmente como indicadores del estado de forma y del nivel de adaptación al entrenamiento.

5.4. Inervación parasimpática sacra

Las fibras parasimpáticas de origen sacro se localizan en los segmentos inferiores de la médula espinal y se dirigen principalmente a los órganos pélvicos. A través de estas vías, la división parasimpática regula funciones como la micción, la defecación y determinados aspectos de la función reproductora.

Aunque su papel es menos relevante durante el ejercicio físico, la actividad parasimpática sacra contribuye al mantenimiento de la homeostasis general y al correcto funcionamiento de los órganos viscerales en condiciones de reposo y recuperación.

La división parasimpática del sistema nervioso autónomo, por tanto, presenta una organización anatómica y funcional orientada al mantenimiento del equilibrio interno del organismo y a la recuperación tras situaciones de activación fisiológica, complementando la acción de la división simpática.

6. Neurotransmisores del sistema nervioso autónomo

6.1. Transmisión colinérgica en el sistema nervioso autónomo

La transmisión nerviosa en el sistema nervioso autónomo se basa en la liberación de neurotransmisores específicos que permiten la comunicación entre neuronas y entre neuronas y órganos efectores. Uno de los principales neurotransmisores implicados es la acetilcolina, que desempeña un papel fundamental tanto en la división simpática como en la parasimpática.

En todas las sinapsis entre neuronas preganglionares y posganglionares del sistema nervioso autónomo, independientemente de la división considerada, el neurotransmisor liberado es la acetilcolina. Esta característica común refleja la importancia de la transmisión colinérgica en los primeros niveles de la vía autonómica.

Además, en la división parasimpática, la acetilcolina es también el neurotransmisor liberado por las neuronas posganglionares sobre los órganos efectores. La acción de la acetilcolina sobre estos tejidos permite regular funciones como la disminución de la frecuencia cardíaca, el aumento de la motilidad digestiva y la estimulación de la secreción glandular.

6.2. Transmisión adrenérgica y catecolaminas

En la división simpática, la mayoría de las neuronas posganglionares liberan noradrenalina como neurotransmisor principal. Esta transmisión adrenérgica permite regular la actividad de numerosos órganos y tejidos, incluyendo el corazón, los vasos sanguíneos y el músculo liso.

La noradrenalina actúa sobre receptores específicos presentes en los órganos efectores, generando respuestas que pueden ser excitadoras o inhibidoras en función del tipo de receptor activado. Esta diversidad de efectos contribuye a la versatilidad funcional de la división simpática.

Además de la noradrenalina liberada a nivel sináptico, el sistema simpático incluye una vía hormonal mediada por la médula suprarrenal. La activación simpática de esta estructura provoca la liberación de adrenalina y noradrenalina a la circulación sanguínea, amplificando y prolongando los efectos de la respuesta simpática durante situaciones de elevada activación fisiológica, como el ejercicio físico.

6.3. Médula suprarrenal como órgano neuroendocrino

La médula suprarrenal actúa como un órgano neuroendocrino estrechamente vinculado al sistema nervioso autónomo. Aunque forma parte del sistema simpático, su mecanismo de acción se basa en la liberación de catecolaminas directamente a la sangre, en lugar de una acción sináptica local.

Las catecolaminas circulantes permiten que la activación simpática tenga efectos generalizados y sostenidos en el tiempo, contribuyendo a la movilización de sustratos energéticos, al aumento del gasto cardíaco y a la adaptación metabólica al ejercicio. Este sistema simpaticoadrenal resulta especialmente relevante en ejercicios de alta intensidad o larga duración.

6.4. Varicosidades y sinapsis en passant

A diferencia del sistema nervioso somático, en el sistema nervioso autónomo las terminaciones nerviosas no suelen formar sinapsis bien delimitadas con una única célula efectora. En su lugar, los axones posganglionares presentan varicosidades, que son engrosamientos a lo largo del axón desde los cuales se libera el neurotransmisor.

Esta organización da lugar a sinapsis en passant, en las que el neurotransmisor se difunde a través del tejido y actúa sobre múltiples células efectoras. Este tipo de transmisión permite respuestas más difusas y prolongadas, adecuadas para la regulación de funciones viscerales que no requieren una precisión temporal extrema.

Durante el ejercicio físico, este tipo de transmisión contribuye a una regulación eficaz y sostenida de la actividad visceral, complementando la acción rápida de los mecanismos neurales directos.

7. Receptores del sistema nervioso autónomo y mecanismos de acción

7.1. Receptores colinérgicos: nicotínicos y muscarínicos

Los efectos de la acetilcolina en el sistema nervioso autónomo dependen del tipo de receptor presente en la membrana de la célula diana. Existen dos grandes tipos de receptores colinérgicos: los receptores nicotínicos y los receptores muscarínicos, que presentan localización y mecanismos de acción diferentes.

Los receptores nicotínicos se encuentran principalmente en los ganglios autónomos, donde median la transmisión sináptica entre neuronas preganglionares y posganglionares. La activación de estos receptores produce una despolarización rápida de la neurona posganglionar, facilitando la transmisión de la señal nerviosa.

Los receptores muscarínicos, por su parte, se localizan en los órganos efectores inervados por neuronas parasimpáticas posganglionares y en algunas estructuras inervadas por el sistema simpático. Su activación produce respuestas más lentas y prolongadas, mediadas por mecanismos intracelulares, lo que permite una regulación sostenida de la función visceral.

7.2. Receptores adrenérgicos: alfa y beta

Los receptores adrenérgicos son los principales mediadores de la acción de la noradrenalina y la adrenalina liberadas por el sistema simpático. Estos receptores se clasifican en dos grandes grupos, receptores alfa y receptores beta, que presentan subtipos con efectos funcionales distintos.

La activación de los receptores alfa suele asociarse a respuestas como la vasoconstricción y el aumento del tono del músculo liso, mientras que los receptores beta participan en la regulación de la actividad cardíaca, la broncodilatación y la movilización de sustratos energéticos. La distribución de estos receptores en los diferentes órganos determina la respuesta específica a la activación simpática.

En el ejercicio físico, la activación de receptores adrenérgicos permite ajustar el funcionamiento cardiovascular y metabólico a las demandas del esfuerzo, facilitando el aporte de oxígeno y nutrientes a los músculos activos.

7.3. Subtipos de receptores y segundos mensajeros

Los receptores del sistema nervioso autónomo pueden activar diferentes vías de señalización intracelular mediante la acción de segundos mensajeros. Estos mecanismos permiten amplificar la señal nerviosa y prolongar su efecto en el tiempo.

A través de la activación de proteínas G y de cascadas enzimáticas, los receptores colinérgicos y adrenérgicos modulan la actividad de enzimas, canales iónicos y procesos metabólicos en las células efectoras. Esta diversidad de mecanismos de acción explica la amplia gama de respuestas fisiológicas que puede generar el sistema nervioso autónomo.

7.4. Especificidad tisular de la respuesta autonómica

Un mismo neurotransmisor puede producir efectos diferentes, e incluso opuestos, en distintos tejidos en función del tipo de receptor presente. Esta especificidad tisular constituye una de las características fundamentales del sistema nervioso autónomo y permite una regulación fina y diferenciada de la función visceral.

Gracias a esta organización, la activación simpática o parasimpática puede generar respuestas adaptadas a las necesidades funcionales de cada órgano. En el ejercicio físico, esta especificidad permite una redistribución eficaz del flujo sanguíneo y una regulación precisa de la actividad metabólica y cardiovascular.

8. Funciones del sistema nervioso autónomo

8.1. Actividad tónica del sistema nervioso autónomo

Una de las características fundamentales del sistema nervioso autónomo es que mantiene una actividad basal continua, conocida como tono autonómico. Esto significa que los órganos viscerales no están simplemente “activados” o “desactivados”, sino que su funcionamiento depende del equilibrio dinámico entre la actividad simpática y parasimpática.

Este tono autonómico permite realizar ajustes finos y continuos en la función de los órganos, adaptándolos a las necesidades del organismo en cada momento. Por ejemplo, la frecuencia cardíaca en reposo no es el resultado de una ausencia de control neural, sino del predominio de la actividad parasimpática sobre el corazón.

La existencia de un tono autonómico constante explica por qué pequeñas variaciones en la actividad simpática o parasimpática pueden producir cambios significativos en la función visceral. Este principio es esencial para comprender la regulación fisiológica tanto en reposo como durante el ejercicio físico.

8.2. Respuesta simpática: preparación del organismo para la acción

La activación de la división simpática del sistema nervioso autónomo se asocia a situaciones que requieren una elevada demanda fisiológica, como el ejercicio físico, el estrés o la respuesta frente a estímulos intensos. Su función principal es preparar al organismo para la acción, facilitando la disponibilidad de energía y optimizando el funcionamiento de los sistemas implicados en el esfuerzo.

Durante la activación simpática se producen cambios coordinados en múltiples órganos y sistemas. A nivel cardiovascular, aumenta la frecuencia cardíaca y la fuerza de contracción del corazón, lo que incrementa el gasto cardíaco. Al mismo tiempo, se produce una redistribución del flujo sanguíneo, favoreciendo el riego de los músculos activos y reduciendo el aporte a territorios menos prioritarios en ese momento.

Desde el punto de vista metabólico, la activación simpática favorece la movilización de sustratos energéticos, facilitando la disponibilidad de glucosa y ácidos grasos para su utilización por el músculo. Estos efectos se ven reforzados por la acción de las catecolaminas liberadas por la médula suprarrenal, que prolongan y amplifican la respuesta simpática.

8.3. Respuesta parasimpática: mantenimiento y recuperación de la homeostasis

La división parasimpática del sistema nervioso autónomo desempeña un papel esencial en el mantenimiento de la homeostasis en condiciones de reposo y en los procesos de recuperación tras el esfuerzo. Su activación favorece la conservación de la energía y la restauración del equilibrio fisiológico del organismo.

A nivel cardiovascular, la actividad parasimpática reduce la frecuencia cardíaca y facilita el retorno a valores basales tras el ejercicio. En el aparato digestivo, estimula la motilidad y la secreción, favoreciendo los procesos de digestión y absorción de nutrientes.

En el contexto de la actividad física, la rapidez con la que se restablece la influencia parasimpática tras el ejercicio se considera un indicador del estado funcional del sistema nervioso autónomo y del nivel de adaptación al entrenamiento. Una recuperación parasimpática eficiente se asocia a una mayor capacidad de tolerancia al esfuerzo y a una mejor recuperación.

8.4. Regulación integrada de los órganos viscerales

Las funciones del sistema nervioso autónomo no deben entenderse como el resultado de la acción aislada de la división simpática o parasimpática, sino como una regulación integrada y dinámica de la actividad visceral. En muchos órganos, ambas divisiones actúan de forma complementaria o antagonista, permitiendo un control preciso de la función.

Esta regulación integrada permite adaptar de manera continua el funcionamiento de los órganos a las demandas cambiantes del organismo. Durante el ejercicio, predomina la actividad simpática; durante el reposo y la recuperación, aumenta la influencia parasimpática. Sin embargo, en ningún momento se produce una desconexión completa de una u otra división.

Comprender esta interacción es fundamental para interpretar la respuesta fisiológica al ejercicio y para entender cómo el entrenamiento modifica la regulación autonómica, mejorando la eficiencia del control visceral y la capacidad de adaptación al esfuerzo.

9. Interacción funcional entre el sistema simpático y parasimpático

9.1. Principios generales de la interacción autonómica

El funcionamiento del sistema nervioso autónomo se basa en la interacción constante entre sus dos divisiones principales, simpática y parasimpática. Estas divisiones no actúan como sistemas independientes ni excluyentes, sino que regulan de forma conjunta la actividad de los órganos viscerales, permitiendo un control dinámico y preciso de la función fisiológica.

En muchos casos, la actividad de un órgano está determinada por el balance entre la influencia simpática y parasimpática. Este equilibrio puede modificarse rápidamente en función de las necesidades del organismo, lo que permite adaptar la respuesta fisiológica a situaciones de reposo, ejercicio o recuperación.

Comprender esta interacción es fundamental para interpretar correctamente la respuesta autonómica al ejercicio físico y para evitar una visión simplista basada únicamente en la oposición entre ambas divisiones.

9.2. Acciones antagonistas

En numerosos órganos, la división simpática y la parasimpática ejercen acciones antagonistas, es decir, producen efectos opuestos sobre una misma función. Este tipo de interacción permite un control fino y reversible de la actividad visceral, ya que el aumento de la influencia de una división suele ir acompañado de la disminución de la otra.

Un ejemplo claro de este tipo de regulación se observa a nivel cardiovascular, donde la actividad simpática tiende a aumentar la frecuencia cardíaca y la fuerza de contracción, mientras que la actividad parasimpática produce una disminución de la frecuencia cardíaca. El valor final de la frecuencia cardíaca depende del equilibrio entre ambas influencias.

Este mecanismo antagonista resulta especialmente eficaz para regular funciones que requieren ajustes rápidos y precisos, como ocurre durante la transición del reposo al ejercicio o durante la recuperación posterior al esfuerzo.

9.3. Acciones complementarias

En otros casos, la división simpática y la parasimpática no actúan de forma opuesta, sino complementaria, regulando diferentes aspectos de la función de un mismo órgano. En este tipo de interacción, ambas divisiones contribuyen de manera coordinada al funcionamiento global del sistema.

Este patrón de actuación permite que una división prepare o facilite una función, mientras que la otra la modula o completa. La existencia de acciones complementarias pone de manifiesto que el sistema nervioso autónomo no se limita a activar o inhibir órganos, sino que regula de forma integrada procesos fisiológicos complejos.

Desde el punto de vista del ejercicio físico, este tipo de interacción contribuye a una regulación eficiente de funciones como la circulación y la ventilación, adaptándolas progresivamente a las demandas del esfuerzo.

9.4. Acciones cooperativas y regulación diferencial de órganos

En algunos órganos o tejidos, la actividad está regulada de forma predominante por una sola división del sistema nervioso autónomo, mientras que la otra tiene una influencia limitada o inexistente. En estos casos, la regulación autonómica se basa en la modulación del grado de activación de la división predominante.

Además, existen situaciones en las que ambas divisiones actúan de forma cooperativa, contribuyendo conjuntamente a la regulación de una función determinada. Este tipo de interacción refleja la complejidad del control autonómico y la necesidad de integrar múltiples mecanismos para mantener la homeostasis.

Durante el ejercicio físico, esta regulación diferencial permite priorizar determinadas funciones, como el aporte sanguíneo a los músculos activos, mientras se mantiene un control adecuado de otros sistemas esenciales para la estabilidad interna del organismo.

9.5. Interacción simpático-parasimpática en el ejercicio

La interacción entre el sistema simpático y parasimpático adquiere una especial relevancia durante el ejercicio físico, ya que permite ajustar de forma precisa la respuesta fisiológica a la intensidad y duración del esfuerzo. El predominio simpático durante el ejercicio no implica la desaparición total de la influencia parasimpática, sino una reorganización del equilibrio autonómico.

Tras el ejercicio, la reactivación progresiva de la actividad parasimpática contribuye a la recuperación y a la restauración del equilibrio fisiológico. La eficacia de esta interacción se asocia a una mejor capacidad de adaptación al entrenamiento y a un menor riesgo de sobrecarga funcional.

En conjunto, la interacción funcional entre las divisiones simpática y parasimpática constituye la base del control autonómico del organismo y permite comprender cómo el sistema nervioso autónomo regula de forma integrada la respuesta al ejercicio y a otras situaciones de demanda fisiológica.

10. Actividad simpática en el músculo durante el ejercicio: controles de *feedforward* y *feedback*

10.1. Activación simpática del músculo esquelético durante el ejercicio

Durante el ejercicio físico se produce una activación específica del sistema nervioso simpático dirigida al músculo esquelético y a su vascularización. Esta activación no tiene como objetivo provocar la contracción muscular —que depende del sistema nervioso somático—, sino regular el entorno interno en el que el músculo desarrolla su actividad mecánica y metabólica.

La actividad simpática muscular contribuye de manera decisiva a la redistribución del flujo sanguíneo, favoreciendo el aporte de oxígeno y nutrientes a los músculos activos. A través de la regulación del tono vascular, el sistema nervioso simpático ajusta el calibre de los vasos sanguíneos en función de las necesidades metabólicas del tejido muscular, permitiendo una adecuada perfusión durante el ejercicio.

Además, la activación simpática influye sobre procesos metabólicos intramusculares, facilitando la movilización y utilización de sustratos energéticos. Estos efectos resultan especialmente relevantes a medida que aumenta la intensidad del ejercicio y las demandas metabólicas del músculo se incrementan.

La regulación simpática del músculo durante el ejercicio no es uniforme ni constante, sino que se ajusta de forma dinámica en función de la intensidad, duración y tipo de esfuerzo. Este control preciso permite mantener la eficacia del movimiento y retrasar la aparición de la fatiga.

10.2. Control anticipatorio de la actividad simpática: mecanismo de *feedforward*

Una característica fundamental de la respuesta autonómica al ejercicio es que la activación simpática se inicia, en parte, antes de que se produzcan cambios fisiológicos significativos en el músculo o en el medio interno. Este mecanismo recibe el nombre de control anticipatorio o *feedforward*.

El control *feedforward* se origina en centros superiores del sistema nervioso central y se asocia al denominado comando central. Cuando el individuo decide iniciar un ejercicio, estos centros activan de forma simultánea los sistemas motor somático y autónomo, preparando al organismo para el esfuerzo incluso antes de que comience la contracción muscular.

Gracias a este mecanismo anticipatorio, variables como la frecuencia cardíaca, la presión arterial y el flujo sanguíneo muscular pueden aumentar desde los primeros instantes del ejercicio. Esto permite una respuesta rápida y eficaz, evitando retrasos que podrían comprometer el rendimiento o la estabilidad fisiológica.

El control *feedforward* es especialmente relevante en ejercicios de inicio brusco o de alta intensidad, donde la preparación anticipada del sistema cardiovascular y metabólico resulta esencial para satisfacer de forma inmediata las demandas del músculo activo.

10.3. Control reflejo de la actividad simpática muscular: mecanismo de *feedback*

Además del control anticipatorio, la actividad simpática en el músculo durante el ejercicio está regulada por mecanismos de control reflejo, conocidos como mecanismos de *feedback*. Estos mecanismos dependen de la información sensorial que se genera en el propio músculo y en el sistema cardiovascular como consecuencia de la contracción y del aumento de la actividad metabólica.

Durante el ejercicio, los cambios mecánicos y metabólicos que se producen en el músculo activo estimulan distintos receptores periféricos. Los mecanorreceptores musculares responden a la deformación y al estiramiento asociados a la contracción, mientras que los metabolorreceptores se activan en respuesta al aumento de metabolitos derivados del metabolismo muscular. La

información procedente de estos receptores se transmite al sistema nervioso central a través de vías aferentes.

Esta información aferente permite ajustar de forma continua la actividad simpática en función del estado real del músculo y de las demandas del ejercicio. Cuando la intensidad del esfuerzo aumenta y se incrementa la producción de metabolitos, el mecanismo de *feedback* refuerza la activación simpática, favoreciendo un mayor aporte sanguíneo y una mejor regulación del entorno metabólico del músculo.

El control reflejo resulta especialmente importante durante ejercicios prolongados o de intensidad creciente, en los que las condiciones fisiológicas del músculo cambian progresivamente. Gracias a este mecanismo, el sistema nervioso autónomo puede adaptar la respuesta simpática a lo largo del tiempo, manteniendo la eficacia del esfuerzo y retrasando la aparición de la fatiga.

10.4. Integración de los mecanismos de *feedforward* y *feedback* durante el ejercicio

El control de la actividad simpática muscular durante el ejercicio no depende de un único mecanismo, sino de la integración funcional de los controles de *feedforward* y *feedback*. Ambos mecanismos actúan de forma complementaria y simultánea, permitiendo una regulación precisa y flexible de la respuesta autonómica.

El control *feedforward* prepara al organismo para el inicio del ejercicio y facilita una respuesta rápida, mientras que el control *feedback* ajusta esa respuesta en función de las condiciones reales del músculo y del medio interno. Esta integración garantiza que la activación simpática sea adecuada tanto al inicio como durante el desarrollo del esfuerzo.

Desde el punto de vista de la actividad física y el deporte, la eficacia de esta integración resulta fundamental para el rendimiento y la tolerancia al ejercicio. El entrenamiento puede mejorar la coordinación entre ambos mecanismos, optimizando la respuesta autonómica y contribuyendo a una mayor eficiencia fisiológica durante el esfuerzo.

Bibliografía

Fox SI. Fisiología Humana. 15ª ed. McGraw-Hill Interamericana; 2021.

Gourine AV, Ackland GL. Cardiac vagus and exercise. *Physiology (Bethesda)*. 2019;34:71-80.

Katch VL, MacArdle WD, Katch FI. *Fisiología Del Ejercicio : "Fundamentos"*. 4ª ed. Editorial Médica Panamericana; 2014.

López Chicharro J, Fernández Vaquero A. *Fisiología Del Ejercicio*. 4a ed. Editorial Médica Panamericana; 2023.

Silverthorn DU. *Fisiología Humana Un Enfoque Integrado*. Ed. 8. Editorial Médica Panamericana; 2019

Tank AW, Lee Wong D. Peripheral and central effects of circulating catecholamines. *Compr Physiol*. 2015;5:1-15.

Wehrwein EA, Orer HS, Barman SM. Overview of the anatomy, physiology, and pharmacology of the autonomic nervous system. *Compr Physiol*. 2016;6:1239-1278.

Wilmore JH, Kenney WL, Costill DL. *Fisiología del Deporte y el Ejercicio*. 5th ed. Editorial Médica Panamericana; 2014.

Tema 4. El músculo esquelético y la contracción muscular

1. Introducción y funciones del músculo esquelético

El músculo esquelético constituye el principal sistema efector del movimiento humano y desempeña un papel central en la actividad física y el deporte. Su contracción permite generar fuerza, producir desplazamientos, mantener la postura y estabilizar las articulaciones, haciendo posible la interacción del organismo con el entorno.

Desde el punto de vista funcional, el músculo esquelético actúa bajo el control del sistema nervioso somático y responde de manera precisa a las órdenes motoras que recibe. Esta relación estrecha entre sistema nervioso y músculo permite regular la intensidad, la duración y la coordinación del movimiento, adaptándolo a las exigencias de cada tarea motora.

Además de su función mecánica, el músculo esquelético cumple importantes funciones metabólicas. Durante el ejercicio, el músculo es el principal consumidor de energía y participa activamente en la utilización y regulación de sustratos energéticos como la glucosa y los ácidos grasos. Asimismo, el tejido muscular actúa como un reservorio metabólico que contribuye al mantenimiento de la homeostasis energética del organismo.

El músculo esquelético desempeña también un papel fundamental en el mantenimiento de la postura y el equilibrio corporal. Incluso en reposo, presenta un cierto grado de activación que permite contrarrestar la acción de la gravedad y mantener la estabilidad articular. Esta actividad postural es especialmente relevante en actividades físicas que requieren control del equilibrio y precisión del movimiento.

El estudio de las bases fisiológicas de la contracción muscular resulta imprescindible para comprender cómo se genera la fuerza, cómo se regula el movimiento y cómo el músculo se adapta al entrenamiento. El conocimiento de estos mecanismos permite interpretar las respuestas al ejercicio, optimizar el rendimiento y aplicar criterios fisiológicos en el diseño de programas de entrenamiento.

2. Organización estructural del músculo esquelético

El músculo esquelético presenta una organización estructural altamente jerarquizada que permite transformar una señal nerviosa en fuerza mecánica de manera eficaz. Esta organización se extiende desde el nivel macroscópico del músculo completo hasta el nivel microscópico del sarcómero, unidad básica de la contracción.

2.1. Organización macroscópica del músculo esquelético

Desde un punto de vista macroscópico, el músculo esquelético está formado por un conjunto de fibras musculares agrupadas y organizadas para producir fuerza y movimiento. Cada músculo se encuentra unido al esqueleto mediante tendones, que transmiten la fuerza generada por la contracción muscular a los huesos, permitiendo el movimiento articular.

El músculo presenta una disposición anatómica adaptada a su función. La orientación de las fibras, la longitud del músculo y su relación con las palancas óseas condicionan la magnitud de la fuerza producida y la velocidad del movimiento. Estas características estructurales explican por qué distintos músculos están especializados en tareas diferentes, como el mantenimiento de la postura o la producción de movimientos rápidos y potentes.

2.2. Organización histológica: fibras musculares y tejido conjuntivo

A nivel histológico, el músculo esquelético está compuesto por fibras musculares, que son células largas y multinucleadas especializadas en la contracción. Estas fibras se agrupan en haces y están rodeadas por tejido conjuntivo, que desempeña un papel fundamental en la transmisión de la fuerza y en la integridad estructural del músculo.

El tejido conjuntivo muscular se organiza en diferentes capas que envuelven a las fibras individuales, a los fascículos y al músculo completo. Esta red conjuntiva no solo proporciona soporte mecánico, sino que también facilita la distribución de la fuerza generada por las fibras musculares hacia el tendón y el hueso.

Durante la actividad física, la integridad y organización del tejido conjuntivo resultan esenciales para una transmisión eficiente de la fuerza y para la prevención de lesiones musculares.

2.3. Miofibrillas y sarcómero como unidad estructural y funcional

En el interior de cada fibra muscular se encuentran las miofibrillas, estructuras cilíndricas dispuestas longitudinalmente que ocupan la mayor parte del volumen celular. Las miofibrillas están formadas por la repetición en serie de unidades estructurales denominadas sarcómeros.

El sarcómero constituye la unidad estructural y funcional básica del músculo esquelético. Su organización regular es responsable del aspecto estriado característico del músculo y permite la interacción ordenada entre los filamentos contráctiles. La disposición geométrica del sarcómero es clave para la generación de fuerza y el acortamiento muscular.

La contracción muscular se produce como resultado del acortamiento simultáneo de millones de sarcómeros, lo que pone de manifiesto la importancia de esta organización microscópica en la función global del músculo.

2.4. Transmisión de la fuerza muscular

La fuerza generada en el interior del sarcómero debe transmitirse de manera eficaz a todo el músculo y, finalmente, al sistema esquelético. Esta transmisión se produce tanto de forma longitudinal, a lo largo de la fibra muscular, como de forma lateral, a través del tejido conjuntivo que conecta las fibras entre sí.

La transmisión longitudinal permite que la fuerza generada por los sarcómeros se sume a lo largo de la miofibrilla y de la fibra muscular. Por su parte, la transmisión lateral distribuye la fuerza entre fibras vecinas y contribuye a una acción muscular coordinada y eficiente.

Esta doble vía de transmisión de la fuerza es especialmente relevante durante el ejercicio físico, ya que permite soportar cargas elevadas y optimizar la producción de fuerza sin comprometer la integridad estructural del músculo.

3. Ultraestructura del sarcómero y proteínas contráctiles

El sarcómero constituye la unidad estructural y funcional básica del músculo esquelético y es el lugar donde se produce directamente la generación de fuerza durante la contracción muscular. Su organización altamente ordenada permite que los filamentos contráctiles interactúen de manera eficaz y repetitiva.

3.1. Organización general del sarcómero

El sarcómero está delimitado por dos líneas Z consecutivas y contiene una disposición precisa de filamentos finos y gruesos. Esta organización da lugar a distintas bandas y zonas características que pueden observarse al microscopio y que reflejan la disposición interna de los filamentos.

La disposición regular de los sarcómeros a lo largo de las miofibrillas es responsable del aspecto estriado del músculo esquelético. Esta estructura repetitiva permite que la contracción muscular se produzca de forma coordinada y eficiente en toda la fibra muscular.

3.2. Filamentos finos: actina, tropomiosina y complejo de troponina

Los filamentos finos están formados principalmente por actina, una proteína globular que se organiza en largas cadenas helicoidales. Asociadas a la actina se encuentran la tropomiosina y el complejo de troponina, que desempeñan un papel esencial en la regulación de la contracción muscular.

En condiciones de reposo, la tropomiosina se sitúa de manera que bloquea los sitios de unión de la actina para la miosina, impidiendo la formación de enlaces cruzados. El complejo de troponina actúa como sensor del calcio intracelular y regula la posición de la tropomiosina sobre el filamento fino.

Cuando aumenta la concentración de calcio en el interior de la fibra muscular, el calcio se une a la troponina, provocando un cambio conformacional que desplaza la tropomiosina y deja libres los sitios de unión para la miosina. Este mecanismo permite el inicio de la interacción entre los filamentos contráctiles.

3.3. Filamentos gruesos: miosina y estructura de los puentes cruzados

Los filamentos gruesos están formados principalmente por miosina, una proteína con una estructura compleja que incluye una región filamentosa y unas cabezas globulares orientadas hacia los filamentos finos. Estas cabezas constituyen los denominados puentes cruzados, responsables directos de la generación de fuerza.

Las cabezas de miosina presentan sitios específicos para la unión a la actina y para la hidrólisis de ATP. Gracias a estas propiedades, los puentes cruzados pueden unirse de forma cíclica a los filamentos de actina y producir desplazamientos relativos entre ambos filamentos, dando lugar al acortamiento del sarcómero.

3.4. Proteínas estructurales del sarcómero

Además de las proteínas contráctiles principales, el sarcómero contiene diversas proteínas estructurales que contribuyen a su estabilidad y funcionamiento. Entre ellas destacan proteínas que mantienen alineados los filamentos y aseguran la correcta transmisión de la fuerza durante la contracción.

Estas proteínas estructurales permiten que el sarcómero conserve su organización incluso durante contracciones intensas y repetidas, como las que se producen durante el ejercicio físico. Su integridad es fundamental para el mantenimiento de la función muscular y para la prevención de daños estructurales.

3.5. Significado funcional de la ultraestructura sarcomérica

La ultraestructura del sarcómero está directamente relacionada con la capacidad del músculo para generar fuerza y realizar trabajo mecánico. La disposición precisa de los filamentos y la regulación de su interacción permiten ajustar la producción de fuerza a las necesidades funcionales del movimiento.

Durante el ejercicio las características estructurales del sarcómero influyen en propiedades como la velocidad de contracción, la resistencia a la fatiga y la capacidad de adaptación al entrenamiento. Por ello, el estudio de la ultraestructura sarcomérica resulta esencial para comprender las bases fisiológicas del rendimiento muscular.

4. Sistema de membranas de la fibra muscular

El sistema de membranas de la fibra muscular es esencial para la transmisión de la señal eléctrica y para el control de la concentración de calcio intracelular, elementos fundamentales en el proceso de contracción y relajación muscular. Su organización permite que la excitación eléctrica alcance de forma rápida y uniforme el interior de la fibra muscular.

4.1. Sarcolema y potencial de membrana

El sarcolema es la membrana plasmática de la fibra muscular y presenta propiedades eléctricas que permiten la generación y propagación del potencial de acción muscular. Esta membrana contiene canales iónicos específicos que regulan el paso de sodio, potasio y otros iones, haciendo posible la excitabilidad de la fibra muscular.

Cuando la fibra muscular recibe un estímulo nervioso adecuado, se produce una despolarización del sarcolema que se propaga a lo largo de toda la superficie de la fibra. Esta señal eléctrica constituye el primer paso para la activación del mecanismo contráctil.

4.2. Túbulos transversos (túbulos T)

Los túbulos transversos son invaginaciones del sarcolema que penetran en el interior de la fibra muscular y permiten que el potencial de acción alcance rápidamente las zonas más profundas de la célula. Gracias a esta estructura, la señal eléctrica se distribuye de manera sincronizada por toda la fibra muscular.

La disposición regular de los túbulos T en relación con las miofibrillas asegura que la excitación eléctrica llegue de forma simultánea a todos los sarcómeros, permitiendo una contracción uniforme y coordinada del músculo.

4.3. Retículo sarcoplásmico y almacenamiento de calcio

El retículo sarcoplásmico es un sistema de membranas internas especializado en el almacenamiento y liberación de calcio. La concentración de calcio en el interior del retículo es mucho mayor que en el citoplasma de la fibra muscular, lo que permite una liberación rápida y controlada cuando se produce la excitación.

La liberación de calcio desde el retículo sarcoplásmico es el acontecimiento clave que inicia la contracción muscular, mientras que su recaptación permite la relajación. Por tanto, el control de los niveles de calcio intracelular constituye un mecanismo central en la regulación de la actividad muscular.

4.4. Tríada y acoplamiento estructural

La tríada es una estructura formada por un túbulo T flanqueado por dos cisternas terminales del retículo sarcoplásmico. Esta disposición anatómica permite una comunicación directa entre la señal eléctrica que viaja por el sarcolema y la liberación de calcio desde el retículo.

Gracias a la organización en tríadas, el potencial de acción muscular se traduce de forma rápida y eficiente en una señal química, facilitando el acoplamiento entre la excitación eléctrica y la contracción mecánica del músculo.

4.5. Importancia funcional del sistema de membranas

El sistema de membranas de la fibra muscular garantiza que la contracción se produzca de manera rápida, sincronizada y reversible. Durante el ejercicio físico, esta organización permite responder con precisión a estímulos nerviosos repetidos y mantener la capacidad contráctil del músculo.

Alteraciones en el funcionamiento del sarcolema, los túbulos T o el retículo sarcoplásmico pueden comprometer la liberación de calcio y afectar negativamente a la contracción y la relajación muscular, lo que pone de manifiesto la importancia de este sistema en la fisiología del músculo esquelético.

5. Inervación del músculo esquelético y unidad motora

La contracción del músculo esquelético depende de forma directa de su inervación por el sistema nervioso somático. La señal nerviosa constituye el estímulo imprescindible para iniciar el proceso contráctil y regular la intensidad y duración de la contracción muscular. Por ello, el músculo y el sistema nervioso deben considerarse como una unidad funcional inseparable.

5.1. Motoneurona alfa y control neural del músculo

La inervación del músculo esquelético se realiza a través de las motoneuronas alfa, cuyos cuerpos celulares se localizan en el asta anterior de la médula espinal o en núcleos motores del tronco encefálico. Los axones de estas neuronas se dirigen hacia las fibras musculares y constituyen la vía final común del control motor.

Cada motoneurona alfa transmite las órdenes motoras procedentes del sistema nervioso central y de los circuitos reflejos espinales, integrando múltiples influencias antes de activar la fibra muscular. La descarga de potenciales de acción en la motoneurona alfa determina el inicio de la contracción muscular y su patrón temporal.

5.2. Unión neuromuscular

La unión neuromuscular es la estructura especializada que permite la transmisión de la señal nerviosa desde la motoneurona alfa a la fibra muscular. En esta sinapsis química, la llegada del potencial de acción al terminal nervioso provoca la liberación del neurotransmisor acetilcolina.

La acetilcolina se une a receptores específicos situados en la membrana postsináptica de la fibra muscular, generando un potencial de placa motora que, si alcanza el umbral, da lugar a un potencial de acción muscular. Este proceso asegura una transmisión eficaz y fiable de la señal nerviosa.

En condiciones fisiológicas normales, la unión neuromuscular presenta un elevado margen de seguridad, lo que garantiza que cada impulso nervioso genere una respuesta muscular adecuada.

5.3. Concepto de unidad motora

La unidad motora se define como el conjunto formado por una motoneurona alfa y todas las fibras musculares que inerva. Todas las fibras pertenecientes a una misma unidad motora se activan de manera simultánea cuando la motoneurona descarga un potencial de acción.

El tamaño de la unidad motora varía según la función del músculo. En músculos que realizan movimientos finos y precisos, las unidades motoras son pequeñas, mientras que en músculos encargados de producir grandes niveles de fuerza las unidades motoras son más grandes.

El concepto de unidad motora es fundamental para comprender cómo el sistema nervioso regula la contracción muscular y ajusta la fuerza producida por el músculo.

5.4. Tipos de unidades motoras y control de la fuerza

Las unidades motoras no son homogéneas, sino que presentan características funcionales distintas en función del tipo de fibras musculares que inervan. Existen unidades motoras adaptadas a la producción de fuerza sostenida y otras especializadas en la generación de fuerza rápida y potente.

El sistema nervioso regula la fuerza muscular mediante dos mecanismos principales: el reclutamiento progresivo de unidades motoras y la modificación de la frecuencia de descarga de las motoneuronas. Estos mecanismos permiten ajustar la producción de fuerza a las demandas del movimiento y del ejercicio físico.

Durante el entrenamiento, se producen adaptaciones neurales que mejoran la capacidad de reclutar unidades motoras de forma eficaz y de aumentar la frecuencia de descarga, lo que contribuye de manera decisiva a las mejoras en el rendimiento muscular.

6. Acoplamiento excitación–contracción

El acoplamiento excitación–contracción es el conjunto de procesos mediante los cuales una señal eléctrica originada en el sistema nervioso da lugar a la contracción del músculo esquelético. Este mecanismo permite transformar el potencial de acción muscular en una respuesta mecánica coordinada y eficaz.

6.1. Potencial de acción muscular

El proceso de acoplamiento excitación–contracción se inicia con la llegada del potencial de acción a la fibra muscular a través de la unión neuromuscular. Una vez generado, el potencial de acción se propaga rápidamente a lo largo del sarcolema y penetra en el interior de la fibra a través de los túbulos transversos.

Esta propagación asegura que la señal eléctrica alcance de manera casi simultánea todas las regiones de la fibra muscular, permitiendo una activación coordinada de los sarcómeros y una contracción uniforme del músculo.

6.2. Activación del sistema túbulos T–retículo sarcoplásmico

La llegada del potencial de acción a los túbulos T provoca la activación de mecanismos de acoplamiento entre el sarcolema y el retículo sarcoplásmico. Este acoplamiento estructural y funcional permite que la señal eléctrica desencadene la liberación de calcio desde el retículo hacia el citoplasma de la fibra muscular.

La rápida liberación de calcio constituye el evento clave que conecta la excitación eléctrica con la activación del sistema contráctil. Gracias a la organización en tríadas, este proceso se produce de forma rápida y eficiente.

6.3. Aumento de la concentración de calcio intracelular

El calcio liberado desde el retículo sarcoplásmico se difunde por el citoplasma y alcanza las miofibrillas. El aumento de la concentración de calcio intracelular es el estímulo directo que permite iniciar la interacción entre los filamentos de actina y miosina.

La magnitud y duración del aumento de calcio intracelular influyen directamente en la intensidad y duración de la contracción muscular, lo que permite al sistema nervioso regular la respuesta mecánica del músculo.

6.4. Activación del complejo troponina–tropomiosina

El calcio intracelular se une a la troponina, una de las proteínas reguladoras del filamento fino. Esta unión provoca un cambio conformacional en el complejo troponina–tropomiosina que desplaza la tropomiosina y deja libres los sitios de unión de la actina para la miosina.

Este proceso elimina la inhibición existente en reposo y permite la formación de los enlaces cruzados entre los filamentos contráctiles, iniciándose así el mecanismo de contracción muscular.

6.5. Relajación muscular y recaptación del calcio

La relajación muscular se produce cuando cesa la señal nerviosa y el calcio es recaptado activamente por el retículo sarcoplásmico. La disminución de la concentración de calcio intracelular provoca que el complejo troponina–tropomiosina vuelva a su posición inicial, bloqueando de nuevo los sitios de unión de la actina.

Este proceso permite la finalización de la interacción actina–miosina y el retorno del músculo a su estado de reposo. La rapidez y eficacia de la recaptación de calcio son esenciales para permitir contracciones repetidas, especialmente durante el ejercicio físico.

7. Mecanismo molecular de la contracción muscular

La contracción muscular es el resultado de una serie de interacciones moleculares altamente ordenadas entre los filamentos de actina y miosina en el interior del sarcómero. Este proceso, denominado ciclo de los puentes cruzados, permite transformar la energía química almacenada en el ATP en trabajo mecánico y producción de fuerza.

7.1. Estado de reposo del sistema contráctil

En condiciones de reposo, la concentración de calcio en el citoplasma de la fibra muscular es baja. En esta situación, la tropomiosina se dispone longitudinalmente sobre el filamento de actina, cubriendo los sitios específicos de unión para la miosina. El complejo de troponina mantiene esta posición inhibidora, impidiendo la interacción entre ambos filamentos.

Aunque las cabezas de miosina contienen ATP y se encuentran en una posición energéticamente preparada, no pueden unirse a la actina mientras los sitios de unión permanecen bloqueados. De este modo, el músculo permanece relajado a pesar de que el sistema contráctil está estructuralmente intacto.

7.2. Activación del sistema contráctil por el calcio

Cuando se produce la excitación de la fibra muscular, el calcio es liberado desde el retículo sarcoplásmico al citoplasma. El aumento de la concentración de calcio intracelular permite que este ion se una a la subunidad específica del complejo de troponina.

La unión del calcio a la troponina provoca un cambio conformacional que se transmite a la tropomiosina, desplazándola de su posición inhibidora. Como consecuencia, quedan expuestos los sitios activos de la actina, permitiendo la interacción con las cabezas de miosina.

Este paso es esencial, ya que el calcio actúa como el verdadero interruptor molecular de la contracción muscular, regulando el acceso de la miosina a la actina.

7.3. Formación del puente cruzado

Una vez expuestos los sitios de unión de la actina, las cabezas de miosina pueden unirse a ellos formando los denominados puentes cruzados. En este momento, la cabeza de miosina se encuentra unida a ADP y fosfato inorgánico, productos de la hidrólisis previa del ATP.

La formación del puente cruzado establece una conexión física entre los filamentos finos y gruesos, paso imprescindible para la generación de fuerza. El número de puentes cruzados formados de manera simultánea es uno de los principales determinantes de la tensión desarrollada por el músculo.

7.4. Golpe de fuerza y desplazamiento de los filamentos

Tras la formación del puente cruzado, se libera el fosfato inorgánico y posteriormente el ADP desde la cabeza de miosina. Esta liberación induce un cambio conformacional en la cabeza de miosina, conocido como golpe de fuerza.

El golpe de fuerza provoca el desplazamiento del filamento de actina hacia el centro del sarcómero, reduciendo la distancia entre las líneas Z. Este movimiento constituye el paso mecánico fundamental de la contracción muscular.

Es importante destacar que durante este proceso los filamentos no se acortan, sino que se deslizan unos sobre otros. El acortamiento del músculo es el resultado del acortamiento simultáneo de millones de sarcómeros.

7.5. Desprendimiento del puente cruzado: papel del ATP

Para que el ciclo contráctil pueda continuar, es necesario que el puente cruzado se rompa. Este desprendimiento se produce cuando una nueva molécula de ATP se une a la cabeza de miosina.

La unión del ATP reduce la afinidad de la miosina por la actina, provocando la separación del puente cruzado. Sin ATP, la miosina permanecería unida a la actina, lo que explica la rigidez muscular que se observa en situaciones de agotamiento extremo de ATP.

Este paso pone de manifiesto que el ATP no solo es necesario para la generación de fuerza, sino también para la relajación muscular.

7.6. Reactivación de la cabeza de miosina

Tras el desprendimiento del puente cruzado, el ATP unido a la cabeza de miosina es hidrolizado en ADP y fosfato inorgánico. La energía liberada durante esta reacción se utiliza para reorientar la cabeza de miosina a su posición inicial, dejándola preparada para iniciar un nuevo ciclo de interacción con la actina.

Mientras la concentración de calcio intracelular se mantenga elevada y los sitios de unión de la actina permanezcan accesibles, el ciclo de los puentes cruzados se repite de forma continua, produciendo una contracción sostenida.

7.7. Relajación muscular

La relajación muscular se inicia cuando cesa la excitación de la fibra muscular y el calcio es recaptado activamente por el retículo sarcoplásmico. La disminución de la concentración de calcio intracelular provoca que el calcio se disocie de la troponina.

Como consecuencia, la tropomiosina vuelve a su posición original, bloqueando los sitios de unión de la actina. Al no poder formarse nuevos puentes cruzados y romperse los existentes, el músculo retorna progresivamente a su estado de reposo.

7.8. Significado funcional del ciclo de los puentes cruzados

El mecanismo molecular de la contracción muscular permite una regulación extremadamente precisa de la fuerza y del movimiento. La intensidad de la contracción depende del número de puentes cruzados activos y de la velocidad a la que se produce el ciclo.

En el ejercicio físico, factores como la disponibilidad de ATP, la concentración de calcio y las características estructurales del sarcómero influyen directamente en la capacidad contráctil del músculo. Alteraciones en cualquiera de estos elementos pueden contribuir al desarrollo de la fatiga muscular y a la disminución del rendimiento.

8. Modulación de la fuerza y del acortamiento muscular

La fuerza y el acortamiento desarrollados por el músculo esquelético no son constantes, sino que pueden modularse de forma precisa en función de las características del estímulo nervioso y de las condiciones mecánicas en las que se produce la contracción. Esta capacidad de modulación permite adaptar la respuesta muscular a las exigencias específicas del movimiento y del ejercicio físico.

8.1. Sumación temporal y tetania

Cuando una fibra muscular recibe estímulos nerviosos de baja frecuencia, cada estímulo produce una contracción breve seguida de una relajación completa. Sin embargo, si la frecuencia de estimulación aumenta, las contracciones sucesivas pueden superponerse parcialmente, produciendo un incremento progresivo de la tensión desarrollada. Este fenómeno se conoce como sumación temporal.

A frecuencias de estimulación suficientemente altas, la relajación entre contracciones desaparece y se alcanza una contracción sostenida de máxima tensión denominada tetania. La tetania representa la máxima capacidad contráctil de la fibra muscular en esas condiciones y se debe a la elevada concentración mantenida de calcio intracelular, que permite la formación continua de puentes cruzados.

Durante el ejercicio voluntario, el sistema nervioso regula la frecuencia de descarga de las motoneuronas para ajustar el grado de sumación y, por tanto, la fuerza desarrollada por el músculo.

8.2. Reclutamiento de unidades motoras

Además de la frecuencia de estimulación, la fuerza muscular puede modularse mediante el reclutamiento progresivo de unidades motoras. A medida que aumenta la demanda de fuerza, el sistema nervioso activa un mayor número de unidades motoras, incrementando el número total de fibras musculares que participan en la contracción.

Este reclutamiento sigue un orden funcional que permite una utilización eficiente del músculo, activando primero las unidades motoras más pequeñas y resistentes a la fatiga y, posteriormente, las unidades motoras de mayor tamaño y capacidad de producción de fuerza. Gracias a este mecanismo, el músculo puede ajustar su fuerza de manera gradual y adaptada a la tarea.

En el ejercicio físico, la combinación del reclutamiento de unidades motoras y del aumento de la frecuencia de descarga permite una regulación muy precisa de la fuerza y del movimiento.

8.3. Relación longitud–tensión

La fuerza que puede desarrollar un músculo depende de su longitud inicial antes de la contracción. Esta relación, conocida como relación longitud–tensión, se explica por el grado de solapamiento entre los filamentos de actina y miosina en el sarcómero.

Existe una longitud óptima del sarcómero en la que el solapamiento entre los filamentos permite la formación del máximo número de puentes cruzados, generándose la mayor tensión activa. Si el músculo se encuentra excesivamente acortado o excesivamente estirado, el solapamiento es menos favorable y la fuerza desarrollada disminuye.

Este principio tiene importantes implicaciones funcionales, ya que explica por qué la capacidad de generar fuerza varía a lo largo del rango de movimiento de una articulación y por qué determinadas posiciones son más eficientes para la producción de fuerza.

8.4. Relación fuerza–velocidad

La relación fuerza–velocidad describe cómo la velocidad de acortamiento muscular influye en la fuerza desarrollada. Durante las contracciones concéntricas, a medida que aumenta la velocidad de acortamiento, la fuerza que el músculo puede generar disminuye. Esto se debe a que, a altas velocidades, hay menos tiempo para que se formen puentes cruzados efectivos.

Por el contrario, durante las contracciones excéntricas, en las que el músculo se alarga mientras desarrolla tensión, la fuerza generada puede ser mayor que en las contracciones isométricas. En estas condiciones, los puentes cruzados se rompen mientras están sometidos a tensión, lo que permite desarrollar elevados niveles de fuerza.

Esta relación tiene una gran relevancia en el ámbito deportivo, ya que diferentes disciplinas exigen distintos compromisos entre fuerza y velocidad de contracción.

8.5. Tipos de contracción muscular

En función de las condiciones mecánicas, pueden distinguirse diferentes tipos de contracción muscular. En la contracción isométrica, el músculo desarrolla tensión sin variar su longitud, lo que ocurre cuando la fuerza generada es igual a la resistencia externa.

En la contracción concéntrica, el músculo se acorta al superar la resistencia, produciendo movimiento. En la contracción excéntrica, el músculo se alarga mientras desarrolla tensión para frenar o controlar una fuerza externa superior.

Cada tipo de contracción presenta características fisiológicas y funcionales específicas y se utiliza de manera diferente durante el ejercicio físico y el entrenamiento. La comprensión de estas diferencias es esencial para interpretar el rendimiento muscular y para aplicar criterios fisiológicos al diseño del entrenamiento.

8.6. Integración durante el movimiento y el ejercicio

La modulación de la fuerza y del acortamiento muscular resulta de la integración de mecanismos neurales y mecánicos. El sistema nervioso ajusta el reclutamiento y la frecuencia de descarga, mientras que las propiedades estructurales del músculo determinan la relación entre longitud, fuerza y velocidad.

Durante el ejercicio físico, esta integración permite adaptar la respuesta muscular a tareas muy diversas, desde el mantenimiento de la postura hasta la realización de movimientos rápidos y potentes. El entrenamiento modifica estos mecanismos, optimizando la capacidad del músculo para generar fuerza y realizar trabajo mecánico de forma eficiente.

9. Tipos de fibras musculares y propiedades funcionales

El músculo esquelético no es un tejido homogéneo, sino que está compuesto por fibras musculares con características estructurales, metabólicas y funcionales diferentes. Esta heterogeneidad permite que el músculo se adapte a distintas demandas mecánicas y metabólicas, desde el mantenimiento de la postura hasta la realización de esfuerzos explosivos.

9.1. Clasificación de las fibras musculares

Las fibras musculares se clasifican en función de sus propiedades contráctiles y metabólicas. Desde un punto de vista funcional, pueden distinguirse fibras de contracción lenta y fibras de

contracción rápida, que presentan diferencias en la velocidad de acortamiento, la capacidad de generar fuerza y la resistencia a la fatiga.

Las fibras de contracción lenta se caracterizan por una velocidad de contracción menor y una elevada resistencia a la fatiga, lo que las hace especialmente adecuadas para actividades prolongadas y de baja intensidad. Por el contrario, las fibras de contracción rápida presentan una mayor velocidad de acortamiento y una mayor capacidad de producción de fuerza, aunque se fatigan con mayor rapidez.

Esta clasificación funcional se relaciona con diferencias en la expresión de isoformas de miosina y en la organización del sistema contráctil.

9.2. Propiedades mecánicas de las fibras musculares

Las fibras musculares difieren en su capacidad para desarrollar fuerza y velocidad de contracción. Las fibras de contracción rápida presentan un ciclo de los puentes cruzados más veloz, lo que permite generar fuerza en menor tiempo y desarrollar movimientos explosivos.

Las fibras de contracción lenta, aunque desarrollan menor fuerza máxima, son capaces de mantener la contracción durante períodos prolongados gracias a una menor velocidad de fatiga. Estas propiedades mecánicas condicionan el tipo de esfuerzo para el que cada fibra resulta más eficiente.

En la mayoría de los músculos esqueléticos, ambos tipos de fibras coexisten, lo que permite una amplia gama de respuestas funcionales.

9.3. Propiedades metabólicas y resistencia a la fatiga

Desde el punto de vista metabólico, las fibras musculares también presentan diferencias importantes. Las fibras de contracción lenta poseen una elevada capacidad oxidativa, con abundancia de mitocondrias y una alta densidad capilar, lo que favorece la producción de energía mediante el metabolismo aeróbico.

Las fibras de contracción rápida presentan una mayor capacidad para obtener energía a partir de vías anaeróbicas, lo que permite una rápida producción de ATP, pero a costa de una mayor acumulación de metabolitos asociados a la fatiga.

Estas diferencias metabólicas explican la distinta resistencia a la fatiga de los tipos de fibras y su participación preferente en actividades de resistencia o de fuerza y potencia.

9.4. Reclutamiento de fibras musculares durante el ejercicio

El sistema nervioso recluta las fibras musculares en función de las demandas de la tarea motora. En ejercicios de baja intensidad, predominan las fibras de contracción lenta, mientras que a medida que aumenta la intensidad del esfuerzo se incorporan progresivamente las fibras de contracción rápida.

Este patrón de reclutamiento permite una utilización eficiente del músculo y una adaptación progresiva a las demandas del ejercicio. Durante esfuerzos máximos o explosivos, se requiere la activación de un elevado número de fibras rápidas para alcanzar los niveles de fuerza necesarios.

9.5. Plasticidad muscular y adaptación al entrenamiento

Las fibras musculares presentan una notable capacidad de adaptación frente al entrenamiento y a los cambios en el nivel de actividad física. El entrenamiento puede modificar las propiedades funcionales de las fibras, mejorando su capacidad oxidativa, su resistencia a la fatiga o su capacidad de generar fuerza.

Estas adaptaciones no suelen implicar una transformación completa de un tipo de fibra en otro, sino cambios graduales en sus características funcionales. La plasticidad muscular permite optimizar el rendimiento en función del tipo de entrenamiento realizado y explica las mejoras observadas tanto en deportes de resistencia como de fuerza y potencia.

10. Adaptaciones musculares al entrenamiento y a la inactividad

El músculo esquelético es un tejido altamente plástico, capaz de modificar su estructura y función en respuesta a los estímulos mecánicos, neurales y metabólicos asociados al ejercicio físico. Estas adaptaciones permiten optimizar el rendimiento y mejorar la capacidad funcional del músculo. Por el contrario, la ausencia de estímulo adecuado conduce a alteraciones estructurales y funcionales que reducen su capacidad contráctil.

10.1. Adaptaciones musculares al entrenamiento de fuerza

El entrenamiento de fuerza induce adaptaciones específicas orientadas al aumento de la capacidad del músculo para generar tensión. Una de las principales adaptaciones es la hipertrofia muscular, que consiste en el aumento del tamaño de las fibras musculares como consecuencia de un incremento en la cantidad de proteínas contráctiles.

Además de los cambios estructurales, el entrenamiento de fuerza produce importantes adaptaciones neurales, especialmente en fases iniciales. Estas adaptaciones incluyen una mejora en el reclutamiento de unidades motoras, un aumento de la frecuencia de descarga y una mayor coordinación intermuscular, lo que permite generar mayores niveles de fuerza sin necesidad de cambios inmediatos en el tamaño muscular.

Estas adaptaciones se traducen en una mayor capacidad para producir fuerza máxima y potencia, así como en una mejora de la estabilidad articular durante la ejecución de movimientos con cargas elevadas.

10.2. Adaptaciones musculares al entrenamiento de resistencia

El entrenamiento de resistencia provoca adaptaciones musculares orientadas a mejorar la capacidad de mantener la contracción durante períodos prolongados y a retrasar la aparición de la fatiga. Estas adaptaciones afectan principalmente a las propiedades metabólicas del músculo.

Entre los cambios más relevantes se encuentran el aumento de la densidad mitocondrial, la mejora de la capacidad oxidativa y el incremento de la capilarización del tejido muscular. Estos cambios facilitan el aporte de oxígeno y la utilización eficiente de los sustratos energéticos durante el ejercicio prolongado.

El entrenamiento de resistencia mejora la eficiencia contráctil del músculo y su capacidad para mantener niveles moderados de fuerza durante largos periodos, aspectos clave en actividades de carácter aeróbico.

10.3. Adaptaciones al entrenamiento combinado y especificidad

En la práctica deportiva, es frecuente la combinación de estímulos de fuerza y resistencia, lo que da lugar a adaptaciones musculares mixtas. La naturaleza de estas adaptaciones depende del tipo de estímulo predominante, de la intensidad, del volumen de entrenamiento y del estado inicial del individuo.

El principio de especificidad resulta fundamental para comprender estas adaptaciones. El músculo se adapta de forma específica a las demandas funcionales a las que se ve sometido, optimizando aquellas propiedades más relevantes para el tipo de ejercicio realizado.

10.4. Efectos de la inactividad y del desentrenamiento

La ausencia de estímulo mecánico y neural, como ocurre durante periodos de inactividad, inmovilización o desentrenamiento, provoca una serie de adaptaciones regresivas en el músculo esquelético. Entre ellas destaca la atrofia muscular, caracterizada por una reducción del tamaño de las fibras y de la masa muscular total.

La inactividad también se asocia a una disminución de la capacidad oxidativa, una reducción de la fuerza y una mayor fatigabilidad. Estos cambios pueden producirse en períodos relativamente cortos y afectan tanto al rendimiento físico como a la funcionalidad cotidiana.

La reversibilidad de estas adaptaciones pone de manifiesto la importancia del ejercicio regular para el mantenimiento de la salud muscular y de la capacidad funcional del organismo.

Bibliografía

Heckman CJ, Enoka RM. Motor unit. *Compr Physiol*. 2012;2:2629.

Fitts RH. The cross-bridge cycle and skeletal muscle fatigue. *J Appl Physiol*. 2008;104:551.

Fox SI. Fisiología Humana. 15ª ed. McGraw-Hill Interamericana; 2021.

Katch VL, MacArdle WD, Katch FI. *Fisiología Del Ejercicio : "Fundamentos"*. 4ª ed. Editorial Médica Panamericana; 2014.

Lin BL, Song T, Sadayappan S. Myofilaments: movers and rulers of the sarcomere. *Compr Physiol*. 2017;7:675-692.

López Chicharro J, Fernández Vaquero A. *Fisiología Del Ejercicio*. 4a ed. Editorial Médica Panamericana; 2023.

Meissner G. The structural basis of ryanodine receptor ion channel function. *J Gen Physiol*. 2017;149:1065-1089.

Rekling et al., 2000.Rekling J.C., Funk G.D., Bayliss D.A., et al: Synaptic control of motoneuronal excitability. Physiol Rev 2000; 80:pp. 767

Rosenberg PB. Calcium entry in skeletal muscle. *J Physiol*. 2009;587:3149.

Schiaffino S, Reggiani C. Fiber types in mammalian skeletal muscles. *Physiol Rev*. 2011;91:1447.

Silverthorn DU. *Fisiología Humana Un Enfoque Integrado*. Ed. 8. Editorial Médica Panamericana; 2019

Wilmore JH, Kenney WL, Costill DL. *Fisiología del Deporte y el Ejercicio*. 5th ed. Editorial Médica Panamericana; 2014.

Tema 5. Entrenamiento de la fuerza muscular

BLOQUE I — BASES BIOLÓGICAS DE LA FUERZA

1. Concepto y manifestaciones de la fuerza muscular

La fuerza muscular constituye una de las capacidades físicas básicas y representa la base funcional sobre la que se apoyan el resto de manifestaciones del rendimiento (velocidad, potencia, resistencia o control motor). Desde el punto de vista fisiológico, la fuerza puede definirse como la capacidad del sistema neuromuscular para generar tensión y aplicarla contra una resistencia externa.

Es importante diferenciar que el músculo no produce movimiento, sino tensión. El movimiento aparece cuando la tensión generada supera la resistencia externa o equilibra fuerzas opuestas. Por ello, la fuerza depende tanto de factores musculares como del control neural que regula el número de unidades motoras activadas, su frecuencia de descarga y su coordinación.

La producción de fuerza es el resultado de la interacción de tres sistemas:

- Sistema nervioso → reclutamiento y sincronización de unidades motoras
- Sistema muscular → capacidad contráctil y estructural
- Sistema mecánico → palancas, ángulos articulares y velocidad de ejecución

Así, dos personas con la misma masa muscular pueden producir fuerzas muy distintas si difiere su capacidad de activación neural.

1.1 Fuerza máxima

Es la mayor cantidad de tensión que el sistema neuromuscular puede generar de forma voluntaria en una contracción única.

Depende principalmente de:

- Reclutamiento completo de unidades motoras
- Frecuencia de disparo neuronal
- Sección transversal del músculo

La fuerza máxima no implica movimiento rápido; representa el techo de producción de tensión. Es la base sobre la que se desarrollan el resto de manifestaciones.

1.2 Fuerza velocidad y potencia

Cuando la contracción ocurre a alta velocidad, la capacidad de aplicar fuerza disminuye debido a las limitaciones del ciclo de los puentes cruzados. De esta relación surge la potencia:

Potencia = Fuerza × Velocidad

La potencia refleja la capacidad de generar fuerza en el menor tiempo posible y es determinante en acciones explosivas como saltar, lanzar o acelerar.

En este caso cobra especial importancia:

- Activación neural rápida
- Tipo de fibras musculares
- Rigidez músculo-tendinosa

1.3 Fuerza resistencia

Es la capacidad de mantener la producción de fuerza durante repeticiones prolongadas o durante un tiempo elevado.

No depende solo del músculo, sino también de:

- Metabolismo energético
- Fatiga neuromuscular
- Capacidad buffer
- Coordinación intermuscular

Se relaciona con tareas repetidas o esfuerzos submáximos prolongados.

1.4 Manifestaciones funcionales de la fuerza

En la práctica, la fuerza no aparece de forma aislada, sino combinada según la tarea:

- Fuerza máxima → levantar grandes cargas
- Fuerza explosiva → movimientos rápidos con cargas medias/bajas
- Fuerza reactiva → utilización del ciclo estiramiento-acortamiento
- Fuerza resistencia → esfuerzos repetidos

Por tanto, la fuerza no es una cualidad única, sino un conjunto de manifestaciones que dependen del modo en que el sistema nervioso utiliza el músculo en un contexto mecánico determinado. Esta idea será fundamental para entender posteriormente las adaptaciones al entrenamiento y la dosificación del esfuerzo.

2. Bases neuromusculares de la producción de fuerza

La producción de fuerza no depende únicamente del tamaño del músculo, sino principalmente de la forma en que el sistema nervioso lo activa. Antes de que aparezcan cambios estructurales, las mejoras iniciales del entrenamiento de fuerza son casi exclusivamente neurales. El músculo posee una gran capacidad potencial de generar tensión, pero su utilización real está limitada por mecanismos de control del sistema nervioso central y periférico.

El movimiento voluntario comienza en la corteza motora, donde se genera la orden motora. Esta señal desciende por las vías corticoespinales hasta las motoneuronas espinales, que constituyen la vía final común hacia el músculo. Cada motoneurona y las fibras musculares que inerva forman una unidad motora, considerada la unidad funcional básica de la fuerza.

2.1 Reclutamiento de unidades motoras

El sistema nervioso no activa todas las fibras musculares simultáneamente. Sigue el principio del tamaño: primero se activan unidades motoras pequeñas (fibras lentas) y progresivamente las grandes (fibras rápidas) a medida que aumenta la demanda de fuerza.

Esto implica que:

- Cargas bajas → pocas unidades motoras
- Cargas altas → reclutamiento casi completo
- Esfuerzo máximo → activación total disponible

Por ello, la intensidad del esfuerzo, y no solo el peso levantado, determina el estímulo neuromuscular. Cuando una serie se acerca al fallo, incluso con cargas moderadas, termina activando unidades motoras de alto umbral.

2.2 Frecuencia de descarga

Una vez reclutadas las unidades motoras, el sistema nervioso puede aumentar la fuerza elevando la frecuencia de impulsos nerviosos. Este fenómeno, denominado sumación temporal, incrementa la tensión sin necesidad de reclutar nuevas fibras.

A mayor frecuencia de descarga:

- Mayor concentración de Ca^{2+} intracelular
- Mayor número de puentes cruzados activos
- Mayor tensión generada

Los sujetos entrenados muestran frecuencias de disparo superiores y más eficientes.

2.3 Sincronización y coordinación

Además de activar fibras, el sistema nervioso optimiza cómo se activan:

Sincronización → varias unidades motoras disparan simultáneamente
Coordinación intermuscular → músculos agonistas colaboran mejor
Inhibición antagonista → disminuye la oposición al movimiento

Estas adaptaciones explican por qué al inicio del entrenamiento la fuerza aumenta sin hipertrofia visible.

2.4 Mecanismos inhibitorios

El organismo posee sistemas de protección que limitan la fuerza para evitar daño estructural:

- Órgano tendinoso de Golgi → inhibe tensión excesiva
- Interneuronas inhibitorias → reducen activación motora
- Control cortical protector

El entrenamiento de fuerza reduce parcialmente estas inhibiciones, permitiendo expresar mayor porcentaje de la fuerza potencial.

En conjunto, la fuerza máxima voluntaria no refleja la capacidad real del músculo, sino el grado de acceso neural a esa capacidad. Por ello, las primeras adaptaciones al entrenamiento son neurales y determinan la eficacia posterior del estímulo hipertrófico.

3. Manifestaciones de la fuerza y tipos de contracción

La fuerza muscular no es una cualidad única, sino que puede expresarse de diferentes formas según la velocidad de ejecución, el tiempo disponible para generar tensión y la resistencia externa. Cada manifestación implica demandas neuromusculares y energéticas distintas, por lo que el entrenamiento debe diferenciar claramente entre ellas.

3.1 Fuerza máxima

Es la mayor tensión que el sistema neuromuscular puede generar voluntariamente en una contracción. Representa la base sobre la que se desarrollan el resto de manifestaciones de fuerza.

Características fisiológicas:

- Reclutamiento casi completo de unidades motoras
- Alta frecuencia de descarga
- Gran activación cortical
- Velocidad de movimiento baja

La fuerza máxima depende principalmente de factores neurales y de la sección transversal del músculo. Su mejora incrementa el "techo" de rendimiento de potencia, velocidad y resistencia muscular.

3.2 Fuerza explosiva o potencia

Es la capacidad de generar fuerza en el menor tiempo posible. No depende solo de cuánta fuerza puede producir el músculo, sino de la rapidez con que puede desarrollarla (tasa de desarrollo de la fuerza, RFD).

Determinantes principales:

- Activación rápida de unidades motoras rápidas
- Alta frecuencia inicial de descarga
- Elasticidad músculo-tendinosa
- Coordinación intramuscular

La potencia es clave en gestos deportivos como saltos, lanzamientos o cambios de dirección, donde el tiempo para aplicar fuerza es muy limitado.

3.3 Fuerza-resistencia

Es la capacidad de mantener o repetir niveles de fuerza durante un tiempo prolongado sin caída importante del rendimiento.

Depende fundamentalmente de:

- Capacidad metabólica muscular
- Tolerancia a metabolitos

- Eficiencia neuromuscular
- Economía del movimiento

No implica necesariamente baja intensidad; puede existir fuerza-resistencia con cargas moderadas si el número de repeticiones es elevado.

3.4 Tipos de contracción muscular

El músculo puede generar fuerza en distintas condiciones mecánicas:

Contracción isométrica
No hay cambio de longitud muscular. Se produce tensión sin movimiento articular. Permite altos niveles de activación neural.

Contracción concéntrica
El músculo se acorta al vencer la resistencia. La producción de fuerza disminuye conforme aumenta la velocidad de acortamiento.

Contracción excéntrica
El músculo se alarga mientras genera tensión. Produce mayor fuerza con menor coste energético y elevada tensión mecánica, siendo clave para el estímulo hipertrófico y el daño muscular adaptativo.

3.5 Relación fuerza-velocidad

Existe una relación inversa entre la velocidad de acortamiento y la fuerza generada:

- Velocidades bajas → mayor fuerza
- Velocidades altas → menor fuerza
- Excéntrico → fuerza superior a la isométrica

Esta relación explica por qué cargas pesadas desarrollan fuerza máxima y cargas ligeras permiten entrenar potencia.

En conjunto, las distintas manifestaciones de la fuerza responden a mecanismos fisiológicos específicos. El entrenamiento eficaz debe seleccionar la intensidad, la velocidad y el tipo de contracción en función de la adaptación buscada.

BLOQUE II — RESPUESTA AGUDA

4. Bases mecánicas de la producción de fuerza

La fuerza que finalmente se aplica sobre una resistencia externa no depende únicamente de la activación neuromuscular, sino también de las condiciones mecánicas en las que el músculo trabaja. La relación entre longitud muscular, velocidad de contracción y disposición estructural del músculo determina cuánta tensión puede transformarse en movimiento útil.

Comprender estas relaciones permite explicar por qué un mismo músculo puede generar diferentes niveles de fuerza según el ángulo articular, la velocidad de ejecución o el tipo de contracción.

4.1 Relación longitud–tensión

La capacidad de generar fuerza depende de la longitud inicial del músculo antes de contraerse. Existe una longitud óptima en la que la superposición entre actina y miosina permite el máximo número de puentes cruzados.

Si el músculo está excesivamente acortado, los filamentos se solapan demasiado y disminuye la producción de tensión. Si está demasiado estirado, la interacción entre filamentos es insuficiente y también cae la fuerza.

Esto explica que:

- Cada ejercicio tenga un punto mecánicamente más fuerte
- El rango completo de movimiento tenga importancia en el entrenamiento
- El trabajo en longitudes musculares largas genere gran tensión mecánica

4.2 Relación fuerza–velocidad

La fuerza que el músculo puede producir disminuye a medida que aumenta la velocidad de acortamiento. Durante contracciones concéntricas rápidas hay menos tiempo para la formación de puentes cruzados, reduciendo la tensión generada.

En cambio, durante contracciones excéntricas el músculo puede generar más fuerza porque los puentes cruzados son forzados a separarse por la carga externa y contribuyen componentes elásticos pasivos.

Por tanto:

- Velocidad baja → alta fuerza
- Velocidad alta → baja fuerza
- Excéntrico → fuerza superior

Esta relación es fundamental para diferenciar entrenamiento de fuerza máxima y entrenamiento de potencia.

4.3 Curva potencia–velocidad

La potencia resulta del producto entre fuerza y velocidad. No es máxima ni con cargas muy altas ni con cargas muy bajas, sino en valores intermedios donde se logra el mejor equilibrio entre ambas.

Esto explica por qué:

- Cargas muy pesadas desarrollan fuerza máxima
- Cargas moderadas desarrollan potencia
- Cargas ligeras desarrollan velocidad

El objetivo del entrenamiento determinará el punto de la curva a trabajar.

4.4 Influencia de la arquitectura muscular

La disposición de las fibras musculares influye en la producción de fuerza. Los músculos con mayor ángulo de pennación pueden alojar más fibras en paralelo, aumentando la fuerza potencial. Los músculos con fibras más largas favorecen la velocidad de contracción.

El entrenamiento de fuerza puede modificar esta arquitectura, aumentando el ángulo de pennación y la capacidad de generar tensión.

En conjunto, la producción de fuerza depende de la interacción entre activación neural y condiciones mecánicas. El rendimiento no solo está limitado por la capacidad del músculo, sino también por cómo y cuándo se aplica esa capacidad dentro del movimiento.

5. Respuestas neuromusculares agudas al entrenamiento de fuerza

Durante una sesión de entrenamiento de fuerza el organismo experimenta cambios inmediatos que afectan tanto al sistema nervioso como al músculo. Estas respuestas agudas no constituyen todavía adaptaciones permanentes, pero determinan el tipo de estímulo que provocará posteriormente las mejoras estructurales y funcionales.

El rendimiento durante la serie depende del reclutamiento progresivo de unidades motoras y de la aparición simultánea de mecanismos de fatiga que limitan la producción de fuerza.

5.1 Reclutamiento progresivo y proximidad al fallo

Al inicio de una serie con cargas submáximas, el sistema nervioso activa principalmente unidades motoras de bajo umbral. A medida que las fibras activadas se fatigan, el organismo necesita reclutar unidades motoras de mayor tamaño para mantener la fuerza requerida.

Por ello, aunque la carga no sea máxima, al aproximarse al fallo muscular se alcanza un reclutamiento prácticamente completo. Este fenómeno explica por qué la proximidad al fallo determina la magnitud del estímulo neuromuscular más que el peso absoluto levantado.

Cuanto menor es el número de repeticiones en reserva, mayor es:

- la activación de fibras rápidas
- la tensión mecánica efectiva
- el estímulo adaptativo

5.2 Fatiga neural transitoria

Durante el esfuerzo intenso se produce una disminución temporal de la capacidad de activación voluntaria. Aparecen reducciones en la frecuencia de descarga y en la coordinación de unidades motoras, lo que se manifiesta como pérdida de fuerza inmediata tras la serie.

Esta fatiga neural es reversible tras el descanso, pero determina la duración necesaria de las pausas entre series para recuperar la capacidad de generar tensión elevada.

5.3 Alteraciones del acoplamiento excitación–contracción

La repetición de contracciones provoca cambios iónicos y acumulación de metabolitos que reducen la liberación de calcio desde el retículo sarcoplásmico y la sensibilidad de las proteínas contráctiles. Como consecuencia, la fuerza producida por cada impulso nervioso disminuye progresivamente.

Este proceso explica la caída de la velocidad de ejecución dentro de la serie y la incapacidad de completar más repeticiones pese a mantener la intención de esfuerzo máxima.

5.4 Potenciación postactivación

Tras una contracción intensa puede observarse un aumento temporal de la capacidad de generar fuerza en esfuerzos posteriores de corta duración. Este fenómeno se relaciona con una mayor

disponibilidad de calcio intracelular y con cambios en la fosforilación de las proteínas contráctiles.

Su efecto es breve y depende del equilibrio entre fatiga y potenciación, siendo relevante en tareas explosivas posteriores al calentamiento o a series pesadas.

En conjunto, las respuestas neuromusculares agudas determinan el tipo de estímulo que recibe el músculo. La proximidad al fallo, la fatiga generada y la recuperación entre series condicionan las adaptaciones que aparecerán con el entrenamiento sistemático.

6. Respuesta metabólica y hormonal aguda al entrenamiento de fuerza

El entrenamiento de fuerza no solo implica activación neuromuscular, sino también una importante perturbación metabólica y endocrina. Durante una sesión se produce un aumento de la demanda energética, acumulación de metabolitos y liberación de hormonas que actúan como señales para la adaptación posterior del tejido muscular.

Estas respuestas dependen principalmente de la intensidad de la carga, el número de repeticiones, el volumen total de trabajo y la duración de las pausas.

6.1 Respuesta metabólica

El suministro de energía durante el entrenamiento de fuerza depende fundamentalmente de los sistemas anaeróbicos. En las primeras repeticiones predomina el sistema ATP-fosfocreatina, que permite generar fuerza elevada de manera inmediata. A medida que la serie se prolonga, aumenta la participación de la glucólisis anaeróbica.

La repetición de contracciones y la posible oclusión parcial del flujo sanguíneo dentro del músculo provocan acumulación de metabolitos como fosfato inorgánico, protones y lactato. Estos cambios contribuyen a la fatiga local pero también actúan como estímulos para la adaptación muscular.

El estrés metabólico asociado a series largas o pausas cortas se relaciona con:

- mayor activación de vías anabólicas
- aumento del reclutamiento de fibras rápidas
- incremento del estímulo hipertrófico

Por el contrario, series muy cortas con pausas largas generan menor perturbación metabólica y un estímulo principalmente neural.

6.2 Respuesta hormonal

El ejercicio de fuerza provoca incrementos agudos de diversas hormonas que participan en la regulación del metabolismo y en la señalización de la adaptación.

Entre las principales destacan:

Testosterona: favorece la síntesis proteica y la adaptación muscular. Su aumento es mayor cuando se implican grandes masas musculares y volúmenes elevados.

Hormona del crecimiento (GH): relacionada con el estrés metabólico y la acumulación de metabolitos. Estimula procesos de reparación y adaptación tisular.

Catecolaminas: aumentan la activación neuromuscular y la movilización energética durante el ejercicio.

Cortisol: participa en la disponibilidad de sustratos energéticos; su elevación excesiva puede indicar elevada carga fisiológica.

La magnitud de la respuesta hormonal depende de la combinación de variables del entrenamiento. Protocolos con volumen moderado-alto, pausas cortas y múltiples grupos musculares suelen producir mayores respuestas endocrinas agudas.

6.3 Significado fisiológico

Las respuestas metabólicas y hormonales no son en sí mismas la adaptación, sino señales que desencadenan procesos posteriores de reparación y remodelación. La combinación de tensión mecánica, estrés metabólico y activación hormonal determina el tipo de adaptación al entrenamiento de fuerza.

Por ello, la manipulación de la intensidad, el volumen y la recuperación permite orientar el estímulo hacia mejoras neurales, hipertróficas o de resistencia muscular. En el siguiente bloque se analizarán las adaptaciones crónicas que resultan de la repetición sistemática de estos estímulos.

BLOQUE III — ADAPTACIONES

7. Adaptaciones neurales al entrenamiento de fuerza

Las primeras mejoras en el rendimiento de fuerza tras iniciar un programa de entrenamiento no se deben al aumento del tamaño muscular, sino a modificaciones en la activación del sistema nervioso. Estas adaptaciones neurales permiten utilizar un mayor porcentaje de la capacidad contráctil del músculo existente y explican los rápidos incrementos de fuerza observados en las primeras semanas.

El entrenamiento de fuerza mejora la eficacia con la que el sistema nervioso recluta, coordina y modula las unidades motoras.

7.1 Mejora del reclutamiento de unidades motoras

Con el entrenamiento aumenta la capacidad de activar unidades motoras de alto umbral. El sistema nervioso reduce las limitaciones protectoras iniciales y accede a un mayor número de fibras rápidas incluso con cargas submáximas.

Esto permite generar mayor tensión sin necesidad inmediata de hipertrofia muscular.

7.2 Aumento de la frecuencia de descarga

El entrenamiento incrementa la frecuencia de impulsos nerviosos enviados a las fibras musculares. Una mayor frecuencia de descarga aumenta la concentración intracelular de calcio y, por tanto, la cantidad de puentes cruzados activos.

El resultado es una mayor fuerza producida por cada unidad motora activada.

7.3 Sincronización de unidades motoras

Las unidades motoras tienden a activarse de forma más coordinada. Aunque la sincronización excesiva no siempre es eficiente para movimientos finos, en acciones de fuerza máxima favorece la producción de picos de tensión elevados.

7.4 Reducción de mecanismos inhibitorios

El entrenamiento disminuye la acción de los mecanismos reflejos protectores que limitan la tensión muscular, como la inhibición mediada por el órgano tendinoso de Golgi. Esto permite expresar una mayor proporción de la fuerza potencial del músculo.

7.5 Mejora de la coordinación intermuscular

Se optimiza la cooperación entre músculos agonistas, sinergistas y antagonistas. Disminuye la coactivación innecesaria de los antagonistas y el movimiento se vuelve más eficiente desde el punto de vista mecánico.

En conjunto, las adaptaciones neurales permiten producir más fuerza sin cambios estructurales significativos. Constituyen la base inicial del progreso y condicionan el estímulo posterior responsable de la hipertrofia muscular.

8. Adaptaciones musculares al entrenamiento de fuerza

Tras las primeras semanas dominadas por mejoras neurales, el entrenamiento de fuerza provoca modificaciones estructurales en el músculo esquelético que aumentan su capacidad para generar tensión. Estas adaptaciones afectan al tamaño de la fibra, a su organización interna y a sus características funcionales.

El incremento de fuerza a medio y largo plazo depende en gran medida de estos cambios morfológicos.

8.1 Hipertrofia miofibrilar

La hipertrofia miofibrilar consiste en el aumento del número y tamaño de las miofibrillas dentro de la fibra muscular. Se incrementa la cantidad de proteínas contráctiles (actina y miosina), lo que permite generar mayor tensión por unidad de área.

Este tipo de hipertrofia se relaciona principalmente con:

- cargas elevadas
- alta tensión mecánica
- activación completa de unidades motoras

Supone un aumento real de la capacidad contráctil del músculo.

8.2 Hipertrofia sarcoplasmática

Implica el aumento del volumen del sarcoplasma y de los componentes no contráctiles de la fibra, como enzimas, glucógeno y fluido intracelular.

Suele asociarse a:

- mayor volumen de entrenamiento
- mayor estrés metabólico
- pausas más cortas

Contribuye al aumento del tamaño muscular y a la tolerancia al esfuerzo repetido, aunque su efecto directo sobre la fuerza máxima es menor que el de la hipertrofia miofibrilar.

8.3 Cambios en el tipo de fibra

El entrenamiento de fuerza no transforma completamente unas fibras en otras, pero sí modifica sus características funcionales. Se observa una tendencia hacia un perfil más rápido y potente

dentro de las fibras existentes, especialmente mediante la transición de fibras rápidas menos especializadas hacia fenotipos más eficientes en la producción de fuerza.

8.4 Cambios en la arquitectura muscular

El músculo adapta su estructura para soportar mayores niveles de tensión. Aumenta el ángulo de pennación, lo que permite alojar más fibras en paralelo y mejorar la capacidad de generar fuerza. También puede incrementarse la longitud de los fascículos, favoreciendo la producción de fuerza en rangos articulares amplios.

Estas modificaciones estructurales mejoran la transmisión de fuerza al tendón y optimizan el rendimiento mecánico.

En conjunto, las adaptaciones musculares constituyen el principal soporte de las mejoras de fuerza a largo plazo y dependen de la repetición sistemática de estímulos mecánicos suficientes.

9. Adaptaciones estructurales y tisulares

El entrenamiento de fuerza no solo modifica el músculo, sino también los tejidos que transmiten y soportan la tensión generada. Tendones, tejido conectivo y hueso se adaptan progresivamente para tolerar mayores cargas mecánicas, mejorando la eficiencia del movimiento y reduciendo el riesgo de lesión.

Estas adaptaciones son más lentas que las neurales y musculares, pero resultan fundamentales para la estabilidad y la durabilidad del rendimiento.

9.1 Adaptaciones del tendón

El tendón transmite la fuerza del músculo al hueso. Con el entrenamiento aumenta su rigidez y su capacidad de soportar tensión. Una mayor rigidez tendinosa permite transferir la fuerza de forma más rápida y eficiente, mejorando la producción de potencia y la economía del movimiento.

Además, el aumento del contenido de colágeno y la reorganización de sus fibras incrementan la resistencia mecánica frente a cargas repetidas.

9.2 Tejido conectivo

El entrenamiento de fuerza fortalece las estructuras de soporte del músculo (endomisio, perimisio y epimisio). Estas adaptaciones mejoran la transmisión lateral de la fuerza entre fibras musculares y contribuyen a una distribución más homogénea de la tensión.

Como consecuencia, disminuye la probabilidad de daño muscular ante esfuerzos elevados.

9.3 Adaptaciones óseas

Las cargas mecánicas repetidas estimulan la actividad osteoblástica, aumentando la densidad mineral ósea. Este proceso mejora la resistencia del hueso y reduce el riesgo de fracturas por estrés.

La adaptación depende de la magnitud de la carga y de la dirección de las fuerzas aplicadas, siendo el entrenamiento de fuerza uno de los estímulos más eficaces para el tejido óseo..

10. Adaptaciones metabólicas al entrenamiento de fuerza

Aunque el entrenamiento de fuerza se asocia principalmente con adaptaciones neurales y estructurales, también provoca modificaciones importantes en el metabolismo muscular. Estas adaptaciones mejoran la capacidad para producir energía rápidamente, tolerar la acumulación de metabolitos y mantener la producción de fuerza en esfuerzos repetidos.

Su magnitud depende del tipo de entrenamiento realizado, siendo más marcadas cuando existe un componente de volumen elevado o pausas incompletas.

10.1 Aumento de los fosfágenos musculares

El entrenamiento incrementa la concentración intramuscular de fosfocreatina y mejora la actividad de las enzimas implicadas en la resíntesis rápida de ATP. Esto permite sostener esfuerzos intensos durante más tiempo y recuperar la capacidad de producir fuerza entre series con mayor rapidez.

Como consecuencia, mejora el rendimiento en acciones explosivas repetidas.

10.2 Mejora de la capacidad glucolítica

Se incrementa la actividad de enzimas de la glucólisis anaeróbica, lo que facilita la producción rápida de ATP en esfuerzos de corta duración. Esta adaptación permite tolerar mejor series de múltiples repeticiones y mantener niveles de fuerza elevados en trabajos de alta intensidad.

10.3 Mayor capacidad amortiguadora

El músculo aumenta su capacidad para neutralizar los cambios de pH derivados de la acumulación de protones. El incremento de sistemas tampón intracelulares retrasa la aparición de la fatiga metabólica y permite mantener la contracción durante más tiempo.

10.4 Economía neuromuscular

El entrenamiento mejora la eficiencia en la utilización de energía para producir fuerza. Para una misma carga relativa, el coste energético disminuye debido a la optimización de la coordinación neuromuscular y al menor reclutamiento innecesario de fibras.

En conjunto, las adaptaciones metabólicas permiten sostener la producción de fuerza durante esfuerzos repetidos y facilitan la recuperación entre series, contribuyendo al rendimiento global en el entrenamiento de fuerza.

BLOQUE IV — MÉTODOS

11. Variables de la carga en el entrenamiento de fuerza

La adaptación al entrenamiento depende de las características del estímulo aplicado. No es la realización del ejercicio por sí misma lo que determina la mejora, sino la combinación de variables que definen la carga de entrenamiento. Estas variables condicionan el tipo de estrés neuromuscular, metabólico y hormonal generado y, por tanto, la adaptación resultante.

Comprenderlas permite orientar el entrenamiento hacia fuerza máxima, hipertrofia o potencia.

11.1 Intensidad

La intensidad se refiere al nivel de esfuerzo aplicado respecto a la capacidad máxima. Tradicionalmente se expresa como porcentaje de una repetición máxima (1RM), aunque fisiológicamente representa el grado de reclutamiento de unidades motoras.

Cargas altas producen elevada tensión mecánica y predominio de adaptaciones neurales.
Cargas moderadas permiten acumular volumen y favorecen la hipertrofia.
Cargas bajas requieren proximidad al fallo para generar estímulo significativo.

Por tanto, la intensidad real depende tanto del peso como del esfuerzo realizado.

11.2 Volumen

El volumen corresponde a la cantidad total de trabajo realizado, normalmente expresado como número de series y repeticiones. Es el principal determinante del estímulo hipertrófico, ya que aumenta el tiempo bajo tensión y el estrés metabólico.

Un volumen insuficiente limita la adaptación, mientras que un volumen excesivo dificulta la recuperación.

11.3 Densidad

La densidad hace referencia a la relación entre trabajo y descanso. Pausas cortas incrementan el estrés metabólico y hormonal, mientras que pausas largas favorecen la recuperación neural y permiten mantener cargas elevadas.

Su manipulación modifica el carácter del esfuerzo y el tipo de fatiga generada.

11.4 Frecuencia

La frecuencia indica el número de sesiones por grupo muscular en un periodo determinado. Permite distribuir el volumen total y mejorar la calidad del estímulo, favoreciendo la recuperación entre sesiones.

Frecuencias moderadas suelen optimizar la adaptación al permitir repetir estímulos eficaces sin acumulación excesiva de fatiga.

11.5 Selección de ejercicios

Los ejercicios determinan el patrón neuromuscular y el tipo de tensión aplicada. Movimientos multiarticulares permiten mayores cargas y activación global, mientras que ejercicios analíticos focalizan el estímulo sobre grupos musculares específicos.

La combinación adecuada condiciona la transferencia al rendimiento y la adaptación estructural.

En conjunto, la manipulación coordinada de estas variables define el estímulo del entrenamiento de fuerza y constituye la base para la programación posterior.

12. Métodos de entrenamiento de fuerza

Los métodos de entrenamiento son formas organizadas de aplicar las variables de carga con el objetivo de provocar adaptaciones específicas. Cada método modifica el tipo de tensión mecánica, el grado de fatiga y la respuesta neuromuscular, por lo que debe seleccionarse en función del objetivo principal del entrenamiento.

12.1 Entrenamiento orientado a hipertrofia

Se caracteriza por combinar cargas moderadas con un volumen relativamente alto de trabajo. El objetivo principal es aumentar la masa muscular mediante la acumulación de tensión mecánica y estrés metabólico.

Suele implicar:

- múltiples series por ejercicio
- repeticiones medias
- pausas incompletas

Este enfoque favorece tanto la hipertrofia miofibrilar como la sarcoplasmática.

12.2 Entrenamiento de fuerza máxima

Busca aumentar la capacidad de generar la mayor tensión posible. Se utilizan cargas elevadas y pocas repeticiones, con pausas largas que permiten recuperar la activación neural.

El estímulo principal es neural:

- reclutamiento completo de unidades motoras
- alta frecuencia de descarga
- baja fatiga metabólica relativa

12.3 Entrenamiento de potencia

Pretende mejorar la capacidad de aplicar fuerza rápidamente. Se emplean cargas bajas o moderadas movidas a la máxima velocidad posible.

La clave es la intención de movimiento rápido, que optimiza la tasa de desarrollo de la fuerza y la coordinación neuromuscular.

12.4 Entrenamiento de fuerza resistencia

Orientado a mantener la producción de fuerza durante múltiples repeticiones. Utiliza cargas ligeras o moderadas con pausas cortas.

Predominan las adaptaciones metabólicas y la tolerancia a la fatiga local.

12.5 Pliometría

Basada en el ciclo estiramiento-acortamiento, aprovecha la energía elástica almacenada durante la fase excéntrica para aumentar la fuerza en la fase concéntrica.

Mejora la potencia y la eficiencia neuromuscular, siendo especialmente relevante en acciones deportivas explosivas.

12.6 Entrenamiento isométrico

Se realiza sin cambio en la longitud muscular. Permite desarrollar altos niveles de activación neural en ángulos específicos y mejorar la estabilidad articular.

12.7 Entrenamiento excéntrico

Enfatiza la fase de alargamiento muscular, donde se producen elevadas tensiones mecánicas con menor coste energético. Es eficaz para la hipertrofia y para el fortalecimiento estructural del músculo y del tendón.

En conjunto, cada método modifica la naturaleza del estímulo aplicado. La combinación adecuada de métodos permite desarrollar las distintas manifestaciones de la fuerza de forma complementaria.

BLOQUE V — RIR / AUTORREGULACIÓN

13. Intensidad real del esfuerzo y proximidad al fallo

La carga utilizada en un ejercicio no describe completamente el estímulo aplicado al sistema neuromuscular. Dos series realizadas con el mismo peso pueden provocar adaptaciones muy diferentes dependiendo del grado de esfuerzo con el que se ejecuten. Por ello, además de la intensidad externa (peso levantado), es necesario considerar la intensidad interna, es decir, cuánto se aproxima la serie al límite de producción de fuerza del músculo.

Este concepto conecta la fisiología de la activación neuromuscular con la dosificación práctica del entrenamiento.

13.1 Intensidad externa vs intensidad interna

La intensidad externa se expresa habitualmente como porcentaje de una repetición máxima. Sin embargo, fisiológicamente el estímulo depende del nivel de reclutamiento de unidades motoras y de la fatiga alcanzada durante la serie.

Con cargas ligeras, el reclutamiento inicial es bajo, pero aumenta progresivamente conforme las fibras activas se fatigan. Si la serie continúa hasta un esfuerzo elevado, terminarán activándose unidades motoras de alto umbral, generando un estímulo similar al de cargas altas.

Por tanto, el peso no determina por sí solo la intensidad real del ejercicio.

13.2 Proximidad al fallo muscular

El fallo muscular se produce cuando no es posible completar una repetición adicional manteniendo la técnica. A medida que se acerca este punto, el sistema nervioso necesita reclutar más unidades motoras y aumentar la frecuencia de descarga para sostener la fuerza requerida.

En las últimas repeticiones de la serie:

- se activan fibras rápidas
- aumenta la tensión efectiva
- se incrementa el estímulo adaptativo

Esto explica por qué la proximidad al fallo condiciona en gran medida la magnitud de la adaptación.

13.3 Repeticiones en reserva (RIR)

Las repeticiones en reserva estiman cuántas repeticiones podrían realizarse antes de alcanzar el fallo. Constituyen una herramienta práctica para controlar la intensidad interna del esfuerzo.

Valores bajos de RIR indican alto reclutamiento neuromuscular y elevada fatiga local, mientras que valores altos implican un estímulo más reducido. De esta forma, permite ajustar el entrenamiento sin necesidad de alcanzar el fallo en cada serie.

13.4 Significado fisiológico

El estímulo eficaz de entrenamiento aparece cuando el músculo debe reclutar unidades motoras de alto umbral y mantenerlas activas bajo fatiga. La proximidad al fallo es el factor que garantiza esta activación independientemente de la carga utilizada.

Por ello, la intensidad del entrenamiento de fuerza debe interpretarse como el grado de esfuerzo realizado y no únicamente como el peso levantado. Este concepto será fundamental para la programación y la autorregulación del entrenamiento.

14. Autorregulación y aplicación práctica del esfuerzo

El uso de la proximidad al fallo permite ajustar el entrenamiento a la capacidad real del deportista en cada sesión. El rendimiento diario puede variar por factores como la fatiga acumulada, el descanso o el estado nutricional, por lo que emplear únicamente porcentajes fijos de carga no siempre garantiza un estímulo adecuado. La autorregulación adapta la carga al estado funcional del organismo, manteniendo la calidad del estímulo sin generar fatiga excesiva.

14.1 Escala de percepción del esfuerzo aplicada a la fuerza

La percepción subjetiva del esfuerzo puede emplearse para estimar la intensidad interna de una serie. Cuando el deportista evalúa cuántas repeticiones podría realizar antes del fallo, está valorando indirectamente el grado de activación neuromuscular alcanzado.

Un esfuerzo percibido bajo indica que aún no se han reclutado todas las unidades motoras, mientras que un esfuerzo elevado refleja activación completa y alta fatiga local. Esta herramienta permite ajustar la carga sin necesidad de pruebas máximas continuas.

14.2 Series efectivas

Se denominan series efectivas aquellas que alcanzan un nivel de esfuerzo suficiente para provocar adaptaciones, es decir, cuando la proximidad al fallo obliga al reclutamiento de unidades motoras de alto umbral.

Series muy alejadas del fallo generan escaso estímulo, mientras que acercarse excesivamente al fallo en todas las series puede dificultar la recuperación. El entrenamiento eficaz consiste en acumular un número adecuado de series efectivas manteniendo la calidad del movimiento.

14.3 Volumen recuperable

Cada organismo posee una capacidad limitada de tolerar fatiga. El volumen recuperable representa la cantidad de trabajo que puede asimilarse sin comprometer la adaptación. Si se supera, disminuye el rendimiento y aumenta el riesgo de lesión o sobreentrenamiento.

La autorregulación permite ajustar el número de series en función de la respuesta diaria del deportista.

14.4 Distribución de la carga y frecuencia

Repartir el volumen total en varias sesiones mejora la calidad del estímulo y facilita la recuperación neuromuscular. Frecuencias moderadas permiten repetir estímulos eficaces sin acumular fatiga excesiva en una sola sesión.

En conjunto, la autorregulación convierte el conocimiento fisiológico en una herramienta práctica para programar el entrenamiento de fuerza, adaptándolo al estado real del deportista y optimizando la relación entre estímulo y recuperación.

BLOQUE VI — PERIODIZACIÓN Y APLICACIÓN

15. Principios de programación del entrenamiento de fuerza

La programación del entrenamiento organiza las variables de carga en el tiempo para provocar adaptaciones progresivas sin generar fatiga excesiva. No se trata solo de seleccionar ejercicios o cargas, sino de distribuir el estímulo de forma que el organismo pueda recuperarse y supercompensar.

Los principios de programación derivan directamente de la fisiología de la adaptación: el cuerpo necesita un estímulo suficiente para adaptarse, pero también tiempo para asimilarlo.

15.1 Principio de sobrecarga progresiva

Para que exista adaptación, el estímulo debe superar el nivel al que el organismo está acostumbrado. A medida que mejora la capacidad de producir fuerza, la carga debe aumentar progresivamente, ya sea mediante más peso, mayor volumen o mayor proximidad al fallo.

Sin sobrecarga no hay adaptación; con sobrecarga excesiva no hay recuperación.

15.2 Principio de especificidad

Las adaptaciones son específicas al tipo de estímulo aplicado. El músculo, el sistema nervioso y la coordinación mejoran en función de:

- el tipo de contracción
- la velocidad de ejecución
- el rango de movimiento
- la intensidad utilizada

Por ello, el entrenamiento debe reproducir las características del rendimiento buscado.

15.3 Principio de variabilidad

El organismo se adapta al estímulo repetido y su efecto disminuye con el tiempo. Introducir variaciones controladas en volumen, intensidad o ejercicios permite mantener la eficacia del entrenamiento sin perder la especificidad.

La variabilidad no implica cambio constante, sino modificación planificada del estímulo.

15.4 Principio de individualización

La respuesta al entrenamiento depende del nivel previo, la genética, la recuperación y la experiencia. La misma carga puede ser insuficiente para un sujeto entrenado y excesiva para un principiante.

La programación debe ajustarse a la capacidad individual para mantener el equilibrio entre estímulo y recuperación.

15.5 Principio de recuperación

La adaptación ocurre durante la recuperación posterior al entrenamiento. Un estímulo adecuado seguido de descanso suficiente produce mejora; sin recuperación adecuada aparece fatiga acumulada y disminuye el rendimiento.

La correcta planificación alterna fases de carga y descarga para permitir la supercompensación.

En conjunto, estos principios orientan la organización del entrenamiento y constituyen la base para la periodización, que estructura el proceso a medio y largo plazo.

16. Periodización del entrenamiento de fuerza

La periodización consiste en organizar el entrenamiento a lo largo del tiempo mediante la variación planificada de la carga para optimizar la adaptación y evitar la fatiga acumulada. Su objetivo es mantener un equilibrio entre estímulo y recuperación, permitiendo mejorar el rendimiento de forma progresiva y sostenida.

En lugar de aplicar siempre la misma intensidad y volumen, la periodización modifica estas variables para orientar las adaptaciones hacia objetivos concretos en cada fase.

16.1 Periodización lineal

Se caracteriza por un aumento progresivo de la intensidad y una disminución del volumen a lo largo del tiempo. Inicialmente se emplean cargas moderadas y mayor número de repeticiones, y posteriormente se avanza hacia cargas más altas y menor volumen.

Este modelo permite desarrollar primero adaptaciones estructurales y posteriormente maximizar la capacidad de generar fuerza.

16.2 Periodización ondulante

En este caso la intensidad y el volumen varían dentro de la misma semana o entre sesiones consecutivas. Se alternan días orientados a fuerza máxima, hipertrofia o potencia.

Este enfoque mantiene estímulos variados y reduce la adaptación excesiva a una única carga, favoreciendo la mejora simultánea de varias manifestaciones de la fuerza.

16.3 Periodización por bloques

Organiza el entrenamiento en fases específicas centradas en una capacidad principal. Cada bloque acumula adaptaciones concretas que sirven de base para el siguiente.

Por ejemplo, un bloque de hipertrofia prepara el tejido muscular para un bloque posterior de fuerza máxima, que a su vez facilita el desarrollo de potencia.

16.4 Periodización concurrente

Combina en el mismo periodo el desarrollo de distintas cualidades físicas, como fuerza y resistencia. Requiere ajustar cuidadosamente el volumen y la intensidad para evitar interferencias entre adaptaciones.

En conjunto, la periodización permite dirigir el proceso de entrenamiento de forma sistemática, asegurando progresión y reduciendo el riesgo de estancamiento o sobrecarga excesiva.

17. Entrenamiento de fuerza según población

El entrenamiento de fuerza produce beneficios en cualquier edad y condición, pero la magnitud y el tipo de adaptación dependen de las características biológicas del sujeto. Por ello, la planificación debe ajustarse a la maduración neuromuscular, la capacidad de recuperación y los objetivos funcionales de cada población.

17.1 Niños y adolescentes

Antes de la pubertad, el aumento de fuerza se debe principalmente a adaptaciones neurales, ya que los niveles hormonales anabólicos son bajos y la hipertrofia es limitada. El entrenamiento mejora la coordinación intermuscular, el reclutamiento de unidades motoras y el control técnico del movimiento.

Por este motivo, el objetivo principal debe ser educativo y no estructural. Se priorizan:

- aprendizaje técnico
- control postural
- variedad de movimientos

Las cargas pueden progresar gradualmente siempre que se mantenga la correcta ejecución. El entrenamiento supervisado es seguro y favorece el desarrollo motor general.

17.2 Adultos mayores

Con la edad disminuyen la masa muscular y la capacidad de activación neural, fenómeno conocido como sarcopenia. El entrenamiento de fuerza es la intervención más eficaz para preservar la funcionalidad, mejorar la estabilidad y reducir el riesgo de caídas.

Las adaptaciones incluyen:

- aumento de fuerza relativa
- mejora del equilibrio
- mayor autonomía funcional

Se utilizan intensidades moderadas con progresión gradual, prestando especial atención a la técnica y al control del movimiento.

17.3 Mujer

Las diferencias hormonales implican menor masa muscular absoluta, pero la capacidad de mejora relativa es similar a la del hombre. Las adaptaciones neurales y estructurales responden de forma comparable cuando el estímulo es equivalente.

Generalmente presentan:

- mayor tolerancia al volumen
- recuperación más rápida entre series
- menor fatiga neuromuscular inmediata

Por ello, la programación puede incluir frecuencias algo mayores y mayor número de repeticiones manteniendo la calidad del esfuerzo.

En conjunto, el entrenamiento de fuerza debe adaptarse a las características del sujeto, pero sus principios fisiológicos son universales. La individualización permite maximizar los beneficios y garantizar la seguridad en cualquier población.

18. Transferencia al rendimiento deportivo

El objetivo final del entrenamiento de fuerza no es únicamente aumentar la capacidad de generar tensión, sino mejorar el rendimiento en tareas específicas. La fuerza actúa como una capacidad base sobre la que se apoyan la velocidad, la potencia, la resistencia y la eficiencia del movimiento. Su utilidad depende de cómo se integre en el gesto deportivo.

18.1 Relación fuerza–velocidad

Un aumento de la fuerza máxima eleva el potencial de producción de potencia. Cuando el deportista es capaz de generar mayor tensión, necesita aplicar un menor porcentaje de su capacidad en cada acción, lo que permite ejecutar movimientos a mayor velocidad.

Esto resulta especialmente relevante en:

- aceleraciones
- saltos
- cambios de dirección
- lanzamientos

El entrenamiento de fuerza desplaza la curva fuerza-velocidad hacia valores superiores, mejorando la capacidad de aplicar fuerza en tiempos cortos.

18.2 Mejora de la economía de movimiento

Al aumentar la fuerza relativa, cada gesto requiere una menor activación neuromuscular. Esto reduce el coste energético de la tarea y retrasa la aparición de fatiga.

En deportes de resistencia, el entrenamiento de fuerza:

- disminuye el consumo de energía para una misma intensidad
- mejora la estabilidad mecánica
- optimiza la coordinación muscular

El resultado es una mayor eficiencia durante esfuerzos prolongados.

18.3 Prevención de lesiones

El fortalecimiento muscular y tendinoso mejora la capacidad de absorber y redistribuir fuerzas mecánicas. Un sistema musculoesquelético más resistente protege articulaciones y tejidos blandos frente a cargas repetidas o impactos.

El entrenamiento adecuado contribuye a:

- estabilizar articulaciones
- mejorar el control neuromuscular
- reducir desequilibrios musculares

18.4 Transferencia específica

La mejora del rendimiento depende de la similitud entre el entrenamiento y el gesto deportivo. La velocidad de ejecución, el tipo de contracción y el patrón de movimiento deben aproximarse progresivamente a la actividad objetivo.

La fuerza máxima proporciona la base, mientras que el trabajo específico transforma esa capacidad en rendimiento deportivo útil.

En conjunto, la fuerza es un medio para mejorar la función y la eficiencia del movimiento. Su entrenamiento adquiere sentido cuando se integra dentro de las demandas reales de la actividad física o deportiva.

Bibliografía

Adams GR, Bamman MM. Characterization and regulation of mechanical loading-induced compensatory muscle hypertrophy. *Compr Physiol*. 2012;2:2829-2870.

Damas F, Libardi CA, Ugrinowitsch C. The development of skeletal muscle hypertrophy through resistance training: the role of muscle damage and muscle protein synthesis. *Eur J Appl Physiol*. 2018;118:485-500.

Fox SI. Fisiología Humana. 15ª ed. McGraw-Hill Interamericana; 2021.

Grgic J, Schoenfeld BJ, Davies TB, Lazinica B, Krieger JW, Pedisic Z. Effect of resistance training frequency on gains in muscular strength: a systematic review and meta-analysis. *Sports Med*. 2018;48(5):1207-1220.

Katch VL, MacArdle WD, Katch FI. *Fisiología Del Ejercicio : "Fundamentos"*. 4ª ed. Editorial Médica Panamericana; 2014.

López Chicharro J, Fernández Vaquero A. *Fisiología Del Ejercicio*. 4a ed. Editorial Médica Panamericana; 2023.

Pareja-Blanco F, Alcázar J, Sánchez-Valdepeñas J, et al. Velocity loss as a critical variable determining the adaptations to strength training. *Med Sci Sports Exerc*. 2020;52(8):1752-1762.

Schoenfeld BJ, Wilson JM, Lowery RP, Krieger JW. Muscular adaptations in low- versus high-load resistance training: a meta-analysis. *Eur J Sport Sci*. 2016;16(1):1-10.

Silverthorn DU. *Fisiología Humana Un Enfoque Integrado*. Ed. 8. Editorial Médica Panamericana; 2019

Wilmore JH, Kenney WL, Costill DL. *Fisiología del Deporte y el Ejercicio*. 5th ed. Editorial Médica Panamericana; 2014.

BLOQUE II.

REGULACIÓN DEL METABOLISMO Y LA FATIGA

ÍNDICE DE BLOQUE II

Tema 6. Metabolismo energético durante el ejercicio

Tema 7. Control hormonal durante el ejercicio

Tema 8. Fatiga durante el ejercicio

Tema 6. Metabolismo energético durante el ejercicio

1. Introducción al metabolismo energético en el ejercicio

El movimiento humano y, en particular, el ejercicio físico requieren un aporte continuo de energía. Esta energía es necesaria para que el músculo esquelético pueda contraerse, mantener la tensión, relajarse y repetir el ciclo de contracción durante la actividad física. El estudio del metabolismo energético permite comprender cómo el organismo obtiene, transforma y utiliza la energía para sostener el esfuerzo físico en función de su intensidad, duración y características.

Desde el punto de vista fisiológico, el metabolismo energético hace referencia al conjunto de procesos bioquímicos mediante los cuales las células obtienen energía a partir de los nutrientes. En el contexto del ejercicio, estos procesos adquieren una importancia central, ya que deben adaptarse de forma rápida y precisa a las demandas impuestas por la actividad muscular.

1.1. Concepto de bioenergética y metabolismo energético

La bioenergética es la rama de la fisiología que estudia las transformaciones de energía en los sistemas biológicos. En los seres humanos, la energía química contenida en los hidratos de carbono, los lípidos y, en menor medida, las proteínas, se transforma en energía utilizable por la célula mediante una serie de reacciones metabólicas altamente reguladas.

El metabolismo energético incluye tanto los procesos catabólicos, responsables de la degradación de los sustratos energéticos y de la liberación de energía, como los procesos anabólicos, implicados en la síntesis y el mantenimiento de las estructuras celulares. Durante el ejercicio físico predominan claramente los procesos catabólicos, ya que el objetivo principal es la obtención rápida y eficiente de energía para la contracción muscular.

1.2. Importancia del metabolismo energético en la contracción muscular

La contracción muscular es un proceso activo que requiere energía de forma constante. Cada ciclo de interacción entre los filamentos de actina y miosina depende directamente de la disponibilidad de energía química. Sin un suministro adecuado de energía, el músculo no puede mantener la contracción ni responder a las demandas del ejercicio.

Durante la actividad física, el consumo energético del músculo esquelético aumenta de manera muy significativa en comparación con las condiciones de reposo. Este aumento obliga a una activación coordinada de los distintos sistemas metabólicos, que deben garantizar el aporte energético necesario sin comprometer el equilibrio interno del organismo.

La capacidad para sostener el ejercicio, retrasar la aparición de la fatiga y mantener el rendimiento está estrechamente relacionada con la eficiencia de estos mecanismos metabólicos.

1.3. El ATP como moneda energética celular

El adenosín trifosfato (ATP) constituye la forma inmediata de energía utilizable por la célula muscular. La energía necesaria para la contracción se libera cuando el ATP se hidroliza, dando lugar a adenosín difosfato (ADP) y fosfato inorgánico. Esta reacción proporciona la energía directa que permite el desplazamiento de los puentes cruzados y el desarrollo de tensión muscular.

A pesar de su papel fundamental, las reservas de ATP en el músculo son muy limitadas y solo permiten sostener la contracción durante unos pocos segundos. Por este motivo, el organismo dispone de diversos mecanismos metabólicos destinados a resintetizar ATP de forma continua durante el ejercicio.

El mantenimiento de los niveles de ATP es una prioridad fisiológica, ya que una disminución significativa de su concentración comprometería de forma inmediata la capacidad contráctil del músculo.

1.4. Visión integrada del metabolismo energético durante el ejercicio físico

El metabolismo energético durante el ejercicio no depende de una única vía metabólica, sino de la interacción coordinada de varios sistemas de aporte energético. Estos sistemas actúan de manera simultánea, aunque su contribución relativa varía en función de la intensidad, la duración del ejercicio y el nivel de entrenamiento del individuo.

Desde el inicio del ejercicio, el organismo ajusta rápidamente su metabolismo para satisfacer la demanda energética, activando mecanismos de regulación neural, hormonal y local. Esta respuesta integrada permite una transición eficaz desde el reposo hasta el esfuerzo y explica la capacidad del cuerpo humano para adaptarse a una amplia variedad de situaciones físicas.

El estudio del metabolismo energético y de su regulación durante el ejercicio constituye una base esencial para comprender el rendimiento deportivo, la fatiga, la adaptación al entrenamiento y los efectos del ejercicio sobre la salud.

2. Sistemas de aporte energético

Para mantener la contracción muscular durante el ejercicio físico, el organismo necesita resintetizar ATP de forma continua. Dado que las reservas de ATP son muy limitadas, existen distintos sistemas metabólicos capaces de producir energía a diferentes velocidades y con distintas capacidades totales. Estos sistemas no actúan de manera aislada, sino que funcionan de forma integrada, solapándose desde el inicio del ejercicio. Desde un punto de vista funcional, se distinguen tres grandes sistemas de aporte energético: el sistema de los fosfágenos, el sistema glucolítico y el sistema oxidativo.

2.1. Sistema de los fosfágenos (ATP–fosfocreatina)

El sistema de los fosfágenos constituye el mecanismo más rápido de resíntesis de ATP. Se basa en la utilización de las reservas intramusculares de ATP y fosfocreatina (PCr), que permiten aportar energía de forma inmediata al inicio del ejercicio.

La fosfocreatina actúa como un tampón energético, cediendo su grupo fosfato al ADP para regenerar ATP mediante una reacción catalizada por la creatina quinasa. Este proceso no requiere oxígeno y no produce lactato, lo que permite una resíntesis muy rápida de ATP.

Sin embargo, la capacidad de este sistema es limitada, ya que las reservas de fosfocreatina se agotan en pocos segundos. Por este motivo, el sistema de los fosfágenos es fundamental en esfuerzos de muy corta duración y alta intensidad, como los sprints o los movimientos explosivos, pero no puede sostener el ejercicio prolongado.

2.2. Glucólisis anaerobia y sistema láctico

Cuando la demanda energética supera la capacidad del sistema de los fosfágenos, el organismo recurre a la glucólisis anaerobia como fuente principal de ATP. Este sistema utiliza la glucosa o el glucógeno muscular para producir energía de forma relativamente rápida, sin necesidad de oxígeno.

Durante la glucólisis, la glucosa se degrada hasta piruvato, generando ATP. En condiciones de alta intensidad, cuando la capacidad oxidativa está limitada, el piruvato se transforma en lactato. Este proceso permite mantener el flujo glucolítico, aunque se asocia a cambios en el equilibrio ácido-base del músculo.

El sistema glucolítico presenta una velocidad de producción de ATP inferior a la del sistema de los fosfágenos, pero una capacidad mayor. Es especialmente relevante en ejercicios de alta intensidad y duración intermedia, como pruebas de 30 segundos a varios minutos.

2.3. Metabolismo aeróbico u oxidativo

El metabolismo oxidativo constituye el sistema de mayor capacidad para la producción de ATP. Utiliza oxígeno para oxidar hidratos de carbono, lípidos y, en menor medida, proteínas, generando grandes cantidades de energía.

Este sistema se desarrolla en las mitocondrias y presenta una velocidad de producción de ATP más lenta que los sistemas anaerobios, pero una capacidad prácticamente ilimitada mientras exista aporte de oxígeno y sustratos energéticos. Por este motivo, es el sistema predominante en ejercicios de baja y moderada intensidad y larga duración.

Durante el ejercicio aeróbico, el piruvato procedente de la glucólisis entra en las mitocondrias y se oxida completamente, lo que permite una elevada eficiencia energética y una menor acumulación de metabolitos asociados a la fatiga.

2.4. Características funcionales de los sistemas energéticos

Cada sistema energético presenta características específicas en términos de velocidad de producción de ATP, capacidad total y duración de su contribución. El sistema de los fosfágenos es el más rápido, pero el de menor capacidad. El sistema glucolítico ocupa una posición intermedia tanto en velocidad como en capacidad. El sistema oxidativo es el más lento, pero el de mayor capacidad energética.

Estas diferencias explican por qué ningún sistema energético es suficiente por sí solo para cubrir todas las demandas del ejercicio físico y por qué el organismo necesita la activación simultánea de varios mecanismos de producción de energía.

2.5. Participación relativa de los sistemas energéticos durante el ejercicio

La contribución de cada sistema energético depende principalmente de la intensidad y la duración del ejercicio. En los primeros segundos de cualquier actividad física predomina el sistema de los fosfágenos, independientemente del tipo de ejercicio. A medida que el esfuerzo se prolonga, aumenta la participación del sistema glucolítico y, posteriormente, del metabolismo oxidativo.

Este solapamiento funcional permite una transición progresiva entre sistemas y garantiza un suministro energético continuo. La adaptación al entrenamiento modifica la contribución relativa de cada sistema, mejorando la eficiencia metabólica y la capacidad para sostener el esfuerzo físico.

La comprensión de estos sistemas y de su interacción es esencial para interpretar la respuesta metabólica al ejercicio y para aplicar criterios fisiológicos al entrenamiento y al rendimiento deportivo.

3. Metabolismo de los hidratos de carbono durante el ejercicio

Los hidratos de carbono constituyen uno de los principales sustratos energéticos utilizados durante el ejercicio físico, especialmente cuando la intensidad es moderada o elevada. Su importancia radica en su capacidad para proporcionar energía de forma rápida y eficiente, tanto en condiciones aeróbicas como anaeróbicas. El metabolismo de los hidratos de carbono desempeña, por tanto, un papel clave en el mantenimiento del rendimiento y en la aparición de la fatiga durante el ejercicio.

3.1. Glucosa y glucógeno como sustratos energéticos

La glucosa puede ser utilizada directamente por el músculo esquelético para la producción de ATP, aunque durante el ejercicio la principal fuente de hidratos de carbono es el glucógeno muscular. El glucógeno es un polisacárido de reserva que se almacena en el músculo y en el hígado y que puede degradarse rápidamente cuando aumenta la demanda energética.

El glucógeno muscular se utiliza de forma preferente para satisfacer las necesidades energéticas del propio músculo que se está contrayendo, mientras que el glucógeno hepático contribuye a mantener los niveles de glucosa en sangre, especialmente durante el ejercicio prolongado. La disponibilidad de glucógeno es un factor determinante del rendimiento, ya que su depleción se asocia a una reducción significativa de la capacidad para mantener la intensidad del esfuerzo.

3.2. Glucogenólisis muscular y hepática

La glucogenólisis es el proceso mediante el cual el glucógeno se degrada para liberar glucosa-6-fosfato, que puede entrar directamente en la glucólisis. En el músculo esquelético, este proceso se activa rápidamente al inicio del ejercicio como respuesta al aumento de la demanda energética.

La glucogenólisis muscular está regulada por mecanismos locales, como el aumento de calcio intracelular y la acumulación de ADP y AMP, así como por factores hormonales. En el hígado, la glucogenólisis tiene como objetivo principal mantener la glucemia, liberando glucosa al torrente sanguíneo para abastecer a los tejidos activos.

Durante el ejercicio de alta intensidad, la tasa de glucogenólisis muscular aumenta de forma marcada, lo que permite una rápida producción de energía, aunque a costa de una utilización acelerada de las reservas de glucógeno.

3.3. Glucólisis: regulación y rendimiento energético

La glucólisis es la vía metabólica mediante la cual la glucosa o la glucosa procedente del glucógeno se degrada hasta piruvato, generando ATP. Esta vía puede funcionar tanto en condiciones aeróbicas como anaeróbicas, lo que la convierte en un mecanismo central del metabolismo energético durante el ejercicio.

La velocidad de la glucólisis está estrechamente regulada por la actividad de enzimas clave y por la disponibilidad de sustratos. Durante el ejercicio intenso, la activación de la glucólisis permite una producción rápida de ATP, esencial para sostener esfuerzos de elevada intensidad.

El rendimiento energético de la glucólisis es inferior al del metabolismo oxidativo, pero su rapidez la hace indispensable en situaciones en las que la demanda energética es elevada y el aporte de oxígeno es insuficiente para cubrirla completamente.

3.4. Destino del piruvato: metabolismo aeróbico y anaeróbico

El piruvato generado en la glucólisis puede seguir diferentes destinos en función de la intensidad del ejercicio y de la capacidad oxidativa del músculo. En condiciones aeróbicas, el piruvato entra en las mitocondrias y se oxida completamente, contribuyendo a la producción de ATP a través del metabolismo oxidativo.

En situaciones de ejercicio de alta intensidad, cuando la tasa de producción de piruvato supera la capacidad de oxidación mitocondrial, el piruvato se convierte en lactato. Este proceso permite mantener el flujo glucolítico y la producción de ATP, aunque se asocia a cambios metabólicos que pueden influir en la aparición de la fatiga.

La conversión de piruvato en lactato no debe interpretarse únicamente como un proceso negativo, sino como un mecanismo adaptativo que permite sostener el ejercicio intenso.

3.5. Producción y papel del lactato durante el ejercicio

El lactato es un producto normal del metabolismo de los hidratos de carbono durante el ejercicio, especialmente en esfuerzos de alta intensidad. Su producción refleja la elevada tasa de glucólisis y la necesidad de mantener la resíntesis de ATP cuando la capacidad oxidativa es limitada.

Lejos de ser un simple producto de desecho, el lactato puede ser reutilizado como sustrato energético por otros tejidos, como el músculo oxidativo o el corazón, y puede participar en procesos de regulación metabólica. La acumulación de lactato en sangre se utiliza como un indicador indirecto de la intensidad del ejercicio y del equilibrio entre producción y eliminación.

La comprensión del metabolismo de los hidratos de carbono y del papel del lactato resulta fundamental para interpretar la respuesta metabólica al ejercicio, la aparición de la fatiga y la adaptación al entrenamiento.

4. Metabolismo de los lípidos durante el ejercicio

Los lípidos constituyen una fuente energética esencial durante el ejercicio físico, especialmente en actividades de intensidad baja y moderada y de larga duración. Su elevada densidad energética y sus amplias reservas corporales hacen que el metabolismo lipídico desempeñe un papel clave en el mantenimiento del esfuerzo prolongado y en la preservación de los depósitos de hidratos de carbono.

4.1. Ácidos grasos como sustrato energético

Los ácidos grasos representan el principal componente energético de los lípidos utilizados durante el ejercicio. Pueden proceder de los triglicéridos almacenados en el tejido adiposo o de los triglicéridos intramusculares presentes en las fibras musculares, especialmente en las de tipo oxidativo.

Durante el ejercicio, los ácidos grasos son liberados y transportados hasta el músculo esquelético, donde pueden ser utilizados como sustrato energético mediante procesos metabólicos dependientes del oxígeno. Su utilización resulta más lenta que la de los hidratos de carbono, pero permite una producción sostenida de ATP durante largos periodos.

4.2. Lipólisis y movilización de grasas

La lipólisis es el proceso mediante el cual los triglicéridos se descomponen en ácidos grasos y glicerol. Este proceso se activa durante el ejercicio como consecuencia de cambios hormonales y de la disminución de la acción de la insulina.

Las catecolaminas desempeñan un papel fundamental en la estimulación de la lipólisis, favoreciendo la movilización de ácidos grasos desde el tejido adiposo hacia la circulación. La

intensidad del ejercicio y la duración del esfuerzo influyen de forma significativa en la tasa de lipólisis y en la disponibilidad de ácidos grasos.

Durante el ejercicio prolongado, el aumento de la movilización de grasas contribuye a preservar las reservas de glucógeno, retrasando la aparición de la fatiga asociada a su depleción.

4.3. Transporte y utilización de ácidos grasos en el músculo

Una vez liberados, los ácidos grasos deben ser transportados a través de la sangre hasta el músculo esquelético y posteriormente introducidos en las fibras musculares. Este proceso depende del flujo sanguíneo, de la capilarización del músculo y de mecanismos específicos de transporte a nivel celular.

En el interior de la fibra muscular, los ácidos grasos son dirigidos hacia las mitocondrias, donde se produce su oxidación. La capacidad del músculo para utilizar ácidos grasos está estrechamente relacionada con la densidad mitocondrial y con el nivel de entrenamiento del individuo.

4.4. Beta-oxidación y metabolismo aeróbico

La beta-oxidación es el proceso metabólico mediante el cual los ácidos grasos se degradan en las mitocondrias para producir acetil-CoA, que entra posteriormente en el metabolismo oxidativo. Este proceso requiere oxígeno y genera grandes cantidades de ATP, lo que lo convierte en una fuente energética muy eficiente para el ejercicio prolongado.

Sin embargo, la velocidad de la beta-oxidación es menor que la de la glucólisis, lo que limita su contribución durante ejercicios de alta intensidad. Por este motivo, el metabolismo de los lípidos predomina cuando la demanda energética es moderada y sostenida.

4.5. Factores que determinan el uso de grasas durante el ejercicio

La utilización de lípidos como sustrato energético depende de múltiples factores, entre los que destacan la intensidad y duración del ejercicio, el estado nutricional, el nivel de entrenamiento y la disponibilidad de oxígeno. A medida que aumenta la intensidad del ejercicio, disminuye la contribución relativa de los lípidos y aumenta la utilización de hidratos de carbono.

El entrenamiento de resistencia mejora la capacidad del músculo para oxidar ácidos grasos, aumentando la eficiencia metabólica y retrasando la fatiga. Estas adaptaciones explican la mayor utilización de grasas observada en individuos entrenados durante esfuerzos prolongados.

5. Metabolismo de las proteínas y ejercicio físico

Las proteínas no constituyen un sustrato energético principal durante el ejercicio físico, pero pueden contribuir de forma complementaria a la producción de energía en determinadas situaciones. Su participación en el metabolismo energético depende del tipo de ejercicio, de su duración y del estado nutricional del individuo.

Desde el punto de vista funcional, el papel más relevante de las proteínas durante el ejercicio está relacionado con el mantenimiento y la adaptación del tejido muscular, aunque en condiciones específicas pueden ser utilizadas como fuente energética.

5.1. Papel energético de las proteínas

En condiciones normales, la contribución de las proteínas a la producción de energía durante el ejercicio es reducida. Sin embargo, en ejercicios de larga duración, en situaciones de depleción de glucógeno o cuando la ingesta energética es insuficiente, aumenta la oxidación de aminoácidos.

Los aminoácidos pueden ser utilizados como sustrato energético tras la eliminación de su grupo amino, incorporándose sus esqueletos carbonados a las vías metabólicas centrales. Este proceso permite obtener energía, pero supone una pérdida de proteínas estructurales y funcionales, por lo que no es un mecanismo deseable desde el punto de vista fisiológico.

5.2. Aminoácidos ramificados y ejercicio

Los aminoácidos ramificados, especialmente la leucina, la isoleucina y la valina, tienen una particular relevancia en el contexto del ejercicio físico. A diferencia de otros aminoácidos, pueden ser metabolizados directamente en el músculo esquelético.

Durante el ejercicio prolongado, estos aminoácidos pueden contribuir de forma limitada a la producción de energía y participar en procesos de regulación metabólica. No obstante, su papel más importante está relacionado con la señalización metabólica y la regulación de la síntesis proteica.

5.3. Situaciones de aumento del catabolismo proteico

El catabolismo proteico puede aumentar durante el ejercicio en determinadas circunstancias, como esfuerzos prolongados de alta intensidad, estados de ayuno, dietas hipocalóricas o situaciones de desentrenamiento. En estos casos, el organismo recurre en mayor medida a los aminoácidos como fuente energética complementaria.

Este aumento del catabolismo proteico puede comprometer la masa muscular y el rendimiento si se mantiene en el tiempo, lo que pone de manifiesto la importancia de una adecuada planificación del entrenamiento y de la nutrición.

5.4. Importancia funcional en el ejercicio prolongado

En ejercicios de muy larga duración, la utilización de proteínas como sustrato energético puede contribuir de manera modesta al mantenimiento del esfuerzo, especialmente cuando las reservas de hidratos de carbono se reducen. Sin embargo, su participación sigue siendo secundaria en comparación con la de los hidratos de carbono y los lípidos.

Desde el punto de vista de la fisiología del ejercicio, el metabolismo proteico debe entenderse principalmente como un indicador del estado energético y de la adaptación del organismo, más que como una fuente energética prioritaria.

6. Regulación del metabolismo energético durante el ejercicio

El metabolismo energético durante el ejercicio físico no depende únicamente de la disponibilidad de sustratos, sino de un complejo sistema de regulación que permite ajustar de forma rápida y precisa la producción de energía a las demandas del músculo activo. Esta regulación se basa en la integración de mecanismos locales, neurales y hormonales que actúan de manera coordinada desde el inicio del ejercicio.

La activación metabólica durante el ejercicio es un proceso dinámico que permite aumentar la producción de ATP sin comprometer el equilibrio interno del organismo.

6.1. Regulación enzimática del metabolismo energético

Las reacciones metabólicas que conducen a la producción de ATP están catalizadas por enzimas cuya actividad puede modificarse rápidamente. Durante el ejercicio, el aumento del consumo de ATP provoca cambios en la concentración de metabolitos como ADP, AMP y fosfato inorgánico, que actúan como potentes señales reguladoras.

Estos cambios estimulan la actividad de enzimas clave de las vías metabólicas, acelerando procesos como la glucólisis, la glucogenólisis y el metabolismo oxidativo. De este modo, la regulación enzimática permite un ajuste inmediato de la producción de energía a las necesidades del músculo sin necesidad de cambios estructurales.

6.2. Papel del calcio en la activación metabólica

El calcio desempeña un papel central en la regulación del metabolismo energético durante el ejercicio. El aumento de la concentración de calcio intracelular, asociado a la contracción muscular, no solo activa el sistema contráctil, sino que también estimula enzimas implicadas en la producción de energía.

Este mecanismo permite acoplar de forma directa la contracción muscular con la activación metabólica, garantizando que el aumento de la demanda mecánica vaya acompañado de un incremento paralelo en la producción de ATP. El calcio actúa, por tanto, como un nexo funcional entre contracción y metabolismo.

6.3. Regulación hormonal del metabolismo durante el ejercicio

El ejercicio físico induce importantes cambios hormonales que contribuyen a la regulación del metabolismo energético. Entre las hormonas más relevantes se encuentran la insulina, el glucagón y las catecolaminas.

Durante el ejercicio, la secreción de insulina disminuye, mientras que aumenta la liberación de glucagón y catecolaminas. Estos cambios hormonales favorecen la movilización de sustratos energéticos, estimulando la glucogenólisis, la lipólisis y la liberación de glucosa a la sangre.

La regulación hormonal permite coordinar la respuesta metabólica de distintos tejidos, asegurando el aporte de energía al músculo activo y el mantenimiento de la glucemia.

6.4. Integración nerviosa y endocrina del metabolismo

El sistema nervioso desempeña un papel fundamental en la regulación del metabolismo durante el ejercicio, tanto de forma directa como indirecta. La activación del sistema nervioso simpático contribuye a la movilización de sustratos energéticos y a la redistribución del flujo sanguíneo hacia los músculos activos.

La acción conjunta del sistema nervioso y del sistema endocrino permite una respuesta rápida y coordinada del metabolismo, adaptada a la intensidad y duración del ejercicio. Esta integración es esencial para garantizar la eficiencia metabólica y el mantenimiento del rendimiento.

6.5. Adaptación metabólica inmediata al inicio del ejercicio

Desde los primeros segundos del ejercicio se produce una activación rápida de los mecanismos metabólicos, incluso antes de que se produzcan cambios significativos en el medio interno. Esta respuesta anticipatoria permite cubrir el aumento inmediato de la demanda energética y reducir el desfase entre consumo y producción de ATP.

A medida que el ejercicio progresa, la regulación metabólica se ajusta de forma continua en función de la intensidad del esfuerzo, del tipo de sustrato disponible y del estado de entrenamiento del individuo.

7. Intensidad, duración del ejercicio y utilización de sustratos

La utilización de los distintos sustratos energéticos durante el ejercicio físico no es fija, sino que varía en función de la intensidad y la duración del esfuerzo. El organismo ajusta de forma continua

el metabolismo para satisfacer la demanda energética del músculo activo, priorizando aquellos sustratos que permiten una producción de ATP adecuada a cada situación.

Comprender esta relación es fundamental para interpretar la respuesta metabólica al ejercicio, la aparición de la fatiga y las adaptaciones inducidas por el entrenamiento.

7.1. Relación entre intensidad del ejercicio y tipo de sustrato energético

La intensidad del ejercicio es uno de los principales factores que determinan el tipo de sustrato energético utilizado. A intensidades bajas, el metabolismo oxidativo predomina y la mayor parte de la energía procede de la oxidación de lípidos. En estas condiciones, el aporte de oxígeno es suficiente y la producción de ATP se realiza de forma eficiente y sostenida.

A medida que la intensidad del ejercicio aumenta, se incrementa progresivamente la utilización de hidratos de carbono. Esto se debe a que los hidratos de carbono permiten una producción de ATP más rápida que los lípidos, lo que resulta esencial para cubrir las mayores demandas energéticas del músculo durante esfuerzos intensos.

En ejercicios de alta intensidad, el metabolismo de los hidratos de carbono se convierte en la fuente energética predominante, con una participación significativa de la glucólisis anaerobia.

7.2. Efecto de la duración del ejercicio sobre el metabolismo energético

La duración del ejercicio también influye de manera decisiva en la utilización de sustratos. En ejercicios de corta duración, independientemente de la intensidad, la contribución relativa de los hidratos de carbono suele ser elevada, debido a la necesidad de una producción rápida de energía.

En ejercicios prolongados, especialmente a intensidades moderadas, se produce un aumento progresivo de la utilización de lípidos como sustrato energético. Este cambio contribuye a preservar las reservas de glucógeno y permite sostener el esfuerzo durante largos periodos.

Cuando el ejercicio se prolonga en el tiempo y las reservas de glucógeno disminuyen de forma significativa, el rendimiento puede verse comprometido, lo que pone de manifiesto la importancia de la duración como factor determinante del metabolismo energético.

7.3. Concepto de “crossover” metabólico

El concepto de *crossover* metabólico describe el punto a partir del cual, al aumentar la intensidad del ejercicio, los hidratos de carbono pasan a ser el principal sustrato energético en detrimento de los lípidos. Este fenómeno refleja un cambio en la contribución relativa de los sustratos en función de la intensidad del esfuerzo.

El punto de *crossover* no es fijo, sino que depende del nivel de entrenamiento del individuo. En sujetos entrenados, este punto se desplaza hacia intensidades más altas, lo que indica una mayor capacidad para utilizar lípidos incluso a intensidades relativamente elevadas.

Este concepto resulta especialmente útil para comprender las adaptaciones metabólicas al entrenamiento de resistencia y su impacto sobre la eficiencia energética.

7.4. Consumo de oxígeno y cinética del VO_2

El consumo de oxígeno (VO_2) es un indicador fundamental del metabolismo aeróbico durante el ejercicio. Al inicio del ejercicio, el VO_2 no aumenta de forma instantánea hasta el nivel requerido por la intensidad del esfuerzo, sino que presenta una cinética progresiva.

Durante este periodo de ajuste, la producción de energía depende en mayor medida de los sistemas anaerobios, lo que explica la mayor contribución inicial del sistema de los fosfágenos y de la

glucólisis. A medida que el VO_2 alcanza un estado estable, el metabolismo oxidativo se convierte en la principal fuente de ATP.

La velocidad de ajuste del VO_2 está influida por la intensidad del ejercicio y por el nivel de entrenamiento, siendo más rápida en individuos entrenados.

7.5. Déficit y deuda de oxígeno

El déficit de oxígeno hace referencia a la diferencia entre el oxígeno requerido para un ejercicio y el realmente consumido durante los primeros instantes del esfuerzo. Este déficit se compensa mediante la activación de los sistemas anaerobios.

Tras finalizar el ejercicio, el consumo de oxígeno permanece elevado durante un periodo de tiempo, fenómeno conocido como deuda de oxígeno o consumo de oxígeno postejercicio. Este aumento del VO_2 está relacionado con la restauración de las reservas energéticas, la eliminación de metabolitos y la recuperación del equilibrio fisiológico.

La magnitud del déficit y de la deuda de oxígeno depende de la intensidad y duración del ejercicio, así como del estado de entrenamiento del individuo.

8. Producción de lactato, umbral y fatiga metabólica

La producción de lactato durante el ejercicio físico es un fenómeno fisiológico normal estrechamente relacionado con la intensidad del esfuerzo y con la activación del metabolismo de los hidratos de carbono. La comprensión del papel del lactato y de los distintos umbrales metabólicos resulta fundamental para interpretar la respuesta al ejercicio, la aparición de la fatiga y el rendimiento deportivo.

8.1. Producción de lactato durante el ejercicio

El lactato se produce a partir del piruvato como consecuencia de la elevada tasa de glucólisis que se alcanza durante el ejercicio, especialmente a intensidades moderadas y altas. Cuando la producción de piruvato supera la capacidad de oxidación mitocondrial, este se convierte en lactato, permitiendo que la glucólisis continúe y se mantenga la resíntesis de ATP.

La producción de lactato no implica necesariamente una falta de oxígeno, sino un desajuste entre la velocidad de producción de piruvato y la capacidad oxidativa del músculo. Por este motivo, el lactato puede producirse incluso en condiciones aeróbicas, siempre que la intensidad del ejercicio sea suficientemente elevada.

La concentración de lactato en sangre refleja el equilibrio entre su producción y su eliminación, y aumenta progresivamente a medida que se incrementa la intensidad del ejercicio.

8.2. Lactato como metabolito y como sustrato energético

Durante años, el lactato fue considerado un producto de desecho responsable directo de la fatiga muscular. Sin embargo, actualmente se reconoce que el lactato desempeña un papel funcional importante en el metabolismo energético.

El lactato puede ser transportado desde las fibras musculares productoras hacia otras fibras con mayor capacidad oxidativa, así como hacia otros tejidos como el corazón, donde puede ser utilizado como sustrato energético. Este intercambio contribuye a la redistribución de la energía y a la eficiencia metabólica durante el ejercicio.

Además, el lactato participa en procesos de regulación metabólica y puede actuar como señal para la adaptación al entrenamiento.

8.3. Umbral de lactato y umbral anaeróbico

El umbral de lactato se define como la intensidad de ejercicio a partir de la cual la concentración de lactato en sangre comienza a aumentar de forma sistemática por encima de los valores basales. Este punto refleja un cambio en el equilibrio entre producción y eliminación de lactato.

El concepto de umbral anaeróbico se utiliza habitualmente para describir una intensidad similar, asociada a un aumento marcado de la contribución de la glucólisis y a cambios metabólicos significativos. Aunque ambos términos no son estrictamente idénticos, en el contexto del ejercicio se emplean con frecuencia de forma equivalente.

La localización del umbral es un indicador importante de la capacidad aeróbica y del rendimiento, ya que determina la intensidad máxima que puede mantenerse durante un tiempo prolongado sin una acumulación excesiva de lactato.

8.4. Relación entre lactato, pH y fatiga metabólica

El aumento de la concentración de lactato durante el ejercicio se asocia a cambios en el equilibrio ácido-base del músculo. La producción de protones vinculada al metabolismo de alta intensidad puede contribuir a la disminución del pH intramuscular.

La acidosis metabólica puede afectar al funcionamiento del sistema contráctil y a la actividad enzimática, contribuyendo a la aparición de la fatiga. No obstante, la fatiga metabólica es un fenómeno multifactorial en el que intervienen también la disponibilidad de sustratos, la acumulación de metabolitos y la alteración del control neural.

Por tanto, el lactato no debe considerarse el causante único de la fatiga, sino un marcador de la intensidad del esfuerzo y de los cambios metabólicos asociados.

8.5. Interpretación fisiológica de las curvas de lactato

Las curvas de lactato obtenidas durante pruebas de esfuerzo permiten analizar la respuesta metabólica al ejercicio y estimar los distintos umbrales. La forma de estas curvas proporciona información sobre la capacidad oxidativa del músculo, la eficiencia metabólica y el nivel de entrenamiento del individuo.

El entrenamiento de resistencia desplaza la curva de lactato hacia intensidades más altas, lo que refleja una menor producción relativa de lactato a una misma intensidad absoluta y una mayor capacidad para eliminarlo y reutilizarlo.

La interpretación adecuada de las curvas de lactato resulta fundamental en el ámbito de la actividad física y el deporte, tanto para la evaluación del rendimiento como para la planificación del entrenamiento.

9. Regulación metabólica durante distintos tipos de ejercicio

La respuesta metabólica al ejercicio físico depende en gran medida de las características del esfuerzo realizado. Variables como la intensidad, la duración, el tipo de contracción muscular y la forma de organización del ejercicio determinan qué sistemas energéticos predominan y cómo se regulan los distintos sustratos metabólicos.

El organismo adapta de manera específica su metabolismo para optimizar la producción de energía en función de las demandas funcionales de cada tipo de ejercicio.

9.1. Ejercicio de baja intensidad y larga duración

En el ejercicio de baja intensidad y larga duración predomina el metabolismo aeróbico. En estas condiciones, el aporte de oxígeno es suficiente para cubrir la demanda energética y la principal fuente de energía procede de la oxidación de lípidos, con una contribución complementaria de los hidratos de carbono.

La regulación metabólica favorece la movilización y utilización de ácidos grasos, preservando las reservas de glucógeno muscular y hepático. Este tipo de ejercicio se caracteriza por una producción moderada de lactato y una estabilidad relativa del medio interno, lo que permite sostener el esfuerzo durante largos periodos.

El entrenamiento de resistencia mejora notablemente la eficiencia metabólica en este tipo de ejercicio, aumentando la capacidad de oxidación de grasas y retrasando la aparición de la fatiga.

9.2. Ejercicio de intensidad moderada

En el ejercicio de intensidad moderada se produce una combinación equilibrada del metabolismo de los hidratos de carbono y de los lípidos. A medida que la intensidad se aproxima al umbral de lactato, aumenta progresivamente la utilización de glucógeno muscular y la tasa de glucólisis.

La regulación metabólica en este rango de intensidades es especialmente sensible a las adaptaciones al entrenamiento, ya que pequeñas mejoras en la capacidad oxidativa permiten sostener intensidades más altas con una menor acumulación de lactato.

Este tipo de ejercicio es característico de muchas actividades deportivas y constituye una zona clave para el desarrollo de la capacidad aeróbica.

9.3. Ejercicio de alta intensidad y corta duración

En el ejercicio de alta intensidad y corta duración predominan los sistemas anaerobios de aporte energético. En los primeros segundos del esfuerzo, el sistema de los fosfágenos aporta la mayor parte del ATP, seguido rápidamente por una activación intensa de la glucólisis anaerobia.

La regulación metabólica en este tipo de ejercicio favorece una producción rápida de energía, aunque a costa de una acumulación elevada de metabolitos asociados a la fatiga. La utilización de lípidos es mínima debido a la limitada velocidad de la beta-oxidación.

Este patrón metabólico es característico de actividades explosivas, sprints y ejercicios de potencia, donde la capacidad de generar energía rápidamente es prioritaria frente a la eficiencia energética.

9.4. Ejercicio intermitente

El ejercicio intermitente se caracteriza por la alternancia de periodos de esfuerzo y recuperación. Esta estructura permite una activación repetida de los sistemas anaerobios durante las fases de alta intensidad, con una contribución relevante del metabolismo aeróbico durante las fases de recuperación.

La regulación metabólica en el ejercicio intermitente es compleja y dinámica, ya que implica transiciones frecuentes entre distintos sistemas energéticos. La capacidad para resintetizar fosfocreatina y eliminar lactato durante las pausas resulta determinante para el rendimiento en este tipo de ejercicio.

Este patrón es típico de muchos deportes colectivos y de actividades con cambios frecuentes de ritmo.

9.5. Ejercicio de fuerza y potencia

En el ejercicio de fuerza y potencia, la demanda energética se concentra en esfuerzos breves y de alta intensidad. El sistema de los fosfágenos desempeña un papel central, proporcionando energía inmediata para la contracción muscular.

Aunque la contribución energética total de los sistemas aeróbicos es limitada durante el esfuerzo en sí, el metabolismo oxidativo resulta importante durante la recuperación entre series, facilitando la resíntesis de ATP y fosfocreatina.

La regulación metabólica en este tipo de ejercicio está estrechamente ligada a la organización del entrenamiento, incluyendo la duración de las series, las pausas y la carga utilizada.

10. Adaptaciones metabólicas al entrenamiento

El entrenamiento físico produce una serie de adaptaciones metabólicas que mejoran la capacidad del organismo para producir energía, utilizar los sustratos de forma más eficiente y tolerar mejor las demandas del ejercicio. Estas adaptaciones dependen del tipo de entrenamiento realizado, de su intensidad y duración, y del estado inicial del individuo.

Desde el punto de vista fisiológico, las adaptaciones metabólicas reflejan una optimización de los mecanismos de producción y regulación de la energía, permitiendo mejorar el rendimiento y retrasar la aparición de la fatiga.

10.1. Adaptaciones al entrenamiento de resistencia

El entrenamiento de resistencia induce profundas adaptaciones metabólicas orientadas a mejorar la capacidad aeróbica del músculo esquelético. Entre los cambios más relevantes se encuentra el aumento de la densidad y del tamaño de las mitocondrias, lo que incrementa la capacidad oxidativa del músculo.

Asimismo, se produce un aumento de la actividad de las enzimas implicadas en el metabolismo aeróbico y una mejora de la capilarización muscular, facilitando el aporte de oxígeno y la eliminación de metabolitos. Estas adaptaciones permiten una mayor utilización de lípidos como sustrato energético y una menor dependencia del glucógeno a intensidades submáximas.

Como consecuencia, el ejercicio puede sostenerse durante más tiempo y a intensidades más elevadas antes de que aparezca una acumulación significativa de lactato.

10.2. Adaptaciones al entrenamiento de alta intensidad

El entrenamiento de alta intensidad provoca adaptaciones metabólicas específicas que mejoran la capacidad para producir energía rápidamente. Este tipo de entrenamiento aumenta la actividad de las enzimas glucolíticas y mejora la capacidad de los sistemas anaerobios para resintetizar ATP.

Además, se observa una mejora en la capacidad de tolerar y manejar la acumulación de metabolitos asociados a la fatiga, como el lactato y los protones. Estas adaptaciones permiten mantener intensidades elevadas durante más tiempo y mejorar el rendimiento en esfuerzos de corta y media duración.

El entrenamiento de alta intensidad también puede inducir adaptaciones aeróbicas relevantes, especialmente cuando se estructura de forma intermitente.

10.3. Adaptaciones al entrenamiento de fuerza

Aunque el entrenamiento de fuerza se asocia principalmente a adaptaciones neuromusculares y estructurales, también produce cambios metabólicos. Se observa una mejora en la capacidad del sistema de los fosfágenos y en la resíntesis de ATP durante esfuerzos breves y repetidos.

Asimismo, el entrenamiento de fuerza puede aumentar la eficiencia metabólica durante la recuperación entre esfuerzos, facilitando la reposición de las reservas energéticas. Estas adaptaciones contribuyen a una mayor tolerancia al entrenamiento y a una mejora del rendimiento en ejercicios de potencia.

10.4. Cambios enzimáticos y regulación metabólica

Las adaptaciones metabólicas al entrenamiento incluyen modificaciones en la cantidad y actividad de enzimas clave de las distintas vías metabólicas. Estos cambios permiten una regulación más eficaz del metabolismo energético, ajustando la producción de ATP a las demandas del ejercicio de forma más rápida y eficiente.

El entrenamiento también mejora la coordinación entre los mecanismos de regulación local, hormonal y neural, optimizando la respuesta metabólica global del organismo durante el ejercicio.

10.5. Integración funcional y repercusión en el rendimiento

Las adaptaciones metabólicas al entrenamiento reflejan una mejora de la eficiencia energética del organismo y una mayor capacidad para sostener el esfuerzo físico. Estas adaptaciones permiten retrasar la aparición de la fatiga, mejorar el rendimiento y ampliar el rango de intensidades que pueden mantenerse de forma estable.

Desde el punto de vista de las Ciencias de la Actividad Física y del Deporte, la comprensión de estas adaptaciones resulta esencial para el diseño de programas de entrenamiento eficaces, la evaluación del rendimiento y la promoción de la salud a través del ejercicio físico.

Bibliografía

Brooks GA, Arevalo JA, Osmond AD, Leija RG, Curl CC, Tovar AP. Lactate in contemporary biology: a phoenix risen. *J Physiol*. 2022;600(5):1229-1251.

Fox SI. Fisiología Humana. 15ª ed. McGraw-Hill Interamericana; 2021.

Hargreaves M, Spriet LL. Skeletal muscle energy metabolism during exercise. *Nat Metab*. 2020;2(9):817-828.

Huertas JR, Casuso RA, Agustín PH, Cogliati S. Stay fit, stay young: mitochondria in movement: the role of exercise in the new mitochondrial paradigm. *Oxid Med Cell Longev*. 2019;2019:7058350.

Katch VL, MacArdle WD, Katch FI. *Fisiología Del Ejercicio : "Fundamentos"*. 4ª ed. Editorial Médica Panamericana; 2014.

López Chicharro J, Fernández Vaquero A. *Fisiología Del Ejercicio*. 4a ed. Editorial Médica Panamericana; 2023.

Silverthorn DU. *Fisiología Humana Un Enfoque Integrado*. Ed. 8. Editorial Médica Panamericana; 2019

Wilmore JH, Kenney WL, Costill DL. *Fisiología del Deporte y el Ejercicio*. 5th ed. Editorial Médica Panamericana; 2014

Tema 7. Control hormonal durante el ejercicio

Bloque I. Generalidades del Sistema endocrino

1. El sistema endocrino como sistema regulador integrador

El sistema endocrino constituye uno de los grandes sistemas de regulación del organismo, junto con el sistema nervioso. Mientras que la regulación nerviosa se caracteriza por su rapidez y especificidad, la regulación endocrina actúa de forma más lenta, sostenida y difusa, permitiendo ajustes prolongados en el tiempo. Ambos sistemas no funcionan de manera independiente, sino que están profundamente integrados, especialmente durante situaciones de estrés fisiológico como el ejercicio físico.

Una hormona puede definirse como una sustancia química producida por células especializadas que se libera al torrente sanguíneo y actúa sobre células diana que poseen receptores específicos. Esta especificidad receptor-hormona es la que determina la respuesta biológica. No todas las células responden a todas las hormonas; solo aquellas que expresan el receptor adecuado pueden verse afectadas.

El sistema endocrino está formado por glándulas clásicas (hipófisis, tiroides, suprarrenales, páncreas endocrino, gónadas, entre otras), pero también por tejidos con función endocrina no clásica, como el tejido adiposo, el músculo esquelético o el propio corazón. En el contexto del ejercicio, esta visión ampliada es especialmente relevante, ya que el músculo no es solo un órgano efector sino también un órgano secretor con funciones endocrinas.

Desde un punto de vista funcional, el sistema endocrino regula cuatro grandes procesos fisiológicos:

- El metabolismo energético.
- El crecimiento y la diferenciación celular.
- La reproducción.
- La adaptación al estrés.

El ejercicio físico representa un potente estímulo estresante para el organismo. Supone una alteración transitoria del equilibrio interno (homeostasis) que requiere una respuesta coordinada para mantener la glucemia, asegurar el aporte de oxígeno, movilizar sustratos energéticos, regular la presión arterial y controlar el balance hidroelectrolítico. Esta coordinación no podría producirse

únicamente mediante mecanismos nerviosos rápidos; requiere una respuesta hormonal organizada y jerarquizada.

Durante el ejercicio se produce una activación integrada del sistema nervioso central, del sistema nervioso autónomo y del sistema endocrino. La liberación de catecolaminas, el descenso de la insulina, el aumento del glucagón, la activación del eje hipotálamo-hipófiso-adrenal y la secreción de hormona del crecimiento constituyen ejemplos claros de cómo el sistema endocrino participa en la regulación metabólica aguda.

Además, el sistema endocrino no solo interviene en la respuesta inmediata al esfuerzo, sino también en los procesos de adaptación al entrenamiento. Cambios en la sensibilidad de los tejidos a determinadas hormonas, modificaciones en la secreción basal o alteraciones en los perfiles de respuesta ante una misma carga de trabajo forman parte de las adaptaciones endocrinas crónicas inducidas por el entrenamiento.

Por tanto, el sistema endocrino debe entenderse como un sistema regulador integrador que:

- Coordina la disponibilidad de sustratos energéticos.
- Modula la función cardiovascular y respiratoria.
- Regula el equilibrio hídrico y electrolítico.
- Participa en los procesos de recuperación y adaptación.

En el estudio del control hormonal durante el ejercicio es fundamental adoptar una visión dinámica. No se trata únicamente de conocer qué hormonas existen, sino de comprender cómo interactúan, cómo se regulan entre sí y cómo su secreción depende de variables como la intensidad, la duración y el estado de entrenamiento del individuo.

Este enfoque integrador permitirá entender la respuesta endocrina no como una suma de acciones aisladas, sino como un sistema coordinado orientado a mantener la homeostasis y optimizar el rendimiento físico.

2. Clasificación de las hormonas

2.1. Clasificación según su naturaleza química

Desde el punto de vista químico, las hormonas pueden agruparse en cuatro grandes categorías: esteroideas, aminas, peptídicas/proteicas y glucoproteínas.

Las hormonas esteroideas derivan del colesterol y presentan una estructura lipídica. Se sintetizan principalmente en la corteza suprarrenal (cortisol, aldosterona), en las gónadas (testosterona, estrógenos, progesterona) y en menor medida en otros tejidos. Debido a su carácter lipofílico, atraviesan fácilmente la membrana plasmática y ejercen su acción mediante receptores intracelulares, generalmente nucleares, modificando la transcripción génica. Durante el ejercicio, el cortisol y la testosterona desempeñan un papel destacado en la regulación metabólica y en la adaptación tisular.

Las hormonas amínicas derivan de aminoácidos, fundamentalmente de la tirosina y del triptófano. Dentro de este grupo se incluyen las catecolaminas (adrenalina y noradrenalina) producidas en la médula suprarrenal, y las hormonas tiroideas (T3 y T4). Aunque ambas derivan de la tirosina, su comportamiento fisiológico es diferente: las catecolaminas son hidrosolubles y actúan sobre receptores de membrana, mientras que las hormonas tiroideas son lipofílicas y actúan sobre receptores nucleares. En el contexto del ejercicio, las catecolaminas son esenciales en la respuesta

aguda al esfuerzo, mientras que las hormonas tiroideas modulan el metabolismo basal y la capacidad oxidativa a largo plazo.

Las hormonas peptídicas y proteicas están formadas por cadenas de aminoácidos de diferente longitud. Incluyen la insulina, el glucagón, la hormona del crecimiento (GH), la hormona adrenocorticotropa (ACTH) y muchas hormonas hipotalámicas e hipofisarias. Son hidrosolubles, no atraviesan la membrana plasmática y actúan a través de receptores de superficie acoplados a sistemas de segundos mensajeros. Constituyen el grupo más numeroso y desempeñan un papel central en la regulación metabólica durante el ejercicio.

Las glucoproteínas son hormonas proteicas unidas a fracciones glucídicas, como la hormona estimulante de la tiroides (TSH), la hormona foliculoestimulante (FSH) y la hormona luteinizante (LH). Se secretan por la hipófisis anterior y actúan sobre glándulas endocrinas periféricas, formando parte de los ejes de regulación hormonal.

2.2. Clasificación según su solubilidad

Otra forma fundamental de clasificación, especialmente relevante desde el punto de vista fisiológico, es la que distingue entre hormonas lipofílicas e hidrofílicas.

Las hormonas lipofílicas, como las esteroideas y las tiroideas, circulan en sangre unidas a proteínas transportadoras (por ejemplo, la globulina transportadora de corticosteroides o la globulina fijadora de hormonas sexuales). Esta unión prolonga su vida media plasmática y regula su fracción libre, que es la biológicamente activa. Al atravesar la membrana celular, se unen a receptores intracelulares y modulan la expresión génica, produciendo efectos más lentos pero sostenidos en el tiempo.

Las hormonas hidrofílicas, como las catecolaminas y las hormonas peptídicas, circulan disueltas en el plasma y tienen una vida media más corta. No pueden atravesar la membrana celular, por lo que actúan sobre receptores específicos en la superficie celular, activando cascadas de señalización intracelular (AMPc, IP3, DAG, entre otras). Sus efectos suelen ser rápidos y de corta duración, lo que resulta esencial para la regulación inmediata del metabolismo durante el ejercicio.

Esta distinción entre hormonas lipofílicas e hidrofílicas permite comprender por qué algunas respuestas hormonales al ejercicio son inmediatas (por ejemplo, la liberación de adrenalina) mientras que otras participan en procesos de adaptación más prolongados (como el aumento de la síntesis proteica mediado por testosterona o GH).

2.3. Prohormonas y prehormonas

Muchas hormonas no se secretan en su forma activa definitiva. En el caso de las hormonas peptídicas, se sintetizan inicialmente como preprohormonas en el retículo endoplasmático rugoso. Tras la escisión del péptido señal, se convierten en prohormonas, que posteriormente son procesadas en el aparato de Golgi para generar la hormona activa antes de su liberación por exocitosis. Un ejemplo clásico es la proinsulina, que se escinde para formar insulina y péptido C.

En otros casos, como ocurre con las hormonas tiroideas, se liberan precursores que se transforman en formas más activas en tejidos periféricos. La conversión de T4 en T3 constituye un ejemplo relevante de regulación periférica de la actividad hormonal.

El conocimiento de estos procesos de síntesis y activación es clave para entender cómo el organismo ajusta la disponibilidad hormonal durante el ejercicio y el entrenamiento, tanto en situaciones agudas como en adaptaciones crónicas.

3. Transporte plasmático y vida media hormonal

Una vez sintetizadas y liberadas a la circulación, las hormonas deben desplazarse hasta sus tejidos diana para ejercer su acción. El modo en que viajan por el plasma, su estabilidad en sangre y su eliminación determinan la intensidad y duración de su efecto biológico. Estos aspectos, estudiados en fisiología general, adquieren una dimensión aplicada cuando se analizan en el contexto del ejercicio, donde cambian el flujo sanguíneo, la perfusión hepática y la tasa metabólica.

3.1 Hormonas libres y hormonas unidas a proteínas transportadoras

Las hormonas pueden circular en sangre en dos formas: libres o unidas a proteínas transportadoras. La fracción libre es la biológicamente activa, ya que es la única capaz de atravesar membranas (si es lipofílica) o de interactuar con receptores en tejidos diana.

Las hormonas lipofílicas, como las esteroideas y las tiroideas, circulan mayoritariamente unidas a proteínas plasmáticas específicas (por ejemplo, globulinas transportadoras) o a albúmina. Esta unión cumple varias funciones:

- Aumenta su solubilidad en el medio acuoso.
- Actúa como reservorio circulante.
- Prolonga su vida media.
- Regula la fracción libre disponible.

Las hormonas hidrofílicas, como las catecolaminas, la insulina o el glucagón, circulan principalmente en forma libre y tienen una vida media más corta. Esto permite una acción rápida y una regulación dinámica, especialmente relevante durante el ejercicio agudo.

En el contexto del ejercicio, la concentración total de una hormona puede no reflejar necesariamente su fracción libre activa. Cambios en proteínas transportadoras, en el volumen plasmático o en la perfusión tisular pueden modificar la biodisponibilidad hormonal.

3.2 Vida media hormonal

La vida media hormonal es el tiempo necesario para que la concentración plasmática de una hormona se reduzca a la mitad. Este parámetro depende de su naturaleza química, de su unión a proteínas y de su tasa de degradación y eliminación.

Las hormonas peptídicas y catecolaminas suelen tener vidas medias cortas, del orden de minutos, lo que permite ajustes rápidos ante cambios fisiológicos como el inicio del ejercicio. Por el contrario, las hormonas esteroideas y tiroideas, al estar unidas a proteínas transportadoras y actuar mediante mecanismos genómicos, presentan vidas medias más prolongadas.

Durante el ejercicio, la vida media funcional de algunas hormonas puede verse modificada por cambios en el flujo sanguíneo hepático, la tasa de filtración renal o la actividad enzimática, lo que influye en la duración de su efecto.

3.3 Metabolización hepática

El hígado desempeña un papel central en la inactivación y transformación de muchas hormonas. Las hormonas esteroideas son metabolizadas principalmente mediante reacciones de conjugación que facilitan su eliminación. Las hormonas peptídicas pueden ser degradadas por enzimas específicas tanto en el hígado como en otros tejidos.

Durante el ejercicio intenso, el flujo sanguíneo hepático puede disminuir debido a la redistribución del gasto cardíaco hacia el músculo activo. Este fenómeno puede alterar

temporalmente la tasa de aclaramiento hepático de algunas hormonas, contribuyendo a modificar su concentración plasmática.

3.4 Eliminación renal

El riñón participa en la eliminación de hormonas y de sus metabolitos a través de la filtración glomerular y la excreción urinaria. Las hormonas hidrosolubles y los metabolitos conjugados de hormonas esteroideas son eliminados principalmente por esta vía.

Durante el ejercicio prolongado, la reducción del flujo renal y los cambios en la tasa de filtración glomerular pueden influir en la eliminación hormonal. Además, la activación de mecanismos hormonales como la secreción de ADH y aldosterona contribuye a modificar la función renal y el equilibrio hidroelectrolítico.

4. Mecanismos de acción hormonal

Comprender cómo actúan las hormonas sobre sus células diana es uno de los puntos clave del tema y, con frecuencia, uno de los que genera mayor confusión en el alumnado. El mecanismo de acción depende fundamentalmente de la naturaleza química de la hormona y de la localización de su receptor. En términos generales, las hormonas pueden actuar a través de receptores intracelulares (acción genómica) o a través de receptores de membrana (acción mediada por segundos mensajeros).

La distinción entre estos dos grandes mecanismos permite entender por qué algunas respuestas hormonales son rápidas y transitorias, mientras que otras son más lentas pero sostenidas y relacionadas con procesos de adaptación.

4.1 Receptores nucleares (acción genómica)

Las hormonas lipofílicas, como las esteroideas (cortisol, aldosterona, testosterona) y las hormonas tiroideas, pueden atravesar la membrana plasmática debido a su naturaleza lipídica. Una vez en el interior de la célula, se unen a receptores específicos localizados en el citoplasma o directamente en el núcleo.

El complejo hormona–receptor actúa como un factor de transcripción que se une al ADN en regiones específicas, modulando la expresión génica. Este proceso implica la activación o inhibición de la síntesis de proteínas concretas, lo que explica que los efectos de estas hormonas requieran más tiempo en manifestarse, pero sean más prolongados.

En el contexto del ejercicio, este mecanismo es especialmente relevante para comprender los procesos de adaptación. Por ejemplo, el cortisol regula la expresión de enzimas implicadas en el metabolismo energético, mientras que la testosterona y la hormona tiroidea influyen en la síntesis proteica y en la capacidad oxidativa del músculo.

El tiempo de respuesta de este tipo de acción hormonal suele medirse en horas o incluso días, ya que depende de la síntesis de nuevas proteínas.

4.2 Receptores de membrana y segundos mensajeros

Las hormonas hidrofílicas, como las catecolaminas, la insulina, el glucagón y muchas hormonas peptídicas, no pueden atravesar la membrana plasmática. Por ello, actúan uniéndose a receptores específicos situados en la superficie celular.

La unión hormona–receptor desencadena una cascada de señalización intracelular mediada por segundos mensajeros. Entre los principales mecanismos destacan:

1. **Las proteínas G y el sistema del AMPc**. Muchas hormonas, como la adrenalina o el glucagón, activan receptores acoplados a proteínas G, que estimulan la adenilato ciclasa y aumentan la producción de AMPc. Este segundo mensajero activa quinasas intracelulares que modifican la actividad de enzimas clave del metabolismo, permitiendo respuestas rápidas como la activación de la glucogenólisis.
2. **El sistema IP3/DAG**. Algunas hormonas activan la fosfolipasa C, generando inositol trifosfato (IP3) y diacilglicerol (DAG). Estos segundos mensajeros movilizan calcio intracelular y activan proteínas quinasas, participando en la regulación de múltiples procesos celulares.
3. **Los receptores con actividad tirosina quinasa, como el receptor de la insulina**. En este caso, la unión hormonal provoca la autofosforilación del receptor y la activación de vías intracelulares que regulan el transporte de glucosa y el metabolismo energético.

Estos mecanismos permiten respuestas muy rápidas, del orden de segundos o minutos, lo que resulta esencial para la regulación aguda del metabolismo durante el ejercicio.

4.3 Regulación del número y sensibilidad de los receptores

La respuesta hormonal no depende únicamente de la concentración de la hormona circulante, sino también del número y la sensibilidad de los receptores en el tejido diana.

El fenómeno de up-regulation consiste en un aumento del número de receptores cuando la estimulación hormonal es baja o intermitente. Esto incrementa la sensibilidad del tejido a la hormona.

El fenómeno de down-regulation ocurre cuando una exposición prolongada a concentraciones elevadas de una hormona reduce el número de receptores disponibles, disminuyendo la respuesta celular.

La desensibilización hace referencia a la reducción transitoria de la respuesta a una hormona pese a que su concentración siga siendo elevada, debido a modificaciones en la señalización intracelular.

En el contexto del ejercicio y del entrenamiento, estos mecanismos son fundamentales. Las adaptaciones endocrinas no solo implican cambios en la secreción hormonal, sino también modificaciones en la sensibilidad de los tejidos diana. Por ejemplo, el entrenamiento mejora la sensibilidad a la insulina en el músculo esquelético, facilitando el control glucémico.

5. Interacciones hormonales

En el organismo, las hormonas rara vez actúan de forma aislada. La regulación fisiológica se basa en la interacción coordinada de múltiples señales hormonales que pueden potenciarse, complementarse o contrarrestarse entre sí. Comprender estas interacciones es esencial para interpretar la respuesta endocrina durante el ejercicio, ya que los cambios hormonales inducidos por el esfuerzo no afectan a una única vía metabólica, sino a un conjunto integrado de procesos.

Las interacciones hormonales pueden clasificarse en sinergismo, permisividad, antagonismo y efectos aditivos o complementarios.

5.1 Sinergismo

El sinergismo ocurre cuando dos o más hormonas producen un efecto conjunto mayor que la suma de sus efectos individuales. En este caso, la acción combinada amplifica la respuesta fisiológica.

Un ejemplo claro en el contexto del ejercicio es la acción conjunta de las catecolaminas y el glucagón sobre la glucogenólisis hepática. Ambas hormonas estimulan la liberación de glucosa a la sangre, asegurando el mantenimiento de la glucemia durante el esfuerzo. La combinación de sus efectos permite una respuesta metabólica más potente que la acción aislada de cada una.

El sinergismo es especialmente importante durante el ejercicio intenso, cuando la activación hormonal es múltiple y coordinada.

5.2 Permisividad

La permisividad se produce cuando la presencia de una hormona es necesaria para que otra ejerza plenamente su efecto. La primera no desencadena directamente la respuesta, pero "permite" que la segunda actúe con eficacia.

Un ejemplo clásico es el papel de las hormonas tiroideas en la acción de las catecolaminas. Las hormonas tiroideas aumentan la expresión de receptores beta-adrenérgicos en diversos tejidos. Sin una concentración adecuada de hormonas tiroideas, la respuesta a la adrenalina sería menor.

Este concepto es fundamental en fisiología del ejercicio, ya que muchas adaptaciones metabólicas dependen de este tipo de interacciones a largo plazo.

5.3 Antagonismo

El antagonismo ocurre cuando dos hormonas producen efectos opuestos sobre una misma variable fisiológica. Este tipo de interacción permite mantener el equilibrio interno mediante mecanismos de compensación.

El ejemplo más relevante es la relación entre insulina y glucagón en la regulación de la glucemia. La insulina favorece el almacenamiento de glucosa y la síntesis de glucógeno, mientras que el glucagón estimula la liberación de glucosa al torrente sanguíneo. Durante el ejercicio, la disminución de la insulina y el aumento del glucagón permiten movilizar sustratos energéticos de forma eficiente.

El equilibrio entre hormonas con efectos antagonistas es uno de los pilares del control metabólico.

5.4 Efectos aditivos y complementarios

En los efectos aditivos, dos hormonas producen un efecto conjunto equivalente a la suma de sus efectos individuales. En los efectos complementarios, cada hormona actúa sobre un punto distinto de una misma vía metabólica, generando una respuesta integrada.

Durante el ejercicio, la regulación hormonal del metabolismo energético es un ejemplo claro de acción complementaria. Las catecolaminas estimulan la glucogenólisis muscular, el glucagón favorece la producción hepática de glucosa, el cortisol facilita la disponibilidad de sustratos a más largo plazo y la hormona del crecimiento contribuye a aumentar la lipólisis. Todas estas acciones convergen en el mismo objetivo: garantizar el suministro de energía al músculo activo.

Bloque II. Respuesta hormonal aguda al ejercicio

6. Respuesta endocrina aguda al ejercicio

El ejercicio físico constituye un potente estímulo fisiológico que altera de manera transitoria el equilibrio interno del organismo. Para mantener la homeostasis y garantizar el suministro energético al músculo activo, se produce una activación coordinada del sistema nervioso y del sistema endocrino. La respuesta hormonal aguda al ejercicio depende fundamentalmente de la intensidad, la duración, el tipo de ejercicio y el estado de entrenamiento del individuo.

Desde el inicio del esfuerzo se desencadena una respuesta endocrina organizada que tiene como objetivos principales: movilizar sustratos energéticos, mantener la glucemia, regular la presión arterial y el equilibrio hidroelectrolítico, y preparar al organismo para el estrés metabólico.

6.1 Principios generales de la respuesta hormonal al ejercicio

La magnitud de la respuesta hormonal está estrechamente relacionada con la intensidad del ejercicio. A intensidades bajas, las variaciones hormonales son moderadas y se orientan principalmente a facilitar la utilización de sustratos energéticos. A medida que la intensidad aumenta, la activación hormonal es más marcada y afecta a un mayor número de ejes endocrinos.

La duración del ejercicio también influye de manera decisiva. En ejercicios breves y explosivos predominan las respuestas rápidas mediadas por catecolaminas. En ejercicios prolongados, se activan además hormonas relacionadas con la movilización sostenida de sustratos y con la regulación del equilibrio hídrico, como el cortisol, la hormona del crecimiento o la ADH.

Existe, además, un umbral de activación hormonal. Determinadas hormonas solo muestran aumentos significativos cuando la intensidad del ejercicio supera un determinado nivel. Este fenómeno explica por qué la respuesta endocrina no es lineal, sino dependiente del tipo de estímulo.

6.2 Hormonas que aumentan durante el ejercicio

Las catecolaminas (adrenalina y noradrenalina) son de las primeras hormonas en aumentar durante el ejercicio. Su liberación está asociada a la activación del sistema nervioso simpático. Facilitan la glucogenólisis, la lipólisis, el aumento de la frecuencia cardíaca y la redistribución del flujo sanguíneo hacia el músculo activo. Su respuesta es especialmente marcada en ejercicios de alta intensidad.

El glucagón aumenta durante el ejercicio, favoreciendo la liberación hepática de glucosa y contribuyendo al mantenimiento de la glucemia. Su incremento es más evidente en ejercicios prolongados o cuando disminuyen las reservas de glucógeno.

La hormona del crecimiento (GH) también se incrementa, especialmente en ejercicios de intensidad moderada-alta. Contribuye a la movilización de ácidos grasos y participa en procesos de adaptación tisular.

El cortisol, hormona esteroidea liberada por la corteza suprarrenal, aumenta en ejercicios prolongados o de alta intensidad. Facilita la disponibilidad de sustratos energéticos y participa en la respuesta al estrés.

La ADH (hormona antidiurética) y la aldosterona aumentan principalmente en ejercicios prolongados, especialmente cuando existe pérdida de líquidos por sudoración. Su función es conservar agua y sodio, manteniendo el volumen plasmático y la presión arterial.

6.3 Hormonas que disminuyen durante el ejercicio

La insulina es la principal hormona que disminuye durante el ejercicio. A pesar de la reducción en su concentración plasmática, la captación de glucosa por el músculo activo aumenta debido a mecanismos independientes de la insulina, relacionados con la contracción muscular.

La disminución de la insulina facilita la movilización de sustratos energéticos, permitiendo que el glucagón y las catecolaminas actúen con mayor eficacia. Esta regulación coordinada evita la hipoglucemia y optimiza la disponibilidad de energía durante el esfuerzo.

7. Regulación hormonal del metabolismo durante el ejercicio

La regulación hormonal del metabolismo durante el ejercicio constituye uno de los ejes centrales de la fisiología del esfuerzo. El objetivo principal del sistema endocrino en este contexto es garantizar un aporte continuo de energía al músculo activo, manteniendo al mismo tiempo la estabilidad de la glucemia y el equilibrio interno del organismo.

Esta regulación no depende de una única hormona, sino de la interacción coordinada de varias señales endocrinas que actúan sobre distintos tejidos (músculo, hígado, tejido adiposo). El resultado final es una respuesta integrada que ajusta la utilización de hidratos de carbono, lípidos y proteínas en función de la intensidad y duración del ejercicio.

7.1 Regulación hormonal del metabolismo de los hidratos de carbono

El control de la glucemia durante el ejercicio es una prioridad fisiológica. El músculo activo aumenta considerablemente su captación de glucosa, lo que podría provocar hipoglucemia si no existieran mecanismos compensadores.

La insulina disminuye durante el ejercicio. Este descenso facilita la movilización de glucosa hepática y evita el almacenamiento de glucosa en tejidos no activos. A pesar de la reducción de insulina, la captación de glucosa por el músculo aumenta gracias a mecanismos asociados a la contracción muscular, que estimulan la translocación de transportadores de glucosa hacia la membrana celular.

El glucagón aumenta, especialmente en ejercicios prolongados, estimulando la glucogenólisis hepática y la liberación de glucosa al torrente sanguíneo. Este efecto es esencial para mantener la glucemia.

Las catecolaminas potencian tanto la glucogenólisis muscular como la hepática. En el músculo, favorecen la rápida disponibilidad de glucosa para la glucólisis; en el hígado, contribuyen a sostener la concentración de glucosa en sangre.

El cortisol y la hormona del crecimiento actúan de forma más sostenida. El cortisol estimula la gluconeogénesis hepática y favorece la disponibilidad de sustratos energéticos, mientras que la GH reduce la utilización de glucosa en algunos tejidos y promueve el uso de lípidos, preservando las reservas de glucógeno.

La regulación de los hidratos de carbono durante el ejercicio es, por tanto, el resultado de una disminución de la acción insulínica y un aumento coordinado de hormonas contrarreguladoras.

7.2 Regulación hormonal del metabolismo lipídico

A medida que el ejercicio se prolonga o cuando la intensidad es moderada, aumenta la contribución de los lípidos como fuente energética. Esta transición está mediada por cambios hormonales específicos.

Las catecolaminas estimulan la lipólisis en el tejido adiposo mediante la activación de enzimas responsables de la degradación de triglicéridos. Esto incrementa la liberación de ácidos grasos hacia la circulación.

La hormona del crecimiento también favorece la movilización de grasas y reduce la captación de glucosa en ciertos tejidos, contribuyendo a un mayor uso de lípidos.

El cortisol, especialmente en ejercicios prolongados, potencia la disponibilidad de sustratos energéticos y facilita la movilización de ácidos grasos.

La disminución de la insulina es fundamental para permitir la lipólisis, ya que esta hormona, en condiciones basales, inhibe la degradación de triglicéridos. Su descenso durante el ejercicio elimina este efecto inhibidor.

El resultado es un aumento progresivo de la utilización de ácidos grasos, especialmente en ejercicios de larga duración.

7.3 Regulación hormonal del metabolismo proteico

El metabolismo proteico no constituye la principal fuente energética durante el ejercicio, pero puede verse modulado por cambios hormonales, especialmente en esfuerzos prolongados o de alta intensidad.

El cortisol favorece el catabolismo proteico y la liberación de aminoácidos, que pueden utilizarse para la gluconeogénesis. Este efecto es más evidente en situaciones de estrés metabólico prolongado.

La hormona del crecimiento y la testosterona ejercen efectos anabólicos, favoreciendo la síntesis proteica y la reparación tisular tras el ejercicio. En este sentido, su papel es más relevante en la recuperación y adaptación que en la producción directa de energía durante el esfuerzo.

El equilibrio entre hormonas catabólicas y anabólicas determina el balance proteico y forma parte de los mecanismos de adaptación al entrenamiento.

8. Integración neuroendocrina durante el ejercicio

La respuesta hormonal al ejercicio no puede entenderse de forma aislada del sistema nervioso. El control del esfuerzo físico implica una integración estrecha entre el sistema nervioso central, el sistema nervioso autónomo y el sistema endocrino. Esta coordinación permite anticipar el inicio del ejercicio, ajustar la intensidad de la respuesta fisiológica y mantener la homeostasis durante el esfuerzo.

La integración neuroendocrina explica por qué muchas respuestas hormonales comienzan incluso antes de que se produzcan cambios metabólicos significativos en el músculo activo. Además, permite modular la respuesta en función de la intensidad, la duración y el contexto del ejercicio.

8.1 Feedforward: comando central y activación anticipatoria

El mecanismo de *feedforward* hace referencia a la activación anticipatoria de sistemas fisiológicos antes de que aparezcan cambios detectables en el medio interno. En el ejercicio, este fenómeno se relaciona con el denominado “comando central”, es decir, la activación cortical asociada a la intención y al inicio del movimiento.

Antes incluso de que comience la contracción muscular, se produce una activación del sistema nervioso simpático. Esta activación anticipatoria contribuye al aumento de la frecuencia cardíaca, la redistribución del flujo sanguíneo y la liberación de catecolaminas desde la médula suprarrenal.

Este mecanismo explica por qué la concentración de adrenalina puede aumentar de forma muy precoz al inicio del ejercicio. La activación simpática forma parte de una respuesta integrada que prepara al organismo para el incremento inmediato de la demanda energética.

8.2 Feedback periférico: señales aferentes desde los tejidos activos

El mecanismo de *feedback* se basa en la información procedente de receptores periféricos que detectan cambios en el medio interno. Durante el ejercicio, distintos tipos de receptores contribuyen a modular la respuesta neuroendocrina.

Los metaborreceptores musculares detectan cambios en metabolitos asociados a la actividad contráctil, como el aumento de protones o de productos del metabolismo energético. Los quimiorreceptores responden a variaciones en la concentración de oxígeno y dióxido de carbono. Los barorreceptores monitorizan cambios en la presión arterial.

La información procedente de estos receptores es transmitida al sistema nervioso central, donde se integra y ajusta la respuesta simpática y hormonal. Este mecanismo permite adaptar la secreción de catecolaminas, cortisol, ADH y otras hormonas en función de la intensidad real del esfuerzo.

8.3 Interacción entre sistema nervioso autónomo y sistema endocrino

El sistema nervioso autónomo, especialmente su componente simpático, desempeña un papel central en la regulación endocrina durante el ejercicio. La activación simpática no solo produce efectos directos sobre el corazón y los vasos sanguíneos, sino que también estimula la liberación de hormonas clave como la adrenalina y la noradrenalina.

Además, el eje hipotálamo-hipófiso-adrenal se activa en respuesta al estrés físico, integrando señales nerviosas y hormonales. Esta activación contribuye a la liberación de ACTH y, posteriormente, de cortisol.

La interacción entre el sistema nervioso y el sistema endocrino garantiza que la respuesta al ejercicio sea proporcional a la demanda impuesta. En esfuerzos de baja intensidad, la activación hormonal es moderada. En ejercicios de alta intensidad o prolongados, la activación simpática y endocrina es más marcada y sostenida.

9. Regulación hormonal del equilibrio hidroelectrolítico

El mantenimiento del equilibrio hidroelectrolítico es esencial durante el ejercicio físico, especialmente cuando este es prolongado o se realiza en condiciones ambientales adversas. La pérdida de agua y electrolitos a través del sudor puede comprometer el volumen plasmático, la presión arterial, la termorregulación y, en última instancia, el rendimiento.

La regulación de este equilibrio depende de una compleja interacción entre mecanismos neurales y hormonales, en los que destacan la hormona antidiurética (ADH), la aldosterona, el sistema renina–angiotensina y los péptidos natriuréticos.

9.1 Hormona antidiurética (ADH)

La ADH, también denominada vasopresina, se sintetiza en el hipotálamo y se libera desde la hipófisis posterior. Su secreción se estimula por el aumento de la osmolaridad plasmática y por la disminución del volumen sanguíneo o de la presión arterial.

Durante el ejercicio, especialmente si existe sudoración significativa, aumenta la osmolaridad plasmática y puede disminuir el volumen circulante efectivo. Estas señales activan la liberación de ADH, que actúa sobre el riñón aumentando la reabsorción de agua en los túbulos colectores. Como consecuencia, se reduce la producción de orina y se preserva el volumen plasmático.

Además de su efecto renal, la ADH puede contribuir a la regulación de la presión arterial mediante un efecto vasoconstrictor leve.

9.2 Aldosterona

La aldosterona es una hormona esteroidea producida en la corteza suprarrenal. Su principal función es regular el equilibrio de sodio y potasio. Actúa sobre el túbulo distal renal aumentando la reabsorción de sodio y la excreción de potasio.

Durante el ejercicio prolongado, la activación del sistema renina–angiotensina estimula la secreción de aldosterona. La retención de sodio favorece indirectamente la retención de agua, ayudando a mantener el volumen plasmático y la presión arterial.

Este mecanismo es especialmente importante en actividades de resistencia o en condiciones de elevada sudoración, donde las pérdidas de sodio pueden ser significativas.

9.3 Sistema renina–angiotensina

El sistema renina–angiotensina se activa cuando disminuye el flujo sanguíneo renal o la presión arterial. La renina, liberada por el riñón, inicia una cascada que culmina con la formación de angiotensina II.

La angiotensina II ejerce varios efectos: provoca vasoconstricción, estimula la liberación de aldosterona y favorece la secreción de ADH. Estos mecanismos contribuyen a mantener la presión arterial y el volumen sanguíneo durante el ejercicio.

En situaciones de ejercicio intenso o prolongado, este sistema ayuda a compensar la redistribución del flujo sanguíneo hacia el músculo activo.

9.4 Péptidos natriuréticos

Los péptidos natriuréticos, como el péptido natriurético auricular (ANP), se liberan en respuesta a la distensión de las aurículas cardíacas. Su acción es, en cierto modo, opuesta a la del sistema renina–angiotensina–aldosterona.

Estos péptidos favorecen la excreción de sodio y agua, contribuyendo a regular el volumen plasmático y la presión arterial. Durante el ejercicio, especialmente cuando aumenta el retorno venoso y la distensión auricular, pueden participar en el ajuste fino del equilibrio hídrico.

Bloque III. Adaptación y rendimiento

10. Adaptaciones endocrinas al entrenamiento

El entrenamiento físico sistemático no solo modifica la capacidad cardiovascular, respiratoria o muscular, sino que también induce adaptaciones significativas en el sistema endocrino. Estas adaptaciones pueden observarse tanto en condiciones de reposo como durante el ejercicio y dependen del tipo, la intensidad y el volumen del entrenamiento realizado.

Las adaptaciones endocrinas reflejan una mejora en la eficiencia reguladora del organismo. En términos generales, el sistema hormonal de un individuo entrenado responde de manera más ajustada, económica y específica ante una misma carga de trabajo en comparación con un sujeto no entrenado.

10.1 Adaptaciones endocrinas en reposo

En reposo, el entrenamiento puede modificar tanto la secreción basal de determinadas hormonas como la sensibilidad de los tejidos diana.

En sujetos entrenados en resistencia, suele observarse una mejora de la sensibilidad a la insulina, lo que facilita el control glucémico y reduce la necesidad de secreciones elevadas de esta hormona. Esto se traduce en una mayor eficiencia metabólica.

Asimismo, pueden producirse cambios en los niveles basales de cortisol, testosterona o GH, dependiendo del tipo de entrenamiento y del equilibrio entre carga y recuperación. Sin embargo, más que cambios marcados en las concentraciones basales, lo más relevante suelen ser las modificaciones en la sensibilidad tisular y en la regulación de los ejes hormonales.

10.2 Adaptaciones durante el ejercicio submáximo

Una de las adaptaciones más características del entrenamiento es la reducción de la respuesta hormonal ante un mismo ejercicio submáximo. En individuos entrenados, la liberación de catecolaminas, glucagón y cortisol ante una carga moderada suele ser menor que en sujetos no entrenados.

Esta menor respuesta hormonal refleja una mayor eficiencia metabólica y una mejor utilización de sustratos. Por ejemplo, en el entrenamiento de resistencia se observa una mayor capacidad de oxidación de lípidos, lo que reduce la necesidad de activación intensa de hormonas movilizadoras de glucosa.

Además, el entrenamiento mejora el control glucémico durante el ejercicio, con menores oscilaciones de la glucosa plasmática y una regulación más estable de la insulina y el glucagón.

10.3 Adaptaciones según el tipo de entrenamiento

El tipo de entrenamiento determina el perfil de adaptación endocrina.

En el entrenamiento de resistencia, predominan adaptaciones relacionadas con la eficiencia metabólica y la economía hormonal. Se observa una mejor coordinación entre la respuesta simpática y la secreción hormonal, una mayor capacidad de movilización de grasas y una menor dependencia del glucógeno a intensidades submáximas.

En el entrenamiento de fuerza, las adaptaciones endocrinas se asocian con cambios en hormonas anabólicas como la testosterona y la hormona del crecimiento. Aunque las respuestas agudas pueden ser intensas, las adaptaciones crónicas están más relacionadas con modificaciones en la sensibilidad de los tejidos y en el balance anabólico-catabólico que con aumentos permanentes en las concentraciones basales.

En ambos casos, el entrenamiento modula la reactividad del sistema endocrino, permitiendo respuestas más eficientes y mejor adaptadas a las demandas específicas del esfuerzo.

11. Hormonas anabólicas y rendimiento

El rendimiento físico y la adaptación al entrenamiento no dependen únicamente de la disponibilidad de energía durante el ejercicio, sino también de los procesos de recuperación, reparación y remodelación tisular que se producen posteriormente. En este contexto, las hormonas anabólicas desempeñan un papel fundamental, ya que regulan la síntesis proteica, la proliferación celular y la adaptación estructural del músculo y otros tejidos.

El equilibrio entre hormonas anabólicas y catabólicas determina el denominado balance anabólico–catabólico, que influye directamente en la capacidad de adaptación al entrenamiento y en la mejora del rendimiento.

11.1 Hormona del crecimiento (GH) e IGF-1

La hormona del crecimiento (GH), secretada por la hipófisis anterior, aumenta de forma aguda durante el ejercicio, especialmente cuando la intensidad es moderada-alta. Su liberación está influida por factores como la hipoglucemia, el estrés metabólico y la acumulación de lactato.

La GH ejerce efectos directos sobre el metabolismo lipídico, favoreciendo la movilización de ácidos grasos, pero gran parte de sus efectos anabólicos están mediados por el factor de crecimiento similar a la insulina tipo 1 (IGF-1), producido principalmente en el hígado y también en el propio músculo.

El eje GH–IGF-1 participa en la estimulación de la síntesis proteica, la proliferación celular y la reparación tisular. En el contexto del entrenamiento, contribuye a la adaptación muscular y al mantenimiento de la masa magra.

11.2 Testosterona

La testosterona es una hormona esteroidea con potentes efectos anabólicos. Favorece la síntesis proteica, el aumento de la masa muscular y la recuperación tras el ejercicio. La respuesta aguda de la testosterona puede variar según el tipo de ejercicio, siendo más evidente en sesiones de fuerza con grandes masas musculares implicadas y cargas elevadas.

Más allá de los cambios agudos, la testosterona participa en la regulación a largo plazo de la masa y función muscular. La sensibilidad del tejido muscular a esta hormona es un factor relevante en la adaptación al entrenamiento.

11.3 Cortisol y balance hormonal

El cortisol, aunque frecuentemente asociado a efectos catabólicos, cumple una función esencial en la respuesta al ejercicio. Facilita la disponibilidad de sustratos energéticos y participa en la regulación del estrés metabólico. Sin embargo, una elevación mantenida del cortisol puede favorecer el catabolismo proteico.

El rendimiento y la adaptación dependen del equilibrio entre hormonas anabólicas (GH, IGF-1, testosterona) y hormonas con efecto catabólico (cortisol). Un predominio sostenido de señales catabólicas puede dificultar la recuperación y limitar las adaptaciones al entrenamiento.

11.4 Balance anabólico–catabólico y aplicación al entrenamiento

El concepto de balance anabólico–catabólico permite interpretar la respuesta hormonal al entrenamiento desde una perspectiva integrada. No se trata únicamente de aumentar hormonas anabólicas, sino de mantener un equilibrio adecuado que favorezca la recuperación y la adaptación.

Factores como la carga de entrenamiento, la nutrición, el descanso y el estado psicológico influyen en este balance hormonal. Una planificación adecuada debe considerar no solo la respuesta aguda al ejercicio, sino también la recuperación endocrina posterior.

Desde el punto de vista de la fisiología del ejercicio, el estudio de las hormonas anabólicas permite comprender cómo el organismo transforma el estímulo mecánico del entrenamiento en adaptaciones estructurales y funcionales que mejoran el rendimiento.

Bibliografía

Daly W, Seegers CA, Rubin DA, Dobridge JD, Hackney AC. Relationship between stress hormones and testosterone with prolonged endurance exercise. *Eur J Appl Physiol*. 2005;93:375.

Fox SI. Fisiología Humana. 15ª ed. McGraw-Hill Interamericana; 2021.

Hackney AC, Davis HC, Lane AR. Growth hormone-insulin-like growth factor axis, thyroid axis, prolactin, and exercise. Front Horm Res. 2016;47:1-11.

Hew-Butler T, Noakes TD, Soldin SJ, Verbalis JG. Acute changes in endocrine and fluid balance markers during high-intensity, steady-state, and prolonged endurance running: unexpected increases in oxytocin and brain natriuretic peptide during exercise. *Eur J Endocrinol*. 2008;159(6):729-737.

Katch VL, MacArdle WD, Katch FI. *Fisiología Del Ejercicio : "Fundamentos"*. 4ª ed. Editorial Médica Panamericana; 2014.

López Chicharro J, Fernández Vaquero A. *Fisiología Del Ejercicio*. 4a ed. Editorial Médica Panamericana; 2023.

Silverthorn DU. *Fisiología Humana Un Enfoque Integrado*. Ed. 8. Editorial Médica Panamericana; 2019

Wideman L, Weltman JY, Shah N, Story S, Veldhuis JD, Weltman A. The impact of sex and exercise duration on growth hormone secretion. *J Appl Physiol*. 2006;101:1641.

Wilmore JH, Kenney WL, Costill DL. *Fisiología del Deporte y el Ejercicio*. 5th ed. Editorial Médica Panamericana; 2014.

Tema 8. Fatiga durante el ejercicio

1. Concepto y clasificación de la fatiga

La fatiga es uno de los fenómenos fisiológicos más relevantes en el estudio del ejercicio, ya que constituye uno de los principales factores limitantes del rendimiento. Desde un punto de vista funcional, puede definirse como la **disminución transitoria de la capacidad para generar fuerza o potencia**, que aparece durante o tras la realización de un ejercicio y que es reversible con el descanso.

Es importante diferenciar la fatiga de otros conceptos como el agotamiento o la lesión. La fatiga es un proceso fisiológico, regulador y protector, que limita el rendimiento antes de que se produzca un daño estructural irreversible. El agotamiento, en cambio, implicaría la imposibilidad de continuar el ejercicio, mientras que la lesión supone alteraciones estructurales del tejido.

Desde la fisiología del ejercicio, la fatiga no se considera un fenómeno único ni localizado exclusivamente en el músculo. Es el resultado de la interacción entre múltiples sistemas: muscular, metabólico, nervioso y cardiovascular. Por tanto, debe entenderse como un proceso **multifactorial e integrador**.

1.1 Fatiga aguda y fatiga acumulada

La fatiga puede analizarse en diferentes escalas temporales.

La **fatiga aguda** aparece durante una sesión de ejercicio y se desarrolla progresivamente conforme aumenta la intensidad o la duración del esfuerzo. Está directamente relacionada con alteraciones metabólicas, iónicas o neuromusculares que reducen la capacidad contráctil o el drive neural.

La **fatiga acumulada** se refiere a la reducción del rendimiento que se produce tras múltiples sesiones de entrenamiento sin recuperación completa. Aunque en este tema nos centramos principalmente en la fatiga aguda durante el ejercicio, es importante introducir este concepto para diferenciarlo de procesos más complejos como el sobreentrenamiento.

1.2 Clasificación general de la fatiga

Tradicionalmente, la fatiga se ha clasificado según el nivel del sistema en el que predomina la alteración:

- **Fatiga periférica**, cuando el origen principal se sitúa en el músculo esquelético o en los mecanismos implicados en la contracción (metabolismo energético, alteraciones iónicas, acoplamiento excitación–contracción).
- **Fatiga central**, cuando la limitación está relacionada con una disminución en la activación voluntaria del músculo, es decir, una reducción del impulso neural desde el sistema nervioso central hacia las motoneuronas.
- **Fatiga neuromuscular**, término que integra alteraciones tanto en la unión neuromuscular como en la propagación del potencial de acción.

- **Fatiga metabólica**, vinculada específicamente a la disponibilidad de sustratos energéticos y a la acumulación de metabolitos.

En la práctica, estos mecanismos no actúan de manera aislada. La fatiga durante el ejercicio es el resultado de la interacción dinámica entre factores centrales y periféricos, que varían en función de la intensidad, la duración y el tipo de ejercicio realizado.

Este enfoque integrador será clave a lo largo del tema, ya que permitirá comprender cómo distintos mecanismos pueden predominar según la modalidad de esfuerzo, pero siempre dentro de un sistema fisiológico interconectado.

2. Modelos explicativos de la fatiga

La comprensión de la fatiga ha evolucionado de forma significativa en las últimas décadas. Los primeros modelos se centraban casi exclusivamente en el músculo esquelético y en sus limitaciones metabólicas. Sin embargo, los avances en neurofisiología y fisiología del ejercicio han demostrado que la fatiga no puede explicarse únicamente por alteraciones locales, sino que implica la interacción dinámica entre mecanismos periféricos y centrales.

A partir de las aportaciones clásicas y actuales en fisiología del ejercicio, pueden distinguirse varios modelos explicativos complementarios que permiten entender la complejidad del fenómeno.

2.1 Modelo periférico clásico

Durante muchos años, la fatiga se interpretó principalmente como un fenómeno muscular. Según este enfoque, la disminución de la fuerza o potencia durante el ejercicio se debía a alteraciones locales en el músculo activo.

Entre los mecanismos propuestos destacan:

- Disminución de la disponibilidad de sustratos energéticos, como ATP, fosfocreatina y glucógeno.
- Acumulación de metabolitos derivados del metabolismo energético, como protones (H^+), fosfato inorgánico (Pi) y ADP.
- Alteraciones en la liberación y recaptación de calcio por el retículo sarcoplásmico.
- Cambios en la excitabilidad de la membrana muscular.

Este modelo explica adecuadamente la fatiga en ejercicios de alta intensidad y corta duración, donde predominan alteraciones metabólicas rápidas. No obstante, resulta insuficiente para interpretar la reducción progresiva del rendimiento en esfuerzos prolongados en los que el músculo aún conserva capacidad contráctil residual.

2.2 Modelo central

Posteriormente se reconoció que la fatiga no depende exclusivamente del músculo, sino también de la capacidad del sistema nervioso central para mantener la activación voluntaria.

La fatiga central se define como una disminución en el impulso neural que llega al músculo, lo que reduce el reclutamiento de unidades motoras y la frecuencia de descarga. Entre los mecanismos implicados se incluyen:

- Reducción del drive cortical desde la corteza motora.
- Alteraciones en neurotransmisores como serotonina, dopamina y noradrenalina.

- Influencia de señales aferentes procedentes del músculo fatigado.
- Mecanismos protectores que limitan el reclutamiento completo de unidades motoras.

Este modelo resulta especialmente relevante en ejercicios de larga duración, donde la limitación del rendimiento no siempre coincide con un agotamiento energético absoluto.

2.3 Modelo integrador o multifactorial

La visión actual entiende la fatiga como un fenómeno multisistémico. No existe una causa única, sino una interacción compleja entre diferentes niveles del sistema neuromuscular.

En este modelo interactúan:

- Factores metabólicos y bioenergéticos.
- Alteraciones iónicas.
- Cambios en la liberación y sensibilidad al calcio.
- Señales aferentes musculares (metaborreceptores).
- Regulación cardiovascular.
- Integración cortical y subcortical.

Desde esta perspectiva, la fatiga no se interpreta como un fallo aislado, sino como el resultado de la interacción dinámica entre sistemas periféricos y centrales, modulados por el contexto fisiológico y el tipo de ejercicio.

2.4 Modelo del "gobernador central"

Algunos autores han propuesto que el sistema nervioso central regula anticipadamente el rendimiento para evitar daños potenciales. Según esta hipótesis, el cerebro actuaría como un regulador que ajusta el reclutamiento muscular en función de la información aferente y de la expectativa del esfuerzo restante.

Aunque este modelo ha generado debate y no existe consenso absoluto sobre su base anatómica, resulta útil para comprender que la fatiga puede aparecer antes de que el músculo alcance un límite bioenergético crítico.

2.5 Visión actual

En la actualidad se acepta que:

- No existe una única causa de fatiga.
- El mecanismo predominante depende del tipo, intensidad y duración del ejercicio.
- La fatiga es el resultado de una interacción dinámica entre sistemas.
- Tiene un componente regulador y protector que limita el daño potencial.

Este enfoque integrador será el eje del desarrollo del tema. A continuación, se analizarán de forma detallada los mecanismos periféricos implicados en la fatiga durante el ejercicio, comenzando por los procesos metabólicos.

BLOQUE I — FATIGA PERIFÉRICA.

3. Fatiga metabólica

La fatiga metabólica constituye uno de los mecanismos periféricos más estudiados en fisiología del ejercicio. Se refiere a la disminución de la capacidad contráctil del músculo como consecuencia de alteraciones en la disponibilidad de sustratos energéticos y en la acumulación de productos derivados del metabolismo.

Durante el ejercicio, el músculo incrementa de forma notable su demanda de ATP. Aunque la concentración intramuscular de ATP se mantiene relativamente estable incluso en esfuerzos intensos, los cambios en los sistemas encargados de su resíntesis y la acumulación de metabolitos asociados pueden alterar la función contráctil.

3.1 Depleción de sustratos energéticos

Uno de los factores clásicos asociados a la fatiga es la disminución de sustratos energéticos.

La fosfocreatina (PCr) constituye la fuente más rápida de resíntesis de ATP. En ejercicios de alta intensidad y corta duración, la depleción de PCr es rápida y se asocia a una disminución en la capacidad de mantener la potencia máxima. La reducción de PCr limita la velocidad de resíntesis de ATP a través del sistema fosfágeno.

El glucógeno muscular es el principal sustrato en ejercicios de intensidad moderada-alta. En esfuerzos prolongados, la disminución progresiva de las reservas de glucógeno se relaciona con la reducción del rendimiento y con la aparición de fatiga. Además, el glucógeno no solo tiene un papel energético, sino también estructural y regulador dentro de la fibra muscular.

El glucógeno hepático contribuye al mantenimiento de la glucemia durante el ejercicio prolongado. Su depleción puede favorecer la aparición de fatiga central al reducir la disponibilidad de glucosa para el sistema nervioso.

Es importante señalar que la concentración de ATP rara vez desciende a niveles críticos compatibles con la interrupción absoluta de la contracción. Por tanto, la fatiga no suele deberse a un “agotamiento total” de ATP, sino a alteraciones en su resíntesis y en el equilibrio metabólico.

3.2 Acumulación de metabolitos

Durante el ejercicio intenso, la producción de ATP mediante glucólisis y otras vías metabólicas genera subproductos que pueden influir en la función muscular.

El fosfato inorgánico (Pi) aumenta como consecuencia de la hidrólisis del ATP y de la degradación de la fosfocreatina. Elevadas concentraciones de Pi pueden interferir en la formación de puentes cruzados y en la liberación de calcio desde el retículo sarcoplásmico.

El ADP también se acumula cuando la tasa de resíntesis de ATP no compensa completamente su utilización. Aunque su papel directo en la fatiga es complejo, contribuye a modificar el equilibrio energético intracelular.

El aumento de protones (H^+), asociado a la producción de lactato en la glucólisis anaeróbica, provoca una disminución del pH intramuscular. Tradicionalmente se atribuía a la acidosis un papel central en la fatiga; actualmente se reconoce que su efecto es más matizado y que la interferencia con la contracción no depende exclusivamente del descenso del pH.

El lactato, lejos de ser únicamente un producto “fatigante”, puede actuar como sustrato energético y molécula señalizadora. Por ello, la fatiga no puede atribuirse de forma simplista a su acumulación.

En ejercicios muy intensos puede aumentar la concentración de amonio, derivado del metabolismo de los nucleótidos, lo que también se ha relacionado con la disminución del rendimiento.

3.3 Alteraciones del pH y función contráctil

La disminución del pH intramuscular puede afectar a la función contráctil al modificar la sensibilidad de las proteínas contráctiles al calcio y al interferir en la cinética de los puentes cruzados entre actina y miosina.

Además, la acidosis puede influir en la liberación y recaptación de Ca^{2+} por el retículo sarcoplásmico, alterando el acoplamiento excitación–contracción. Sin embargo, el papel exacto del pH en la fatiga es complejo y depende del tipo de ejercicio y del nivel de acumulación de metabolitos.

En conjunto, la fatiga metabólica no puede atribuirse a un único factor, sino a la combinación de depleción de sustratos y acumulación de metabolitos que modifican la eficiencia del sistema contráctil.

En el siguiente apartado se analizarán con mayor profundidad las alteraciones iónicas y su influencia en la excitabilidad muscular y en el acoplamiento excitación–contracción, aspectos especialmente relevantes en la fisiología de la fatiga.

4. Fatiga por alteraciones iónicas

Además de los cambios en sustratos energéticos y metabolitos, la fatiga muscular está estrechamente relacionada con alteraciones en los gradientes iónicos que regulan la excitabilidad de la fibra muscular y el acoplamiento excitación–contracción.

Durante el ejercicio intenso o prolongado, los repetidos potenciales de acción y los ciclos de contracción generan modificaciones en las concentraciones intra y extracelulares de distintos iones, especialmente potasio (K^+), sodio (Na^+) y calcio (Ca^{2+}). Estos cambios pueden alterar tanto la propagación del impulso eléctrico como la capacidad de generar fuerza.

4.1 Alteraciones del potasio extracelular

Durante la despolarización repetida de la membrana muscular, el potasio sale al espacio extracelular. En ejercicios de alta intensidad, el aumento de K^+ en el espacio intersticial puede ser significativo.

El incremento del potasio extracelular reduce el gradiente electroquímico necesario para la generación y propagación del potencial de acción. Como consecuencia, disminuye la excitabilidad de la membrana y se dificulta la activación completa de la fibra muscular.

Este mecanismo es especialmente relevante en esfuerzos intermitentes o de alta frecuencia de estimulación, donde la capacidad de restaurar rápidamente los gradientes iónicos puede verse comprometida.

4.2 Alteraciones del sodio

El sodio es esencial para la fase de despolarización del potencial de acción. Durante la actividad repetida, la alteración en el gradiente de Na^+ puede contribuir a una reducción en la amplitud del potencial de acción.

Si la entrada de sodio disminuye o el gradiente se atenúa, la conducción del impulso eléctrico a lo largo de la membrana y de los túbulos T puede verse afectada, lo que repercute directamente en la activación del sistema contráctil.

4.3 Alteraciones del calcio

El calcio es el ion clave en la regulación de la contracción muscular. La liberación de Ca^{2+} desde el retículo sarcoplásmico permite la interacción entre actina y miosina.

Durante la fatiga, pueden producirse dos fenómenos relevantes:

Disminución en la liberación de Ca^{2+} desde el retículo sarcoplásmico, lo que reduce la activación de los puentes cruzados.

Disminución de la sensibilidad de las proteínas contráctiles al Ca^{2+}, especialmente en presencia de acumulación de metabolitos como Pi o cambios en el pH.

Estas alteraciones reducen la fuerza generada por cada estímulo, incluso aunque el potencial de acción llegue correctamente a la fibra muscular.

4.4 Acoplamiento excitación–contracción

El acoplamiento excitación–contracción es el proceso mediante el cual el potencial de acción que viaja por la membrana y los túbulos T se traduce en liberación de calcio y generación de fuerza.

Las alteraciones iónicas descritas pueden afectar diferentes etapas de este proceso:

- Propagación del potencial de acción.
- Activación de los canales dependientes de voltaje.
- Liberación de Ca^{2+}.
- Interacción actina–miosina.

Por tanto, la fatiga por alteraciones iónicas no implica necesariamente la ausencia de estímulo nervioso, sino una disminución en la eficiencia del proceso que convierte la señal eléctrica en fuerza mecánica.

Este mecanismo adquiere especial relevancia en ejercicios de alta intensidad y en situaciones donde la frecuencia de activación muscular es elevada.

En el siguiente apartado se analizará la fatiga neuromuscular, profundizando en la unión neuromuscular y en la propagación del impulso desde la motoneurona hasta la fibra muscular.

5. Fatiga neuromuscular

La fatiga neuromuscular se refiere a las alteraciones que afectan a la transmisión del impulso nervioso desde la motoneurona hasta la fibra muscular y a la propagación del potencial de acción en el propio músculo. Aunque la unión neuromuscular posee un amplio margen de seguridad en condiciones normales, durante ejercicios de elevada intensidad o prolongados pueden producirse modificaciones que disminuyen la eficacia de la activación muscular. Este tipo de fatiga completa el análisis periférico, situándose en la transición entre el sistema nervioso y el músculo esquelético.

5.1 Unión neuromuscular

La unión neuromuscular es el punto de contacto funcional entre el sistema nervioso periférico y la fibra muscular. Cuando el potencial de acción llega al terminal axónico de la motoneurona, se libera acetilcolina hacia la hendidura sináptica. La acetilcolina se une a receptores nicotínicos en la membrana postsináptica, generando el potencial de placa motora que, si alcanza el umbral, desencadena un nuevo potencial de acción en la fibra muscular.

Durante la actividad repetida y de alta frecuencia, pueden producirse alteraciones transitorias en la liberación de acetilcolina debido a la elevada demanda sináptica. Aunque en sujetos sanos este fenómeno rara vez constituye el principal factor limitante del rendimiento, puede contribuir a la reducción progresiva de la activación muscular en condiciones extremas. Asimismo, pequeñas variaciones en la sensibilidad postsináptica pueden influir en la eficacia de la transmisión sináptica.

5.2 Propagación del potencial de acción

Una vez generado el potencial de acción en la fibra muscular, este debe propagarse a lo largo del sarcolema y penetrar en los túbulos T para activar el acoplamiento excitación–contracción. La correcta propagación depende del mantenimiento de los gradientes de sodio y potasio a ambos lados de la membrana.

Durante el ejercicio intenso, las alteraciones en estos gradientes pueden reducir la amplitud y velocidad del potencial de acción, dificultando su conducción. Si la señal eléctrica no se transmite de forma eficaz, la liberación de calcio desde el retículo sarcoplásmico se ve comprometida y disminuye la activación de los puentes cruzados entre actina y miosina.

En consecuencia, la fatiga neuromuscular implica una pérdida progresiva de eficiencia en la conversión del estímulo nervioso en fuerza mecánica. Con este apartado se cierra el bloque de fatiga periférica, dando paso al análisis de los mecanismos centrales que influyen en la regulación del rendimiento durante el ejercicio.

BLOQUE II — FATIGA CENTRAL

Tras analizar los mecanismos periféricos implicados en la fatiga, es necesario abordar los procesos que tienen su origen en el sistema nervioso central. La fatiga central se refiere a la disminución progresiva en la activación voluntaria del músculo como consecuencia de alteraciones en el impulso neural generado a nivel cortical o transmitido a través de las motoneuronas espinales.

A diferencia de la fatiga periférica, donde la limitación se sitúa en el músculo o en los mecanismos de excitación–contracción, en la fatiga central el músculo puede conservar capacidad contráctil residual, pero no recibe una estimulación neural suficiente para desarrollar su máxima fuerza.

6. Fatiga central: concepto y bases fisiológicas

La fatiga central implica una reducción del drive motor voluntario. Esto significa que el sistema nervioso central disminuye progresivamente la frecuencia de descarga o el número de unidades motoras reclutadas durante el ejercicio.

Este fenómeno puede estar relacionado con mecanismos protectores que limitan el daño tisular, con la integración de señales aferentes procedentes del músculo fatigado o con cambios en neurotransmisores implicados en la regulación del estado de alerta y la motivación.

La fatiga central adquiere especial relevancia en ejercicios prolongados, donde la disminución del rendimiento no siempre coincide con un agotamiento energético completo del músculo.

6.1 Disminución del drive motor

El drive motor depende de la actividad de la corteza motora, de las vías descendentes y de la excitabilidad de las motoneuronas espinales. Durante el ejercicio prolongado, puede observarse una reducción progresiva en la activación cortical y en la capacidad de mantener altos niveles de descarga neural.

La información aferente procedente de los músculos activos, especialmente a través de metaborreceptores y mecanorreceptores, puede influir en la excitabilidad de las motoneuronas espinales y modular la activación voluntaria. Este mecanismo contribuye a ajustar la producción de fuerza en función del estado metabólico del músculo.

6.2 Neurotransmisores implicados

Diversos neurotransmisores participan en la regulación de la fatiga central. Entre los más estudiados destacan la serotonina, la dopamina y la noradrenalina.

Un aumento relativo de la actividad serotoninérgica se ha asociado con una mayor percepción de esfuerzo y una reducción de la activación motora. Por el contrario, la dopamina y la noradrenalina se relacionan con el mantenimiento del estado de alerta, la motivación y la capacidad de sostener el esfuerzo.

El equilibrio entre estos sistemas neurotransmisores influye en la tolerancia al ejercicio prolongado y en la aparición de fatiga central.

6.3 Teoría serotoninérgica

La denominada teoría serotoninérgica propone que durante el ejercicio prolongado aumenta la disponibilidad cerebral de triptófano libre, precursor de la serotonina. Este incremento podría favorecer la síntesis de serotonina en el sistema nervioso central y contribuir a la aparición de fatiga.

Se ha planteado que la relación entre triptófano y aminoácidos de cadena ramificada (BCAA) en plasma podría influir en este proceso, ya que compiten por el mismo transportador para atravesar la barrera hematoencefálica.

Aunque esta teoría no explica por sí sola la fatiga central, aporta un marco bioquímico para comprender cómo cambios metabólicos periféricos pueden influir en la regulación neural del rendimiento.

En conjunto, la fatiga central no debe entenderse como un simple “fallo” del sistema nervioso, sino como parte de un proceso regulador que integra señales periféricas, estado metabólico, temperatura, motivación y expectativas del esfuerzo. En los siguientes apartados se analizarán los factores moduladores que influyen sobre estos mecanismos centrales y periféricos.

BLOQUE III — FACTORES MODULADORES

7. Fatiga y temperatura

La temperatura corporal constituye un factor determinante en la aparición de la fatiga durante el ejercicio, especialmente en esfuerzos prolongados o realizados en ambientes calurosos. El aumento de la producción metabólica de calor asociado a la contracción muscular puede superar la capacidad de disipación térmica del organismo, generando hipertermia y afectando al rendimiento físico.

El incremento de la temperatura no solo influye en el músculo, sino también en el sistema nervioso central, en la función cardiovascular y en la percepción del esfuerzo, convirtiéndose en un factor integrador de la fatiga.

7.1 Hipertermia

Durante el ejercicio, aproximadamente el 70-80 % de la energía liberada por el metabolismo se transforma en calor. Cuando la producción de calor supera su eliminación mediante radiación, convección, conducción y evaporación, la temperatura corporal se eleva progresivamente.

La hipertermia puede alterar la función muscular al modificar la actividad enzimática, aumentar el consumo energético y acelerar la aparición de la fatiga metabólica. Sin embargo, uno de los efectos más importantes se produce a nivel central: el aumento de la temperatura cerebral se asocia a una disminución del drive motor voluntario.

Este fenómeno actúa como un mecanismo protector, limitando la intensidad del ejercicio para evitar daños térmicos en el sistema nervioso.

7.2 Estrés térmico

El estrés térmico aparece cuando la carga de calor ambiental dificulta la disipación del calor producido internamente. En estas condiciones, el organismo incrementa la sudoración y el flujo sanguíneo cutáneo para favorecer la pérdida de calor.

La redistribución del flujo sanguíneo hacia la piel puede reducir el aporte de oxígeno al músculo activo, aumentando la carga cardiovascular y acelerando la aparición de fatiga. Además, el aumento de la percepción subjetiva de esfuerzo contribuye a limitar el rendimiento antes de alcanzar un agotamiento metabólico real.

7.3 Flujo sanguíneo cerebral

La temperatura también influye en la perfusión cerebral. En condiciones de hipertermia se producen modificaciones en la regulación del flujo sanguíneo cerebral que pueden afectar a la activación cortical.

La reducción relativa del aporte sanguíneo cerebral y los cambios en neurotransmisores contribuyen a la aparición de fatiga central, manifestándose como dificultad para mantener la intensidad del esfuerzo, disminución de la concentración y aumento de la sensación de agotamiento.

En conjunto, la fatiga inducida por temperatura muestra claramente que el rendimiento no depende únicamente del estado energético del músculo, sino de la integración entre regulación térmica, sistema cardiovascular y control neural del ejercicio. El siguiente apartado analizará otro factor estrechamente relacionado con la termorregulación: la deshidratación.

8. Fatiga y deshidratación

La deshidratación es uno de los factores más importantes en la aparición de la fatiga durante el ejercicio prolongado, especialmente en ambientes calurosos. La pérdida de agua a través del sudor reduce el volumen de líquidos corporales y altera la homeostasis cardiovascular y térmica, lo que repercute directamente en la capacidad de mantener el rendimiento.

A medida que progresa el ejercicio, la combinación de sudoración y aumento de la temperatura corporal genera una disminución progresiva del volumen plasmático. Este fenómeno afecta tanto al transporte de oxígeno y nutrientes como a la regulación de la temperatura y a la función del sistema nervioso.

8.1 Disminución del volumen plasmático

La pérdida de líquidos corporales reduce el volumen sanguíneo circulante. Como consecuencia, disminuye el retorno venoso y el volumen sistólico, lo que obliga al organismo a aumentar la frecuencia cardíaca para mantener el gasto cardíaco.

Esta respuesta cardiovascular incrementa el coste fisiológico del ejercicio y acelera la aparición de la fatiga. Además, la menor disponibilidad de volumen plasmático compromete la capacidad de disipar calor mediante la sudoración y el flujo cutáneo.

8.2 Perfusión muscular

La reducción del volumen circulante también afecta a la perfusión del músculo activo. El menor flujo sanguíneo limita el aporte de oxígeno y la eliminación de metabolitos, favoreciendo la acumulación de productos metabólicos asociados a la fatiga periférica.

Al mismo tiempo, la competencia entre la piel (termorregulación) y el músculo (metabolismo) por el flujo sanguíneo disponible incrementa la carga cardiovascular y contribuye a la disminución progresiva del rendimiento.

8.3 Alteraciones cardiovasculares y centrales

La deshidratación no solo afecta al músculo, sino también al sistema nervioso central. La reducción del volumen plasmático y el aumento de la temperatura corporal influyen en la perfusión cerebral y en la percepción del esfuerzo.

Se produce un aumento de la sensación de cansancio y una reducción del drive motor, lo que limita la intensidad del ejercicio antes de alcanzar un agotamiento metabólico completo. Este fenómeno pone de manifiesto el carácter integrador de la fatiga, donde factores cardiovasculares, térmicos y centrales actúan de forma simultánea.

En conjunto, la deshidratación acelera la aparición de fatiga tanto periférica como central, siendo un factor clave en ejercicios de larga duración. El siguiente apartado abordará otro elemento modulador relevante: el daño muscular asociado al ejercicio.

9. Fatiga y daño muscular

Además de los factores metabólicos, térmicos y cardiovasculares, el daño estructural del músculo constituye un importante modulador de la fatiga, especialmente en ejercicios que incluyen contracciones excéntricas o esfuerzos de alta tensión mecánica. A diferencia de la fatiga metabólica, que aparece durante el ejercicio y es reversible en corto tiempo, el daño muscular puede prolongar la pérdida de rendimiento durante horas o días.

El daño muscular implica alteraciones estructurales en las fibras musculares y en el tejido conectivo asociado, generando respuestas inflamatorias y modificaciones en la activación neuromuscular.

9.1 Contracción excéntrica

Las contracciones excéntricas, en las que el músculo se alarga mientras produce tensión, generan elevadas fuerzas mecánicas sobre los sarcómeros. Este tipo de contracción puede provocar desalineación de miofilamentos, microroturas en las fibras musculares y alteraciones en la membrana celular.

Como consecuencia, disminuye la capacidad de generar fuerza y se altera el acoplamiento excitación–contracción, ya que se ve afectada la liberación y sensibilidad al calcio dentro de la fibra muscular.

9.2 Dolor muscular de aparición tardía (DOMS)

Tras ejercicios no habituales o con elevada componente excéntrica, aparece el dolor muscular de aparición tardía (DOMS), generalmente entre 24 y 72 horas después del esfuerzo.

Este fenómeno se asocia a microlesiones estructurales y a la respuesta inflamatoria posterior. El dolor reduce la activación voluntaria del músculo y modifica los patrones de movimiento, contribuyendo a la sensación de fatiga y a la disminución del rendimiento en días posteriores.

9.3 Inflamación y alteraciones neuromusculares

El daño muscular activa procesos inflamatorios locales caracterizados por la liberación de mediadores químicos y la infiltración de células inmunitarias. Estos procesos sensibilizan receptores aferentes musculares, aumentando la percepción de esfuerzo y modulando la activación del sistema nervioso central.

Además, la inflamación puede alterar la conducción del impulso nervioso y la capacidad contráctil del músculo, prolongando la fatiga más allá de la finalización del ejercicio.

En conjunto, el daño muscular representa una forma de fatiga diferida que combina alteraciones periféricas estructurales y modulaciones centrales. Con este apartado se completa el bloque de factores moduladores y se pasa al análisis de la fatiga en función del tipo de ejercicio realizado.

BLOQUE IV — FATIGA SEGÚN TIPO DE EJERCICIO

10. Fatiga en ejercicio de alta intensidad y corta duración

En los ejercicios de muy alta intensidad y corta duración, la fatiga aparece rápidamente y está dominada principalmente por mecanismos periféricos, especialmente metabólicos e iónicos. Este tipo de esfuerzo depende en gran medida de los sistemas energéticos anaeróbicos y de la capacidad del músculo para generar fuerza máxima en un tiempo breve.

La limitación del rendimiento no suele estar relacionada con el agotamiento completo del ATP, sino con la incapacidad de mantener su resíntesis a la velocidad requerida y con las alteraciones asociadas al metabolismo anaeróbico.

10.1 Depleción de fosfocreatina

Durante los primeros segundos del ejercicio intenso, la principal fuente de resíntesis de ATP es la fosfocreatina (PCr). La rápida degradación de PCr permite mantener la contracción muscular a máxima potencia, pero sus reservas son limitadas.

Cuando la concentración de PCr disminuye de forma significativa, la velocidad de resíntesis de ATP se reduce, lo que provoca una caída inmediata en la capacidad de generar potencia. Este es uno de los principales factores limitantes en esfuerzos máximos de corta duración, como sprints o levantamientos explosivos.

10.2 Glucólisis anaeróbica y acumulación de metabolitos

Al agotarse parcialmente la PCr, aumenta la contribución de la glucólisis anaeróbica. Este proceso permite seguir produciendo ATP rápidamente, pero genera acumulación de metabolitos asociados a la fatiga, como protones (H^+), fosfato inorgánico y ADP.

El aumento de estos metabolitos altera la función contráctil, disminuye la eficiencia de los puentes cruzados y reduce la liberación de calcio desde el retículo sarcoplásmico.

10.3 Acidosis y alteraciones contráctiles

La acumulación de protones provoca una disminución del pH intramuscular. Este descenso del pH reduce la sensibilidad de las proteínas contráctiles al calcio y dificulta la interacción entre actina y miosina.

Además, las alteraciones iónicas asociadas a la actividad repetida afectan la excitabilidad de la membrana muscular, contribuyendo a la rápida pérdida de fuerza.

En conjunto, la fatiga en ejercicios de alta intensidad y corta duración se caracteriza por una limitación predominantemente periférica, en la que la rápida alteración del equilibrio metabólico

e iónico impide mantener la producción de fuerza máxima durante más de unos pocos segundos. El siguiente apartado analizará la fatiga en ejercicios de resistencia, donde predominan mecanismos diferentes y más progresivos.

11. Fatiga en ejercicio de resistencia

En los ejercicios de larga duración y moderada intensidad, la fatiga aparece de forma progresiva y responde a un conjunto de mecanismos distintos a los observados en esfuerzos máximos. En este tipo de actividad no predomina una limitación única, sino la interacción entre factores metabólicos, iónicos, térmicos y centrales.

El rendimiento depende en gran medida de la capacidad de mantener el suministro energético y la homeostasis interna durante periodos prolongados.

11.1 Depleción de glucógeno

Uno de los factores más determinantes es la disminución progresiva de las reservas de glucógeno, especialmente en el músculo activo. A medida que las reservas se reducen, disminuye la capacidad de mantener la intensidad del ejercicio y aumenta la dependencia del metabolismo lipídico, que presenta una menor velocidad de producción de ATP.

La reducción del glucógeno hepático también contribuye a la aparición de fatiga, ya que dificulta el mantenimiento de la glucemia. Cuando la disponibilidad de glucosa para el sistema nervioso central disminuye, se incrementa la percepción de esfuerzo y aparece fatiga central.

11.2 Fatiga central progresiva

En ejercicios prolongados adquiere gran importancia la fatiga central. La información aferente procedente del músculo, los cambios metabólicos y la temperatura corporal influyen en la activación del sistema nervioso central, reduciendo gradualmente el drive motor.

El aumento de la percepción del esfuerzo, los cambios en neurotransmisores y la disminución del estado de alerta contribuyen a la reducción voluntaria de la intensidad, incluso antes de que el músculo alcance un agotamiento completo.

11.3 Alteraciones iónicas sostenidas

Durante la actividad prolongada también se producen alteraciones iónicas mantenidas que afectan a la excitabilidad muscular y al acoplamiento excitación–contracción. Aunque menos abruptas que en ejercicios máximos, estas modificaciones contribuyen a la disminución progresiva de la fuerza y de la eficiencia mecánica.

En conjunto, la fatiga en ejercicios de resistencia es el resultado de un proceso multifactorial donde la depleción de sustratos energéticos, la regulación central del esfuerzo y la pérdida progresiva de eficiencia muscular actúan de forma simultánea. El siguiente apartado analizará la fatiga en ejercicios intermitentes, donde coexisten fases de esfuerzo y recuperación incompleta.

12. Fatiga en ejercicio intermitente

Los ejercicios intermitentes combinan fases repetidas de esfuerzo de alta intensidad con periodos breves de recuperación incompleta, como ocurre en muchos deportes colectivos. Este patrón genera un tipo de fatiga característico en el que coexisten mecanismos propios del ejercicio intenso y del ejercicio prolongado.

La capacidad de repetir acciones de alta intensidad depende tanto de la velocidad de recuperación metabólica como de la regulación neural del esfuerzo.

12.1 Recuperación incompleta

Durante las pausas entre esfuerzos, se produce una resíntesis parcial de fosfocreatina y una eliminación incompleta de metabolitos. Si el tiempo de recuperación es insuficiente, la concentración de PCr disminuye progresivamente a lo largo de las repeticiones y se acumulan fosfato inorgánico y protones.

Como consecuencia, cada nuevo esfuerzo comienza desde un estado metabólico menos favorable, reduciéndose la potencia desarrollada. Además, la acumulación progresiva de alteraciones iónicas afecta la excitabilidad muscular y la capacidad de generar fuerza rápida.

12.2 Papel del sistema nervioso

El sistema nervioso central también participa activamente en este tipo de fatiga. La repetición de esfuerzos intensos incrementa la percepción del esfuerzo y modifica la estrategia de reclutamiento motor. El organismo ajusta de forma progresiva la intensidad de cada acción para poder sostener el rendimiento global.

La información aferente procedente del músculo, junto con factores motivacionales y cognitivos, influye en la capacidad de mantener la frecuencia de acciones explosivas. De este modo, la fatiga en ejercicios intermitentes resulta de la interacción entre limitaciones periféricas acumulativas y regulación central del esfuerzo.

BLOQUE V — ADAPTACIONES Y APLICACIÓN

13. Adaptaciones al entrenamiento y fatiga

El entrenamiento sistemático modifica de forma significativa los mecanismos responsables de la fatiga. Más que eliminarla, el organismo desarrolla adaptaciones que retrasan su aparición y permiten mantener una mayor intensidad de ejercicio durante más tiempo. Estas adaptaciones afectan tanto a los componentes periféricos musculares como a la regulación central del esfuerzo.

En general, el sujeto entrenado no evita los procesos fisiológicos asociados a la fatiga, sino que mejora la tolerancia a las alteraciones metabólicas, iónicas y neurales que la producen.

13.1 Mayor capacidad amortiguadora (buffer)

El entrenamiento, especialmente el de alta intensidad, aumenta la capacidad del músculo para tolerar la acumulación de protones. Se incrementa la concentración de sistemas tampón intracelulares y mejora el transporte de iones a través de la membrana.

Como consecuencia, el descenso del pH intramuscular afecta menos a la contracción y se retrasa la aparición de fatiga en esfuerzos intensos.

13.2 Mejor manejo del calcio

El entrenamiento induce adaptaciones en el retículo sarcoplásmico que mejoran la liberación y recaptación de Ca^{2+}. Esto permite mantener la eficacia del acoplamiento excitación–contracción durante más tiempo.

Además, aumenta la sensibilidad de las proteínas contráctiles al calcio, lo que favorece la generación de fuerza incluso en condiciones de acumulación de metabolitos.

13.3 Mayor densidad mitocondrial

El entrenamiento de resistencia incrementa el número y la eficiencia de las mitocondrias. Este cambio mejora la producción aeróbica de ATP, reduce la dependencia de la glucólisis anaeróbica y disminuye la acumulación de metabolitos asociados a la fatiga.

También se favorece el uso de lípidos como fuente energética, preservando el glucógeno muscular y retrasando la fatiga en ejercicios prolongados.

13.4 Cambios en excitabilidad y control neural

El entrenamiento modifica la activación neuromuscular y la coordinación entre unidades motoras. Se optimiza el reclutamiento, disminuye la coactivación innecesaria y mejora la eficiencia mecánica.

A nivel central, el sujeto entrenado tolera mejor la percepción del esfuerzo y puede mantener niveles elevados de activación motora durante más tiempo.

En conjunto, las adaptaciones al entrenamiento retrasan la aparición de fatiga mediante mejoras metabólicas, estructurales y neurales. El siguiente apartado abordará las aplicaciones prácticas derivadas de estos conocimientos para la planificación del entrenamiento y la recuperación.

14. Aplicaciones prácticas

El conocimiento de los mecanismos fisiológicos de la fatiga permite trasladar la teoría a la planificación del entrenamiento y a la optimización del rendimiento. La fatiga no debe considerarse únicamente como una limitación, sino también como una señal que orienta la dosificación de las cargas y la recuperación.

14.1 Estrategias nutricionales

La disponibilidad de sustratos energéticos es un factor clave para retrasar la fatiga. Mantener niveles adecuados de glucógeno muscular y hepático mediante una correcta ingesta de hidratos de carbono permite sostener la intensidad del ejercicio en esfuerzos prolongados.

Durante actividades de larga duración, el aporte de carbohidratos ayuda a mantener la glucemia y reduce la aparición de fatiga central. Asimismo, la adecuada hidratación contribuye a preservar el volumen plasmático y la termorregulación.

14.2 Recuperación

La recuperación debe permitir la restauración de los sistemas energéticos, la eliminación de metabolitos y la reparación tisular. El descanso entre sesiones, el sueño adecuado y las estrategias de recuperación activa favorecen la resíntesis de fosfocreatina, la reposición de glucógeno y la normalización de la función neuromuscular.

Una recuperación insuficiente favorece la acumulación de fatiga y puede comprometer la adaptación al entrenamiento.

14.3 Diseño del entrenamiento

La programación de las cargas debe considerar los distintos mecanismos de fatiga. Los ejercicios de alta intensidad desarrollan la tolerancia metabólica, mientras que el entrenamiento de resistencia mejora la eficiencia energética y retrasa la fatiga central.

La alternancia adecuada entre estímulo y recuperación permite generar adaptaciones sin provocar una acumulación excesiva de fatiga.

14.4 Prevención del sobreentrenamiento

El sobreentrenamiento aparece cuando la carga supera de forma sostenida la capacidad de recuperación. Se caracteriza por disminución del rendimiento, alteraciones del estado de ánimo y cambios fisiológicos persistentes.

La monitorización de la percepción del esfuerzo, el rendimiento y el estado general del deportista ayuda a detectar precozmente situaciones de fatiga excesiva. Ajustar las cargas y respetar los periodos de recuperación es fundamental para prevenirlo.

Bibliografía

Allen DG, Lamb GD, Westerblad H. Skeletal muscle fatigue: cellular mechanisms. *Physiol Rev*. 2008;88:287-332.

Egan B, Sharples AP. Molecular responses to acute exercise and their relevance for adaptations in skeletal muscle to exercise training. Physiol Rev. 2023;103(3):2057-2170.

Fox SI. Fisiología Humana. 15ª ed. McGraw-Hill Interamericana; 2021.

Katch VL, MacArdle WD, Katch FI. *Fisiología Del Ejercicio : "Fundamentos"*. 4ª ed. Editorial Médica Panamericana; 2014.

López Chicharro J, Fernández Vaquero A. *Fisiología Del Ejercicio*. 4a ed. Editorial Médica Panamericana; 2023.

Nielsen J, Holmberg HC, Schrøder HD, Saltin B, Ortenblad N. Human skeletal muscle glycogen utilization in exhaustive exercise: role of subcellular localization and fibre type. J Physiol. 2011;589(Pt 11):2871-2885.

Morales-Alamo D, Losa-Reyna J, Torres-Peralta R, et al. What limits performance during whole-body incremental exercise to exhaustion in humans? *J Physiol*. 2015;593(20):4631-4648.

Silverthorn DU. *Fisiología Humana Un Enfoque Integrado*. Ed. 8. Editorial Médica Panamericana; 2019

Wilmore JH, Kenney WL, Costill DL. *Fisiología del Deporte y el Ejercicio*. 5th ed. Editorial Médica Panamericana; 2014.

BLOQUE III.

SISTEMAS DE APOYO DURANTE EL EJERCICIO

ÍNDICE DE BLOQUE III

Tema 9. Sistema cardiovascular

Tema 10. Sistema pulmonar

Tema 11. La sangre y el sistema inmunológico

Tema 12. Fisiología del entrenamiento aeróbico y anaeróbico

Tema 9. Sistema Cardiovascular

1. Introducción al sistema cardiovascular

El sistema cardiovascular desempeña un papel esencial en el mantenimiento de la homeostasis del organismo y adquiere una relevancia aún mayor durante la práctica de ejercicio físico. Su función principal consiste en asegurar el transporte adecuado de oxígeno, nutrientes, hormonas y otras sustancias hacia los tejidos activos, así como la eliminación de dióxido de carbono y productos metabólicos derivados de la actividad celular. Durante el ejercicio, estas funciones deben ajustarse de manera rápida y precisa para satisfacer el incremento de las demandas metabólicas, especialmente del músculo esquelético.

Desde un punto de vista funcional, el sistema cardiovascular actúa como un sistema de distribución que conecta el medio externo (a través del sistema respiratorio) con el medio interno, permitiendo que el oxígeno inspirado llegue a las mitocondrias y que el dióxido de carbono producido por el metabolismo oxidativo sea eliminado. De este modo, el rendimiento del sistema cardiovascular condiciona de forma directa la capacidad del organismo para sostener el ejercicio, en especial aquel de carácter aeróbico.

Además del transporte de gases respiratorios, el sistema cardiovascular interviene en otras funciones fundamentales durante el ejercicio. Entre ellas destacan la distribución de sustratos energéticos (glucosa, ácidos grasos), el transporte de hormonas implicadas en la regulación metabólica y cardiovascular, y la disipación del calor generado por la contracción muscular, contribuyendo así al control de la temperatura corporal. Estas funciones ponen de manifiesto que el sistema cardiovascular no actúa de forma aislada, sino integrado con los sistemas respiratorio, endocrino, renal y nervioso.

El ejercicio físico supone un estímulo fisiológico que altera el equilibrio del medio interno. Frente a este desafío, el sistema cardiovascular responde mediante ajustes agudos que permiten aumentar el flujo sanguíneo total y redistribuirlo hacia los tejidos más activos, al tiempo que se mantiene una presión arterial adecuada para garantizar la perfusión de órganos vitales como el cerebro y el corazón. Estos ajustes se producen gracias a mecanismos de regulación neural, hormonal y local que actúan de manera coordinada.

Desde una perspectiva aplicada a las ciencias del deporte, el sistema cardiovascular es uno de los principales factores limitantes del rendimiento aeróbico. La capacidad para aumentar el gasto cardiaco, distribuir eficazmente el flujo sanguíneo y mantener un transporte adecuado de oxígeno condiciona variables clave como el consumo máximo de oxígeno ($VO_{2máx}$) y la tolerancia al ejercicio prolongado. Por este motivo, el estudio de la fisiología cardiovascular constituye un pilar fundamental para comprender tanto la respuesta aguda al ejercicio como las adaptaciones inducidas por el entrenamiento.

Es importante diferenciar entre los conceptos de respuesta y adaptación cardiovascular. La respuesta cardiovascular al ejercicio hace referencia a los cambios inmediatos y transitorios que se producen durante y después de una sesión de ejercicio, como el aumento de la frecuencia cardiaca o del gasto cardiaco. En cambio, la adaptación cardiovascular implica modificaciones estructurales y funcionales que se desarrollan como consecuencia de la exposición repetida al ejercicio, especialmente mediante el entrenamiento sistemático. El análisis de las respuestas agudas resulta imprescindible para entender el origen de las adaptaciones crónicas que se abordarán en otros temas de la asignatura.

En este contexto, el objetivo de este tema es analizar de forma integrada el funcionamiento del sistema cardiovascular durante el ejercicio físico, comenzando por una visión general de su organización y funciones, para posteriormente profundizar en los mecanismos de regulación y en las respuestas cardiovasculares que se producen ante el esfuerzo. Este enfoque permitirá comprender cómo el sistema cardiovascular contribuye al rendimiento físico y cómo se ve modificado en función de la intensidad del ejercicio, el tipo de actividad y las características del individuo.

2. Componentes estructurales del sistema cardiovascular

El sistema cardiovascular está constituido por tres componentes principales: el corazón, los vasos sanguíneos y la sangre. La interacción funcional entre estos elementos permite el transporte eficaz de sustancias y el mantenimiento de la homeostasis tanto en reposo como durante el ejercicio físico. Aunque cada componente presenta características estructurales específicas, su funcionamiento debe entenderse de manera integrada para comprender la respuesta cardiovascular al esfuerzo.

2.1. El corazón como bomba central

El corazón es un órgano muscular que actúa como una bomba doble, formada por dos circuitos funcionales: la circulación pulmonar y la circulación sistémica. La porción derecha del corazón impulsa la sangre hacia los pulmones para el intercambio gaseoso, mientras que la porción izquierda se encarga de distribuir la sangre oxigenada al resto del organismo. Esta organización permite que ambos circuitos funcionen en serie, asegurando que todo el gasto cardiaco pase primero por los pulmones antes de ser distribuido a los tejidos.

Desde el punto de vista funcional, el corazón genera la presión necesaria para impulsar la sangre a través del sistema vascular. La cantidad de sangre expulsada por cada ventrículo en un latido (volumen sistólico) y el número de latidos por minuto (frecuencia cardiaca) determinan el gasto cardiaco, que representa el volumen total de sangre bombeado por minuto. Durante el ejercicio, el incremento del gasto cardiaco constituye uno de los ajustes cardiovasculares más importantes para satisfacer el aumento de las demandas metabólicas del organismo.

2.2. Los vasos sanguíneos y la circulación

Los vasos sanguíneos forman una red cerrada de conductos a través de los cuales circula la sangre desde el corazón hacia los tejidos y de regreso al corazón. En función de su estructura y función, se distinguen varios tipos de vasos: arterias, arteriolas, capilares, vénulas y venas.

Las arterias transportan la sangre desde el corazón hacia la periferia y se caracterizan por soportar presiones elevadas. Su estructura elástica permite amortiguar las variaciones de presión generadas por la eyección intermitente del corazón. A medida que las arterias se ramifican, dan lugar a las arteriolas, que desempeñan un papel clave en la regulación del flujo sanguíneo regional y de la resistencia periférica total. Durante el ejercicio, los cambios en el tono de las arteriolas permiten redistribuir el flujo sanguíneo hacia los músculos activos.

Los capilares son los vasos sanguíneos más pequeños y numerosos, y constituyen el principal sitio de intercambio entre la sangre y los tejidos. A través de sus paredes delgadas se produce la difusión de oxígeno, dióxido de carbono, nutrientes y productos de desecho. El incremento del flujo sanguíneo capilar en el músculo esquelético durante el ejercicio facilita el aumento del suministro de oxígeno y sustratos energéticos necesarios para la contracción muscular.

Las vénulas y las venas recogen la sangre procedente de los capilares y la devuelven al corazón. Las venas presentan una alta capacidad de almacenamiento de sangre y desempeñan un papel relevante en el retorno venoso. Durante el ejercicio, la contracción rítmica de los músculos esqueléticos y los cambios en la presión intratorácica favorecen el retorno venoso, contribuyendo al mantenimiento del gasto cardiaco.

2.3. La sangre como medio de transporte

La sangre es un tejido líquido que actúa como medio de transporte de gases respiratorios, nutrientes, hormonas y productos metabólicos. Está compuesta por una fracción líquida, el plasma, y por elementos formes, entre los que destacan los eritrocitos, los leucocitos y las plaquetas.

Desde el punto de vista del ejercicio, los eritrocitos adquieren especial relevancia debido a su función en el transporte de oxígeno. La hemoglobina contenida en los eritrocitos permite la captación de oxígeno en los pulmones y su liberación en los tejidos periféricos. La cantidad de hemoglobina y el volumen sanguíneo total influyen de manera directa en la capacidad de transporte de oxígeno del organismo, y, por tanto, en el rendimiento aeróbico.

El plasma sanguíneo contiene agua, electrolitos, proteínas y otras sustancias disueltas. Entre las proteínas plasmáticas, la albúmina desempeña un papel importante en el mantenimiento del volumen plasmático y de la presión oncótica, lo que resulta fundamental para conservar un volumen circulante adecuado durante el ejercicio, especialmente en situaciones de deshidratación o esfuerzo prolongado.

2.4. Integración funcional de los componentes cardiovasculares

El funcionamiento eficaz del sistema cardiovascular depende de la integración entre el corazón, los vasos sanguíneos y la sangre. Durante el ejercicio, esta integración permite aumentar el flujo sanguíneo total, redistribuirlo hacia los tejidos activos y optimizar el transporte de oxígeno y nutrientes. Cualquier limitación en uno de estos componentes puede comprometer la respuesta cardiovascular global y reducir la capacidad del organismo para sostener el esfuerzo físico.

La comprensión de los componentes estructurales del sistema cardiovascular constituye la base para el análisis de los mecanismos de regulación y de las respuestas cardiovasculares al ejercicio, que se desarrollarán en los siguientes apartados.

3. Regulación del funcionamiento cardiovascular

El funcionamiento del sistema cardiovascular está regulado por un conjunto de mecanismos que permiten ajustar de forma precisa el flujo sanguíneo y la presión arterial en función de las necesidades del organismo. Durante el ejercicio físico, estos mecanismos adquieren una importancia fundamental, ya que deben responder de manera rápida y coordinada al aumento de la demanda metabólica de los tejidos activos, especialmente del músculo esquelético.

La regulación cardiovascular puede analizarse desde tres niveles complementarios: la regulación neural, la regulación hormonal y la regulación intrínseca o local. La integración de estos

mecanismos permite mantener un gasto cardiaco adecuado, asegurar la perfusión de órganos vitales y optimizar la distribución del flujo sanguíneo durante el esfuerzo.

3.1. Regulación neural del sistema cardiovascular

La regulación neural del sistema cardiovascular se ejerce principalmente a través del sistema nervioso autónomo, que actúa sobre el corazón y los vasos sanguíneos mediante fibras simpáticas y parasimpáticas. Estos sistemas ejercen efectos opuestos y complementarios que permiten un control fino de la frecuencia cardiaca, la contractilidad miocárdica y el tono vascular.

En condiciones de reposo, el corazón se encuentra bajo un predominio del tono parasimpático, mediado fundamentalmente por el nervio vago. Esta influencia parasimpática reduce la frecuencia cardiaca por debajo del ritmo intrínseco del nodo sinoauricular. Durante el inicio del ejercicio, el aumento de la frecuencia cardiaca se produce inicialmente por una retirada progresiva de la inhibición vagal. A intensidades más elevadas, la activación del sistema nervioso simpático adquiere un papel predominante, incrementando aún más la frecuencia cardiaca y la fuerza de contracción del miocardio.

La estimulación simpática cardíaca se ejerce principalmente mediante la liberación de noradrenalina desde las terminaciones nerviosas simpáticas y de adrenalina desde la médula suprarrenal, las cuales actúan sobre los receptores β_1-adrenérgicos. Esta activación provoca un aumento de la velocidad de despolarización del nodo sinoauricular —efecto cronotrópico positivo— y un incremento de la contractilidad ventricular —efecto inotrópico positivo—, contribuyendo al aumento del gasto cardíaco durante el ejercicio.

A nivel vascular, la activación simpática produce vasoconstricción en la mayoría de los territorios, especialmente en órganos no activos durante el ejercicio. Esta respuesta contribuye al mantenimiento de la presión arterial y facilita la redistribución del flujo sanguíneo hacia el músculo esquelético activo. No obstante, en los músculos en ejercicio, los efectos vasoconstrictores simpáticos pueden verse atenuados por mecanismos locales, lo que permite una vasodilatación funcional adecuada.

El control neural del sistema cardiovascular se integra a nivel central en los centros cardiovasculares del tronco encefálico, que reciben información aferente procedente de diversos receptores periféricos, como los barorreceptores y los quimiorreceptores. Esta información permite ajustar la respuesta cardiovascular en función de cambios en la presión arterial, la composición de la sangre y el nivel de actividad física.

3.2. Regulación hormonal del sistema cardiovascular

La regulación hormonal complementa y refuerza la acción del sistema nervioso autónomo, especialmente durante el ejercicio prolongado o de alta intensidad. Entre las hormonas con mayor influencia sobre el sistema cardiovascular destacan las catecolaminas, liberadas por la médula suprarrenal en respuesta al ejercicio.

La adrenalina y la noradrenalina circulantes potencian los efectos simpáticos sobre el corazón, aumentando la frecuencia cardiaca y la contractilidad. A nivel vascular, estas hormonas contribuyen a la vasoconstricción en determinados territorios y favorecen la redistribución del flujo sanguíneo. Además, las catecolaminas participan en la regulación metabólica, facilitando la movilización de sustratos energéticos necesarios para la contracción muscular.

Otras hormonas, como la vasopresina y el sistema renina-angiotensina-aldosterona, desempeñan un papel relevante en el mantenimiento del volumen plasmático y de la presión arterial, especialmente en situaciones de ejercicio prolongado o asociado a pérdidas significativas de

líquidos. Estos mecanismos hormonales ayudan a preservar la estabilidad del sistema cardiovascular frente al estrés fisiológico inducido por el ejercicio.

3.3. Regulación intrínseca y mecanismos locales

Además de la regulación neural y hormonal, el sistema cardiovascular posee mecanismos intrínsecos que permiten adaptar el flujo sanguíneo de forma local en función de las necesidades metabólicas de los tejidos. Estos mecanismos resultan especialmente importantes en el músculo esquelético durante el ejercicio.

A nivel cardiaco, el corazón presenta un automatismo propio que le permite generar impulsos eléctricos de forma espontánea. Este automatismo, originado en el nodo sinoauricular, constituye la base del ritmo cardiaco y puede ser modulado por influencias externas, pero no depende de ellas para su funcionamiento básico.

En los vasos sanguíneos, los mecanismos locales de regulación incluyen factores metabólicos y mecánicos. El aumento de la concentración de metabolitos como el dióxido de carbono, los iones hidrógeno y otros productos del metabolismo muscular favorece la vasodilatación local, incrementando el flujo sanguíneo hacia las fibras musculares activas. Asimismo, el aumento del flujo sanguíneo produce cambios en la tensión de la pared vascular que pueden inducir respuestas vasodilatadoras adicionales.

Estos mecanismos locales permiten que, durante el ejercicio, el flujo sanguíneo se ajuste de manera precisa a las necesidades metabólicas del tejido activo, incluso frente a una activación simpática generalizada. De este modo, se garantiza un aporte adecuado de oxígeno y nutrientes al músculo en ejercicio sin comprometer la perfusión de órganos esenciales.

3.4. Integración de los mecanismos de regulación cardiovascular

La regulación del funcionamiento cardiovascular durante el ejercicio resulta de la integración dinámica de los mecanismos neurales, hormonales e intrínsecos. Esta integración permite una respuesta cardiovascular eficaz, caracterizada por un aumento del gasto cardiaco, una redistribución adecuada del flujo sanguíneo y el mantenimiento de una presión arterial compatible con el esfuerzo físico.

El análisis de estos mecanismos de regulación constituye la base para comprender las respuestas cardiovasculares al ejercicio agudo, que se abordarán en el siguiente apartado, donde se analizará de forma detallada cómo varían las principales variables cardiovasculares en función de la intensidad y las características del ejercicio.

4. Variables cardiovasculares fundamentales

El análisis de la respuesta del sistema cardiovascular al ejercicio requiere el estudio de una serie de variables fundamentales que describen el funcionamiento del corazón y del sistema vascular. Estas variables están estrechamente interrelacionadas y su comportamiento conjunto determina la capacidad del organismo para transportar oxígeno y nutrientes hacia los tejidos activos durante el esfuerzo físico. Entre las principales variables cardiovasculares destacan la frecuencia cardiaca, el volumen sistólico, el gasto cardiaco, la presión arterial, el retorno venoso y la distribución del flujo sanguíneo.

4.1. Frecuencia cardiaca

La frecuencia cardiaca (FC) se define como el número de latidos del corazón por minuto y constituye una de las variables cardiovasculares más fácilmente medibles y más utilizadas en el

ámbito del ejercicio físico. Desde un punto de vista fisiológico, la FC refleja la actividad del nodo sinoauricular y su modulación por los sistemas de regulación neural y hormonal.

En reposo, la frecuencia cardiaca está determinada principalmente por el equilibrio entre la actividad simpática y parasimpática, predominando habitualmente el tono vagal. Durante el ejercicio, la FC aumenta de forma progresiva en función de la intensidad del esfuerzo. Este incremento se debe inicialmente a la retirada de la inhibición parasimpática y, a intensidades más elevadas, al aumento de la activación simpática.

La relación entre la frecuencia cardiaca y la intensidad del ejercicio suele ser aproximadamente lineal durante ejercicios incrementales, hasta alcanzar un valor máximo conocido como frecuencia cardiaca máxima. Este parámetro presenta una elevada variabilidad interindividual y depende fundamentalmente de la edad, aunque el entrenamiento puede modificar la respuesta submáxima de la FC para una determinada carga de trabajo.

4.2. Volumen sistólico

El volumen sistólico (VS) es la cantidad de sangre expulsada por el ventrículo en cada latido. Esta variable depende de varios factores, entre los que destacan el volumen telediastólico, el volumen telesistólico, la contractilidad miocárdica y la postcarga.

Durante el ejercicio, el volumen sistólico suele aumentar desde el reposo hasta intensidades moderadas como consecuencia de un mayor llenado ventricular y de un incremento de la contractilidad cardiaca. El aumento del llenado ventricular se ve favorecido por el incremento del retorno venoso, asociado a la acción de la bomba muscular, la bomba respiratoria y la vasoconstricción venosa simpática.

A intensidades elevadas de ejercicio, el comportamiento del volumen sistólico puede variar en función del nivel de entrenamiento y de las características del individuo. En sujetos no entrenados, el volumen sistólico tiende a estabilizarse o alcanzar una meseta, mientras que en individuos entrenados puede continuar aumentando a intensidades más altas, contribuyendo de forma significativa al incremento del gasto cardiaco.

4.3. Gasto cardiaco

El gasto cardiaco (GC) representa el volumen de sangre bombeado por el corazón por unidad de tiempo y se calcula como el producto de la frecuencia cardiaca y el volumen sistólico. Esta variable constituye uno de los principales determinantes del transporte de oxígeno durante el ejercicio.

En reposo, el gasto cardiaco es relativamente bajo, pero durante el ejercicio puede aumentar de forma considerable para satisfacer las demandas metabólicas del organismo. El incremento del gasto cardiaco se produce inicialmente por el aumento simultáneo de la frecuencia cardiaca y del volumen sistólico. A intensidades elevadas, el aumento adicional del gasto cardiaco depende principalmente del incremento de la frecuencia cardiaca, especialmente cuando el volumen sistólico se estabiliza.

El valor máximo de gasto cardiaco alcanzable durante el ejercicio está estrechamente relacionado con el nivel de entrenamiento aeróbico y constituye un factor clave del rendimiento en actividades de resistencia.

4.4. Presión arterial

La presión arterial (PA) es la fuerza que ejerce la sangre sobre las paredes de los vasos sanguíneos y resulta del producto del gasto cardiaco y la resistencia periférica total. Se expresa habitualmente mediante dos valores: la presión arterial sistólica y la presión arterial diastólica.

Durante el ejercicio dinámico, la presión arterial sistólica aumenta de forma progresiva como consecuencia del incremento del gasto cardiaco. En cambio, la presión arterial diastólica suele mantenerse estable o experimentar ligeras variaciones, debido a la reducción de la resistencia periférica total asociada a la vasodilatación en los músculos activos.

El mantenimiento de una presión arterial adecuada durante el ejercicio es esencial para garantizar la perfusión de los órganos vitales. Este equilibrio se logra mediante la interacción entre los mecanismos de regulación neural, hormonal y local que modulan tanto el gasto cardiaco como el tono vascular.

4.5. Retorno venoso

El retorno venoso se refiere al volumen de sangre que regresa al corazón por unidad de tiempo y constituye un determinante fundamental del llenado ventricular y del volumen sistólico. Durante el ejercicio, el retorno venoso aumenta de forma significativa debido a varios mecanismos.

La contracción rítmica de los músculos esqueléticos actúa como una bomba muscular que impulsa la sangre hacia el corazón, mientras que los cambios en la presión intratorácica durante la respiración facilitan el flujo venoso. Además, la activación simpática provoca una vasoconstricción venosa que reduce la capacidad de almacenamiento de las venas y favorece el desplazamiento de sangre hacia el corazón.

El aumento del retorno venoso durante el ejercicio contribuye al incremento del volumen telediastólico y, a través del mecanismo de Frank-Starling, al aumento del volumen sistólico.

4.6. Distribución del flujo sanguíneo

La distribución del flujo sanguíneo describe cómo se reparte el gasto cardiaco entre los distintos órganos y tejidos del organismo. En reposo, una proporción importante del flujo sanguíneo se dirige a órganos como el hígado, los riñones y el tracto gastrointestinal. Durante el ejercicio, se produce una redistribución marcada del flujo sanguíneo hacia el músculo esquelético activo.

Esta redistribución se logra mediante una combinación de vasoconstricción en territorios no activos y vasodilatación en los músculos en ejercicio, mediada por factores metabólicos locales. Como resultado, el músculo esquelético puede recibir una fracción muy elevada del gasto cardiaco total durante el ejercicio intenso, lo que permite sostener elevados niveles de metabolismo aeróbico.

5. Respuestas cardiovasculares al ejercicio agudo

El ejercicio físico provoca una serie de respuestas cardiovasculares agudas cuyo objetivo principal es satisfacer el incremento de las demandas metabólicas del organismo, en particular del músculo esquelético activo. Estas respuestas se producen de manera inmediata al inicio del ejercicio y evolucionan en función de la intensidad, la duración y el tipo de actividad realizada. El estudio de estas respuestas resulta fundamental para comprender cómo el sistema cardiovascular contribuye al mantenimiento del equilibrio interno durante el esfuerzo y constituye la base para entender las adaptaciones inducidas por el entrenamiento.

5.1. Respuesta de la frecuencia cardiaca al ejercicio

La frecuencia cardiaca es una de las variables cardiovasculares que responde de manera más rápida al inicio del ejercicio. En los primeros segundos de actividad, el aumento de la frecuencia cardiaca se debe principalmente a la retirada del tono parasimpático sobre el nodo sinoauricular. A medida que la intensidad del ejercicio se incrementa, la activación del sistema nervioso simpático adquiere un papel predominante, produciendo aumentos adicionales de la frecuencia cardiaca.

Durante el ejercicio dinámico incremental, la frecuencia cardiaca aumenta de forma aproximadamente lineal con la intensidad del esfuerzo hasta alcanzar valores cercanos a la frecuencia cardiaca máxima. Este comportamiento refleja la necesidad de incrementar el gasto cardiaco para asegurar un aporte adecuado de oxígeno a los tejidos activos. La pendiente de esta relación puede variar en función del nivel de entrenamiento, la edad y las características individuales.

En ejercicios de carga constante, la frecuencia cardiaca suele aumentar rápidamente al inicio y alcanzar posteriormente un estado estable, siempre que la intensidad del ejercicio sea submáxima. En ejercicios de alta intensidad o de larga duración, pueden observarse incrementos progresivos de la frecuencia cardiaca a lo largo del tiempo, fenómeno conocido como deriva cardiovascular, que se asocia a factores como el aumento de la temperatura corporal y la disminución del volumen plasmático.

5.2. Respuesta del volumen sistólico al ejercicio

El volumen sistólico también experimenta cambios significativos durante el ejercicio agudo. Desde el reposo hasta intensidades moderadas, el volumen sistólico aumenta como consecuencia de un mayor llenado ventricular y de un incremento de la contractilidad miocárdica. El aumento del llenado ventricular se ve favorecido por el incremento del retorno venoso, mediado por la acción de la bomba muscular, la bomba respiratoria y la vasoconstricción venosa simpática.

A intensidades elevadas de ejercicio, el comportamiento del volumen sistólico depende del nivel de entrenamiento del individuo. En sujetos no entrenados, el volumen sistólico suele alcanzar una meseta a intensidades moderadas, debido a la reducción del tiempo de llenado ventricular asociada a frecuencias cardiacas elevadas. En sujetos entrenados, especialmente en atletas de resistencia, el volumen sistólico puede continuar aumentando o mantenerse elevado incluso a intensidades altas, gracias a una mayor capacidad de llenado ventricular y a una contractilidad miocárdica más eficiente.

El mecanismo de Frank-Starling desempeña un papel fundamental en la respuesta del volumen sistólico al ejercicio, ya que el aumento del volumen telediastólico produce un estiramiento mayor de las fibras miocárdicas, lo que incrementa la fuerza de contracción y, en consecuencia, el volumen de sangre eyectado por latido.

5.3. Respuesta del gasto cardiaco al ejercicio

El gasto cardiaco constituye una de las respuestas cardiovasculares más relevantes al ejercicio agudo, ya que determina el volumen total de sangre disponible para el transporte de oxígeno y nutrientes. Durante el ejercicio, el gasto cardiaco aumenta de forma proporcional a la intensidad del esfuerzo, alcanzando valores varias veces superiores a los observados en reposo.

En intensidades bajas y moderadas, el incremento del gasto cardiaco se debe tanto al aumento de la frecuencia cardiaca como al del volumen sistólico. A intensidades elevadas, cuando el volumen sistólico se estabiliza, el aumento adicional del gasto cardiaco depende principalmente del incremento de la frecuencia cardiaca.

El gasto cardiaco máximo alcanzable durante el ejercicio es un determinante clave del rendimiento aeróbico y está estrechamente relacionado con el nivel de entrenamiento. Los individuos entrenados presentan valores máximos de gasto cardiaco superiores a los de sujetos no entrenados, lo que les permite sostener mayores tasas de consumo de oxígeno durante el ejercicio intenso.

5.4. Respuesta de la presión arterial al ejercicio

La presión arterial responde de manera característica al ejercicio físico, dependiendo del tipo de actividad realizada. Durante el ejercicio dinámico, la presión arterial sistólica aumenta de forma progresiva con la intensidad del esfuerzo, como consecuencia del incremento del gasto cardiaco. Este aumento refleja la mayor fuerza de eyección del corazón y la mayor velocidad del flujo sanguíneo.

En contraste, la presión arterial diastólica suele mantenerse relativamente estable o experimentar ligeras disminuciones durante el ejercicio dinámico, debido a la reducción de la resistencia periférica total asociada a la vasodilatación en los músculos activos. Este patrón de respuesta permite aumentar el flujo sanguíneo hacia el músculo sin generar incrementos excesivos de la presión arterial media.

El mantenimiento de la presión arterial durante el ejercicio es esencial para garantizar la perfusión adecuada de órganos vitales, especialmente el cerebro y el corazón. Los mecanismos de regulación neural y local actúan de forma coordinada para evitar caídas bruscas de la presión arterial a pesar de los grandes cambios en el flujo sanguíneo.

5.5. Redistribución del flujo sanguíneo durante el ejercicio

Uno de los ajustes cardiovasculares más importantes durante el ejercicio es la redistribución del flujo sanguíneo. A medida que aumenta la intensidad del ejercicio, una proporción creciente del gasto cardiaco se dirige hacia el músculo esquelético activo, mientras que el flujo sanguíneo hacia órganos menos implicados en el esfuerzo, como el tracto gastrointestinal y los riñones, se reduce.

Esta redistribución se logra mediante una combinación de vasoconstricción simpática en los territorios no activos y vasodilatación local en el músculo en ejercicio. Los factores metabólicos locales producidos por la actividad muscular desempeñan un papel clave en la vasodilatación, permitiendo que el flujo sanguíneo se ajuste de manera precisa a las necesidades del tejido activo.

Además del músculo esquelético, otros territorios, como la piel, pueden recibir un mayor flujo sanguíneo durante el ejercicio prolongado, especialmente en condiciones de calor, con el fin de facilitar la disipación del calor corporal.

5.6. Influencia de la intensidad y el tipo de ejercicio

Las respuestas cardiovasculares al ejercicio agudo varían en función de la intensidad y del tipo de actividad realizada. El ejercicio dinámico de grandes grupos musculares provoca aumentos marcados del gasto cardiaco y una redistribución significativa del flujo sanguíneo. En cambio, el ejercicio estático o isométrico se asocia a aumentos más pronunciados de la presión arterial, debido a la elevada resistencia vascular generada por la contracción sostenida de los músculos.

Asimismo, el tamaño de la masa muscular implicada en el ejercicio influye de manera directa en la magnitud de las respuestas cardiovasculares. A mayor masa muscular activa, mayor es la demanda de flujo sanguíneo y, por tanto, mayor el incremento del gasto cardiaco requerido para sostener el esfuerzo.

6. Integración cardiovascular durante el ejercicio

El funcionamiento del sistema cardiovascular durante el ejercicio no puede entenderse como la suma aislada de respuestas de variables individuales, sino como el resultado de una integración compleja entre el corazón, los vasos sanguíneos, la sangre y los tejidos activos. Esta integración permite ajustar de forma precisa el transporte de oxígeno y nutrientes en función de la intensidad del esfuerzo y de las necesidades metabólicas del organismo.

6.1. Coordinación entre corazón, vasos y músculo esquelético

Durante el ejercicio, el incremento del gasto cardiaco constituye el principal mecanismo para aumentar el aporte de oxígeno a los tejidos. Sin embargo, este aumento solo resulta eficaz si se acompaña de una redistribución adecuada del flujo sanguíneo hacia el músculo esquelético activo. La coordinación entre el aumento del gasto cardiaco y la vasodilatación local en el músculo permite maximizar el suministro de oxígeno sin comprometer la perfusión de órganos vitales.

El corazón actúa como la bomba central que impulsa la sangre, mientras que el sistema vascular regula la resistencia periférica y dirige el flujo hacia los territorios que presentan mayores demandas metabólicas. A su vez, el músculo esquelético influye activamente sobre la circulación mediante la producción de metabolitos vasodilatadores y mediante la acción mecánica de la bomba muscular, que favorece el retorno venoso y el llenado ventricular.

Esta interacción bidireccional entre el sistema cardiovascular y el músculo esquelético resulta esencial para sostener el ejercicio dinámico, especialmente a intensidades moderadas y elevadas.

6.2. Relación entre gasto cardiaco y consumo de oxígeno

El consumo de oxígeno del organismo durante el ejercicio depende de dos factores principales: el gasto cardiaco y la diferencia arteriovenosa de oxígeno. Esta relación se expresa mediante el principio de Fick, que establece que el consumo de oxígeno es igual al producto del gasto cardiaco y la diferencia entre el contenido de oxígeno de la sangre arterial y venosa.

Durante el ejercicio, el aumento del consumo de oxígeno se logra tanto por el incremento del gasto cardiaco como por una mayor extracción de oxígeno a nivel periférico. A intensidades bajas y moderadas, ambos factores contribuyen de manera significativa al aumento del consumo de oxígeno. A intensidades elevadas, cuando el gasto cardiaco se aproxima a sus valores máximos, el aumento adicional del consumo de oxígeno depende en mayor medida de la capacidad del músculo para extraer y utilizar el oxígeno disponible.

Esta relación pone de manifiesto la importancia del sistema cardiovascular como elemento limitante del rendimiento aeróbico, ya que la capacidad para aumentar el gasto cardiaco condiciona el suministro máximo de oxígeno a los tejidos activos.

6.3. Integración cardiovascular y VO_2 máximo

El consumo máximo de oxígeno ($VO_2máx$) representa la máxima capacidad del organismo para captar, transportar y utilizar oxígeno durante el ejercicio intenso. Desde el punto de vista cardiovascular, el $VO_2máx$ está estrechamente relacionado con el gasto cardiaco máximo, que a su vez depende de la frecuencia cardiaca máxima y del volumen sistólico máximo.

En la mayoría de los individuos, la frecuencia cardiaca máxima está determinada principalmente por la edad y presenta una variabilidad limitada con el entrenamiento. En cambio, el volumen sistólico máximo puede aumentar de manera significativa como consecuencia del entrenamiento

de resistencia. Por este motivo, las mejoras en el VO_2máx inducidas por el entrenamiento se asocian fundamentalmente a un aumento del volumen sistólico y del gasto cardiaco máximo.

La integración cardiovascular durante el ejercicio intenso determina, por tanto, el techo funcional del rendimiento aeróbico y explica las diferencias interindividuales observadas entre sujetos entrenados y no entrenados.

6.4. Limitaciones cardiovasculares al ejercicio

Durante el ejercicio intenso, el sistema cardiovascular puede convertirse en el principal factor limitante del rendimiento. Cuando el gasto cardiaco alcanza su valor máximo, cualquier aumento adicional de la demanda metabólica debe ser compensado por un incremento de la extracción periférica de oxígeno, que también presenta un límite fisiológico.

Además, factores como la disminución del volumen plasmático, el aumento de la temperatura corporal y la redistribución del flujo sanguíneo hacia la piel pueden comprometer el retorno venoso y reducir el volumen sistólico, especialmente durante el ejercicio prolongado. Estas situaciones ponen de manifiesto la importancia del mantenimiento del volumen sanguíneo y de una adecuada regulación cardiovascular para sostener el esfuerzo.

La integración de todos estos factores explica por qué el sistema cardiovascular desempeña un papel central en la tolerancia al ejercicio y en la aparición de la fatiga durante esfuerzos de alta intensidad o larga duración.

6.5. Significado funcional de la integración cardiovascular

La integración cardiovascular durante el ejercicio garantiza que el aporte de oxígeno y nutrientes se ajuste de manera continua a las necesidades del músculo esquelético activo. Este ajuste dinámico permite mantener la producción de energía aeróbica, retrasar la aparición de la fatiga y sostener el rendimiento físico.

Desde una perspectiva aplicada, la comprensión de esta integración resulta esencial para interpretar las respuestas fisiológicas al ejercicio, planificar el entrenamiento y analizar las adaptaciones cardiovasculares inducidas por la práctica sistemática de actividad física.

7. Recuperación cardiovascular tras el ejercicio

Una vez finalizado el ejercicio físico, el sistema cardiovascular inicia un proceso de recuperación cuyo objetivo es restablecer progresivamente las condiciones de reposo y mantener la homeostasis del organismo. La recuperación cardiovascular no es un proceso pasivo, sino que implica una serie de ajustes fisiológicos regulados por mecanismos neurales, hormonales y hemodinámicos. El estudio de esta fase resulta fundamental para comprender la transición entre el esfuerzo y el reposo, así como para interpretar la respuesta cardiovascular en contextos de entrenamiento y evaluación funcional.

7.1. Recuperación de la frecuencia cardiaca

La frecuencia cardiaca desciende de forma progresiva tras la finalización del ejercicio. Este descenso se debe principalmente a la reactivación del tono parasimpático y a la disminución de la actividad simpática. En los primeros minutos de recuperación, la rápida caída de la frecuencia cardiaca refleja una recuperación vagal eficiente, mientras que en fases posteriores el descenso se hace más lento y está influido por factores metabólicos y hormonales.

La cinética de recuperación de la frecuencia cardiaca depende de la intensidad y duración del ejercicio realizado, así como del nivel de entrenamiento del individuo. Los sujetos entrenados presentan una recuperación más rápida de la frecuencia cardiaca, lo que se asocia a una mayor actividad parasimpática y a una regulación autonómica más eficaz. Por este motivo, la velocidad de recuperación de la frecuencia cardiaca se utiliza con frecuencia como un indicador del estado de forma cardiovascular.

7.2. Recuperación del volumen sistólico y del gasto cardiaco

Tras el ejercicio, el volumen sistólico y el gasto cardiaco disminuyen progresivamente hasta alcanzar valores cercanos a los de reposo. Esta reducción se produce como consecuencia del descenso de la frecuencia cardiaca, de la disminución de la contractilidad miocárdica y de cambios en el retorno venoso.

Durante los primeros momentos de la recuperación, el retorno venoso puede mantenerse elevado si el individuo continúa en movimiento, favoreciendo el llenado ventricular y la estabilidad del gasto cardiaco. En cambio, una interrupción brusca del ejercicio puede provocar una disminución rápida del retorno venoso, lo que reduce el volumen sistólico y puede dar lugar a una caída transitoria del gasto cardiaco.

Este fenómeno pone de manifiesto la importancia de una recuperación activa tras el ejercicio intenso, especialmente para facilitar el retorno venoso y evitar descensos excesivos de la presión arterial.

7.3. Recuperación de la presión arterial

La presión arterial también experimenta cambios característicos durante la fase de recuperación. Tras el ejercicio dinámico, la presión arterial sistólica desciende de manera progresiva a medida que disminuye el gasto cardiaco. En algunos casos, especialmente tras ejercicio prolongado o intenso, puede observarse una hipotensión postejercicio, caracterizada por valores de presión arterial inferiores a los de reposo.

La hipotensión postejercicio se asocia a la persistencia de la vasodilatación en el músculo esquelético y a una disminución de la resistencia periférica total. Si este descenso de la presión arterial no se compensa adecuadamente mediante mecanismos neurales, puede producirse una reducción transitoria del flujo sanguíneo cerebral, dando lugar a sensaciones de mareo o inestabilidad.

7.4. Influencia de la posición corporal y la actividad durante la recuperación

La posición corporal y el nivel de actividad durante la recuperación influyen de manera significativa en la respuesta cardiovascular. La adopción de una posición erguida inmediatamente después del ejercicio puede dificultar el retorno venoso debido a la acción de la gravedad, especialmente si la actividad muscular cesa de forma brusca.

La recuperación activa, caracterizada por la realización de ejercicio de baja intensidad tras el esfuerzo principal, favorece el mantenimiento de la bomba muscular y facilita el retorno venoso. Como consecuencia, se mantiene un volumen sistólico más elevado y se reduce el riesgo de hipotensión postejercicio. Este aspecto tiene una clara aplicación práctica en el ámbito del entrenamiento y de la actividad física dirigida.

7.5. Significado fisiológico de la recuperación cardiovascular

La recuperación cardiovascular permite restablecer el equilibrio interno del organismo tras el ejercicio y prepara al sistema cardiovascular para esfuerzos posteriores. La eficacia de los mecanismos de recuperación refleja el estado funcional del sistema cardiovascular y su capacidad de adaptación al estrés fisiológico.

Desde una perspectiva aplicada, el análisis de la recuperación cardiovascular proporciona información valiosa sobre la condición física del individuo, la carga impuesta por el ejercicio y la adecuación de los programas de entrenamiento. Por ello, la recuperación no debe considerarse una fase secundaria, sino un componente esencial de la respuesta cardiovascular global al ejercicio.

8. Factores moduladores de la respuesta cardiovascular al ejercicio

La respuesta cardiovascular al ejercicio no es uniforme en todos los individuos ni se manifiesta siempre de la misma manera en una misma persona. Existen diversos factores que modulan la magnitud y las características de los ajustes cardiovasculares, influyendo sobre variables como la frecuencia cardiaca, el volumen sistólico, el gasto cardiaco y la presión arterial. El análisis de estos factores resulta esencial para interpretar adecuadamente las respuestas al ejercicio y comprender las diferencias interindividuales observadas en el ámbito del rendimiento y de la salud.

8.1. Edad

La edad constituye uno de los principales factores moduladores de la respuesta cardiovascular al ejercicio. Con el envejecimiento se producen cambios estructurales y funcionales en el sistema cardiovascular que afectan tanto a la respuesta aguda como a la capacidad máxima de esfuerzo.

Uno de los cambios más relevantes es la disminución progresiva de la frecuencia cardiaca máxima con la edad, lo que limita el incremento máximo del gasto cardiaco durante el ejercicio. Asimismo, pueden observarse alteraciones en la función ventricular y en la distensibilidad vascular, que influyen sobre el volumen sistólico y la respuesta de la presión arterial.

A pesar de estos cambios, la práctica regular de ejercicio físico puede atenuar muchas de las modificaciones asociadas al envejecimiento, mejorando la eficiencia cardiovascular y la tolerancia al esfuerzo.

8.2. Sexo

Existen diferencias relacionadas con el sexo en la respuesta cardiovascular al ejercicio, que se deben principalmente a factores morfológicos y fisiológicos. En general, las mujeres presentan un menor tamaño cardiaco y un menor volumen sanguíneo total en comparación con los hombres, lo que se traduce en valores absolutos más bajos de volumen sistólico y gasto cardiaco.

Para una misma intensidad relativa de ejercicio, las mujeres suelen presentar frecuencias cardiacas más elevadas, compensando así un menor volumen sistólico. No obstante, cuando se expresan las variables cardiovasculares en términos relativos al tamaño corporal o a la masa muscular activa, muchas de estas diferencias se reducen.

8.3. Nivel de entrenamiento

El nivel de entrenamiento, especialmente el entrenamiento de resistencia, ejerce una influencia determinante sobre la respuesta cardiovascular al ejercicio. Los individuos entrenados presentan respuestas cardiovasculares más eficientes, caracterizadas por una menor frecuencia cardiaca para una misma carga de trabajo submáxima y un mayor volumen sistólico.

Estas diferencias reflejan adaptaciones funcionales del sistema cardiovascular, como una mayor capacidad de llenado ventricular, una mayor contractilidad miocárdica y una mejor regulación del tono autonómico. Como consecuencia, el gasto cardiaco requerido para realizar un ejercicio submáximo determinado se alcanza con menor estrés cardiovascular en sujetos entrenados.

Durante el ejercicio máximo, los individuos entrenados son capaces de alcanzar valores superiores de gasto cardiaco, lo que contribuye a un mayor consumo máximo de oxígeno y a un mejor rendimiento aeróbico.

8.4. Posición corporal

La posición corporal influye de manera significativa en la respuesta cardiovascular al ejercicio, debido a sus efectos sobre el retorno venoso y la distribución del volumen sanguíneo. En posición erguida, la acción de la gravedad dificulta el retorno venoso, lo que puede reducir el volumen sistólico y requerir un mayor aumento de la frecuencia cardiaca para mantener el gasto cardiaco.

En posiciones como el decúbito supino, el retorno venoso se ve favorecido, lo que permite un mayor llenado ventricular y un volumen sistólico más elevado. Estas diferencias deben tenerse en cuenta al interpretar las respuestas cardiovasculares durante pruebas de ejercicio realizadas en distintas posiciones.

8.5. Condiciones ambientales

Las condiciones ambientales, especialmente la temperatura y la altitud, modulan de forma importante la respuesta cardiovascular al ejercicio. En ambientes calurosos, una mayor proporción del gasto cardiaco se dirige hacia la piel para facilitar la disipación del calor, lo que puede comprometer el retorno venoso y reducir el volumen sistólico. Como consecuencia, la frecuencia cardiaca aumenta para mantener el gasto cardiaco, fenómeno que contribuye a la deriva cardiovascular.

En condiciones de altitud, la reducción de la presión parcial de oxígeno en el aire inspirado supone un desafío adicional para el sistema cardiovascular. Durante el ejercicio en hipoxia, se produce un aumento de la frecuencia cardiaca y del gasto cardiaco para compensar la menor disponibilidad de oxígeno, aunque esta compensación presenta límites fisiológicos.

8.6. Estado de hidratación y volumen plasmático

El estado de hidratación influye de manera directa en el volumen plasmático y, por tanto, en el retorno venoso y el volumen sistólico. La deshidratación asociada al ejercicio prolongado reduce el volumen plasmático, lo que compromete el llenado ventricular y disminuye el volumen sistólico. En estas condiciones, la frecuencia cardiaca aumenta para compensar la reducción del volumen sistólico y mantener el gasto cardiaco.

El mantenimiento de un adecuado estado de hidratación resulta esencial para preservar la función cardiovascular durante el ejercicio prolongado y evitar una sobrecarga excesiva del sistema cardiovascular.

8.7. Importancia fisiológica de los factores moduladores

Los factores moduladores de la respuesta cardiovascular condicionan la magnitud y la eficiencia de los ajustes cardiovasculares al ejercicio. Su consideración resulta imprescindible para interpretar correctamente las respuestas individuales, diseñar programas de entrenamiento adecuados y analizar el impacto del ejercicio sobre la salud y el rendimiento.

9. Síntesis fisiológica del sistema cardiovascular en el ejercicio

El sistema cardiovascular desempeña un papel central en la respuesta del organismo al ejercicio físico, actuando como el principal sistema de transporte que permite satisfacer el incremento de las demandas metabólicas inducidas por la contracción muscular. Su funcionamiento durante el ejercicio se basa en la integración coordinada del corazón, los vasos sanguíneos y la sangre, regulada por mecanismos neurales, hormonales y locales.

Ante el inicio del ejercicio, el sistema cardiovascular responde mediante un aumento rápido del gasto cardiaco, resultado del incremento de la frecuencia cardiaca y del volumen sistólico. Este ajuste permite elevar el flujo sanguíneo total y asegurar un aporte adecuado de oxígeno y nutrientes a los tejidos activos. Paralelamente, se produce una redistribución del flujo sanguíneo que prioriza el músculo esquelético en ejercicio, al tiempo que se mantiene la perfusión de órganos vitales como el cerebro y el corazón.

La regulación cardiovascular durante el ejercicio se apoya en la interacción entre el sistema nervioso autónomo y los mecanismos locales de control vascular. La activación simpática y la retirada del tono parasimpático permiten ajustar la frecuencia cardiaca y la contractilidad miocárdica, mientras que los factores metabólicos locales inducen vasodilatación en el músculo activo, garantizando un ajuste preciso del flujo sanguíneo a las necesidades metabólicas del tejido.

Desde un punto de vista cuantitativo, el gasto cardiaco constituye uno de los principales determinantes del transporte de oxígeno durante el ejercicio. Su relación con el consumo de oxígeno, expresada mediante el principio de Fick, pone de manifiesto que la capacidad del sistema cardiovascular para aumentar el gasto cardiaco condiciona de forma directa el rendimiento aeróbico. En este sentido, el sistema cardiovascular puede convertirse en el principal factor limitante del ejercicio intenso o prolongado.

La fase de recuperación cardiovascular tras el ejercicio representa un proceso fisiológico activo, caracterizado por la restauración progresiva de las variables cardiovasculares hacia los valores de reposo. La velocidad y la eficacia de esta recuperación reflejan el estado funcional del sistema cardiovascular y su grado de adaptación al esfuerzo físico. Asimismo, los factores moduladores de la respuesta cardiovascular, como la edad, el sexo, el nivel de entrenamiento, la posición corporal y las condiciones ambientales, explican gran parte de la variabilidad observada entre individuos.

En conjunto, el estudio del sistema cardiovascular durante el ejercicio permite comprender cómo el organismo mantiene la homeostasis frente al estrés fisiológico inducido por la actividad física. Esta comprensión resulta imprescindible para analizar tanto la respuesta aguda al ejercicio como las adaptaciones crónicas que se desarrollan con el entrenamiento sistemático, las cuales se abordarán en el apartado siguiente mediante el análisis del remodelado cardiovascular.

10. Remodelado cardiovascular inducido por el ejercicio y el entrenamiento

La exposición repetida al ejercicio físico mediante el entrenamiento sistemático induce una serie de adaptaciones crónicas en el sistema cardiovascular que reciben el nombre de **remodelado cardiovascular**. Este remodelado incluye modificaciones estructurales y funcionales tanto a nivel cardiaco como vascular, y constituye la base fisiológica de la mejora del rendimiento cardiovascular y de la mayor eficiencia del sistema ante el esfuerzo.

A diferencia de las respuestas agudas al ejercicio, que son transitorias y reversibles, el remodelado cardiovascular implica cambios estables que se desarrollan progresivamente como consecuencia del estímulo repetido del ejercicio. Estas adaptaciones permiten al sistema cardiovascular responder de manera más eficaz a una misma carga de trabajo y aumentar su capacidad funcional máxima.

10.1. Concepto de remodelado cardiovascular

El remodelado cardiovascular puede definirse como el conjunto de modificaciones estructurales y funcionales que se producen en el corazón y en el sistema vascular como respuesta al estrés hemodinámico crónico inducido por el ejercicio. Este estrés se manifiesta principalmente en forma de aumentos repetidos del volumen de sangre que entra y sale del corazón, así como de cambios en la presión arterial y en el flujo sanguíneo.

Desde un punto de vista fisiológico, el remodelado cardiovascular representa un proceso adaptativo orientado a optimizar el transporte de oxígeno y nutrientes, reducir el coste energético del trabajo cardiaco y mejorar la capacidad del organismo para tolerar esfuerzos prolongados o de alta intensidad.

10.2. Remodelado cardiaco inducido por el entrenamiento

El corazón experimenta adaptaciones estructurales y funcionales como consecuencia del entrenamiento, especialmente del entrenamiento de resistencia. Estas adaptaciones afectan tanto a las cavidades cardiacas como a las paredes del miocardio y se reflejan en una mejora de la función cardiaca.

Uno de los cambios más característicos es el aumento del tamaño de las cavidades ventriculares, especialmente del ventrículo izquierdo. Este aumento del volumen telediastólico permite un mayor llenado ventricular y, en consecuencia, un mayor volumen sistólico en reposo y durante el ejercicio. Este tipo de adaptación se asocia a un aumento de la distensibilidad ventricular y a una mayor eficiencia del mecanismo de Frank-Starling.

Además del aumento del tamaño de las cavidades, el entrenamiento puede inducir cambios en el grosor de las paredes del miocardio. Estos cambios dependen del tipo de estímulo predominante. En el entrenamiento de resistencia, el aumento del grosor de la pared suele ser proporcional al aumento del tamaño de la cavidad, manteniéndose una relación equilibrada que favorece la función diastólica y sistólica. Este patrón de remodelado se considera una adaptación fisiológica.

Desde el punto de vista funcional, el remodelado cardiaco se traduce en un aumento del volumen sistólico máximo y en una reducción de la frecuencia cardiaca tanto en reposo como durante el ejercicio submáximo. Como consecuencia, el gasto cardiaco requerido para una determinada carga de trabajo se alcanza con menor estrés cardiovascular, lo que refleja una mayor eficiencia del sistema.

10.3. Remodelado vascular inducido por el entrenamiento

El entrenamiento también induce adaptaciones significativas en el sistema vascular, que contribuyen de manera decisiva a la mejora de la función cardiovascular. Entre estas adaptaciones destacan los cambios en el diámetro de los vasos, en la distensibilidad arterial y en la capacidad de regulación del flujo sanguíneo.

El ejercicio repetido provoca aumentos crónicos del flujo sanguíneo a través de determinadas arterias, especialmente las que irrigan los músculos entrenados. Este aumento del flujo actúa como estímulo para la adaptación de la pared vascular, favoreciendo un aumento del diámetro arterial

y una mejora de la función endotelial. Como consecuencia, se reduce la resistencia vascular y se facilita el flujo sanguíneo durante el ejercicio.

Asimismo, el entrenamiento puede mejorar la distensibilidad de las grandes arterias, lo que contribuye a amortiguar las variaciones de presión generadas por la eyección cardiaca. Esta adaptación reduce la carga de trabajo del corazón y favorece una presión arterial más estable durante el ejercicio y en reposo.

10.4. Consecuencias hemodinámicas del remodelado cardiovascular

Las adaptaciones estructurales y funcionales del corazón y de los vasos sanguíneos tienen importantes consecuencias hemodinámicas. El aumento del volumen sistólico y la mejora del retorno venoso permiten alcanzar mayores valores de gasto cardiaco máximo, lo que incrementa la capacidad de transporte de oxígeno del organismo.

Al mismo tiempo, la reducción de la resistencia periférica y la mejora de la regulación vascular facilitan una redistribución más eficaz del flujo sanguíneo hacia los tejidos activos. Estas adaptaciones contribuyen a una menor elevación de la frecuencia cardiaca y de la presión arterial para una misma carga de trabajo submáxima, reflejando una mayor economía cardiovascular.

10.5. Remodelado cardiovascular y rendimiento físico

El remodelado cardiovascular constituye uno de los principales determinantes de la mejora del rendimiento aeróbico inducida por el entrenamiento. El aumento del gasto cardiaco máximo y la mejora de la eficiencia del transporte de oxígeno permiten alcanzar mayores valores de consumo máximo de oxígeno y sostener intensidades de ejercicio más elevadas durante periodos prolongados.

Estas adaptaciones explican las diferencias observadas entre individuos entrenados y no entrenados en términos de capacidad aeróbica, tolerancia al ejercicio y recuperación cardiovascular. Asimismo, ponen de manifiesto la importancia del estímulo del entrenamiento como factor clave para inducir cambios estructurales y funcionales en el sistema cardiovascular.

10.6. Significado fisiológico del remodelado cardiovascular

El remodelado cardiovascular inducido por el ejercicio representa un proceso adaptativo fisiológico que mejora la capacidad funcional del sistema cardiovascular y reduce el estrés asociado al esfuerzo físico. Estas adaptaciones permiten al organismo responder de manera más eficaz a las demandas del ejercicio y contribuyen tanto al rendimiento deportivo como a la salud cardiovascular.

Desde una perspectiva docente, el análisis del remodelado cardiovascular cierra el estudio del sistema cardiovascular en el ejercicio, conectando las respuestas agudas con las adaptaciones crónicas y proporcionando un marco fisiológico coherente para comprender los efectos del entrenamiento sobre el organismo.

Bibliografía

González-Alonso, J., Pointon, M., Crandall, C. G., & Johnson, J. M. (1997). Stroke volume does not decline during exercise at maximal effort in healthy individuals. *Journal of Applied Physiology, 82*(5), 1947–1953

Goodman, J. M., Liu, P. P., & Green, H. J. (2005). Left ventricular adaptations following short-term endurance training. *Journal of Applied Physiology, 98*(5), 454–460.

Fox SI. Fisiología Humana. 15ª ed. McGraw-Hill Interamericana; 2021.

Katch VL, MacArdle WD, Katch FI. *Fisiología Del Ejercicio : "Fundamentos"*. 4ª ed. Editorial Médica Panamericana; 2014.

López Chicharro J, Fernández Vaquero A. *Fisiología Del Ejercicio*. 4a ed. Editorial Médica Panamericana; 2023.

Silverthorn DU. *Fisiología Humana Un Enfoque Integrado*. Ed. 8. Editorial Médica Panamericana; 2019

Thomas, C. D., & Segal, S. S. (2004). Neural control of muscle blood flow during exercise. *Journal of Applied Physiology, 97*(3), 731.

Wilmore JH, Kenney WL, Costill DL. *Fisiología del Deporte y el Ejercicio*. 5th ed. Editorial Médica Panamericana; 2014.

Tema 10. Sistema Pulmonar

1. Introducción al sistema respiratorio en el ejercicio

El sistema respiratorio desempeña un papel esencial en la respuesta del organismo al ejercicio físico, al ser el encargado de garantizar el aporte continuo de oxígeno necesario para la producción de energía aeróbica y de eliminar el dióxido de carbono generado como producto final del metabolismo celular. Durante el ejercicio, el incremento de la actividad metabólica del músculo esquelético exige una adaptación precisa y coordinada de la ventilación pulmonar y del intercambio gaseoso, con el fin de mantener la homeostasis del medio interno.

Desde un punto de vista funcional, el sistema respiratorio actúa como un sistema de apoyo al metabolismo energético, facilitando el transporte de oxígeno desde el aire ambiente hasta las mitocondrias musculares y contribuyendo al control del equilibrio ácido-base mediante la eliminación del dióxido de carbono. Aunque tradicionalmente se ha considerado que el sistema respiratorio rara vez constituye un factor limitante del rendimiento en individuos sanos, su adecuada regulación resulta imprescindible para sostener el ejercicio prolongado y de alta intensidad.

Durante el reposo, la ventilación pulmonar se ajusta a las necesidades metabólicas basales del organismo. Sin embargo, con el inicio del ejercicio se produce un aumento inmediato de la ventilación, incluso antes de que se detecten cambios significativos en la composición química de la sangre. Este ajuste rápido pone de manifiesto la importancia de los mecanismos de control neural y anticipatorio en la regulación de la respiración durante la actividad física.

A medida que aumenta la intensidad del ejercicio, la ventilación pulmonar se incrementa de forma proporcional al consumo de oxígeno y a la producción de dióxido de carbono. Esta relación permite mantener relativamente constantes las presiones parciales de oxígeno y dióxido de carbono en la sangre arterial, garantizando un suministro adecuado de oxígeno a los tejidos y evitando alteraciones significativas del pH sanguíneo.

El sistema respiratorio no actúa de manera aislada durante el ejercicio, sino que se integra estrechamente con el sistema cardiovascular. La ventilación pulmonar y el gasto cardiaco aumentan de forma coordinada para optimizar el transporte de gases respiratorios. Esta integración cardiorrespiratoria resulta fundamental para comprender la respuesta global del organismo al esfuerzo físico y será un eje central del estudio de la fisiología del ejercicio.

Desde una perspectiva aplicada, el análisis del sistema respiratorio en el ejercicio permite interpretar fenómenos clave como los umbrales ventilatorios, la respuesta ventilatoria al ejercicio progresivo, la recuperación postejercicio y las adaptaciones inducidas por el entrenamiento. Asimismo, proporciona las bases fisiológicas necesarias para comprender las limitaciones respiratorias en determinadas poblaciones y contextos ambientales.

2. Estructura y función del sistema respiratorio

El sistema respiratorio está organizado de forma que permite el intercambio eficaz de gases entre el organismo y el medio externo. Su estructura anatómica y sus características funcionales están estrechamente relacionadas con la ventilación pulmonar y con la difusión de oxígeno y dióxido de carbono, procesos esenciales para el mantenimiento del metabolismo aeróbico, especialmente durante el ejercicio físico.

Desde un punto de vista funcional, el sistema respiratorio puede dividirse en dos grandes componentes: las **vías de conducción**, encargadas del transporte del aire hacia y desde los pulmones, y la **zona respiratoria**, donde tiene lugar el intercambio gaseoso.

2.1. Vías aéreas y zona de conducción

Las vías aéreas incluyen la cavidad nasal, la faringe, la laringe, la tráquea, los bronquios y los bronquiolos. Su función principal es conducir el aire desde el exterior hasta las regiones donde se produce el intercambio gaseoso. Durante este recorrido, el aire es filtrado, humidificado y calentado, lo que favorece unas condiciones óptimas para la difusión de gases en los pulmones.

Desde el punto de vista del ejercicio, las vías aéreas representan una fuente de resistencia al flujo de aire. Cambios en el diámetro de las vías respiratorias, regulados por el sistema nervioso autónomo y por factores locales, influyen directamente en la facilidad con la que el aire puede entrar y salir de los pulmones, condicionando el trabajo respiratorio durante el esfuerzo.

2.2. Pulmones y árbol bronquial

Los pulmones son órganos esponjosos y elásticos situados en la cavidad torácica. Su estructura interna está formada por el árbol bronquial, que se ramifica progresivamente hasta dar lugar a los bronquiolos respiratorios y, finalmente, a los alvéolos. Esta organización ramificada permite una amplia superficie de contacto entre el aire y la sangre, condición indispensable para un intercambio gaseoso eficiente.

La elasticidad pulmonar facilita la entrada y salida de aire durante el ciclo respiratorio. Durante la inspiración, la expansión de la caja torácica permite la entrada de aire en los pulmones, mientras que durante la espiración el retroceso elástico pulmonar favorece la salida del aire. Estas propiedades mecánicas adquieren especial relevancia durante el ejercicio, cuando el volumen de aire movilizado por minuto aumenta de forma considerable.

2.3. Alvéolos y membrana respiratoria

Los alvéolos son pequeñas estructuras saculares que constituyen la unidad funcional del intercambio gaseoso. Están rodeados por una extensa red de capilares pulmonares, lo que permite una difusión rápida y eficaz de oxígeno y dióxido de carbono entre el aire alveolar y la sangre.

La membrana respiratoria, formada por el epitelio alveolar, la membrana basal y el endotelio capilar, presenta un grosor extremadamente reducido, lo que facilita la difusión de gases. La gran superficie alveolar y la corta distancia de difusión son factores clave que permiten satisfacer las elevadas demandas de oxígeno durante el ejercicio intenso.

Desde una perspectiva funcional, cualquier alteración en la integridad o en la superficie de la membrana respiratoria puede comprometer el intercambio gaseoso, lo que adquiere especial importancia durante el ejercicio, cuando la velocidad del tránsito sanguíneo por los capilares pulmonares aumenta.

2.4. Circulación pulmonar

La circulación pulmonar transporta la sangre desoxigenada desde el corazón derecho hasta los pulmones, donde se produce el intercambio gaseoso. Se caracteriza por una baja resistencia vascular y una elevada distensibilidad, lo que permite acomodar grandes aumentos del flujo sanguíneo sin incrementos excesivos de la presión pulmonar.

Durante el ejercicio, el aumento del gasto cardiaco se acompaña de un incremento del flujo sanguíneo pulmonar. La elevada capacidad de adaptación de la circulación pulmonar resulta esencial para mantener una adecuada oxigenación de la sangre incluso a intensidades elevadas de esfuerzo.

2.5. Relación estructura–función en el ejercicio

La organización anatómica del sistema respiratorio está estrechamente ligada a su función durante el ejercicio. La amplia superficie alveolar, la delgadez de la membrana respiratoria, la elasticidad pulmonar y la elevada distensibilidad de la circulación pulmonar permiten satisfacer las demandas de intercambio gaseoso impuestas por el aumento del metabolismo muscular.

Durante el ejercicio, estas características estructurales facilitan el aumento de la ventilación pulmonar y del flujo sanguíneo pulmonar, garantizando un transporte eficaz de oxígeno hacia los tejidos activos y la eliminación del dióxido de carbono producido. Esta relación estructura–función constituye la base fisiológica sobre la que se desarrollan los ajustes ventilatorios y respiratorios que se analizarán en los apartados siguientes.

3. Mecánica ventilatoria

La mecánica ventilatoria describe los procesos físicos que permiten la entrada y salida de aire de los pulmones como consecuencia de los cambios de volumen y presión en la cavidad torácica. Estos procesos están determinados por la acción coordinada de los músculos respiratorios, las propiedades elásticas del sistema respiratorio y las resistencias al flujo aéreo. Durante el ejercicio, la mecánica ventilatoria adquiere una importancia creciente, ya que el aumento de la ventilación pulmonar exige una adaptación eficiente de todos estos componentes.

3.1. El ciclo respiratorio: inspiración y espiración

El ciclo respiratorio está formado por dos fases principales: la inspiración y la espiración. Durante la inspiración, la contracción del diafragma y de los músculos intercostales externos provoca un aumento del volumen de la cavidad torácica. Este incremento del volumen torácico genera una disminución de la presión intrapulmonar con respecto a la presión atmosférica, lo que permite la entrada de aire en los pulmones.

La espiración, en condiciones de reposo, es un proceso fundamentalmente pasivo, que se produce como consecuencia del retroceso elástico de los pulmones y de la caja torácica. Sin embargo, durante el ejercicio, especialmente a intensidades elevadas, la espiración se convierte en un proceso activo, en el que participan los músculos abdominales y los intercostales internos para facilitar la salida rápida del aire y permitir frecuencias respiratorias elevadas.

3.2. Músculos respiratorios

Los principales músculos inspiratorios son el diafragma y los músculos intercostales externos. El diafragma desempeña un papel central en la ventilación pulmonar, ya que su contracción aumenta el diámetro vertical de la cavidad torácica y genera la mayor parte del volumen inspiratorio.

Durante el ejercicio intenso, se reclutan músculos accesorios de la inspiración, como los escalenos y el esternocleidomastoideo, que contribuyen a ampliar la caja torácica y a aumentar el volumen

de aire inspirado. En la espiración forzada, los músculos abdominales y los intercostales internos incrementan la presión intratorácica, favoreciendo la expulsión del aire.

El trabajo de los músculos respiratorios aumenta de manera notable con la intensidad del ejercicio, lo que puede representar un coste metabólico significativo y contribuir a la fatiga respiratoria en esfuerzos prolongados o de alta intensidad.

3.3. Presiones respiratorias

La ventilación pulmonar depende de los gradientes de presión generados entre el interior de los pulmones y la atmósfera. La presión intrapulmonar, la presión intrapleural y la presión transpulmonar son variables clave para comprender la mecánica ventilatoria.

La presión intrapleural es normalmente negativa con respecto a la presión atmosférica, lo que mantiene los pulmones expandidos dentro de la cavidad torácica. Durante la inspiración, esta presión se hace más negativa, facilitando la expansión pulmonar. Durante la espiración, la presión intrapleural aumenta, pero permanece generalmente por debajo de la presión atmosférica.

Durante el ejercicio, los cambios en estas presiones se amplifican para permitir mayores volúmenes y flujos de aire, lo que incrementa el trabajo respiratorio.

3.4. Complacencia (distensibilidad) pulmonar

La complacencia pulmonar describe la facilidad con la que los pulmones y la caja torácica se expanden en respuesta a un cambio de presión. Una elevada complacencia indica que se requiere una menor presión para producir un determinado aumento de volumen pulmonar.

La complacencia depende de las propiedades elásticas del tejido pulmonar y de la tensión superficial presente en los alvéolos. Durante el ejercicio, la complacencia pulmonar influye directamente en el trabajo respiratorio, ya que una menor complacencia aumenta el esfuerzo necesario para ventilar los pulmones.

3.5. Resistencia de las vías aéreas

La resistencia de las vías aéreas es el principal factor que se opone al flujo de aire durante la ventilación. Depende del diámetro de las vías respiratorias y de la velocidad del flujo aéreo. Pequeñas variaciones en el diámetro bronquial pueden producir cambios significativos en la resistencia al flujo.

Durante el ejercicio, la activación simpática y la liberación de catecolaminas favorecen la broncodilatación, lo que reduce la resistencia de las vías aéreas y facilita el aumento de la ventilación. Este mecanismo resulta esencial para mantener un flujo de aire adecuado durante el ejercicio intenso.

3.6. Trabajo respiratorio y ejercicio

El trabajo respiratorio representa la energía necesaria para vencer las fuerzas elásticas del sistema respiratorio y las resistencias al flujo aéreo. A intensidades bajas de ejercicio, el trabajo respiratorio constituye una fracción pequeña del coste energético total. Sin embargo, a intensidades elevadas, el aumento de la frecuencia y del volumen respiratorio incrementa de manera notable el trabajo de los músculos respiratorios.

Cuando el trabajo respiratorio se vuelve excesivo, puede producirse fatiga de la musculatura respiratoria, lo que limita la capacidad ventilatoria y puede influir negativamente en el rendimiento físico.

4. Volúmenes y capacidades pulmonares

Los volúmenes y capacidades pulmonares describen cuantitativamente la cantidad de aire que puede movilizar el sistema respiratorio en diferentes condiciones funcionales. Su análisis resulta fundamental para comprender la ventilación pulmonar tanto en reposo como durante el ejercicio, así como para interpretar los cambios ventilatorios asociados al esfuerzo físico.

Desde un punto de vista fisiológico, los volúmenes pulmonares reflejan la mecánica respiratoria y las propiedades elásticas del sistema respiratorio, mientras que las capacidades pulmonares representan combinaciones de varios volúmenes que permiten evaluar la función ventilatoria global.

4.1. Volúmenes pulmonares estáticos

Los principales volúmenes pulmonares estáticos son el volumen corriente, el volumen de reserva inspiratoria, el volumen de reserva espiratoria y el volumen residual.

El volumen corriente corresponde a la cantidad de aire inspirada o espirada en una respiración normal en reposo. Durante el ejercicio, el volumen corriente aumenta de manera progresiva, especialmente en las fases iniciales del esfuerzo, contribuyendo de forma significativa al incremento de la ventilación pulmonar.

El volumen de reserva inspiratoria representa el volumen adicional de aire que puede inspirarse tras una inspiración normal, mientras que el volumen de reserva espiratoria es el volumen adicional que puede espirarse tras una espiración normal. Estos volúmenes permiten aumentar la amplitud de la ventilación durante el ejercicio, especialmente cuando el volumen corriente se aproxima a sus valores máximos.

El volumen residual es la cantidad de aire que permanece en los pulmones tras una espiración máxima. Este volumen no puede ser movilizado de forma voluntaria y desempeña un papel importante en el mantenimiento de la estabilidad alveolar y del intercambio gaseoso.

4.2. Capacidades pulmonares

Las capacidades pulmonares se obtienen mediante la combinación de dos o más volúmenes pulmonares. Entre ellas destacan la capacidad vital, la capacidad pulmonar total, la capacidad inspiratoria y la capacidad residual funcional.

La capacidad vital representa el volumen máximo de aire que puede movilizarse entre una inspiración máxima y una espiración máxima. Aunque la capacidad vital no cambia de forma significativa durante el ejercicio, su valor condiciona el margen disponible para aumentar el volumen corriente y la ventilación.

La capacidad pulmonar total incluye todos los volúmenes pulmonares y representa la cantidad máxima de aire que pueden contener los pulmones. Esta capacidad está determinada en gran medida por factores anatómicos y estructurales.

4.3. Volúmenes pulmonares dinámicos

Los volúmenes pulmonares dinámicos hacen referencia a la cantidad de aire movilizada por unidad de tiempo. La variable más representativa es la ventilación pulmonar o ventilación minuto, que se define como el producto del volumen corriente y la frecuencia respiratoria.

Durante el ejercicio, la ventilación pulmonar aumenta de manera notable para satisfacer las demandas metabólicas del organismo. Este incremento se produce inicialmente mediante un aumento del volumen corriente y, a intensidades más elevadas, mediante un aumento de la frecuencia respiratoria.

4.4. Cambios de los volúmenes pulmonares con el ejercicio

Con el inicio del ejercicio, el volumen corriente aumenta rápidamente, alcanzando valores próximos al 50–60 % de la capacidad vital en intensidades moderadas. A partir de este punto, el incremento adicional de la ventilación se logra principalmente mediante el aumento de la frecuencia respiratoria.

Este patrón ventilatorio permite optimizar la ventilación alveolar y minimizar el coste energético del trabajo respiratorio. Sin embargo, a intensidades muy elevadas, la elevada frecuencia respiratoria puede limitar el tiempo disponible para el intercambio gaseoso y aumentar el trabajo respiratorio.

4.5. Factores que influyen en los volúmenes y capacidades pulmonares

Los volúmenes y capacidades pulmonares están influenciados por diversos factores, como la edad, el sexo, el tamaño corporal, la postura y el nivel de actividad física. En general, los hombres presentan valores absolutos mayores que las mujeres, y los valores disminuyen progresivamente con la edad.

El entrenamiento físico no produce aumentos significativos de las capacidades pulmonares estructurales en individuos sanos. No obstante, mejora la utilización funcional de los volúmenes pulmonares durante el ejercicio, optimizando el patrón ventilatorio y reduciendo el coste energético de la respiración.

5. Ventilación pulmonar y ejercicio

La ventilación pulmonar representa el volumen de aire que entra y sale de los pulmones por unidad de tiempo y constituye uno de los principales ajustes del sistema respiratorio ante el ejercicio físico. Su incremento durante el esfuerzo permite aumentar el aporte de oxígeno y facilitar la eliminación del dióxido de carbono producido por el metabolismo muscular, contribuyendo así al mantenimiento del equilibrio ácido-base y de la homeostasis interna.

5.1. Ventilación pulmonar en reposo

En condiciones de reposo, la ventilación pulmonar se ajusta de manera precisa a las necesidades metabólicas basales del organismo. El volumen de aire movilizado es relativamente bajo y se caracteriza por una ventilación eficiente, con un equilibrio adecuado entre ventilación alveolar y perfusión pulmonar.

La ventilación en reposo está regulada principalmente por mecanismos automáticos de control neural y químico que responden a pequeñas variaciones en las presiones parciales de oxígeno y dióxido de carbono en la sangre arterial.

5.2. Ajustes ventilatorios al inicio del ejercicio

Con el inicio del ejercicio se produce un aumento inmediato de la ventilación pulmonar, incluso antes de que se detecten cambios significativos en la composición química de la sangre. Este aumento rápido refleja la importancia de los mecanismos de control neural anticipatorio, asociados al inicio del movimiento y a la activación del sistema nervioso central.

Este primer ajuste ventilatorio permite responder de forma rápida al incremento de la demanda metabólica y prepara al sistema respiratorio para el aumento progresivo del consumo de oxígeno y de la producción de dióxido de carbono.

5.3. Ventilación durante el ejercicio submáximo

Durante el ejercicio submáximo de intensidad constante, la ventilación pulmonar aumenta de forma progresiva hasta alcanzar un estado estable. En esta situación, la ventilación se ajusta de manera proporcional al consumo de oxígeno y a la producción de dióxido de carbono, manteniendo relativamente constantes las presiones parciales de los gases en la sangre arterial.

El incremento de la ventilación en estas intensidades se logra principalmente mediante un aumento del volumen corriente, lo que permite una ventilación alveolar eficiente con un coste energético relativamente bajo.

5.4. Ventilación durante el ejercicio máximo

A intensidades elevadas de ejercicio, la ventilación pulmonar continúa aumentando de forma desproporcionada con respecto al consumo de oxígeno. Este incremento exagerado de la ventilación se asocia a la acumulación de productos metabólicos y a la necesidad de eliminar grandes cantidades de dióxido de carbono, así como de amortiguar los cambios en el equilibrio ácido-base.

En estas condiciones, el aumento de la ventilación se logra fundamentalmente mediante un incremento de la frecuencia respiratoria, lo que incrementa el trabajo respiratorio y puede contribuir a la fatiga de la musculatura respiratoria.

5.5. Umbrales ventilatorios

Durante el ejercicio progresivo, pueden identificarse puntos de inflexión en la relación entre la ventilación pulmonar y la intensidad del ejercicio, conocidos como umbrales ventilatorios. Estos umbrales reflejan cambios en el patrón ventilatorio y están relacionados con modificaciones en el metabolismo energético y en la producción de dióxido de carbono.

El primer umbral ventilatorio se asocia a un aumento desproporcionado de la ventilación con respecto al consumo de oxígeno, mientras que el segundo umbral ventilatorio se caracteriza por un incremento aún más pronunciado de la ventilación, reflejando una mayor participación del metabolismo anaeróbico y una mayor necesidad de regulación del pH.

5.6. Limitaciones ventilatorias al ejercicio

En individuos sanos, el sistema respiratorio suele disponer de una reserva ventilatoria suficiente para satisfacer las demandas del ejercicio máximo. Sin embargo, en determinadas situaciones, como en sujetos altamente entrenados o en condiciones ambientales adversas, la ventilación puede aproximarse a sus límites funcionales.

La aparición de limitaciones ventilatorias durante el ejercicio puede comprometer el intercambio gaseoso y contribuir a la fatiga, especialmente en esfuerzos de alta intensidad o larga duración.

6. Intercambio gaseoso y transporte de gases

El objetivo último del sistema respiratorio durante el ejercicio es garantizar un intercambio eficaz de gases entre el aire alveolar y la sangre, así como un transporte adecuado de oxígeno hacia los tejidos y de dióxido de carbono desde los tejidos hacia los pulmones. Estos procesos dependen de la difusión pulmonar, de las características de la sangre y de la coordinación con el sistema cardiovascular.

6.1. Difusión pulmonar de oxígeno y dióxido de carbono

El intercambio gaseoso a nivel pulmonar se produce por difusión a través de la membrana respiratoria, impulsado por los gradientes de presión parcial de los gases. El oxígeno difunde desde el aire alveolar hacia la sangre capilar pulmonar, mientras que el dióxido de carbono lo hace en sentido contrario.

La eficacia de la difusión pulmonar depende de varios factores, entre los que destacan la superficie disponible para el intercambio, el grosor de la membrana respiratoria y la diferencia de presiones parciales entre el alvéolo y la sangre. Durante el ejercicio, el aumento del flujo sanguíneo pulmonar reduce el tiempo de tránsito de la sangre por los capilares, lo que exige una elevada eficiencia del proceso de difusión para mantener una adecuada oxigenación.

6.2. Presiones parciales de los gases

Las presiones parciales de oxígeno y dióxido de carbono en el aire alveolar y en la sangre determinan la dirección y la magnitud del intercambio gaseoso. En condiciones normales, la presión parcial de oxígeno es mayor en el alvéolo que en la sangre venosa que llega a los pulmones, lo que favorece la difusión de oxígeno hacia la sangre.

Durante el ejercicio, la mayor extracción de oxígeno por los tejidos reduce la presión parcial de oxígeno en la sangre venosa, lo que incrementa el gradiente de difusión en los pulmones y facilita la captación de oxígeno. De forma similar, el aumento de la producción de dióxido de carbono incrementa su presión parcial en la sangre venosa, favoreciendo su eliminación en los pulmones.

6.3. Transporte de oxígeno en la sangre

El oxígeno se transporta en la sangre principalmente unido a la hemoglobina contenida en los eritrocitos, y en una pequeña proporción disuelto en el plasma. La capacidad de transporte de oxígeno depende de la concentración de hemoglobina y de su grado de saturación.

Durante el ejercicio, el aumento del gasto cardiaco incrementa la cantidad total de oxígeno transportado por minuto. Además, factores como el aumento de la temperatura, la acidosis metabólica y la mayor concentración de dióxido de carbono favorecen la liberación de oxígeno desde la hemoglobina hacia los tejidos, facilitando su utilización por el músculo esquelético activo.

6.4. Transporte de dióxido de carbono en la sangre

El dióxido de carbono producido por el metabolismo celular se transporta en la sangre de tres formas principales: disuelto en el plasma, unido a la hemoglobina y en forma de bicarbonato. La conversión del dióxido de carbono en bicarbonato constituye el principal mecanismo de transporte y desempeña un papel clave en la regulación del equilibrio ácido-base.

Durante el ejercicio, el aumento de la producción de dióxido de carbono requiere una eliminación eficaz a nivel pulmonar. El incremento de la ventilación pulmonar facilita esta eliminación y contribuye a mantener el pH sanguíneo dentro de límites fisiológicos.

6.5. Intercambio gaseoso y ejercicio

Durante el ejercicio, la coordinación entre ventilación pulmonar, difusión alveolo-capilar y transporte sanguíneo de gases permite satisfacer las elevadas demandas metabólicas del músculo esquelético. El aumento del gasto cardiaco y de la ventilación pulmonar actúan de forma complementaria para optimizar el intercambio gaseoso y el transporte de oxígeno.

En individuos sanos, estos mecanismos permiten mantener una adecuada oxigenación arterial incluso durante el ejercicio intenso. Sin embargo, cualquier alteración en alguno de estos procesos puede comprometer el rendimiento y la tolerancia al esfuerzo.

7. Regulación de la ventilación

La ventilación pulmonar está regulada por un complejo sistema de control que permite ajustar de forma precisa la entrada y salida de aire en los pulmones en función de las necesidades metabólicas del organismo. Durante el ejercicio físico, este sistema de regulación debe responder de manera rápida y coordinada al incremento del consumo de oxígeno y de la producción de dióxido de carbono, garantizando el mantenimiento de las presiones parciales de los gases y del equilibrio ácido-base.

La regulación de la ventilación se basa en la integración de mecanismos **neuronales**, **químicos** y **humorales**, que actúan de forma conjunta tanto en reposo como durante el esfuerzo.

7.1. Centros respiratorios

El control central de la respiración se localiza en el tronco encefálico, donde se sitúan los centros respiratorios responsables de generar el ritmo respiratorio básico. Estos centros regulan la frecuencia y la profundidad de la respiración mediante la activación rítmica de los músculos respiratorios.

Durante el ejercicio, la actividad de los centros respiratorios se ve modulada por señales procedentes de diferentes áreas del sistema nervioso central, lo que permite un ajuste anticipatorio de la ventilación incluso antes de que se produzcan cambios detectables en la composición química de la sangre.

7.2. Regulación neural de la ventilación

La regulación neural desempeña un papel clave en el ajuste rápido de la ventilación al inicio del ejercicio. Las señales procedentes de la corteza cerebral y de los centros motores asociados al movimiento contribuyen a aumentar de forma inmediata la ventilación pulmonar, fenómeno conocido como control ventilatorio anticipatorio.

Además, los mecanorreceptores localizados en músculos y articulaciones proporcionan información aferente relacionada con el movimiento y la tensión muscular, contribuyendo a la modulación de la ventilación durante el ejercicio dinámico.

Estos mecanismos neurales explican la rapidez con la que la ventilación se incrementa al inicio del ejercicio, antes de que se produzcan alteraciones significativas en las presiones parciales de oxígeno y dióxido de carbono.

7.3. Regulación química de la ventilación

La regulación química de la ventilación se basa en la detección de cambios en la composición química de la sangre y del líquido cefalorraquídeo, principalmente en relación con el dióxido de carbono, los iones hidrógeno y, en menor medida, el oxígeno.

Los quimiorreceptores centrales, localizados en el bulbo raquídeo, son especialmente sensibles a los cambios en la concentración de iones hidrógeno derivados del dióxido de carbono. Un aumento de la presión parcial de dióxido de carbono estimula estos receptores, incrementando la ventilación pulmonar.

Los quimiorreceptores periféricos, situados en los cuerpos carotídeos y aórticos, responden a cambios en la presión parcial de oxígeno, dióxido de carbono y al pH sanguíneo. Durante el ejercicio, su activación contribuye al ajuste fino de la ventilación, especialmente en situaciones de elevada intensidad o hipoxia.

7.4. Regulación ventilatoria durante el ejercicio

Durante el ejercicio submáximo, la ventilación pulmonar se ajusta de manera proporcional al consumo de oxígeno y a la producción de dióxido de carbono, manteniendo relativamente constantes las presiones parciales de los gases en la sangre arterial. Este equilibrio refleja la eficacia del sistema de control ventilatorio.

A intensidades elevadas, el aumento de la producción de dióxido de carbono y de iones hidrógeno estimula de forma más intensa los quimiorreceptores, produciendo un incremento desproporcionado de la ventilación. Este fenómeno está estrechamente relacionado con la aparición de los umbrales ventilatorios.

7.5. Integración de los mecanismos de control ventilatorio

La regulación de la ventilación durante el ejercicio resulta de la integración dinámica de los mecanismos neurales y químicos. Mientras que los mecanismos neurales permiten una respuesta rápida y anticipatoria, los mecanismos químicos garantizan un ajuste preciso y sostenido en función de las necesidades metabólicas reales.

Esta integración asegura que la ventilación pulmonar se adapte de manera continua a la intensidad del ejercicio, optimizando el intercambio gaseoso y contribuyendo al mantenimiento de la homeostasis durante el esfuerzo físico.

8. Respuestas respiratorias al ejercicio

El ejercicio físico induce una serie de respuestas respiratorias agudas cuyo objetivo es ajustar la ventilación pulmonar a las demandas metabólicas del organismo. Estas respuestas permiten aumentar el aporte de oxígeno, facilitar la eliminación del dióxido de carbono producido por el metabolismo muscular y contribuir al mantenimiento del equilibrio ácido-base durante el esfuerzo.

La magnitud y las características de las respuestas respiratorias dependen de la intensidad, la duración y el tipo de ejercicio realizado, así como de las características individuales del sujeto.

8.1. Respuesta ventilatoria al ejercicio agudo

Con el inicio del ejercicio se produce un aumento inmediato de la ventilación pulmonar, que precede a los cambios detectables en la composición química de la sangre. Este incremento inicial refleja la activación de los mecanismos neurales de control ventilatorio y permite una rápida adaptación a la nueva situación metabólica.

A medida que el ejercicio continúa, la ventilación aumenta de forma progresiva hasta alcanzar un estado estable durante el ejercicio submáximo. En esta fase, la ventilación se ajusta de manera proporcional al consumo de oxígeno y a la producción de dióxido de carbono, manteniendo relativamente constantes las presiones parciales de los gases en la sangre arterial.

8.2. Cinética ventilatoria

La cinética ventilatoria describe la velocidad con la que la ventilación pulmonar se ajusta a los cambios en la intensidad del ejercicio. Tras el inicio del esfuerzo, la ventilación presenta una fase rápida inicial, seguida de una fase más lenta hasta alcanzar el estado estable.

La rapidez de esta respuesta refleja la eficacia de los mecanismos de control ventilatorio y está influida por el nivel de entrenamiento. Los individuos entrenados suelen presentar una cinética ventilatoria más rápida, lo que contribuye a una mejor tolerancia al ejercicio y a una menor alteración transitoria del equilibrio ácido-base.

8.3. Relación entre ventilación y consumo de oxígeno

Durante el ejercicio submáximo, existe una relación estrecha entre la ventilación pulmonar y el consumo de oxígeno. A medida que aumenta el consumo de oxígeno, la ventilación se incrementa de forma proporcional para asegurar un aporte adecuado de oxígeno a los tejidos.

Esta relación refleja la coordinación entre el sistema respiratorio y el sistema cardiovascular, que actúan de manera integrada para optimizar el transporte y la utilización del oxígeno durante el esfuerzo físico.

8.4. Ventilación y producción de dióxido de carbono

La producción de dióxido de carbono aumenta de forma paralela al consumo de oxígeno durante el ejercicio. La ventilación pulmonar se ajusta para eliminar este dióxido de carbono y evitar su acumulación en la sangre.

A intensidades elevadas de ejercicio, la producción de dióxido de carbono aumenta de forma desproporcionada debido a la mayor participación del metabolismo anaeróbico y a la neutralización de los iones hidrógeno por los sistemas tampón. Este incremento estimula de forma intensa la ventilación, contribuyendo a la aparición de los umbrales ventilatorios.

8.5. Respuesta respiratoria en función de la intensidad del ejercicio

La respuesta respiratoria varía de manera característica según la intensidad del ejercicio. En ejercicios de baja intensidad, los ajustes ventilatorios son moderados y se alcanzan rápidamente estados estables. En ejercicios de intensidad moderada, la ventilación aumenta de forma proporcional al consumo de oxígeno.

En ejercicios de alta intensidad, la ventilación aumenta de forma desproporcionada, reflejando la necesidad de eliminar grandes cantidades de dióxido de carbono y de amortiguar los cambios en el pH sanguíneo. En estas condiciones, el trabajo respiratorio se incrementa notablemente y puede contribuir a la fatiga.

8.6. Coordinación cardiorrespiratoria durante el ejercicio

Durante el ejercicio, la respuesta respiratoria está estrechamente coordinada con la respuesta cardiovascular. El aumento de la ventilación pulmonar se acompaña de un incremento del gasto cardiaco, lo que permite optimizar el intercambio gaseoso y el transporte de oxígeno hacia los tejidos activos.

Esta coordinación cardiorrespiratoria es esencial para mantener el equilibrio interno durante el esfuerzo y constituye uno de los pilares fisiológicos del rendimiento aeróbico.

9. Recuperación respiratoria tras el ejercicio

Tras la finalización del ejercicio físico, el sistema respiratorio entra en una fase de recuperación cuyo objetivo es restablecer progresivamente las condiciones de reposo y contribuir al retorno del organismo al equilibrio homeostático. La recuperación respiratoria no constituye un proceso pasivo, sino que implica una regulación activa de la ventilación pulmonar para eliminar el exceso de dióxido de carbono, normalizar el pH sanguíneo y satisfacer las demandas metabólicas residuales del organismo.

9.1. Ventilación durante la recuperación

Inmediatamente después del ejercicio, la ventilación pulmonar permanece elevada en comparación con los valores de reposo. Este aumento refleja la necesidad de eliminar el dióxido de carbono acumulado durante el esfuerzo y de compensar las alteraciones del equilibrio ácido-base.

A medida que transcurre la recuperación, la ventilación desciende de forma progresiva, siguiendo una cinética que depende de la intensidad y la duración del ejercicio realizado. En ejercicios de baja intensidad, la ventilación retorna rápidamente a los valores basales, mientras que en ejercicios intensos o prolongados el proceso de recuperación es más lento.

9.2. Eliminación del dióxido de carbono postejercicio

La eliminación del dióxido de carbono constituye uno de los principales objetivos de la ventilación durante la recuperación. Durante el ejercicio intenso, la producción elevada de dióxido de carbono y la acumulación de iones hidrógeno estimulan de forma marcada la ventilación pulmonar.

Tras el ejercicio, la ventilación elevada facilita la eliminación del dióxido de carbono residual y contribuye a la normalización de la presión parcial de dióxido de carbono en la sangre arterial. Este proceso resulta esencial para restablecer el equilibrio ácido-base y permitir la recuperación de la función muscular.

9.3. Restablecimiento del equilibrio ácido-base

Durante el ejercicio intenso, la producción de ácido láctico y la acumulación de iones hidrógeno pueden provocar una disminución del pH sanguíneo. La ventilación pulmonar desempeña un papel clave en la regulación del equilibrio ácido-base, ya que la eliminación del dióxido de carbono reduce la concentración de ácido carbónico en la sangre.

Durante la recuperación, la ventilación elevada contribuye a la compensación respiratoria de la acidosis metabólica, facilitando el restablecimiento del pH sanguíneo hacia valores de reposo.

9.4. Relación entre recuperación respiratoria y cardiovascular

La recuperación respiratoria está estrechamente relacionada con la recuperación cardiovascular. El descenso progresivo del gasto cardiaco y de la frecuencia cardiaca se acompaña de una reducción gradual de la ventilación pulmonar.

La coordinación entre ambos sistemas permite una transición ordenada del estado de esfuerzo al reposo. La recuperación activa, caracterizada por la realización de ejercicio de baja intensidad tras el esfuerzo principal, puede facilitar este proceso al mantener una ventilación y un flujo sanguíneo moderados que favorecen la eliminación de metabolitos.

9.5. Significado fisiológico de la recuperación respiratoria

La eficacia de la recuperación respiratoria refleja la capacidad del sistema respiratorio para adaptarse a las exigencias del ejercicio y restablecer la homeostasis tras el esfuerzo. Una recuperación rápida y eficiente se asocia a una mejor condición física y a una mayor tolerancia al ejercicio.

Desde una perspectiva aplicada, el análisis de la recuperación respiratoria proporciona información valiosa sobre la carga impuesta por el ejercicio, el estado funcional del sistema respiratorio y la adecuación de los programas de entrenamiento.

10. Adaptaciones y remodelado del sistema respiratorio inducidos por el entrenamiento

La exposición repetida al ejercicio físico mediante el entrenamiento sistemático induce una serie de adaptaciones crónicas en el sistema respiratorio que mejoran su eficiencia funcional durante el esfuerzo. A diferencia del sistema cardiovascular, el sistema respiratorio presenta una capacidad de adaptación estructural más limitada en individuos sanos. No obstante, las adaptaciones funcionales y neuromusculares resultan relevantes para optimizar la ventilación y reducir el coste energético de la respiración durante el ejercicio.

10.1. Concepto de adaptación respiratoria al entrenamiento

Las adaptaciones respiratorias al entrenamiento pueden definirse como los cambios funcionales que permiten al sistema respiratorio responder de forma más eficaz a una determinada demanda ventilatoria. Estas adaptaciones se desarrollan progresivamente como consecuencia del estímulo repetido del ejercicio y se manifiestan principalmente durante el esfuerzo submáximo y máximo.

A diferencia de las respuestas agudas, las adaptaciones respiratorias son relativamente estables y reflejan una mejora en la coordinación y eficiencia del sistema respiratorio, más que cambios estructurales profundos en los pulmones.

10.2. Adaptaciones ventilatorias crónicas

Una de las principales adaptaciones inducidas por el entrenamiento es la mejora del patrón ventilatorio durante el ejercicio submáximo. Los individuos entrenados suelen presentar una menor ventilación pulmonar para una misma carga de trabajo, lo que indica una mayor eficiencia ventilatoria.

Esta adaptación se asocia a una mejor sincronización entre volumen corriente y frecuencia respiratoria, permitiendo una ventilación alveolar adecuada con un menor coste energético. Como consecuencia, el trabajo de la musculatura respiratoria se reduce para una determinada intensidad de ejercicio.

Durante el ejercicio máximo, la ventilación pulmonar máxima puede aumentar ligeramente en individuos entrenados, aunque este incremento no suele ser el principal factor limitante del rendimiento.

10.3. Adaptaciones en el intercambio gaseoso

En individuos sanos, el entrenamiento no produce cambios estructurales significativos en la superficie alveolar ni en el grosor de la membrana respiratoria. Sin embargo, puede mejorar la eficacia funcional del intercambio gaseoso durante el ejercicio.

El aumento del flujo sanguíneo pulmonar y la mejora de la distribución de la perfusión contribuyen a optimizar la relación ventilación-perfusión, lo que favorece una oxigenación más eficiente de la sangre durante el esfuerzo intenso.

10.4. Adaptaciones de la musculatura respiratoria

La musculatura respiratoria, al igual que otros músculos esqueléticos, puede experimentar adaptaciones funcionales como consecuencia del entrenamiento. El aumento de la resistencia y de la eficiencia de los músculos inspiratorios y espiratorios contribuye a retrasar la aparición de la fatiga respiratoria durante el ejercicio prolongado.

Estas adaptaciones permiten mantener elevados niveles de ventilación con un menor coste metabólico y reducen la competencia por el flujo sanguíneo entre la musculatura respiratoria y la musculatura locomotora durante el ejercicio intenso.

10.5. Sistema respiratorio y rendimiento aeróbico

En individuos sanos, el sistema respiratorio rara vez constituye el principal factor limitante del rendimiento aeróbico, ya que dispone de una reserva ventilatoria suficiente incluso durante el ejercicio máximo. No obstante, las adaptaciones respiratorias inducidas por el entrenamiento contribuyen de manera indirecta al rendimiento al reducir el coste energético de la ventilación y mejorar la eficiencia del intercambio gaseoso.

Estas mejoras permiten una mayor disponibilidad de energía y flujo sanguíneo para la musculatura activa, favoreciendo el rendimiento y la tolerancia al ejercicio.

10.6. Significado fisiológico y aplicado de las adaptaciones respiratorias

Las adaptaciones del sistema respiratorio al entrenamiento reflejan un proceso de optimización funcional más que de remodelado estructural. Estas adaptaciones permiten al sistema respiratorio responder de manera más eficiente a las demandas ventilatorias del ejercicio, contribuyendo al mantenimiento de la homeostasis y al rendimiento físico.

Desde una perspectiva aplicada, la comprensión de estas adaptaciones resulta esencial para interpretar la respuesta respiratoria al ejercicio, planificar el entrenamiento y analizar el papel del sistema respiratorio en la integración cardiorrespiratoria durante el esfuerzo.

Bibliografía

Bassett, D. R., Jr., & Howley, E. T. (2000). Limiting factors for maximum oxygen uptake and determinants of endurance performance. *Medicine & Science in Sports & Exercise, 32*(1), 70–84.

Del Coso, J., Hamouti, N., Aguado-Jiménez, R., & Mora-Rodríguez, R. (2009). Respiratory compensation and blood pH regulation during variable intensity exercise in trained and untrained subjects. *European Journal of Applied Physiology, 107*(1), 83–93.

Dempsey, J. A., Romer, L., Rodman, J., Miller, J., & Smith, C. (2008). Respiratory system determinants of peripheral fatigue and endurance performance. *Medicine & Science in Sports & Exercise, 40*(3), 457–461.

Fox SI. Fisiología Humana. 15ª ed. McGraw-Hill Interamericana; 2021.

Katch VL, MacArdle WD, Katch FI. *Fisiología Del Ejercicio : "Fundamentos"*. 4ª ed. Editorial Médica Panamericana; 2014.

López Chicharro J, Fernández Vaquero A. *Fisiología Del Ejercicio*. 4a ed. Editorial Médica Panamericana; 2023.

McConnell, A. K., Caine, M. P., & Sharpe, G. R. (1997). Inspiratory muscle fatigue following running to volitional fatigue: The influence of baseline strength. *International Journal of Sports Medicine, 18*(3), 169–173.

Silverthorn DU. *Fisiología Humana Un Enfoque Integrado*. Ed. 8. Editorial Médica Panamericana; 2019

Wilmore JH, Kenney WL, Costill DL. *Fisiología del Deporte y el Ejercicio*. 5th ed. Editorial Médica Panamericana; 2014.

Tema 11. La sangre y el sistema inmunológico

1. Funciones de la sangre y su papel en la homeostasis

La sangre es un tejido conjuntivo líquido que desempeña un papel esencial en el mantenimiento de la homeostasis del organismo. Su capacidad para transportar sustancias, regular el medio interno y participar en los mecanismos de defensa convierte a la sangre en un elemento clave para la función integrada de los distintos sistemas fisiológicos, especialmente durante el ejercicio físico, cuando las demandas metabólicas y reguladoras se incrementan de forma notable.

Desde el punto de vista funcional, la sangre actúa como un sistema de comunicación y soporte que conecta los órganos productores y consumidores de energía, los sistemas de control nervioso y hormonal, y los mecanismos de protección frente a agresiones externas o internas.

1.1. Función de transporte

Una de las funciones primordiales de la sangre es el transporte de sustancias esenciales para la vida celular. Entre ellas destacan:

- **Transporte de gases respiratorios**:
  La sangre permite el transporte de oxígeno desde los pulmones hasta los tejidos periféricos y la eliminación del dióxido de carbono producido por el metabolismo celular. Esta función es crucial para sostener la fosforilación oxidativa y la producción de ATP, especialmente durante el ejercicio, cuando el consumo de oxígeno se incrementa de forma significativa.

- **Transporte de nutrientes**:
  Glucosa, ácidos grasos, aminoácidos, vitaminas y minerales son distribuidos por la sangre desde el sistema digestivo y los depósitos corporales hacia los tejidos activos. Durante el ejercicio, esta función permite abastecer al músculo esquelético de los sustratos necesarios para la contracción muscular.

- **Transporte de productos de desecho**:
  Sustancias resultantes del metabolismo celular, como urea, ácido úrico o creatinina, son transportadas hacia órganos de eliminación como el riñón y el hígado. Este proceso contribuye al mantenimiento de un medio interno estable.

- **Transporte de hormonas y señales químicas**:
  La sangre actúa como medio de distribución de hormonas secretadas por glándulas endocrinas, facilitando la regulación coordinada de múltiples funciones fisiológicas. Durante el ejercicio, hormonas como la adrenalina, el cortisol o la insulina modulan la disponibilidad de energía y la respuesta al esfuerzo.

1.2. Función reguladora del medio interno

La sangre desempeña un papel fundamental en la regulación de diversas variables fisiológicas que definen la homeostasis:

- **Regulación del pH sanguíneo**:
  Mediante sistemas tampón, especialmente el sistema bicarbonato–ácido carbónico, la sangre contribuye a mantener el pH dentro de límites compatibles con la función enzimática y celular. Durante el ejercicio intenso, la acumulación de iones hidrógeno exige una respuesta amortiguadora eficaz.

- **Regulación de la temperatura corporal**:
  El flujo sanguíneo facilita la redistribución del calor generado por el metabolismo muscular hacia la piel, permitiendo su disipación. Esta función es especialmente relevante durante el ejercicio prolongado o en ambientes calurosos.

- **Regulación del volumen y la presión sanguínea**:
  A través del control del volumen plasmático y de la interacción con el sistema cardiovascular, la sangre contribuye al mantenimiento de una presión arterial adecuada para garantizar la perfusión tisular.

1.3. Función protectora: coagulación e inmunidad

La sangre participa activamente en los mecanismos de defensa del organismo:

- **Hemostasia y coagulación**:
  Ante una lesión vascular, la sangre inicia una serie de procesos destinados a evitar la pérdida excesiva de sangre. Las plaquetas y los factores de coagulación permiten la formación del coágulo y la posterior reparación del tejido dañado.

- **Defensa inmunológica**:
  La sangre transporta células del sistema inmunitario y moléculas defensivas que permiten identificar y neutralizar agentes patógenos. Esta función protectora resulta esencial para preservar la integridad del organismo frente a infecciones y procesos inflamatorios.

1.4. Relación de la sangre con otros compartimentos líquidos

La sangre forma parte de un sistema integrado de líquidos corporales que incluye el líquido intersticial y la linfa. El intercambio continuo entre estos compartimentos permite la distribución eficaz de nutrientes, gases y señales químicas, así como la eliminación de desechos metabólicos.

Durante el ejercicio físico, los cambios en la presión hidrostática y oncótica favorecen el movimiento de líquidos entre la sangre y el espacio intersticial, lo que puede modificar de forma transitoria el volumen plasmático y la concentración de los componentes sanguíneos.

1.5. Importancia de la sangre en el ejercicio físico

En el contexto del ejercicio, la sangre adquiere una relevancia aún mayor, ya que actúa como el principal medio de adaptación funcional. La capacidad de transportar oxígeno, eliminar dióxido de carbono, regular el pH y sostener la respuesta inmunológica condiciona de manera directa el rendimiento físico y la tolerancia al esfuerzo.

Por ello, el estudio de la sangre desde una perspectiva fisiológica resulta imprescindible para comprender las respuestas agudas y las adaptaciones crónicas inducidas por el entrenamiento físico.

2. Composición de la sangre

La sangre es un tejido complejo cuya composición refleja de forma dinámica el estado funcional del organismo. Desde un punto de vista fisiológico, la sangre está formada por una fase líquida, el plasma, y una fracción celular o elementos formes. La proporción y características de estos

componentes determinan la capacidad de transporte, regulación y defensa del organismo, y pueden modificarse de manera transitoria o crónica en respuesta al ejercicio físico.

2.1. Volumen sanguíneo total

El volumen sanguíneo total representa aproximadamente el 7–8 % del peso corporal en el adulto sano, aunque puede variar en función del sexo, la edad, el nivel de entrenamiento y las condiciones ambientales. En términos absolutos, el volumen sanguíneo suele ser mayor en hombres que en mujeres, principalmente debido a diferencias en la masa corporal y en la concentración de eritrocitos.

El volumen sanguíneo se distribuye entre distintos compartimentos del sistema cardiovascular, actuando como una reserva funcional que puede movilizarse durante el ejercicio para mantener el gasto cardiaco y la perfusión tisular.

2.2. Plasma y elementos formes

Desde el punto de vista composicional, la sangre se divide en:

- **Plasma**, que constituye aproximadamente el 55 % del volumen sanguíneo total.
- **Elementos formes**, que representan en torno al 45 % restante y están formados por eritrocitos, leucocitos y plaquetas.

Esta proporción no es fija y puede alterarse de forma aguda, por ejemplo durante el ejercicio, como consecuencia de cambios en el volumen plasmático.

2.3. Hematocrito

El hematocrito expresa el porcentaje del volumen sanguíneo ocupado por los eritrocitos. En condiciones de reposo, los valores normales se sitúan aproximadamente entre el 40–45 % en mujeres y el 45–50 % en hombres.

El hematocrito es una variable de gran relevancia fisiológica, ya que condiciona la capacidad de transporte de oxígeno de la sangre y la viscosidad sanguínea. Un aumento excesivo del hematocrito puede incrementar la resistencia al flujo sanguíneo, mientras que valores bajos reducen la capacidad de transporte de oxígeno.

Durante el ejercicio agudo, el hematocrito puede aumentar de forma transitoria como consecuencia de la reducción del volumen plasmático, fenómeno conocido como **hemoconcentración**.

2.4. Eritrocitos, leucocitos y plaquetas

Los **eritrocitos** son las células más abundantes de la sangre y están especializados en el transporte de oxígeno y dióxido de carbono gracias a la presencia de hemoglobina. Su elevada relación superficie/volumen y su flexibilidad permiten un intercambio gaseoso eficiente en los capilares.

Los **leucocitos** participan en los mecanismos de defensa del organismo. Aunque representan una fracción muy pequeña del volumen sanguíneo, desempeñan un papel fundamental en la respuesta inmunitaria. Su concentración puede variar de forma significativa en respuesta al ejercicio, al estrés y a procesos inflamatorios.

Las **plaquetas** son fragmentos celulares implicados en la hemostasia. Su función principal es contribuir a la formación del coágulo sanguíneo y a la reparación de lesiones vasculares.

2.5. Variaciones fisiológicas de la composición sanguínea

La composición de la sangre no es estática y puede variar en función de diferentes factores fisiológicos:

- **Sexo**: las mujeres presentan, en general, menores valores de hematocrito y hemoglobina.
- **Edad**: se producen cambios progresivos en la composición sanguínea a lo largo del ciclo vital.
- **Ejercicio físico**: el ejercicio agudo provoca modificaciones transitorias, mientras que el entrenamiento induce adaptaciones crónicas.
- **Nivel de entrenamiento**: los individuos entrenados suelen presentar un mayor volumen plasmático, lo que puede reducir el hematocrito en reposo sin comprometer la capacidad de transporte de oxígeno.

2.6. Sangre arterial y sangre venosa

Desde el punto de vista funcional, se distinguen dos tipos de sangre según su contenido gaseoso:

- **Sangre arterial**, rica en oxígeno y con menor concentración de dióxido de carbono.
- **Sangre venosa**, con menor contenido de oxígeno y mayor concentración de dióxido de carbono, como resultado del metabolismo tisular.

Durante el ejercicio, la diferencia arteriovenosa de oxígeno aumenta, reflejando una mayor extracción de oxígeno por parte de los tejidos activos.

2.7. Importancia funcional de la composición sanguínea en el ejercicio

La composición de la sangre condiciona de manera directa la capacidad del organismo para responder a las demandas del ejercicio. Las variaciones en el volumen plasmático, el hematocrito y la concentración de los distintos elementos formes influyen sobre el transporte de oxígeno, la regulación del pH y la respuesta inmunológica.

Por ello, el análisis de la composición sanguínea constituye una herramienta fundamental para comprender las respuestas hematológicas al ejercicio y las adaptaciones inducidas por el entrenamiento físico.

3. Plasma sanguíneo

El plasma constituye la fracción líquida de la sangre y representa aproximadamente el 55 % del volumen sanguíneo total. Su composición y volumen desempeñan un papel clave en el transporte de sustancias, la regulación del medio interno y la respuesta del organismo al ejercicio físico. Las variaciones del volumen y de los componentes plasmáticos influyen de forma directa sobre la homeostasis y el rendimiento físico.

3.1. Composición general del plasma

El plasma está formado mayoritariamente por agua, que supone alrededor del 90–92 % de su volumen, y por una fracción de solutos disueltos que incluyen proteínas, electrolitos, nutrientes, gases, productos de desecho y hormonas.

El agua plasmática actúa como medio de transporte y permite la distribución eficaz de las sustancias disueltas. La fracción sólida, aunque cuantitativamente menor, es esencial para el mantenimiento de las funciones fisiológicas.

3.2. Proteínas plasmáticas

Las proteínas plasmáticas constituyen uno de los componentes funcionales más importantes del plasma. Las principales son:

- **Albúmina**:
  Es la proteína plasmática más abundante y desempeña un papel fundamental en el mantenimiento de la presión oncótica, regulando el movimiento de agua entre el compartimento intravascular y el intersticial. Además, actúa como transportadora de ácidos grasos, hormonas y otras moléculas.
- **Globulinas**:
  Incluyen una amplia variedad de proteínas con funciones diversas. Las globulinas α y β participan en el transporte de lípidos y metales, mientras que las globulinas γ corresponden a los anticuerpos implicados en la respuesta inmunitaria.
- **Fibrinógeno**:
  Es una proteína clave en el proceso de coagulación sanguínea, ya que se transforma en fibrina durante la formación del coágulo.

La concentración de proteínas plasmáticas influye de manera directa sobre la viscosidad de la sangre y sobre la capacidad de regulación del volumen plasmático.

3.3. Electrolitos y solutos plasmáticos

El plasma contiene electrolitos como sodio, potasio, cloro, bicarbonato, calcio y magnesio, que participan en la regulación del equilibrio ácido-base, la transmisión nerviosa y la contracción muscular.

Entre los solutos no electrolíticos se incluyen la glucosa, los aminoácidos, los lípidos y los productos de desecho metabólico. La concentración de estos solutos puede variar en función del estado nutricional, el nivel de actividad física y las condiciones ambientales.

3.4. Regulación del volumen plasmático

El volumen plasmático es una variable dinámica que se regula mediante mecanismos hormonales y hemodinámicos. Hormonas como la hormona antidiurética y el sistema renina–angiotensina–aldosterona contribuyen al control del balance hídrico y del sodio, modulando el volumen del compartimento intravascular.

Durante el ejercicio agudo, se produce una reducción transitoria del volumen plasmático debido al desplazamiento de líquido hacia el espacio intersticial y a la sudoración. Este fenómeno contribuye a la hemoconcentración observada durante el esfuerzo.

3.5. Cambios del plasma durante el ejercicio agudo

El ejercicio provoca una serie de modificaciones en el plasma sanguíneo:

- Reducción del volumen plasmático por aumento de la presión hidrostática capilar y pérdida de líquido por sudoración.
- Incremento de la concentración relativa de proteínas plasmáticas y de otros solutos.
- Alteraciones en la concentración de electrolitos, especialmente durante el ejercicio prolongado o en ambientes calurosos.

Estas modificaciones son generalmente reversibles y dependen de la intensidad y duración del ejercicio.

3.6. Adaptaciones del plasma al entrenamiento físico

El entrenamiento regular induce un aumento crónico del volumen plasmático, especialmente en deportes de resistencia. Esta adaptación se considera una de las respuestas tempranas al entrenamiento aeróbico.

El aumento del volumen plasmático mejora el retorno venoso, favorece el mantenimiento del gasto cardiaco y contribuye a una mayor estabilidad de la presión arterial durante el ejercicio. Además, permite una mejor regulación térmica y reduce la viscosidad sanguínea.

3.7. Importancia del plasma en la respuesta al ejercicio

Las características del plasma condicionan la capacidad de la sangre para responder a las demandas del ejercicio físico. El mantenimiento de un volumen plasmático adecuado resulta esencial para preservar la homeostasis, optimizar el transporte de sustancias y sostener la función cardiovascular y termorreguladora.

Por ello, el estudio del plasma sanguíneo es fundamental para comprender tanto las respuestas agudas al ejercicio como las adaptaciones crónicas inducidas por el entrenamiento.

4. Eritrocitos y transporte de oxígeno

Los eritrocitos constituyen la fracción celular más abundante de la sangre y están especializados en el transporte de oxígeno desde los pulmones hasta los tejidos periféricos, así como en la eliminación parcial del dióxido de carbono producido por el metabolismo celular. Su estructura, contenido en hemoglobina y comportamiento dinámico en el sistema circulatorio son determinantes para el rendimiento físico, especialmente durante el ejercicio aeróbico.

4.1. Características estructurales y funcionales de los eritrocitos

Los eritrocitos humanos son células anucleadas, con forma de disco bicóncavo, lo que les confiere una elevada relación superficie/volumen y facilita el intercambio gaseoso. Esta morfología, junto con su gran flexibilidad, permite que los eritrocitos atraviesen capilares de diámetro inferior al suyo sin comprometer la circulación sanguínea.

La ausencia de núcleo y de orgánulos mitocondriales impide el consumo de oxígeno por parte del propio eritrocito, garantizando que el oxígeno transportado esté disponible para los tejidos.

4.2. Hemoglobina: estructura y función

La hemoglobina es una proteína globular presente en el interior de los eritrocitos y es responsable del transporte de oxígeno. Está formada por cuatro cadenas polipeptídicas, cada una de ellas asociada a un grupo hemo que contiene un átomo de hierro capaz de unirse reversiblemente al oxígeno.

Cada molécula de hemoglobina puede transportar hasta cuatro moléculas de oxígeno. La unión del oxígeno a la hemoglobina es reversible y depende de factores como la presión parcial de oxígeno, el pH, la temperatura y la concentración de dióxido de carbono.

4.3. Curva de disociación de la oxihemoglobina

La relación entre la presión parcial de oxígeno y el grado de saturación de la hemoglobina se representa mediante la curva de disociación de la oxihemoglobina, de forma sigmoidea. Esta característica permite una captación eficaz de oxígeno en los pulmones y una liberación facilitada en los tejidos periféricos.

Durante el ejercicio, el aumento de la temperatura, la concentración de dióxido de carbono y la acidez metabólica desplazan la curva hacia la derecha, favoreciendo la cesión de oxígeno al

músculo activo. Este fenómeno es fundamental para cubrir las elevadas demandas metabólicas del ejercicio intenso.

4.4. Producción y destrucción de eritrocitos

Los eritrocitos se producen en la médula ósea mediante un proceso denominado eritropoyesis, regulado principalmente por la eritropoyetina. Esta hormona se libera en respuesta a una disminución de la disponibilidad de oxígeno en los tejidos.

La vida media de los eritrocitos es de aproximadamente 120 días. Una vez envejecidos, son retirados de la circulación y destruidos principalmente en el bazo y el hígado, donde se reciclan sus componentes.

4.5. Metabolismo del hierro

El hierro es un elemento esencial para la síntesis de la hemoglobina. Su absorción, transporte y almacenamiento están finamente regulados para asegurar una producción adecuada de eritrocitos.

Un balance negativo de hierro puede comprometer la eritropoyesis y reducir la capacidad de transporte de oxígeno, afectando de manera directa al rendimiento físico.

4.6. Eritrocitos y ejercicio físico

Durante el ejercicio agudo, se observa un aumento transitorio del número de eritrocitos circulantes debido a la contracción esplénica y a la reducción del volumen plasmático. Este fenómeno contribuye a la hemoconcentración y al incremento temporal del hematocrito.

El entrenamiento físico regular, especialmente el de resistencia, induce adaptaciones hematológicas que incluyen un aumento del volumen plasmático y, en algunos casos, de la masa total de eritrocitos. Estas adaptaciones mejoran la capacidad de transporte de oxígeno sin aumentar excesivamente la viscosidad sanguínea.

4.7. Anemia y rendimiento físico

La anemia se caracteriza por una reducción de la concentración de hemoglobina o del número de eritrocitos, lo que limita la capacidad de transporte de oxígeno. En el contexto del ejercicio, la anemia puede manifestarse como una disminución del rendimiento, fatiga precoz y menor tolerancia al esfuerzo.

En deportistas, pueden observarse situaciones de anemia funcional asociadas al entrenamiento intenso, que deben diferenciarse de la anemia patológica.

4.8. Importancia fisiológica de los eritrocitos en el ejercicio

La capacidad del organismo para realizar ejercicio aeróbico depende en gran medida de la eficiencia del transporte de oxígeno. Los eritrocitos y la hemoglobina constituyen el principal sistema de transporte, integrándose con el sistema respiratorio y cardiovascular para satisfacer las demandas metabólicas del músculo esquelético.

El estudio de los eritrocitos resulta, por tanto, esencial para comprender las limitaciones y adaptaciones fisiológicas al ejercicio físico.

5. Leucocitos: tipos y funciones generales

Los leucocitos, o glóbulos blancos, constituyen el principal componente celular del sistema inmunitario circulante y desempeñan un papel esencial en la defensa del organismo frente a agentes patógenos, sustancias extrañas y células alteradas. Aunque representan una fracción muy pequeña del volumen sanguíneo en comparación con los eritrocitos, su importancia funcional es

fundamental para el mantenimiento de la integridad biológica, especialmente en situaciones de estrés fisiológico como el ejercicio físico.

Desde un punto de vista fisiológico, los leucocitos no actúan únicamente en la sangre, sino que utilizan el compartimento sanguíneo como vía de transporte hacia los tejidos donde ejercen sus funciones defensivas.

5.1. Características generales de los leucocitos

Los leucocitos son células nucleadas, con una elevada capacidad de movilidad y de respuesta a señales químicas. A diferencia de los eritrocitos, pueden abandonar el torrente sanguíneo mediante un proceso denominado diapédesis, atravesando la pared de los capilares para dirigirse a los tejidos.

Su concentración en sangre es variable y puede modificarse rápidamente en respuesta a estímulos fisiológicos, hormonales o patológicos. El número total de leucocitos en sangre constituye un indicador sensible del estado inmunológico y del nivel de activación del sistema defensivo.

5.2. Clasificación de los leucocitos

Desde el punto de vista morfológico y funcional, los leucocitos se clasifican en dos grandes grupos: **granulocitos** y **agranulocitos**.

5.2.1. Granulocitos

Los granulocitos se caracterizan por la presencia de gránulos citoplasmáticos visibles y por un núcleo lobulado. Incluyen:

- **Neutrófilos**:
  Son los leucocitos más abundantes en sangre y constituyen la primera línea de defensa frente a infecciones bacterianas. Su función principal es la fagocitosis y destrucción de microorganismos. Durante procesos inflamatorios agudos y tras el ejercicio intenso, su número en sangre puede aumentar de forma significativa.

- **Eosinófilos**:
  Participan en la respuesta frente a parásitos y en procesos alérgicos. También intervienen en la modulación de la inflamación.

- **Basófilos**:
  Son los menos abundantes y están implicados en reacciones alérgicas e inflamatorias, liberando mediadores como la histamina.

5.2.2. Agranulocitos

Los agranulocitos presentan un núcleo grande y carecen de gránulos citoplasmáticos visibles. Incluyen:

- **Linfocitos**:
  Son células clave del sistema inmunitario adaptativo. Se dividen funcionalmente en linfocitos B, linfocitos T y células NK. Participan en el reconocimiento específico de antígenos, la producción de anticuerpos y la destrucción de células infectadas o alteradas.

- **Monocitos**:
  Son las células precursoras de los macrófagos tisulares. Tras abandonar la sangre, se diferencian en macrófagos y participan en la fagocitosis, la presentación de antígenos y la regulación de la respuesta inmunitaria.

5.3. Distribución de los leucocitos en el organismo

Aunque los leucocitos se cuantifican habitualmente en sangre, la mayor parte de estas células se localiza en tejidos linfoides y periféricos. La sangre actúa como un compartimento de tránsito, permitiendo la redistribución rápida de leucocitos en función de las necesidades defensivas del organismo.

Durante el ejercicio físico, se produce una redistribución de leucocitos entre los compartimentos sanguíneo y tisular, influida por factores hemodinámicos y hormonales.

5.4. Producción y regulación de los leucocitos

Los leucocitos se producen en la médula ósea a partir de células madre hematopoyéticas. Su producción y liberación están reguladas por factores de crecimiento, citocinas y señales hormonales.

La vida media de los leucocitos es variable y depende del tipo celular. Algunos granulocitos tienen una vida relativamente corta, mientras que ciertos linfocitos pueden persistir durante años como parte de la memoria inmunológica.

5.5. Cambios leucocitarios inducidos por el ejercicio

El ejercicio físico agudo provoca un aumento transitorio del número de leucocitos circulantes, fenómeno conocido como **leucocitosis inducida por el ejercicio**. Este aumento se debe principalmente a la movilización de leucocitos desde los tejidos hacia la sangre, mediada por el incremento del flujo sanguíneo y la acción de catecolaminas.

Tras ejercicios prolongados o de alta intensidad, puede observarse una fase posterior de disminución transitoria de algunos subtipos leucocitarios, especialmente linfocitos, lo que refleja una redistribución hacia los tejidos y una modulación temporal de la función inmunitaria.

5.6. Importancia fisiológica de los leucocitos en el ejercicio

Los leucocitos desempeñan un papel clave en la protección del organismo frente a infecciones y en la regulación de la inflamación asociada al daño tisular inducido por el ejercicio. La comprensión de su comportamiento durante el esfuerzo físico resulta esencial para interpretar la relación entre ejercicio, inmunidad y salud.

6. Sistema inmunitario innato

El sistema inmunitario innato constituye la primera línea de defensa del organismo frente a agentes patógenos y sustancias extrañas. Se caracteriza por una respuesta rápida, inespecífica y presente desde el nacimiento, que no requiere un reconocimiento previo del agente agresor. Este sistema desempeña un papel esencial en la protección inmediata del organismo y en la activación posterior de la respuesta inmunitaria adaptativa.

Durante el ejercicio físico, el sistema inmunitario innato participa de forma activa en la respuesta inflamatoria asociada al daño tisular y en la defensa frente a posibles infecciones.

6.1. Barreras externas de defensa

Las barreras externas constituyen el primer nivel de protección del sistema inmunitario innato e incluyen la piel y las mucosas. Estas estructuras actúan como barreras físicas y químicas que impiden la entrada de microorganismos.

La piel presenta un epitelio resistente y secreciones con propiedades antimicrobianas, mientras que las mucosas respiratorias y digestivas producen moco y sustancias defensivas que dificultan

la colonización por patógenos. Durante el ejercicio, factores como la ventilación elevada o la deshidratación pueden influir sobre la eficacia de estas barreras.

6.2. Defensas internas inespecíficas

Cuando las barreras externas son superadas, entran en acción las defensas internas del sistema inmunitario innato, que incluyen diversos tipos celulares y mecanismos humorales.

6.2.1. Fagocitosis

La fagocitosis es un mecanismo fundamental de defensa innata mediante el cual determinadas células, principalmente neutrófilos y macrófagos, engloban y destruyen microorganismos, restos celulares y partículas extrañas.

Durante el ejercicio físico, especialmente tras esfuerzos intensos, se produce una activación transitoria de la fagocitosis como parte de la respuesta inflamatoria asociada al daño muscular.

6.2.2. Sistema del complemento

El sistema del complemento está formado por un conjunto de proteínas plasmáticas que, al activarse, contribuyen a la destrucción de microorganismos, la opsonización y la amplificación de la respuesta inflamatoria.

La activación del complemento favorece la atracción de células inmunitarias hacia el lugar de la agresión y potencia la eficacia de la fagocitosis.

6.2.3. Interferones

Los interferones son proteínas producidas por células infectadas por virus que actúan inhibiendo la replicación viral y estimulando la actividad de otras células inmunitarias. Constituyen un mecanismo importante de defensa frente a infecciones virales.

6.2.4. Células NK

Las células NK (natural killer) son linfocitos especializados en la destrucción de células infectadas por virus y células tumorales sin necesidad de un reconocimiento específico previo. Su actividad se modula por señales químicas y hormonales, y puede verse influida por el ejercicio físico.

6.3. Inflamación como respuesta innata

La inflamación es una respuesta local del sistema inmunitario innato frente a lesiones tisulares o infecciones. Se caracteriza por cambios vasculares y celulares que permiten la llegada de células defensivas y sustancias plasmáticas al tejido afectado.

Durante el ejercicio intenso o no habitual, el daño microestructural del músculo esquelético puede desencadenar una respuesta inflamatoria transitoria, necesaria para la reparación y adaptación del tejido.

6.4. Fiebre como mecanismo defensivo

La fiebre es una respuesta sistémica del sistema inmunitario innato que se produce como consecuencia de la liberación de pirógenos durante procesos infecciosos o inflamatorios. El aumento de la temperatura corporal puede dificultar la proliferación de microorganismos y potenciar la eficacia de la respuesta inmunitaria.

Aunque la fiebre no es una respuesta típica del ejercicio, comparte mecanismos regulatorios con la termorregulación inducida por el esfuerzo, lo que pone de manifiesto la integración entre los sistemas fisiológicos.

6.5. Sistema inmunitario innato y ejercicio físico

El ejercicio físico actúa como un estímulo modulador del sistema inmunitario innato. El ejercicio agudo provoca una activación transitoria de algunos componentes defensivos, mientras que el entrenamiento regular puede mejorar la eficiencia de la respuesta innata.

Sin embargo, esfuerzos muy intensos o prolongados pueden generar una situación de estrés fisiológico que modula temporalmente la función inmunitaria, lo que subraya la importancia del equilibrio entre carga y recuperación.

6.6. Importancia fisiológica del sistema inmunitario innato

El sistema inmunitario innato desempeña un papel esencial en la defensa inmediata del organismo y en la activación de la respuesta adaptativa. Su funcionamiento adecuado resulta fundamental para mantener la salud y permitir la práctica regular de ejercicio físico sin un aumento del riesgo de infección.

7. Sistema inmunitario adaptativo

El sistema inmunitario adaptativo constituye la segunda gran línea de defensa del organismo y se caracteriza por su **especificidad** y por la capacidad de desarrollar **memoria inmunológica**. A diferencia del sistema inmunitario innato, la respuesta adaptativa es más lenta en su activación inicial, pero altamente eficaz y específica frente a antígenos concretos.

Este sistema desempeña un papel fundamental en la protección a largo plazo frente a infecciones y en la adaptación del organismo a exposiciones repetidas a agentes patógenos. Su funcionamiento adecuado resulta esencial para la salud general y puede verse modulado por el ejercicio físico y el estado de entrenamiento.

7.1. Antígenos y reconocimiento inmunológico

Un antígeno es cualquier sustancia capaz de ser reconocida por el sistema inmunitario y de desencadenar una respuesta específica. El reconocimiento de los antígenos constituye el primer paso de la respuesta inmunitaria adaptativa y depende de receptores altamente especializados presentes en la superficie de los linfocitos.

La especificidad del reconocimiento antigénico permite al sistema inmunitario distinguir entre lo propio y lo extraño, así como responder de forma selectiva frente a distintos patógenos.

7.2. Linfocitos y su clasificación funcional

Los linfocitos son las células centrales del sistema inmunitario adaptativo y se clasifican en diferentes subtipos según su función:

- **Linfocitos B**:
  Son responsables de la respuesta inmunitaria humoral. Tras su activación, se diferencian en células plasmáticas capaces de producir anticuerpos específicos frente a un antígeno determinado. Los anticuerpos circulan en la sangre y otros fluidos corporales, facilitando la neutralización y eliminación de patógenos.

- **Linfocitos T**:
  Participan en la respuesta inmunitaria celular. Los linfocitos T cooperadores regulan la actividad de otras células inmunitarias mediante la liberación de citocinas, mientras que los linfocitos T citotóxicos destruyen directamente células infectadas o alteradas.

- **Linfocitos de memoria**:
  Son linfocitos B o T que persisten tras una respuesta inmunitaria primaria y permiten una respuesta más rápida y eficaz ante exposiciones posteriores al mismo antígeno.

7.3. Respuesta inmunitaria humoral

La respuesta humoral se basa en la producción de anticuerpos por parte de los linfocitos B activados. Estos anticuerpos se unen de forma específica a los antígenos, facilitando su neutralización, opsonización y eliminación mediante otros mecanismos inmunitarios.

La respuesta humoral es especialmente eficaz frente a patógenos extracelulares y toxinas. Su eficacia depende de la coordinación con el sistema inmunitario innato y de la adecuada función de los linfocitos B.

7.4. Respuesta inmunitaria celular

La respuesta inmunitaria celular está mediada principalmente por los linfocitos T y es fundamental para la defensa frente a patógenos intracelulares, como virus, y frente a células alteradas.

Los linfocitos T citotóxicos reconocen y destruyen células infectadas, mientras que los linfocitos T cooperadores regulan la respuesta inmunitaria mediante la secreción de citocinas que activan otras células defensivas.

7.5. Memoria inmunológica

Una característica distintiva del sistema inmunitario adaptativo es la capacidad de desarrollar memoria inmunológica. Tras una primera exposición a un antígeno, el sistema inmunitario conserva linfocitos de memoria que permiten una respuesta secundaria más rápida, intensa y eficaz.

Este principio constituye la base fisiológica de la vacunación y de la protección a largo plazo frente a infecciones recurrentes.

7.6. Sistema inmunitario adaptativo y ejercicio físico

El ejercicio físico modula la función del sistema inmunitario adaptativo. El ejercicio moderado y regular se asocia a una mejora de la vigilancia inmunológica y a una respuesta adaptativa más eficiente.

En contraste, ejercicios muy intensos o prolongados pueden inducir una modulación temporal de la función de algunos linfocitos, especialmente durante periodos de recuperación insuficiente, lo que puede afectar transitoriamente a la respuesta inmunitaria.

7.7. Importancia fisiológica del sistema inmunitario adaptativo

El sistema inmunitario adaptativo permite una defensa específica y duradera frente a agentes patógenos, complementando la acción del sistema inmunitario innato. Su integración con otros sistemas fisiológicos, como el sistema endocrino y el sistema nervioso, resulta esencial para mantener la salud y la capacidad funcional del organismo.

8. Integración entre la sangre y el sistema inmunitario

La sangre y el sistema inmunitario forman un sistema funcional estrechamente integrado que permite la defensa eficaz del organismo y el mantenimiento de la homeostasis frente a agresiones externas e internas. La sangre no solo actúa como medio de transporte de células y moléculas inmunitarias, sino que constituye un componente activo de la respuesta defensiva, facilitando la

comunicación, la regulación y la coordinación entre los distintos elementos del sistema inmunitario.

Esta integración adquiere especial relevancia durante el ejercicio físico, cuando se producen cambios hemodinámicos, hormonales y metabólicos que modulan la distribución y la función de las células inmunitarias.

8.1. La sangre como vía de transporte inmunitario

La sangre actúa como el principal sistema de transporte de las células del sistema inmunitario entre los órganos productores, los tejidos linfoides y los lugares donde se produce la agresión o el daño tisular. Los leucocitos circulantes utilizan el torrente sanguíneo para desplazarse rápidamente y responder a estímulos locales mediante procesos de migración y extravasación.

Este sistema de transporte permite una vigilancia inmunológica constante, facilitando la detección temprana de patógenos y la activación de respuestas defensivas adecuadas.

8.2. Sistema linfático y órganos linfoides

La integración entre sangre e inmunidad se extiende al sistema linfático, que actúa como un sistema complementario de drenaje y transporte. La linfa recoge líquido intersticial, células inmunitarias y antígenos desde los tejidos, devolviéndolos finalmente a la circulación sanguínea.

Los órganos linfoides, como los ganglios linfáticos, el bazo y el tejido linfoide asociado a mucosas, desempeñan un papel central en la activación y regulación de la respuesta inmunitaria. El bazo, en particular, filtra la sangre y permite el contacto directo entre antígenos circulantes y células inmunitarias.

8.3. Interacción entre inmunidad innata y adaptativa

La respuesta inmunitaria eficaz depende de la coordinación entre los mecanismos innatos y adaptativos. Las células del sistema inmunitario innato, como los macrófagos y las células dendríticas, actúan como puente entre ambos sistemas al presentar antígenos a los linfocitos del sistema adaptativo.

La sangre facilita esta interacción al permitir el transporte de antígenos, citocinas y células inmunitarias, asegurando una respuesta integrada y regulada frente a la agresión.

8.4. Papel de las citocinas y mediadores plasmáticos

Las citocinas son moléculas señalizadoras producidas por células inmunitarias y otros tipos celulares que regulan la activación, proliferación y diferenciación de las células del sistema inmunitario. Muchas de estas citocinas circulan en la sangre y actúan a distancia, coordinando la respuesta inmunitaria a nivel sistémico.

Durante el ejercicio físico, la liberación de citocinas asociadas al daño muscular y al estrés metabólico contribuye a modular la respuesta inflamatoria y la adaptación tisular.

8.5. Resolución de la inflamación y reparación tisular

La integración entre sangre e inmunidad no solo es esencial para iniciar la respuesta defensiva, sino también para su resolución. La eliminación de patógenos y restos celulares, seguida de la activación de mecanismos antiinflamatorios y de reparación, permite restablecer la homeostasis tisular.

La sangre facilita el transporte de factores de crecimiento, nutrientes y células implicadas en la reparación de los tejidos dañados, incluidos los tejidos musculares afectados por el ejercicio.

8.6. Importancia funcional de la integración sangre–inmunidad

La integración entre la sangre y el sistema inmunitario garantiza una respuesta defensiva eficaz, coordinada y regulada. Este sistema integrado permite al organismo responder de forma rápida a agresiones, adaptarse a situaciones de estrés fisiológico y mantener la salud a largo plazo.

En el contexto del ejercicio físico, esta integración resulta fundamental para comprender las respuestas inflamatorias transitorias, las adaptaciones inducidas por el entrenamiento y la relación entre carga de ejercicio, recuperación e inmunidad.

9. Respuestas hematológicas e inmunológicas al ejercicio

El ejercicio físico constituye un potente estímulo fisiológico que induce una serie de respuestas agudas y adaptaciones crónicas en la sangre y en el sistema inmunitario. Estas respuestas permiten al organismo afrontar el estrés metabólico y mecánico del ejercicio, facilitar la reparación tisular y mantener la homeostasis. La magnitud y el sentido de estas respuestas dependen de la intensidad, la duración y la frecuencia del ejercicio, así como del estado de entrenamiento del individuo.

9.1. Respuestas hematológicas al ejercicio agudo

Durante el ejercicio agudo se producen cambios inmediatos en la composición y las propiedades de la sangre, que son en gran medida transitorios y reversibles.

Uno de los fenómenos más característicos es la **reducción del volumen plasmático**, causada por el desplazamiento de líquido hacia el espacio intersticial y por la pérdida de agua a través de la sudoración. Esta reducción del volumen plasmático da lugar a un aumento relativo de la concentración de eritrocitos, proteínas plasmáticas y otros solutos, fenómeno conocido como **hemoconcentración**.

Como consecuencia de la hemoconcentración, el hematocrito y la concentración de hemoglobina pueden aumentar de forma transitoria durante el ejercicio, lo que incrementa momentáneamente la capacidad de transporte de oxígeno. Sin embargo, este efecto debe interpretarse con cautela, ya que también se acompaña de un aumento de la viscosidad sanguínea.

Además, el ejercicio agudo puede inducir una liberación transitoria de eritrocitos desde reservorios como el bazo, contribuyendo al aumento del número de células circulantes.

9.2. Respuesta leucocitaria al ejercicio agudo

El ejercicio físico agudo provoca un aumento del número total de leucocitos circulantes, fenómeno conocido como **leucocitosis inducida por el ejercicio**. Esta respuesta se produce rápidamente y está mediada por el aumento del flujo sanguíneo y por la acción de catecolaminas y glucocorticoides.

Inicialmente, se observa un aumento predominante de neutrófilos y linfocitos. Sin embargo, tras ejercicios prolongados o de alta intensidad, puede producirse una disminución transitoria del número de linfocitos circulantes durante el periodo de recuperación, reflejando una redistribución hacia los tejidos.

Este patrón bifásico de la respuesta leucocitaria es característico del ejercicio intenso y tiene implicaciones importantes para la función inmunitaria.

9.3. Respuesta inflamatoria inducida por el ejercicio

El ejercicio, especialmente cuando es intenso o no habitual, puede provocar microlesiones en el músculo esquelético y otros tejidos. Estas microlesiones desencadenan una **respuesta**

inflamatoria local y sistémica, caracterizada por la activación de células inmunitarias y la liberación de citocinas proinflamatorias.

Esta respuesta inflamatoria no debe interpretarse como un proceso patológico, sino como un mecanismo fisiológico necesario para la eliminación de tejidos dañados y la posterior reparación y adaptación muscular.

9.4. Respuestas inmunológicas al ejercicio crónico

El entrenamiento físico regular induce adaptaciones en el sistema inmunitario que dependen de la carga total de ejercicio. El ejercicio moderado y sistemático se asocia generalmente a una mejora de la función inmunitaria, caracterizada por una mayor eficacia de la vigilancia inmunológica y una respuesta inflamatoria más controlada.

En estos casos, se observa una mejor regulación de las citocinas, una respuesta más eficiente de los fagocitos y una adecuada activación de los mecanismos de reparación tisular.

9.5. Ejercicio intenso, fatiga e inmunosupresión transitoria

Cuando el ejercicio es muy intenso, prolongado o se realiza con una recuperación insuficiente, puede producirse una **modulación temporal de la función inmunitaria**. Esta situación se ha relacionado con una mayor susceptibilidad a infecciones, especialmente de las vías respiratorias superiores, durante los periodos posteriores al esfuerzo intenso.

Este fenómeno refleja un desequilibrio transitorio entre los mecanismos de defensa y las demandas fisiológicas impuestas por el ejercicio, subrayando la importancia de una adecuada planificación del entrenamiento y de la recuperación.

9.6. Papel del entrenamiento en la regulación hematológica e inmunitaria

El entrenamiento físico regular induce adaptaciones hematológicas beneficiosas, como el aumento del volumen plasmático y la mejora de la eficiencia del transporte de oxígeno. Estas adaptaciones contribuyen a una menor hemoconcentración durante el ejercicio y a una mayor estabilidad hemodinámica.

Desde el punto de vista inmunitario, el entrenamiento bien planificado favorece una respuesta más equilibrada, reduciendo la magnitud de las respuestas inflamatorias excesivas y mejorando la capacidad de recuperación tras el ejercicio.

9.7. Significado fisiológico de las respuestas al ejercicio

Las respuestas hematológicas e inmunológicas al ejercicio reflejan la capacidad del organismo para adaptarse al estrés fisiológico y mantener la homeostasis. Estas respuestas permiten afrontar el esfuerzo, reparar los tejidos dañados y desarrollar adaptaciones que mejoran la tolerancia al ejercicio.

La comprensión de estos procesos resulta esencial para interpretar la relación entre ejercicio, salud e inmunidad, y para optimizar el rendimiento físico minimizando el riesgo de efectos adversos.

10. Sangre, inmunidad y patología asociada al ejercicio

El estudio de la sangre y del sistema inmunitario en el contexto del ejercicio físico no puede desligarse de sus implicaciones clínicas y aplicadas. Las respuestas fisiológicas al ejercicio y las adaptaciones inducidas por el entrenamiento pueden, en determinadas circunstancias, dar lugar a alteraciones hematológicas o inmunológicas que afectan a la salud y al rendimiento físico. La comprensión de estos procesos resulta fundamental para interpretar situaciones de fatiga, enfermedad y disminución del rendimiento en personas físicamente activas.

10.1. Anemia y ejercicio físico

La anemia se caracteriza por una disminución de la concentración de hemoglobina, del número de eritrocitos o de ambos, lo que limita la capacidad de transporte de oxígeno de la sangre. En el contexto del ejercicio, la anemia se asocia a una reducción del rendimiento aeróbico, fatiga precoz y menor tolerancia al esfuerzo.

En individuos físicamente activos y deportistas pueden observarse situaciones de **anemia funcional** o **pseudoanemia**, caracterizadas por una disminución aparente de la concentración de hemoglobina debida al aumento del volumen plasmático inducido por el entrenamiento. En estos casos, la masa total de eritrocitos puede ser normal o incluso aumentada, y no existe un compromiso real del transporte de oxígeno.

No obstante, déficits de hierro, pérdidas sanguíneas repetidas o una ingesta insuficiente pueden dar lugar a anemias verdaderas que requieren una evaluación adecuada.

10.2. Infecciones y ejercicio físico

La relación entre ejercicio físico e infecciones ha sido ampliamente estudiada. El ejercicio moderado y regular se asocia generalmente a una menor incidencia de infecciones, debido a una mejora de la función inmunitaria y de la vigilancia inmunológica.

En contraste, esfuerzos muy intensos, prolongados o realizados con una recuperación insuficiente pueden aumentar transitoriamente la susceptibilidad a infecciones, especialmente de las vías respiratorias superiores. Este aumento del riesgo refleja una modulación temporal de la función inmunitaria durante el periodo posterior al ejercicio intenso.

10.3. Sobreentrenamiento e inmunidad

El sobreentrenamiento se caracteriza por un desequilibrio prolongado entre la carga de ejercicio y la capacidad de recuperación del organismo. Desde el punto de vista inmunológico, esta situación se asocia a alteraciones persistentes de la función inmunitaria, con una mayor incidencia de infecciones, inflamación crónica de bajo grado y una recuperación deficiente.

Las alteraciones hematológicas e inmunológicas observadas en el sobreentrenamiento reflejan un estado de estrés fisiológico sostenido que compromete la homeostasis y el rendimiento físico.

10.4. Inflamación crónica y ejercicio

La inflamación crónica de bajo grado se ha relacionado con diversas patologías metabólicas y cardiovasculares. El ejercicio físico regular y bien dosificado contribuye a reducir este estado inflamatorio, modulando la producción de citocinas y mejorando la función inmunitaria.

Sin embargo, cargas de ejercicio excesivas pueden mantener una activación inflamatoria persistente que dificulta la recuperación y favorece la aparición de lesiones y alteraciones funcionales.

10.5. Alteraciones de la coagulación y ejercicio

El ejercicio físico influye sobre los mecanismos de coagulación y fibrinólisis. En general, el ejercicio regular se asocia a una mejora del equilibrio hemostático, reduciendo el riesgo de eventos trombóticos.

Durante el ejercicio intenso, pueden producirse cambios transitorios en la activación plaquetaria y en los factores de coagulación, que suelen normalizarse durante la recuperación. La comprensión de estos cambios resulta relevante en poblaciones con riesgo cardiovascular.

10.6. Implicaciones prácticas en el ámbito del ejercicio y la salud

El conocimiento de las interacciones entre sangre, inmunidad y ejercicio permite identificar situaciones de riesgo, interpretar alteraciones fisiológicas y diseñar programas de entrenamiento más seguros y eficaces. La evaluación del estado hematológico e inmunitario puede aportar información valiosa sobre la carga de entrenamiento, el estado de recuperación y la salud general del individuo.

Desde una perspectiva aplicada, el ejercicio físico bien planificado constituye una herramienta eficaz para mejorar la función hematológica e inmunitaria, mientras que una carga excesiva o mal gestionada puede comprometer estos sistemas.

Bibliografía

Fox SI. Fisiología Humana. 15ª ed. McGraw-Hill Interamericana; 2021.

López Chicharro J, Fernández Vaquero A. *Fisiología Del Ejercicio*. 4a ed. Editorial Médica Panamericana; 2023.

Montero, D., & Lundby, C. (2018). Regulation of red blood cell volume with exercise training. *Comprehensive Physiology, 9*(1), 149–164.

Posthuma, J. J., van der Meijden, P. E. J., Ten Cate, H., & Spronk, H. M. (2015). Short- and long-term exercise induced alterations in haemostasis: A review of the literature. *Blood Reviews, 29*(3), 171–178.

Silverthorn DU. *Fisiología Humana Un Enfoque Integrado*. Ed. 8. Editorial Médica Panamericana; 2019

Simpson, R. J., Kunz, H., Agha, N., & Graff, R. (2015). Exercise and the regulation of immune functions. *Progress in Molecular Biology and Translational Science, 135*, 355–380.

Tema 12. Fisiología del entrenamiento aeróbico y anaeróbico

1. Introducción al entrenamiento de los sistemas energéticos

El ejercicio físico requiere un aporte continuo de energía para mantener la contracción muscular y sostener el trabajo mecánico. Esta energía procede de la degradación de los nutrientes y se utiliza finalmente en forma de ATP (adenosín trifosfato), que constituye la fuente energética inmediata de la célula muscular. Sin embargo, las reservas de ATP en el músculo son muy limitadas, por lo que durante el ejercicio debe resintetizarse continuamente mediante diferentes vías metabólicas.

La producción de energía durante el ejercicio depende de la acción coordinada de varios sistemas energéticos capaces de resintetizar ATP a partir de distintos sustratos. La contribución relativa de cada sistema está determinada principalmente por la intensidad y la duración del esfuerzo, así como por el estado de entrenamiento del individuo. El entrenamiento físico provoca adaptaciones en los sistemas responsables de la producción, transporte y utilización de energía, lo que permite mejorar la eficiencia metabólica y retrasar la aparición de la fatiga.

Desde el punto de vista del rendimiento deportivo, el entrenamiento de los sistemas energéticos tiene como objetivo optimizar la capacidad del organismo para producir energía de acuerdo con las demandas específicas de cada modalidad deportiva. Mientras que los deportes de resistencia dependen en gran medida del metabolismo aeróbico, las actividades de alta intensidad y corta duración requieren una elevada capacidad de producción de energía por vías anaeróbicas.

1.1. Concepto de potencia y capacidad de los sistemas energéticos

En fisiología del ejercicio se distingue entre potencia y capacidad de los sistemas energéticos. La potencia metabólica hace referencia a la velocidad con la que un sistema puede producir energía, es decir, a la rapidez con la que es capaz de resintetizar ATP. La capacidad, en cambio, se refiere a la cantidad total de energía que un sistema puede aportar durante un esfuerzo antes de que aparezca la fatiga.

Los diferentes sistemas energéticos presentan características distintas en relación con estos dos parámetros. El sistema de los fosfágenos posee una elevada potencia, ya que permite producir energía de forma inmediata, pero su capacidad es muy limitada. Por el contrario, el metabolismo aeróbico presenta una menor velocidad de producción de energía, aunque su capacidad es mucho mayor, lo que permite sostener esfuerzos prolongados. La glucólisis anaeróbica se sitúa en una posición intermedia, con una potencia relativamente elevada y una capacidad moderada.

El entrenamiento puede modificar tanto la potencia como la capacidad de estos sistemas. Los estímulos de alta intensidad tienden a mejorar la potencia anaeróbica, mientras que el entrenamiento de resistencia favorece el desarrollo de la capacidad aeróbica.

1.2. Sistemas energéticos implicados en el ejercicio

La resíntesis de ATP durante el ejercicio se realiza a través de tres sistemas energéticos principales: el sistema de los fosfágenos, la glucólisis anaeróbica y el metabolismo aeróbico u oxidativo.

El sistema de los fosfágenos utiliza el ATP y la fosfocreatina almacenados en el músculo para producir energía de forma inmediata. Este sistema predomina en esfuerzos máximos de muy corta duración, como los sprints o los saltos.

Cuando el ejercicio se prolonga y mantiene una intensidad elevada, aumenta la participación de la glucólisis anaeróbica, que produce ATP a partir de la degradación de la glucosa o del glucógeno muscular sin necesidad de oxígeno. Este proceso se asocia a la producción de lactato y permite sostener esfuerzos intensos durante periodos relativamente breves.

En ejercicios de mayor duración predomina el metabolismo aeróbico, que utiliza oxígeno para oxidar principalmente carbohidratos y grasas. Aunque la velocidad de producción de energía es menor, este sistema permite mantener el ejercicio durante periodos prolongados.

1.3. Integración de los metabolismos aeróbico y anaeróbico

En la práctica, los sistemas energéticos no actúan de forma aislada, sino de manera integrada y simultánea. Desde el inicio del ejercicio los tres sistemas contribuyen a la resíntesis de ATP, aunque su participación relativa depende de la intensidad y la duración del esfuerzo.

En esfuerzos muy intensos y breves predomina el metabolismo anaeróbico, especialmente el sistema de los fosfágenos. A medida que el ejercicio se prolonga, aumenta la participación de la glucólisis anaeróbica y posteriormente del metabolismo aeróbico. En ejercicios prolongados de resistencia, el metabolismo oxidativo se convierte en la principal fuente de energía.

El nivel de entrenamiento también influye en esta interacción. Los deportistas entrenados en resistencia presentan una mayor capacidad oxidativa, lo que permite reducir la dependencia de las vías anaeróbicas a una misma intensidad de ejercicio.

1.4. Importancia de los sistemas energéticos en el rendimiento deportivo

El rendimiento deportivo está estrechamente relacionado con la capacidad del organismo para producir energía de forma eficiente según las demandas del ejercicio. Cada modalidad deportiva presenta un perfil característico de utilización de los sistemas energéticos.

En los deportes de resistencia, el rendimiento depende principalmente de la capacidad aeróbica del deportista, reflejada en variables como el consumo máximo de oxígeno o el umbral de lactato. Por el contrario, en disciplinas explosivas de corta duración el rendimiento está determinado en mayor medida por la potencia de los sistemas anaeróbicos.

En muchos deportes colectivos y de situación se alternan periodos de actividad intensa con fases de recuperación, por lo que el rendimiento depende de la interacción entre ambos metabolismos. En estos casos, el metabolismo aeróbico desempeña un papel importante en la recuperación entre esfuerzos de alta intensidad.

El conocimiento del funcionamiento de los sistemas energéticos y de sus adaptaciones al entrenamiento permite orientar de forma más precisa la planificación del entrenamiento y optimizar el rendimiento deportivo.

2. Potencia y capacidad aeróbica

La potencia y la capacidad aeróbica constituyen dos de los principales determinantes del rendimiento en las actividades de resistencia. Ambos conceptos se relacionan con la capacidad del organismo para captar, transportar y utilizar oxígeno durante el ejercicio con el fin de producir energía mediante el metabolismo oxidativo. Este proceso implica la participación coordinada de varios sistemas fisiológicos, principalmente el sistema respiratorio, el sistema cardiovascular y el músculo esquelético.

El metabolismo aeróbico permite la obtención de energía a partir de la oxidación de carbohidratos y lípidos en presencia de oxígeno, generando grandes cantidades de ATP. Aunque la velocidad de producción de energía de este sistema es menor que la de los sistemas anaeróbicos, su elevada capacidad permite sostener el ejercicio durante largos periodos de tiempo. Por esta razón, el desarrollo de la potencia y de la capacidad aeróbica resulta fundamental en disciplinas deportivas caracterizadas por esfuerzos prolongados.

El entrenamiento de resistencia produce importantes adaptaciones fisiológicas que mejoran la eficiencia del metabolismo aeróbico. Entre estas adaptaciones destacan el aumento del gasto cardíaco máximo, la mejora del transporte de oxígeno en sangre, el incremento de la densidad capilar en el músculo y el aumento del contenido mitocondrial y de la actividad enzimática oxidativa. Como consecuencia, el organismo es capaz de producir energía de forma más eficiente y mantener intensidades de ejercicio más elevadas durante periodos prolongados.

2.1. Concepto de potencia aeróbica

La potencia aeróbica se define como la máxima capacidad del organismo para captar, transportar y utilizar oxígeno durante el ejercicio. Esta capacidad se expresa habitualmente mediante el consumo máximo de oxígeno ($VO_2máx$), que representa la mayor cantidad de oxígeno que el organismo puede utilizar por unidad de tiempo durante un esfuerzo máximo.

El $VO_2máx$ depende de varios factores fisiológicos, entre los que destacan el gasto cardíaco máximo, la capacidad de transporte de oxígeno de la sangre y la capacidad de los tejidos musculares para extraer y utilizar el oxígeno disponible. Por tanto, la potencia aeróbica refleja la eficiencia del sistema integrado de transporte y utilización de oxígeno en el organismo.

Desde el punto de vista del rendimiento deportivo, un mayor $VO_2máx$ permite realizar ejercicios de mayor intensidad antes de que se produzca la fatiga. No obstante, aunque la potencia aeróbica constituye un indicador fundamental de la capacidad funcional del organismo, no es el único factor que determina el rendimiento en pruebas de resistencia.

2.2. Concepto de capacidad aeróbica

La capacidad aeróbica se refiere a la habilidad del organismo para mantener un ejercicio prolongado utilizando el metabolismo oxidativo como principal fuente de energía. Mientras que la potencia aeróbica se relaciona con el límite máximo del sistema de transporte y utilización de oxígeno, la capacidad aeróbica está asociada con la posibilidad de sostener un determinado nivel de esfuerzo durante largos periodos de tiempo.

Este concepto está estrechamente relacionado con factores como el umbral de lactato, la eficiencia metabólica y la economía de ejercicio. Los deportistas con una elevada capacidad aeróbica son capaces de mantener intensidades de ejercicio relativamente altas sin acumular grandes cantidades de lactato, lo que retrasa la aparición de la fatiga.

El entrenamiento de resistencia mejora la capacidad aeróbica mediante adaptaciones que favorecen el metabolismo oxidativo, como el aumento del número y tamaño de las mitocondrias, el incremento de la actividad de las enzimas oxidativas y una mayor utilización de los ácidos grasos como fuente energética.

2.3. Relación entre potencia aeróbica y rendimiento deportivo

La potencia aeróbica y la capacidad aeróbica se relacionan estrechamente con el rendimiento en deportes de resistencia. Un mayor VO_2máx suele asociarse con una mayor capacidad para realizar ejercicio de intensidad elevada. Sin embargo, entre deportistas de alto nivel las diferencias en VO_2máx suelen ser relativamente pequeñas, por lo que otros factores adquieren una mayor importancia.

Entre estos factores destacan el umbral de lactato y la economía de ejercicio. El umbral de lactato indica la intensidad máxima de ejercicio que puede mantenerse sin que se produzca una acumulación progresiva de lactato en sangre, mientras que la economía de ejercicio refleja la eficiencia con la que el organismo utiliza la energía para realizar un determinado trabajo.

En consecuencia, el rendimiento en pruebas de resistencia no depende únicamente de la potencia aeróbica máxima, sino también de la capacidad del deportista para mantener un alto porcentaje de su VO_2máx durante periodos prolongados.

2.4. Factores determinantes del VO_2máx

El consumo máximo de oxígeno está determinado por varios factores fisiológicos que intervienen en el transporte y la utilización del oxígeno en el organismo. Entre los principales determinantes se encuentran el sistema respiratorio, el sistema cardiovascular y el sistema muscular.

El sistema cardiovascular desempeña un papel fundamental, ya que el gasto cardíaco máximo determina la cantidad de sangre oxigenada que puede llegar a los músculos activos. Por su parte, el contenido de hemoglobina en sangre influye en la capacidad de transporte de oxígeno. Finalmente, en el músculo esquelético la densidad capilar, el contenido mitocondrial y la actividad enzimática oxidativa condicionan la capacidad de utilización del oxígeno.

El entrenamiento de resistencia mejora muchos de estos factores, lo que contribuye al aumento del VO_2máx y a la mejora del rendimiento aeróbico.

2.5. Limitaciones fisiológicas del transporte y utilización de oxígeno

El consumo máximo de oxígeno puede estar limitado por diferentes factores a lo largo de la cadena de transporte de oxígeno. Entre ellos destacan la capacidad del sistema cardiovascular para bombear sangre, la capacidad de transporte de oxígeno de la sangre y la capacidad de los músculos para utilizar ese oxígeno en los procesos metabólicos.

En la mayoría de los individuos sanos, el principal factor limitante del VO_2máx suele ser el sistema cardiovascular, especialmente el gasto cardíaco máximo. No obstante, en deportistas muy entrenados también pueden adquirir importancia factores periféricos relacionados con la capacidad oxidativa del músculo.

El conocimiento de estos factores limitantes permite comprender las adaptaciones inducidas por el entrenamiento y orientar de forma más precisa la planificación del entrenamiento de resistencia.

3. Determinantes fisiológicos del metabolismo aeróbico

El metabolismo aeróbico depende de la capacidad del organismo para captar oxígeno del aire, transportarlo hasta los tejidos y utilizarlo en las células musculares para la producción de energía. Este proceso implica la participación coordinada de varios sistemas fisiológicos que forman una cadena funcional de transporte y utilización de oxígeno. Cualquier limitación en alguno de estos eslabones puede afectar al rendimiento aeróbico.

Durante el ejercicio, el oxígeno debe atravesar diferentes etapas antes de ser utilizado en la mitocondria para la producción de ATP. En primer lugar, debe ser captado por el sistema respiratorio a través de la ventilación pulmonar. Posteriormente, se difunde desde los alveolos hacia la sangre, donde es transportado principalmente unido a la hemoglobina. A través del sistema cardiovascular, la sangre oxigenada se distribuye hacia los músculos activos. Finalmente, el oxígeno difunde desde los capilares hacia las fibras musculares y es utilizado en las mitocondrias para la oxidación de los sustratos energéticos.

El rendimiento aeróbico depende, por tanto, de la eficiencia con la que se desarrolla cada una de estas etapas. El entrenamiento de resistencia produce adaptaciones en todos estos sistemas, mejorando la capacidad del organismo para transportar y utilizar oxígeno durante el ejercicio.

3.1. Sistema respiratorio

El sistema respiratorio es responsable de la captación de oxígeno del aire y de la eliminación del dióxido de carbono producido durante el metabolismo celular. Durante el ejercicio se produce un aumento de la ventilación pulmonar para satisfacer las mayores demandas metabólicas del organismo.

La ventilación pulmonar depende principalmente de dos variables: el volumen corriente, que representa la cantidad de aire movilizada en cada respiración, y la frecuencia respiratoria. Con el incremento de la intensidad del ejercicio, ambos parámetros aumentan para permitir un mayor intercambio gaseoso en los pulmones.

En individuos sanos, el sistema respiratorio rara vez constituye el principal factor limitante del consumo máximo de oxígeno. No obstante, el entrenamiento puede mejorar la eficiencia ventilatoria, reduciendo el coste energético de la respiración durante el ejercicio y facilitando el intercambio de gases en los pulmones.

3.2. Transporte de oxígeno en sangre

Una vez que el oxígeno llega a los alveolos pulmonares, difunde hacia la sangre a través de la membrana alveolocapilar. En la sangre, la mayor parte del oxígeno se transporta unido a la hemoglobina de los glóbulos rojos, mientras que una pequeña fracción se encuentra disuelta en el plasma.

La capacidad de transporte de oxígeno de la sangre depende principalmente de la concentración de hemoglobina y del volumen sanguíneo total. Un mayor contenido de hemoglobina permite transportar mayores cantidades de oxígeno hacia los músculos activos durante el ejercicio.

El entrenamiento de resistencia puede aumentar el volumen plasmático y el volumen sanguíneo total, lo que mejora el transporte de oxígeno y facilita la distribución de sangre hacia los tejidos activos.

3.3. Sistema cardiovascular

El sistema cardiovascular desempeña un papel fundamental en el transporte de oxígeno desde los pulmones hasta los músculos que realizan el trabajo. Durante el ejercicio se produce un aumento del gasto cardíaco, que es el volumen de sangre que el corazón bombea por minuto.

El gasto cardíaco depende de dos factores principales: la frecuencia cardíaca y el volumen sistólico. Con el aumento de la intensidad del ejercicio se incrementa la frecuencia cardíaca, mientras que el volumen sistólico también puede aumentar como consecuencia de una mayor capacidad de llenado y contracción del corazón.

El entrenamiento de resistencia produce adaptaciones cardiovasculares importantes, como el aumento del volumen sistólico y del gasto cardíaco máximo, lo que permite transportar mayores cantidades de oxígeno hacia los músculos activos durante el ejercicio.

3.4. Difusión periférica del oxígeno

Una vez que la sangre oxigenada llega a los músculos, el oxígeno debe difundirse desde los capilares hacia las fibras musculares. Este proceso depende de la diferencia de presión parcial de oxígeno entre la sangre y el tejido muscular, así como de la superficie de intercambio disponible.

La densidad capilar del músculo esquelético desempeña un papel importante en este proceso, ya que un mayor número de capilares facilita la difusión de oxígeno hacia las fibras musculares y mejora el suministro de nutrientes.

El entrenamiento de resistencia aumenta la capilarización muscular, lo que favorece el intercambio de gases y mejora el aporte de oxígeno a las células musculares.

3.5. Utilización muscular del oxígeno

El último paso en la cadena de transporte de oxígeno es su utilización en las mitocondrias de las fibras musculares. En estas estructuras se lleva a cabo la oxidación de los sustratos energéticos mediante procesos metabólicos que generan ATP.

La capacidad del músculo para utilizar oxígeno depende de factores como el número y tamaño de las mitocondrias, la actividad de las enzimas oxidativas y el contenido de mioglobina en las fibras musculares. Estas características determinan la capacidad oxidativa del músculo.

El entrenamiento de resistencia aumenta el contenido mitocondrial, la actividad enzimática oxidativa y la capacidad de utilización de oxígeno en el músculo esquelético. Como consecuencia, el organismo puede producir energía de forma más eficiente durante el ejercicio prolongado.

4. Adaptaciones fisiológicas al entrenamiento aeróbico

El entrenamiento aeróbico produce una serie de adaptaciones fisiológicas que mejoran la capacidad del organismo para captar, transportar y utilizar oxígeno durante el ejercicio. Estas adaptaciones afectan principalmente al sistema cardiovascular, al músculo esquelético, al metabolismo energético y, en menor medida, al sistema respiratorio. Como resultado, el organismo se vuelve más eficiente en la producción de energía mediante el metabolismo oxidativo, lo que permite mantener intensidades de ejercicio más elevadas durante periodos prolongados.

Estas modificaciones son consecuencia de la exposición repetida a estímulos de entrenamiento que incrementan la demanda metabólica del organismo. Con el tiempo, el cuerpo responde mediante cambios estructurales y funcionales que mejoran la eficiencia del sistema de transporte

de oxígeno y la capacidad oxidativa del músculo. En conjunto, estas adaptaciones explican el aumento del consumo máximo de oxígeno, la mejora del umbral de lactato y el incremento de la resistencia a la fatiga observados en individuos entrenados.

4.1. Adaptaciones cardiovasculares

El sistema cardiovascular experimenta algunas de las adaptaciones más importantes como consecuencia del entrenamiento aeróbico. Estas adaptaciones permiten mejorar el transporte de oxígeno hacia los músculos activos durante el ejercicio.

Una de las modificaciones más relevantes es el aumento del volumen sistólico, es decir, la cantidad de sangre expulsada por el corazón en cada latido. Este aumento se debe principalmente a una mayor capacidad de llenado ventricular y a una mayor contractilidad del músculo cardíaco. Como consecuencia, el corazón puede bombear una mayor cantidad de sangre con cada latido.

El incremento del volumen sistólico también contribuye al aumento del gasto cardíaco máximo, que representa la cantidad total de sangre que el corazón puede bombear por minuto durante el ejercicio máximo. Este factor constituye uno de los principales determinantes del consumo máximo de oxígeno.

Otra adaptación característica del entrenamiento aeróbico es la disminución de la frecuencia cardíaca en reposo y durante el ejercicio submáximo. Este fenómeno se explica por el aumento del volumen sistólico y por cambios en la regulación del sistema nervioso autónomo que favorecen una mayor actividad parasimpática.

Además, el entrenamiento de resistencia suele producir un aumento del volumen sanguíneo total, especialmente del volumen plasmático. Este incremento mejora el retorno venoso al corazón, favorece el llenado ventricular y contribuye a una mayor capacidad de transporte de oxígeno.

4.2. Adaptaciones musculares

El músculo esquelético experimenta importantes adaptaciones estructurales y funcionales como resultado del entrenamiento aeróbico. Estas modificaciones permiten mejorar la capacidad del músculo para utilizar oxígeno y producir energía mediante el metabolismo oxidativo.

Una de las adaptaciones más destacadas es el aumento de la densidad capilar en el músculo. El incremento del número de capilares alrededor de las fibras musculares mejora el suministro de oxígeno y nutrientes, además de facilitar la eliminación de los productos metabólicos.

Otra adaptación importante es el aumento del contenido mitocondrial. Las mitocondrias son las estructuras celulares donde se lleva a cabo la producción de energía mediante procesos oxidativos. El entrenamiento aeróbico incrementa tanto el número como el tamaño de estas estructuras, lo que mejora la capacidad del músculo para generar ATP mediante el metabolismo aeróbico.

También se observa un aumento del contenido de mioglobina en las fibras musculares. La mioglobina es una proteína que facilita el transporte de oxígeno dentro de la célula muscular, favoreciendo su difusión hacia las mitocondrias.

En cuanto a las fibras musculares, el entrenamiento de resistencia puede producir ciertas modificaciones funcionales que aumentan la capacidad oxidativa de las fibras, especialmente de las fibras tipo I y de las fibras tipo IIa.

4.3. Adaptaciones metabólicas

El entrenamiento aeróbico produce importantes cambios en el metabolismo energético del músculo esquelético. Estas adaptaciones permiten mejorar la eficiencia en la utilización de los sustratos energéticos y retrasar la aparición de la fatiga durante el ejercicio prolongado.

Una de las principales adaptaciones metabólicas es el aumento de la actividad de las enzimas oxidativas implicadas en el metabolismo aeróbico. Este incremento facilita la oxidación de los sustratos energéticos y mejora la capacidad del músculo para producir ATP mediante vías oxidativas.

El entrenamiento también modifica la utilización de los sustratos energéticos durante el ejercicio. En individuos entrenados se observa una mayor utilización de los ácidos grasos como fuente de energía y una menor dependencia del glucógeno muscular a intensidades submáximas. Este fenómeno contribuye a preservar las reservas de glucógeno y permite prolongar la duración del ejercicio.

Asimismo, el entrenamiento mejora la capacidad del organismo para producir, transportar y eliminar lactato. Como consecuencia, se retrasa la acumulación de lactato en sangre durante el ejercicio y aumenta la intensidad a la que puede mantenerse el equilibrio entre producción y eliminación de este metabolito.

4.4. Adaptaciones respiratorias

El sistema respiratorio también experimenta algunas adaptaciones como consecuencia del entrenamiento aeróbico, aunque su papel como factor limitante del rendimiento suele ser menor en comparación con el sistema cardiovascular y el músculo esquelético.

Entre las adaptaciones observadas se encuentra una mejora de la eficiencia ventilatoria durante el ejercicio submáximo. Los individuos entrenados suelen presentar una menor ventilación para una misma intensidad de ejercicio, lo que refleja una mayor eficiencia en el intercambio de gases.

El entrenamiento también puede mejorar la coordinación entre la ventilación y las demandas metabólicas del ejercicio, facilitando el mantenimiento de un adecuado intercambio de oxígeno y dióxido de carbono.

En conjunto, estas adaptaciones contribuyen a optimizar el funcionamiento del sistema respiratorio durante el ejercicio, aunque la mejora del rendimiento aeróbico depende en mayor medida de las adaptaciones cardiovasculares y musculares.

5. Umbral de lactato y transición metabólica

Durante el ejercicio de intensidad creciente se producen cambios progresivos en la contribución relativa de los distintos sistemas energéticos. A intensidades bajas y moderadas, el metabolismo aeróbico es suficiente para cubrir la mayor parte de las demandas energéticas del músculo. Sin embargo, a medida que aumenta la intensidad del ejercicio, la producción de energía mediante la glucólisis anaeróbica se incrementa y comienza a producirse una mayor acumulación de lactato en sangre.

El punto a partir del cual la concentración de lactato en sangre empieza a aumentar de forma significativa se conoce como umbral de lactato. Este fenómeno refleja una transición metabólica en la que la producción de lactato supera la capacidad del organismo para eliminarlo o reutilizarlo. Desde el punto de vista fisiológico, el umbral de lactato representa una referencia importante para

evaluar la capacidad de resistencia de un individuo y para determinar la intensidad óptima de entrenamiento en deportes de resistencia.

El entrenamiento aeróbico puede modificar la intensidad a la que aparece este umbral. En individuos entrenados, el umbral de lactato se produce a intensidades de ejercicio más elevadas, lo que permite mantener ritmos de trabajo mayores durante más tiempo sin que se produzca una acumulación significativa de lactato.

5.1. Concepto de umbral de lactato

El umbral de lactato se define como la intensidad de ejercicio a partir de la cual la concentración de lactato en sangre comienza a aumentar de manera progresiva por encima de los valores basales. Este aumento refleja un desequilibrio entre la producción de lactato en el músculo y su eliminación o reutilización por otros tejidos.

Durante el ejercicio de intensidad moderada, el lactato producido en el músculo puede ser utilizado como sustrato energético por otros músculos, por el corazón o por el hígado mediante procesos como el ciclo de Cori. Sin embargo, cuando la intensidad del ejercicio aumenta y la producción de lactato se incrementa de forma considerable, la capacidad de eliminación se vuelve insuficiente y el lactato comienza a acumularse en la sangre.

Desde el punto de vista práctico, el umbral de lactato se utiliza como un indicador de la capacidad de resistencia, ya que está estrechamente relacionado con la intensidad máxima de ejercicio que puede mantenerse durante periodos prolongados.

5.2. Umbral ventilatorio

El umbral ventilatorio es un fenómeno fisiológico estrechamente relacionado con el umbral de lactato. Se caracteriza por un aumento desproporcionado de la ventilación pulmonar en relación con el consumo de oxígeno durante el ejercicio incremental.

Este aumento de la ventilación se produce como consecuencia del incremento en la producción de dióxido de carbono asociado al metabolismo anaeróbico y a los mecanismos de regulación del equilibrio ácido-base. Cuando el lactato comienza a acumularse, se produce un aumento de la concentración de iones hidrógeno, lo que estimula los centros respiratorios y provoca un incremento de la ventilación.

En muchos casos, el umbral ventilatorio se utiliza como una estimación indirecta del umbral de lactato, especialmente en pruebas de laboratorio en las que se analizan los gases respiratorios durante el ejercicio.

5.3. Factores fisiológicos que determinan el umbral

La intensidad a la que aparece el umbral de lactato depende de diversos factores fisiológicos relacionados con la producción y eliminación de lactato en el organismo. Entre los más importantes se encuentran la capacidad oxidativa del músculo, la densidad capilar, el contenido mitocondrial y la actividad de las enzimas oxidativas.

Una mayor capacidad oxidativa del músculo permite utilizar el piruvato generado en la glucólisis para la producción de energía en las mitocondrias, reduciendo así la conversión de piruvato en lactato. Asimismo, una mayor densidad capilar facilita el transporte de lactato desde el músculo hacia la sangre y otros tejidos donde puede ser utilizado como fuente energética.

El entrenamiento de resistencia mejora estos factores, lo que contribuye a retrasar la aparición del umbral de lactato y a aumentar la intensidad de ejercicio que puede mantenerse sin una acumulación significativa de lactato.

5.4. Importancia del umbral en el rendimiento de resistencia

El umbral de lactato constituye uno de los indicadores más importantes del rendimiento en deportes de resistencia. Aunque el consumo máximo de oxígeno representa la capacidad máxima del organismo para utilizar oxígeno, el umbral de lactato refleja la intensidad de ejercicio que puede mantenerse durante un periodo prolongado sin que se produzca una fatiga metabólica rápida.

En deportistas bien entrenados, el umbral de lactato puede situarse en un porcentaje elevado del consumo máximo de oxígeno, lo que permite sostener intensidades de ejercicio cercanas al máximo durante largos periodos de tiempo.

Por esta razón, el entrenamiento de resistencia suele orientarse a mejorar la intensidad correspondiente al umbral de lactato mediante métodos específicos de entrenamiento que estimulan el metabolismo aeróbico y aumentan la capacidad del organismo para producir y eliminar lactato de forma eficiente.

6. Valoración de la potencia y capacidad aeróbica

La valoración de la potencia y la capacidad aeróbica constituye un elemento fundamental en la fisiología del ejercicio y en la planificación del entrenamiento. La evaluación de estas variables permite conocer el nivel de condición física del deportista, identificar factores limitantes del rendimiento y establecer intensidades de entrenamiento adecuadas. Además, el seguimiento periódico de estas variables facilita el control de las adaptaciones producidas por el entrenamiento.

La capacidad aeróbica se evalúa principalmente a través del consumo máximo de oxígeno ($VO_2máx$), que representa la máxima cantidad de oxígeno que el organismo puede captar, transportar y utilizar durante un ejercicio intenso. No obstante, también pueden utilizarse otros indicadores relacionados con el rendimiento aeróbico, como el umbral de lactato, la frecuencia cardíaca o la potencia desarrollada durante el ejercicio.

Las pruebas de valoración pueden realizarse en laboratorio o en el campo. Las pruebas de laboratorio permiten un mayor control de las variables fisiológicas y una medición más precisa de los parámetros metabólicos, mientras que las pruebas de campo ofrecen una mayor aplicabilidad al contexto real del entrenamiento y la competición.

6.1. Medición directa del $VO_2máx$

La medición directa del consumo máximo de oxígeno se realiza habitualmente mediante pruebas incrementales realizadas en laboratorio, utilizando ergómetros como la cinta rodante o el cicloergómetro. Durante estas pruebas, la intensidad del ejercicio aumenta progresivamente hasta que el sujeto alcanza el agotamiento.

Para determinar el $VO_2máx$ se analizan los gases respiratorios mediante sistemas de análisis metabólico que permiten medir el volumen de oxígeno consumido y el dióxido de carbono producido durante el ejercicio. El $VO_2máx$ se expresa normalmente en litros por minuto o en mililitros por kilogramo de peso corporal por minuto.

Este método proporciona una medida precisa de la potencia aeróbica máxima y permite analizar también otros parámetros fisiológicos, como la ventilación pulmonar, la frecuencia cardíaca o el umbral ventilatorio.

6.2. Pruebas indirectas de valoración aeróbica

Cuando no se dispone de equipamiento para medir directamente el consumo de oxígeno, es posible estimar la capacidad aeróbica mediante pruebas indirectas. Estas pruebas se basan en la relación existente entre la intensidad del ejercicio, la frecuencia cardíaca y el consumo de oxígeno.

En este tipo de evaluaciones se utilizan protocolos submáximos en los que el sujeto realiza ejercicio a intensidades moderadas mientras se registra la frecuencia cardíaca. A partir de estos datos se pueden realizar estimaciones del VO_2máx mediante ecuaciones o modelos predictivos.

Aunque la precisión de estas estimaciones es menor que la de las mediciones directas, las pruebas indirectas resultan útiles para evaluar grandes grupos de población o para realizar un seguimiento general del estado de forma.

6.3. Test de laboratorio

Las pruebas de laboratorio permiten evaluar con mayor precisión las respuestas fisiológicas al ejercicio. Además de la medición directa del consumo de oxígeno, en este tipo de pruebas pueden analizarse variables como la concentración de lactato en sangre, la ventilación pulmonar o la potencia mecánica desarrollada.

Las pruebas incrementales son uno de los procedimientos más utilizados en laboratorio para evaluar la potencia aeróbica y determinar variables como el VO_2máx o el umbral de lactato. Durante estas pruebas, la intensidad del ejercicio aumenta de forma progresiva hasta alcanzar el esfuerzo máximo.

El entorno controlado del laboratorio permite estandarizar las condiciones de la prueba y obtener información detallada sobre los factores fisiológicos que limitan el rendimiento aeróbico.

6.4. Test de campo

Los test de campo permiten evaluar la capacidad aeróbica en condiciones más cercanas a la práctica deportiva habitual. Estas pruebas suelen ser más sencillas de aplicar y no requieren equipamiento especializado.

Entre los test de campo más utilizados se encuentran las pruebas de carrera o de desplazamiento realizadas a una intensidad determinada o durante un tiempo establecido. A partir de la distancia recorrida o del tiempo empleado es posible estimar la capacidad aeróbica del sujeto.

Aunque estas pruebas no permiten medir directamente el consumo de oxígeno, resultan muy útiles para evaluar el rendimiento aeróbico y para controlar la evolución del entrenamiento en contextos deportivos.

6.5. Interpretación de los resultados

La interpretación de los resultados obtenidos en las pruebas de valoración aeróbica debe realizarse teniendo en cuenta diferentes factores, como la edad, el sexo, el nivel de entrenamiento y las características de la modalidad deportiva practicada.

En general, valores elevados de VO_2máx y un umbral de lactato situado a intensidades altas se asocian con un mayor rendimiento en actividades de resistencia. Sin embargo, el rendimiento deportivo no depende únicamente de estos factores, sino también de aspectos como la economía de movimiento, la técnica deportiva y la estrategia de competición.

Por esta razón, la valoración fisiológica debe integrarse con otros indicadores del rendimiento para obtener una visión completa de la condición física del deportista y orientar de forma adecuada la planificación del entrenamiento.

7. Bases fisiológicas del entrenamiento de resistencia

El entrenamiento de resistencia tiene como objetivo mejorar la capacidad del organismo para producir energía mediante el metabolismo aeróbico y sostener esfuerzos prolongados con una menor aparición de la fatiga. Las adaptaciones inducidas por este tipo de entrenamiento afectan principalmente al sistema cardiovascular, al sistema respiratorio y al músculo esquelético, mejorando la eficiencia del transporte y la utilización de oxígeno durante el ejercicio.

Desde el punto de vista fisiológico, la mejora del rendimiento en ejercicios de resistencia depende de la interacción de varios factores, entre los que destacan el consumo máximo de oxígeno, el umbral de lactato y la economía de ejercicio. El entrenamiento de resistencia busca estimular estos mecanismos mediante la aplicación controlada de cargas de entrenamiento que generen adaptaciones específicas en los sistemas implicados en el metabolismo aeróbico.

Para que se produzcan estas adaptaciones, el entrenamiento debe cumplir una serie de principios básicos relacionados con la intensidad, la duración, la frecuencia y el volumen del ejercicio. La combinación adecuada de estos factores determina el estímulo fisiológico generado y, en consecuencia, el tipo de adaptación que se produce en el organismo.

7.1. Principios generales del entrenamiento aeróbico

El entrenamiento aeróbico se basa en la aplicación repetida de estímulos de ejercicio que provocan una sobrecarga fisiológica en el organismo. Esta sobrecarga desencadena procesos de adaptación que permiten mejorar la capacidad funcional de los sistemas implicados en el metabolismo aeróbico.

Uno de los principios fundamentales es el principio de sobrecarga, según el cual el organismo debe someterse a un estímulo superior al que está acostumbrado para que se produzcan adaptaciones. A medida que el individuo mejora su condición física, es necesario ajustar la carga de entrenamiento para continuar estimulando nuevas adaptaciones.

Otro principio importante es el de especificidad, que establece que las adaptaciones al entrenamiento dependen del tipo de estímulo aplicado. Por ello, el entrenamiento debe diseñarse de acuerdo con las demandas fisiológicas y mecánicas de la modalidad deportiva.

Asimismo, el principio de progresión indica que la carga de entrenamiento debe incrementarse gradualmente para evitar el estancamiento y reducir el riesgo de fatiga excesiva o lesión.

7.2. Intensidad del entrenamiento

La intensidad del ejercicio es uno de los factores más determinantes en el entrenamiento de resistencia. Representa el grado de esfuerzo que realiza el organismo durante la actividad física y condiciona el tipo de adaptaciones fisiológicas que se producen.

En el entrenamiento aeróbico, la intensidad suele establecerse en relación con variables fisiológicas como la frecuencia cardíaca, el consumo de oxígeno o el umbral de lactato. Las intensidades moderadas estimulan principalmente el metabolismo oxidativo y favorecen el desarrollo de la capacidad aeróbica, mientras que las intensidades más elevadas pueden mejorar tanto la potencia aeróbica como la tolerancia al lactato.

El control adecuado de la intensidad permite dirigir el estímulo de entrenamiento hacia los objetivos fisiológicos deseados y optimizar las adaptaciones del organismo.

7.3. Duración del ejercicio

La duración del ejercicio se refiere al tiempo durante el cual se mantiene el esfuerzo en cada sesión de entrenamiento. Este factor influye directamente en el volumen total de trabajo realizado y en el tipo de sustratos energéticos utilizados durante el ejercicio.

En general, las sesiones de entrenamiento aeróbico suelen tener una duración suficiente para estimular el metabolismo oxidativo y favorecer adaptaciones relacionadas con la resistencia. A intensidades moderadas, el ejercicio prolongado estimula especialmente la utilización de los ácidos grasos como fuente de energía y mejora la eficiencia metabólica.

La duración del ejercicio debe ajustarse en función de la intensidad del entrenamiento y del nivel de condición física del individuo.

7.4. Frecuencia del entrenamiento

La frecuencia del entrenamiento se refiere al número de sesiones realizadas en un determinado periodo de tiempo, normalmente a lo largo de una semana. Este factor influye en la acumulación de estímulos de entrenamiento y en el desarrollo progresivo de las adaptaciones fisiológicas.

Una frecuencia adecuada permite mantener de forma regular el estímulo de entrenamiento necesario para mejorar la capacidad aeróbica, al tiempo que se garantiza un tiempo suficiente de recuperación entre sesiones.

El número óptimo de sesiones semanales depende de factores como el nivel de entrenamiento del individuo, la intensidad de las sesiones y los objetivos específicos del programa de entrenamiento.

7.5. Volumen de entrenamiento

El volumen de entrenamiento representa la cantidad total de trabajo realizado durante un periodo determinado. En el entrenamiento de resistencia, el volumen suele expresarse en términos de tiempo total de ejercicio, distancia recorrida o cantidad de trabajo realizado.

Un mayor volumen de entrenamiento suele asociarse con un mayor desarrollo de la capacidad aeróbica, especialmente en deportes de resistencia. Sin embargo, el volumen debe ajustarse adecuadamente para evitar una acumulación excesiva de fatiga.

La combinación equilibrada de volumen, intensidad, duración y frecuencia constituye uno de los elementos clave en la planificación del entrenamiento de resistencia, ya que determina el estímulo fisiológico global que recibe el organismo.

8. Métodos de entrenamiento aeróbico

El entrenamiento aeróbico puede organizarse mediante diferentes métodos que permiten estimular el metabolismo oxidativo y mejorar la capacidad de resistencia. Estos métodos se diferencian

principalmente por la forma en que se combinan la intensidad, la duración y las pausas de recuperación durante el ejercicio. La elección de un método u otro depende de los objetivos del entrenamiento, del nivel de condición física del deportista y de las demandas específicas de la modalidad deportiva.

Desde el punto de vista fisiológico, los métodos de entrenamiento aeróbico buscan estimular adaptaciones relacionadas con el transporte y la utilización de oxígeno, mejorar la capacidad oxidativa del músculo y aumentar la eficiencia metabólica durante el ejercicio prolongado. Algunos métodos se orientan principalmente al desarrollo de la capacidad aeróbica, mientras que otros están dirigidos a mejorar la potencia aeróbica o a incrementar la intensidad a la que puede mantenerse el ejercicio sin acumulación excesiva de lactato.

8.1. Entrenamiento continuo

El entrenamiento continuo se caracteriza por la realización de ejercicio de forma prolongada sin pausas de recuperación. La intensidad del esfuerzo suele mantenerse constante o con pequeñas variaciones a lo largo de toda la sesión.

Este método se utiliza principalmente para mejorar la capacidad aeróbica, ya que estimula el metabolismo oxidativo durante periodos prolongados. Las intensidades moderadas favorecen la utilización de los ácidos grasos como fuente energética y contribuyen al desarrollo de adaptaciones cardiovasculares y metabólicas asociadas con la resistencia.

El entrenamiento continuo puede realizarse a diferentes intensidades. A intensidades moderadas se orienta al desarrollo general de la resistencia, mientras que a intensidades más elevadas puede utilizarse para mejorar el umbral de lactato y la capacidad de mantener esfuerzos prolongados a mayor intensidad.

8.2. Entrenamiento interválico

El entrenamiento interválico consiste en la alternancia de periodos de ejercicio con periodos de recuperación. Durante los intervalos de trabajo se realizan esfuerzos de intensidad relativamente elevada, mientras que las pausas permiten una recuperación parcial antes de iniciar el siguiente intervalo.

Este método permite acumular un volumen considerable de trabajo a intensidades relativamente altas, lo que lo convierte en una herramienta eficaz para mejorar la potencia aeróbica. Durante los intervalos de ejercicio se estimulan intensamente los sistemas cardiovascular y metabólico, mientras que los periodos de recuperación facilitan la repetición de esfuerzos de alta intensidad.

El entrenamiento interválico puede aplicarse con diferentes combinaciones de duración e intensidad de los intervalos, así como con distintos tipos de recuperación, lo que permite adaptarlo a las necesidades específicas del deportista.

8.3. Entrenamiento de alta intensidad

El entrenamiento de alta intensidad se caracteriza por la realización de esfuerzos muy intensos durante periodos relativamente cortos, alternados con pausas de recuperación. Este tipo de entrenamiento genera un estímulo fisiológico importante tanto sobre el metabolismo aeróbico como sobre los mecanismos anaeróbicos de producción de energía.

Los intervalos de alta intensidad permiten alcanzar valores elevados de consumo de oxígeno, lo que contribuye a mejorar la potencia aeróbica máxima. Además, este tipo de entrenamiento puede

provocar adaptaciones musculares y metabólicas que incrementan la capacidad oxidativa del músculo.

Aunque su duración total suele ser menor que la del entrenamiento continuo, el elevado estímulo fisiológico que produce lo convierte en una herramienta eficaz para mejorar el rendimiento en deportes de resistencia.

8.4. Entrenamiento basado en el umbral de lactato

El entrenamiento basado en el umbral de lactato consiste en realizar ejercicio a intensidades cercanas al umbral en el que comienza a acumularse lactato en sangre. Este tipo de entrenamiento permite mejorar la capacidad del organismo para mantener intensidades relativamente altas de ejercicio sin que se produzca una acumulación excesiva de lactato.

Desde el punto de vista fisiológico, este método estimula adaptaciones relacionadas con la capacidad oxidativa del músculo, la utilización de lactato como sustrato energético y la mejora del equilibrio entre producción y eliminación de lactato.

El entrenamiento cercano al umbral suele realizarse mediante esfuerzos continuos de duración moderada o mediante intervalos relativamente largos con recuperaciones breves.

8.5. Entrenamiento basado en el VO_2máx

El entrenamiento orientado al VO_2máx tiene como objetivo estimular la potencia aeróbica máxima mediante ejercicios realizados a intensidades próximas al consumo máximo de oxígeno. Este tipo de entrenamiento suele aplicarse mediante intervalos de alta intensidad que permiten alcanzar valores elevados de consumo de oxígeno durante el ejercicio.

Los intervalos suelen tener una duración suficiente para que el consumo de oxígeno alcance valores cercanos al máximo, mientras que las pausas de recuperación permiten repetir el esfuerzo varias veces dentro de la misma sesión.

Este método genera un fuerte estímulo sobre el sistema cardiovascular y contribuye a mejorar la capacidad del organismo para captar, transportar y utilizar oxígeno durante el ejercicio de alta intensidad.

9. Potencia y capacidad anaeróbica

Además del metabolismo aeróbico, el organismo dispone de mecanismos anaeróbicos capaces de producir energía de forma rápida cuando las demandas energéticas del ejercicio superan la capacidad del sistema oxidativo. Estos mecanismos permiten resintetizar ATP sin la participación directa del oxígeno y desempeñan un papel fundamental en actividades de alta intensidad y corta duración.

El metabolismo anaeróbico resulta especialmente importante en acciones explosivas, aceleraciones, cambios de ritmo o esfuerzos máximos de corta duración. En muchas modalidades deportivas, especialmente en deportes colectivos o de situación, los sistemas anaeróbicos contribuyen de manera decisiva al rendimiento, ya que permiten realizar acciones intensas que se repiten a lo largo de la actividad.

Al igual que en el metabolismo aeróbico, en el ámbito anaeróbico se distinguen los conceptos de potencia y capacidad. Estos dos aspectos reflejan la velocidad y la cantidad de energía que los sistemas anaeróbicos pueden proporcionar durante el ejercicio. El entrenamiento específico puede

mejorar ambas características mediante adaptaciones metabólicas y neuromusculares que incrementan la capacidad del músculo para producir energía rápidamente.

9.1. Concepto de potencia anaeróbica

La potencia anaeróbica se refiere a la velocidad máxima a la que los sistemas anaeróbicos pueden producir energía para la resíntesis de ATP. Este concepto está relacionado con la capacidad del organismo para generar una gran cantidad de energía en un periodo muy breve de tiempo.

La potencia anaeróbica depende principalmente del sistema de los fosfágenos, que utiliza el ATP y la fosfocreatina almacenados en el músculo para producir energía de forma inmediata. Este sistema permite realizar esfuerzos máximos de corta duración, como sprints, saltos o lanzamientos.

La capacidad de generar elevados niveles de potencia anaeróbica está relacionada con factores como la cantidad de fosfocreatina disponible en el músculo, la actividad de las enzimas implicadas en la resíntesis de ATP y la capacidad del sistema neuromuscular para reclutar rápidamente las fibras musculares de contracción rápida.

9.2. Concepto de capacidad anaeróbica

La capacidad anaeróbica se refiere a la cantidad total de energía que puede producirse mediante los sistemas anaeróbicos durante un esfuerzo intenso. Este concepto está relacionado principalmente con la glucólisis anaeróbica, que permite producir ATP a partir de la degradación de la glucosa o del glucógeno muscular.

A diferencia del sistema de los fosfágenos, que proporciona energía durante unos pocos segundos, la glucólisis anaeróbica puede sostener esfuerzos intensos durante periodos algo más prolongados. Sin embargo, este proceso se asocia a la acumulación de lactato y de otros metabolitos que contribuyen al desarrollo de la fatiga muscular.

La capacidad anaeróbica depende de factores como las reservas de glucógeno muscular, la actividad de las enzimas glucolíticas y la capacidad del músculo para tolerar la acumulación de metabolitos asociados al ejercicio intenso.

9.3. Sistemas energéticos anaeróbicos

Los sistemas energéticos anaeróbicos se dividen en dos mecanismos principales: el sistema de los fosfágenos y la glucólisis anaeróbica. Ambos sistemas permiten la producción de energía sin la participación directa del oxígeno y se caracterizan por una elevada velocidad de resíntesis de ATP.

9.3.1. Sistema de fosfágenos

El sistema de los fosfágenos utiliza el ATP y la fosfocreatina almacenados en el músculo para producir energía de forma inmediata. Durante los primeros segundos de ejercicio, la fosfocreatina se descompone para regenerar ATP rápidamente, lo que permite mantener esfuerzos máximos de corta duración.

Este sistema posee una elevada potencia, pero su capacidad es muy limitada debido a las reducidas reservas de fosfocreatina presentes en el músculo. Por ello, su contribución es especialmente importante en esfuerzos de muy corta duración y alta intensidad.

9.3.2. Glucólisis anaeróbica

La glucólisis anaeróbica permite producir ATP mediante la degradación de la glucosa o del glucógeno muscular sin la participación directa del oxígeno. Este proceso genera energía a una velocidad relativamente elevada y puede sostener esfuerzos intensos durante periodos más prolongados que el sistema de los fosfágenos.

Durante la glucólisis anaeróbica se produce lactato como resultado del metabolismo del piruvato en condiciones de elevada demanda energética. La acumulación de lactato y de iones hidrógeno en el músculo contribuye al desarrollo de la fatiga durante el ejercicio intenso.

A pesar de estas limitaciones, la glucólisis anaeróbica desempeña un papel fundamental en muchas actividades deportivas que requieren esfuerzos de alta intensidad de duración intermedia.

10. Determinantes fisiológicos del metabolismo anaeróbico

El metabolismo anaeróbico depende de la capacidad del músculo para producir energía rápidamente sin la participación directa del oxígeno. Esta producción de energía se basa principalmente en el sistema de los fosfágenos y en la glucólisis anaeróbica, que permiten resintetizar ATP a gran velocidad durante esfuerzos de alta intensidad. La eficacia de estos procesos está determinada por diferentes factores fisiológicos relacionados con las reservas energéticas del músculo, la actividad enzimática, el tipo de fibras musculares y la capacidad del organismo para tolerar la acumulación de metabolitos asociados al ejercicio intenso.

En actividades deportivas caracterizadas por acciones explosivas o esfuerzos de corta duración, la capacidad del músculo para generar energía rápidamente constituye un factor determinante del rendimiento. El entrenamiento anaeróbico produce adaptaciones que mejoran estos mecanismos, aumentando la disponibilidad de sustratos energéticos, la actividad de las enzimas implicadas en el metabolismo anaeróbico y la capacidad de reclutamiento de las fibras musculares rápidas.

10.1. Reservas musculares de ATP y fosfocreatina

Las reservas musculares de ATP y fosfocreatina constituyen la fuente inmediata de energía para la contracción muscular durante los primeros segundos de ejercicio. Aunque la cantidad de ATP almacenado en el músculo es muy limitada, la presencia de fosfocreatina permite regenerar ATP rápidamente mediante una reacción catalizada por la enzima creatina quinasa.

Durante esfuerzos máximos de corta duración, el sistema de los fosfágenos proporciona la mayor parte de la energía necesaria para la contracción muscular. Sin embargo, las reservas de fosfocreatina se agotan rápidamente, lo que limita la duración de los esfuerzos que dependen principalmente de este sistema energético.

El entrenamiento de alta intensidad puede aumentar la concentración de fosfocreatina en el músculo y mejorar la velocidad de resíntesis de ATP, lo que contribuye a mejorar la capacidad para realizar esfuerzos explosivos.

10.2. Glucólisis y producción de lactato

Cuando el ejercicio intenso se prolonga más allá de los primeros segundos, la glucólisis anaeróbica se convierte en una fuente importante de producción de ATP. Este proceso consiste en la degradación de la glucosa o del glucógeno muscular para generar energía sin la participación directa del oxígeno.

Durante la glucólisis, la glucosa se transforma en piruvato mediante una serie de reacciones enzimáticas que producen ATP. En condiciones de alta intensidad de ejercicio, cuando la

capacidad oxidativa del músculo es insuficiente para metabolizar todo el piruvato generado, este se convierte en lactato.

La formación de lactato permite mantener la continuidad de la glucólisis y la producción de ATP durante el ejercicio intenso. No obstante, la acumulación de lactato y de iones hidrógeno en el músculo puede contribuir al desarrollo de la fatiga, ya que altera el equilibrio ácido-base y afecta a los mecanismos de contracción muscular.

10.3. Actividad enzimática glucolítica

La velocidad a la que se produce energía mediante la glucólisis anaeróbica depende en gran medida de la actividad de las enzimas implicadas en este proceso metabólico. Entre las enzimas más importantes se encuentran la fosfofructoquinasa, la lactato deshidrogenasa y otras enzimas que participan en las distintas etapas de la glucólisis.

El entrenamiento anaeróbico puede aumentar la actividad de estas enzimas, lo que permite acelerar la velocidad de degradación de la glucosa y mejorar la capacidad del músculo para producir energía rápidamente durante esfuerzos intensos.

Estas adaptaciones metabólicas contribuyen a mejorar la potencia y la capacidad anaeróbica, especialmente en deportistas que realizan actividades caracterizadas por esfuerzos repetidos de alta intensidad.

10.4. Reclutamiento de fibras rápidas

El tipo de fibras musculares activadas durante el ejercicio también influye en la capacidad del organismo para producir energía mediante vías anaeróbicas. Las fibras musculares de contracción rápida presentan una elevada capacidad glucolítica y son capaces de generar altos niveles de fuerza y potencia en periodos cortos de tiempo.

Durante los esfuerzos de alta intensidad se produce un mayor reclutamiento de estas fibras rápidas, lo que permite aumentar la velocidad de producción de energía. Sin embargo, estas fibras también se fatigan con mayor rapidez debido a su elevada dependencia del metabolismo anaeróbico.

El entrenamiento de alta intensidad favorece la activación y el desarrollo funcional de las fibras rápidas, mejorando la capacidad del sistema neuromuscular para generar fuerza y potencia durante esfuerzos explosivos.

11. Adaptaciones al entrenamiento anaeróbico

El entrenamiento anaeróbico produce una serie de adaptaciones fisiológicas que mejoran la capacidad del organismo para generar energía rápidamente durante esfuerzos de alta intensidad. Estas adaptaciones afectan principalmente al músculo esquelético y al sistema neuromuscular, permitiendo aumentar la velocidad de producción de energía, mejorar la tolerancia al ejercicio intenso y retrasar la aparición de la fatiga.

A diferencia del entrenamiento de resistencia, que estimula principalmente el metabolismo oxidativo, el entrenamiento anaeróbico se caracteriza por la realización de esfuerzos breves y muy intensos que activan en mayor medida el sistema de los fosfágenos y la glucólisis anaeróbica. La repetición de este tipo de estímulos induce cambios en las reservas energéticas musculares, en la actividad enzimática del metabolismo anaeróbico y en la capacidad del músculo para tolerar la acumulación de metabolitos asociados al ejercicio intenso.

11.1. Cambios en las reservas energéticas musculares

Una de las principales adaptaciones al entrenamiento anaeróbico es el aumento de las reservas de fosfocreatina y glucógeno en el músculo esquelético. Estas reservas constituyen los principales sustratos energéticos utilizados durante los esfuerzos de alta intensidad.

El incremento de las reservas de fosfocreatina permite mejorar la capacidad del sistema de los fosfágenos para resintetizar ATP rápidamente durante los primeros segundos de ejercicio. De forma similar, el aumento del glucógeno muscular favorece la producción de energía mediante la glucólisis anaeróbica durante esfuerzos intensos de mayor duración.

Estas adaptaciones contribuyen a mejorar tanto la potencia como la capacidad anaeróbica del deportista.

11.2. Adaptaciones enzimáticas glucolíticas

El entrenamiento anaeróbico también provoca un aumento de la actividad de las enzimas implicadas en el metabolismo glucolítico. Entre estas enzimas destacan la fosfofructoquinasa, la lactato deshidrogenasa y otras enzimas que intervienen en las distintas etapas de la glucólisis.

El aumento de la actividad enzimática permite acelerar la velocidad de degradación de la glucosa y mejorar la capacidad del músculo para producir ATP rápidamente durante el ejercicio intenso. Como consecuencia, el músculo puede mantener esfuerzos de alta intensidad durante periodos algo más prolongados.

Estas adaptaciones metabólicas son especialmente importantes en deportes que requieren acciones explosivas repetidas o esfuerzos intensos de duración intermedia.

11.3. Cambios en la capacidad tampón

Durante el ejercicio anaeróbico intenso se produce una acumulación de metabolitos, especialmente iones hidrógeno, que contribuyen a la disminución del pH muscular y al desarrollo de la fatiga. La capacidad tampón del músculo se refiere a la habilidad del organismo para neutralizar estos cambios en el equilibrio ácido-base.

El entrenamiento anaeróbico puede aumentar la capacidad tampón del músculo mediante la mejora de los mecanismos que regulan el equilibrio ácido-base. Esto permite tolerar mayores concentraciones de lactato y de iones hidrógeno sin que se produzca una disminución inmediata del rendimiento.

Como resultado, los deportistas entrenados pueden mantener esfuerzos de alta intensidad durante más tiempo antes de que la acidosis muscular limite la contracción.

11.4. Adaptaciones neuromusculares

Además de las adaptaciones metabólicas, el entrenamiento anaeróbico produce importantes cambios en el sistema neuromuscular. Estas adaptaciones permiten mejorar la capacidad de generar fuerza y potencia durante esfuerzos explosivos.

Entre las principales adaptaciones se encuentran una mayor capacidad de reclutamiento de fibras musculares rápidas, una mejora en la coordinación entre unidades motoras y un aumento en la velocidad de activación muscular. Estas modificaciones contribuyen a incrementar la producción de fuerza y la potencia desarrollada durante el ejercicio.

En conjunto, las adaptaciones metabólicas y neuromusculares inducidas por el entrenamiento anaeróbico permiten mejorar la capacidad del organismo para realizar esfuerzos de alta intensidad, lo que resulta fundamental en numerosas modalidades deportivas.

12. Valoración de la potencia y capacidad anaeróbica

La valoración de la potencia y la capacidad anaeróbica permite analizar la capacidad del organismo para producir energía rápidamente durante esfuerzos de alta intensidad. Este tipo de evaluación resulta especialmente importante en deportes caracterizados por acciones explosivas, aceleraciones, saltos o esfuerzos repetidos de corta duración. La información obtenida a partir de estas pruebas permite conocer el nivel de rendimiento anaeróbico del deportista, identificar posibles limitaciones fisiológicas y orientar la planificación del entrenamiento.

A diferencia de la valoración aeróbica, en la que el consumo máximo de oxígeno constituye una referencia fundamental, la evaluación del metabolismo anaeróbico se basa principalmente en la medición de la potencia desarrollada durante esfuerzos breves y en la estimación de la capacidad para mantener esfuerzos intensos durante un determinado periodo de tiempo. Estas pruebas pueden realizarse en laboratorio o en el campo y suelen implicar ejercicios máximos de corta duración.

12.1. Test de Wingate

El test de Wingate es una de las pruebas más utilizadas para evaluar la potencia y la capacidad anaeróbica. Este test se realiza habitualmente en un cicloergómetro y consiste en pedalear a la máxima velocidad posible durante un periodo de aproximadamente treinta segundos contra una resistencia determinada en función del peso corporal del sujeto.

Durante la prueba se registran diferentes variables relacionadas con la potencia desarrollada, como la potencia máxima alcanzada, la potencia media y el índice de fatiga. La potencia máxima refleja la capacidad del sistema de los fosfágenos para producir energía rápidamente, mientras que la potencia media proporciona información sobre la contribución de la glucólisis anaeróbica durante el esfuerzo.

El índice de fatiga, por su parte, indica la disminución de la potencia a lo largo de la prueba y permite evaluar la capacidad del sujeto para mantener esfuerzos de alta intensidad.

12.2. Test de potencia anaeróbica máxima

Los test de potencia anaeróbica máxima tienen como objetivo evaluar la capacidad del deportista para generar la mayor potencia posible en un esfuerzo muy breve. Estas pruebas suelen tener una duración de pocos segundos y se centran principalmente en la contribución del sistema de los fosfágenos.

Entre los procedimientos utilizados se encuentran pruebas de sprint, saltos verticales o esfuerzos máximos realizados en ergómetros específicos. En estas evaluaciones se analiza principalmente la potencia máxima desarrollada, que constituye un indicador importante de la capacidad explosiva del deportista.

Este tipo de pruebas resulta especialmente útil en deportes que requieren acciones rápidas y explosivas, como los sprints, los saltos o los lanzamientos.

12.3. Pruebas de capacidad anaeróbica

Las pruebas de capacidad anaeróbica están diseñadas para evaluar la capacidad del organismo para mantener esfuerzos de alta intensidad durante periodos algo más prolongados que los utilizados en las pruebas de potencia máxima. Estas evaluaciones suelen tener una duración de entre treinta segundos y varios minutos.

Durante este tipo de pruebas se analiza la capacidad del organismo para producir energía mediante la glucólisis anaeróbica y para tolerar la acumulación de metabolitos asociados al ejercicio intenso, como el lactato.

En algunos casos, la concentración de lactato en sangre se utiliza como un indicador indirecto de la participación del metabolismo anaeróbico durante el ejercicio.

12.4. Interpretación de los resultados

La interpretación de los resultados obtenidos en las pruebas anaeróbicas debe realizarse teniendo en cuenta las características del deportista y las demandas específicas de la modalidad deportiva practicada. Valores elevados de potencia máxima suelen asociarse con una mayor capacidad para realizar acciones explosivas, mientras que una elevada potencia media o una menor caída de la potencia durante el esfuerzo reflejan una mayor capacidad anaeróbica.

Además del rendimiento obtenido en la prueba, es importante considerar la evolución de estos valores a lo largo del tiempo, ya que el seguimiento periódico permite evaluar las adaptaciones producidas por el entrenamiento.

La valoración de la potencia y la capacidad anaeróbica debe integrarse con otros indicadores fisiológicos y funcionales para obtener una visión completa del rendimiento del deportista y orientar de forma adecuada la planificación del entrenamiento.

13. Factores que influyen en la respuesta al entrenamiento

Las adaptaciones fisiológicas que se producen como consecuencia del entrenamiento no son iguales en todos los individuos. La magnitud y la velocidad con la que se desarrollan estas adaptaciones dependen de diversos factores relacionados con las características biológicas del sujeto y con su estado inicial de condición física. Entre los factores más importantes se encuentran la genética, el nivel inicial de entrenamiento, la edad y el sexo.

Estos factores influyen tanto en la capacidad del organismo para adaptarse al entrenamiento como en el límite máximo que puede alcanzarse en variables fisiológicas relacionadas con el rendimiento, como el consumo máximo de oxígeno, la potencia anaeróbica o la capacidad de resistencia.

13.1. Genética y entrenabilidad

La genética desempeña un papel importante en la respuesta del organismo al entrenamiento. La heredabilidad influye en características fisiológicas como el consumo máximo de oxígeno, la distribución de las fibras musculares o la capacidad de producción de fuerza y potencia.

Algunas personas presentan una mayor capacidad para mejorar determinadas variables fisiológicas con el entrenamiento, fenómeno que se conoce como entrenabilidad. Por ejemplo, existen individuos que experimentan grandes mejoras en el VO_2máx tras un periodo de entrenamiento, mientras que en otros las mejoras son más limitadas.

La genética también puede influir en la predominancia de determinados tipos de fibras musculares. Una mayor proporción de fibras de contracción lenta suele favorecer el rendimiento en deportes de resistencia, mientras que una mayor proporción de fibras de contracción rápida se asocia con un mejor rendimiento en actividades explosivas.

13.2. Nivel inicial de condición física

El nivel inicial de condición física constituye otro factor importante que determina la respuesta al entrenamiento. En general, los individuos con un nivel de condición física bajo o moderado suelen experimentar mejoras más rápidas y pronunciadas en las primeras fases del entrenamiento.

A medida que el nivel de entrenamiento aumenta, las mejoras tienden a ser más progresivas y requieren estímulos de entrenamiento más específicos para seguir produciendo adaptaciones. En deportistas altamente entrenados, el margen de mejora suele ser menor, lo que hace necesario un control más preciso de la carga de entrenamiento.

13.3. Edad y sexo

La edad también influye en la capacidad de adaptación al entrenamiento. Durante la infancia y la adolescencia se producen importantes cambios en el desarrollo del organismo que pueden afectar a la respuesta al ejercicio. En adultos jóvenes, el organismo presenta generalmente una elevada capacidad de adaptación al entrenamiento.

Con el envejecimiento se producen cambios fisiológicos que pueden afectar al rendimiento físico, como la disminución de la masa muscular, la reducción del consumo máximo de oxígeno y cambios en la función cardiovascular. No obstante, el entrenamiento regular puede atenuar muchos de estos efectos y contribuir a mantener un buen nivel de condición física.

El sexo también influye en algunas variables fisiológicas relacionadas con el rendimiento. En general, los hombres suelen presentar valores más elevados de consumo máximo de oxígeno absoluto y mayor masa muscular, mientras que las mujeres presentan un mayor porcentaje de grasa corporal. Sin embargo, las adaptaciones al entrenamiento siguen principios fisiológicos similares en ambos sexos.

13.4. Estado de entrenamiento

El estado de entrenamiento del individuo determina en gran medida la magnitud de las adaptaciones que se producen como respuesta al ejercicio. Los sujetos sedentarios suelen experimentar mejoras rápidas durante las primeras fases de entrenamiento, especialmente en variables relacionadas con el sistema cardiovascular y la eficiencia metabólica.

En cambio, los deportistas entrenados presentan ya un alto grado de adaptación fisiológica, por lo que las mejoras adicionales requieren estímulos de entrenamiento más específicos y una planificación más precisa de la carga de trabajo.

Por esta razón, la planificación del entrenamiento debe ajustarse al nivel de condición física del individuo para optimizar las adaptaciones y evitar tanto una carga insuficiente como una sobrecarga excesiva.

14. Aplicaciones prácticas al entrenamiento

El conocimiento de la fisiología del ejercicio permite aplicar de forma más precisa los principios del entrenamiento para mejorar el rendimiento deportivo. Comprender cómo responden los

sistemas energéticos al ejercicio y qué adaptaciones se producen con el entrenamiento facilita la planificación de programas de trabajo adecuados a las demandas de cada modalidad deportiva.

La aplicación práctica de estos principios implica seleccionar adecuadamente la intensidad, la duración, la frecuencia y el volumen del entrenamiento, así como establecer métodos de control que permitan evaluar la evolución del deportista. De esta forma, el entrenamiento puede orientarse específicamente hacia el desarrollo de la potencia o de la capacidad de los sistemas energéticos implicados en cada disciplina.

14.1. Programación del entrenamiento aeróbico

La programación del entrenamiento aeróbico tiene como objetivo mejorar la capacidad del organismo para captar, transportar y utilizar oxígeno durante el ejercicio prolongado. Para ello se utilizan diferentes métodos de entrenamiento que estimulan el metabolismo oxidativo y favorecen las adaptaciones cardiovasculares y musculares asociadas con la resistencia.

La intensidad del entrenamiento suele establecerse en relación con variables fisiológicas como la frecuencia cardíaca, el consumo de oxígeno o el umbral de lactato. Los entrenamientos realizados a intensidades moderadas favorecen el desarrollo de la capacidad aeróbica, mientras que las intensidades más elevadas permiten mejorar la potencia aeróbica y aumentar la intensidad a la que puede mantenerse el ejercicio sin acumulación excesiva de lactato.

La programación debe combinar adecuadamente sesiones de diferente intensidad y duración para estimular las distintas adaptaciones fisiológicas relacionadas con el rendimiento en deportes de resistencia.

14.2. Programación del entrenamiento anaeróbico

El entrenamiento anaeróbico se orienta principalmente al desarrollo de la potencia y la capacidad para realizar esfuerzos de alta intensidad. Este tipo de entrenamiento suele basarse en ejercicios breves y muy intensos, como sprints, saltos o intervalos de alta intensidad, que estimulan el sistema de los fosfágenos y la glucólisis anaeróbica.

La planificación del entrenamiento anaeróbico debe considerar la duración de los esfuerzos, la intensidad de trabajo y el tiempo de recuperación entre repeticiones. Las pausas de recuperación permiten la resíntesis parcial de los fosfágenos y facilitan la repetición de esfuerzos intensos dentro de una misma sesión de entrenamiento.

Este tipo de entrenamiento también produce adaptaciones neuromusculares que mejoran la capacidad de generar fuerza y potencia, lo que resulta fundamental en deportes que requieren acciones explosivas o cambios rápidos de intensidad.

14.3. Control de la carga de entrenamiento

El control de la carga de entrenamiento es un aspecto fundamental para asegurar que el estímulo aplicado produzca las adaptaciones deseadas sin provocar una acumulación excesiva de fatiga. La carga de entrenamiento se puede analizar teniendo en cuenta tanto el volumen como la intensidad del ejercicio realizado.

En la práctica, se utilizan diferentes indicadores para controlar la carga de entrenamiento, como la frecuencia cardíaca, la concentración de lactato en sangre, la percepción subjetiva del esfuerzo o la potencia desarrollada durante el ejercicio.

El seguimiento de estos indicadores permite ajustar la intensidad del entrenamiento y garantizar que las sesiones de trabajo se realicen dentro de los rangos fisiológicos adecuados para estimular las adaptaciones deseadas.

14.4. Evaluación y seguimiento del entrenamiento

La evaluación periódica del rendimiento y de las variables fisiológicas relacionadas con el ejercicio permite analizar la eficacia del programa de entrenamiento y realizar los ajustes necesarios en la planificación.

Las pruebas de valoración aeróbica y anaeróbica proporcionan información sobre la evolución de la condición física del deportista y permiten detectar posibles estancamientos o mejoras en el rendimiento.

El seguimiento continuo del entrenamiento facilita la individualización de las cargas de trabajo y contribuye a optimizar el proceso de adaptación al ejercicio. De esta forma, la integración de la evaluación fisiológica en la planificación del entrenamiento constituye una herramienta fundamental para mejorar el rendimiento deportivo.

Bibliografía

Egan B, Sharples AP. Molecular responses to acute exercise and their relevance for adaptations in skeletal muscle to exercise training. Physiol Rev. 2023;103(3):2057-2170.

Katch, V. L., MacArdle, W. D., & Katch, F. I. (2014). *Fisiología del ejercicio : "fundamentos"* (4ª ed). Editorial Médica Panamericana.

López Chicharro, J., & Fernández Vaquero, A. (2023). *Fisiología del ejercicio* (4a ed). Editorial Médica Panamericana.

Vicente Campos, D. (2020). *Fisiología del Entrenamiento Aeróbico Una visión integrada*. Editorial Médica Panamericana.

Vicente Campos, D. (2017). *Umbral Láctico Bases fisiológicas y aplicación al entrenamiento*. Editorial Médica Panamericana.

Wilmore. (2014) Fisiología del Deporte y el Ejercicio. (5ª ed). Editorial Médica Panamericana.

BLOQUE IV.

EJERCICIO Y ENTRENAMIENTO EN CONDICIONES ESPECIALES

ÍNDICE DE BLOQUE IV

Tema 13. Ejercicio y entrenamiento en condiciones hipóxicas

Tema 14. Ejercicio y entrenamiento en condiciones de calor

Tema 13. Ejercicio y entrenamiento en condiciones hipóxicas

1. Introducción: por qué importa la hipoxia en Fisiología del Ejercicio

1.1. Concepto de hipoxia y relación con la altitud

La hipoxia es una situación en la que disminuye la disponibilidad de oxígeno para los tejidos. En el contexto del ejercicio físico, esta reducción es especialmente importante porque el músculo esquelético necesita oxígeno para mantener la producción aeróbica de ATP, sobre todo durante esfuerzos prolongados o de intensidad moderada-alta.

En la altitud, la hipoxia aparece porque disminuye la presión atmosférica. El porcentaje de oxígeno en el aire se mantiene prácticamente constante, alrededor del 20,9 %, pero al haber menos presión total también disminuye la presión parcial de oxígeno. Por tanto, en altura no respiramos un aire con menor proporción de oxígeno, sino un aire en el que el oxígeno está disponible con menor presión para pasar desde el ambiente a los pulmones, de los pulmones a la sangre y de la sangre al músculo.

Esta reducción afecta a toda la cadena de transporte de oxígeno: aire inspirado, oxígeno alveolar, saturación de la hemoglobina, contenido arterial de oxígeno, función cardiovascular y aporte final al músculo activo. De esta forma, un cambio ambiental externo termina modificando la ventilación, la circulación, la sangre, el metabolismo muscular y el rendimiento físico.

Durante el ejercicio, la hipoxia supone un desafío mayor que en reposo. La razón es sencilla: la demanda de oxígeno aumenta al mismo tiempo que su disponibilidad disminuye. Por ello, una altitud que puede ser bien tolerada en reposo puede convertirse en un factor claramente limitante durante el esfuerzo.

1.2. Importancia de la hipoxia en Ciencias del Deporte

La hipoxia interesa en Ciencias del Deporte por tres motivos principales.

En primer lugar, permite comprender mejor los límites del rendimiento aeróbico. El ejercicio de resistencia depende de la capacidad del organismo para captar oxígeno, transportarlo por la sangre y utilizarlo en el músculo. Cuando disminuye la presión parcial de oxígeno, toda esta cadena se ve comprometida, lo que reduce especialmente el rendimiento en esfuerzos prolongados.

En segundo lugar, muchas actividades físicas y deportivas se realizan en altitud. Es el caso de carreras de montaña, trail, ciclismo, esquí de fondo, alpinismo, expediciones o competiciones

celebradas en ciudades elevadas. En estos contextos, el profesional de Ciencias del Deporte debe saber interpretar la fatiga, ajustar la intensidad del ejercicio y prevenir problemas asociados a la altura.

En tercer lugar, la hipoxia se utiliza como herramienta de entrenamiento. La exposición a ambientes con menor disponibilidad de oxígeno puede estimular respuestas ventilatorias, cardiovasculares, hematológicas y musculares. Sin embargo, no debe entenderse como una estrategia eficaz por sí misma. Su utilidad depende de la altitud, la duración de la exposición, el tipo de entrenamiento, el nivel del deportista, el estado de hierro, la recuperación y la respuesta individual.

Desde el punto de vista formativo, la hipoxia es un tema especialmente útil porque obliga a integrar varios sistemas fisiológicos. El aparato respiratorio aumenta la ventilación, el sistema cardiovascular intenta mantener el aporte de oxígeno, la sangre modifica su capacidad de transporte y el músculo ajusta su metabolismo. Por tanto, la hipoxia permite estudiar la fisiología del ejercicio como una respuesta coordinada de todo el organismo.

1.3. Hipoxia como modelo para entender la limitación aeróbica

La hipoxia es un modelo muy útil para comprender por qué el oxígeno puede limitar el rendimiento aeróbico. El ejercicio de resistencia no depende solo del músculo, sino de la integración entre ventilación, difusión pulmonar, transporte sanguíneo, función cardiaca y capacidad muscular para utilizar oxígeno.

El VO_2máx refleja precisamente esta integración. No expresa únicamente la capacidad del músculo para consumir oxígeno, sino la capacidad global del organismo para captarlo, transportarlo y utilizarlo. Por eso disminuye en altura: aunque el deportista mantenga una buena condición física, si llega menos oxígeno al músculo, su capacidad aeróbica máxima se reduce.

Esta situación también ayuda a diferenciar entre carga externa y carga interna. La carga externa es el trabajo realizado, por ejemplo correr a una velocidad determinada o pedalear a una potencia concreta. La carga interna es la respuesta fisiológica que ese trabajo provoca en el organismo. En hipoxia, una misma carga externa genera una mayor carga interna: aumenta la ventilación, se eleva la frecuencia cardiaca, puede disminuir la saturación de oxígeno y aumenta la percepción del esfuerzo.

Por esta razón, entrenar o competir en altura exige ajustar las cargas. No es adecuado reproducir automáticamente los ritmos, velocidades o potencias utilizados al nivel del mar, porque el mismo trabajo representa un mayor porcentaje de la capacidad máxima del deportista.

En síntesis, la hipoxia no afecta solo a la respiración. Modifica todo el sistema que transforma el oxígeno ambiental en energía útil para el movimiento y, finalmente, en rendimiento físico.

1.4. Exposición aguda, aclimatación y adaptación crónica

Para estudiar el ejercicio en hipoxia conviene diferenciar tres situaciones: exposición aguda, aclimatación y adaptación crónica.

La exposición aguda corresponde a las primeras horas o días en altura. La menor presión parcial de oxígeno estimula los quimiorreceptores periféricos y aumenta la ventilación. También se incrementa la actividad simpática, lo que eleva la frecuencia cardiaca. Estas respuestas ayudan a compensar parcialmente la hipoxia, pero tienen un coste: mayor sensación de esfuerzo,

alteraciones del equilibrio ácido-base y menor tolerancia al ejercicio intenso. En esta fase, el rendimiento disminuye especialmente en esfuerzos aeróbicos. Una misma carga externa representa una carga interna mayor porque el deportista dispone de menos oxígeno para sostener la producción aeróbica de energía.

La aclimatación es el conjunto de ajustes que aparecen tras varios días o semanas de exposición a la altura. Incluye un aumento más sostenido de la ventilación, compensaciones del equilibrio ácido-base, cambios en el volumen plasmático, estímulo de la eritropoyetina, aumento progresivo de la producción de glóbulos rojos y ajustes musculares y metabólicos. Aclimatarse mejora la tolerancia a la altura, pero no elimina por completo la limitación impuesta por la hipoxia. La disponibilidad ambiental de oxígeno sigue siendo menor, por lo que el rendimiento aeróbico, especialmente en altitudes elevadas, no se normaliza totalmente.

La adaptación crónica se observa en poblaciones que viven de forma permanente en altitud. Puede incluir rasgos fisiológicos más estables desarrollados a largo plazo. Sin embargo, en el ámbito deportivo interesa sobre todo la aclimatación temporal de deportistas que se desplazan a la altura o utilizan la hipoxia como herramienta de entrenamiento.

Por tanto, desde la perspectiva de la Fisiología del Ejercicio, la hipoxia debe entenderse como un estímulo que provoca respuestas inmediatas, ajustes progresivos y adaptaciones más estables según la duración y la magnitud de la exposición. Estas respuestas explican tanto la pérdida inicial de rendimiento como la posible mejora de la tolerancia al esfuerzo tras un periodo de aclimatación.

2. Bases físicas y ambientales de la hipoxia

2.1. Presión atmosférica, altitud y presión parcial de oxígeno

La presión atmosférica es la fuerza que ejerce la columna de aire sobre la superficie terrestre. Al nivel del mar esta presión es mayor porque hay más masa de aire por encima. A medida que ascendemos, la columna de aire disminuye y, por tanto, también lo hace la presión atmosférica.

Este descenso de la presión es el elemento físico central de la altitud. No significa que cambie de forma importante la composición del aire, sino que todos los gases ejercen menos presión. Como el oxígeno forma parte de esa mezcla gaseosa, su presión parcial también disminuye.

La presión parcial de oxígeno es la parte de la presión total del aire que corresponde al oxígeno. Aunque el oxígeno representa aproximadamente el 20,9 % del aire, su presión parcial depende de la presión atmosférica. Por eso, al ascender en altitud, la presión parcial de oxígeno disminuye aunque el porcentaje de oxígeno se mantenga prácticamente igual.

Esta diferencia es fundamental para comprender la hipoxia de altura. En altitud no respiramos un aire con menos proporción de oxígeno, sino un aire en el que el oxígeno está disponible con menor presión. Para el organismo, lo relevante no es solo la cantidad relativa de oxígeno que hay en el aire, sino la presión con la que ese oxígeno puede desplazarse desde el ambiente hacia los pulmones y desde los pulmones hacia la sangre.

El paso del oxígeno desde el aire hacia la sangre depende de gradientes de presión. Primero disminuye la presión de oxígeno en el aire inspirado. Después, al entrar en las vías respiratorias, el aire se humidifica y se mezcla con el aire alveolar, donde también hay dióxido de carbono. Como consecuencia, la presión alveolar de oxígeno es menor que la presión inspirada.

En altura, esta presión alveolar de oxígeno se reduce aún más. Esto afecta directamente al gradiente que permite la difusión del oxígeno desde los alveolos hacia los capilares pulmonares. Cuanto menor sea ese gradiente, más difícil será mantener una saturación arterial elevada, especialmente durante el ejercicio, cuando la sangre pasa más rápido por los capilares pulmonares.

Aplicado al ejercicio, esto explica por qué una persona puede respirar más rápido o más profundamente en altura y, aun así, disponer de menos oxígeno efectivo para el músculo. La ventilación aumenta como mecanismo compensatorio, pero no elimina completamente la limitación física impuesta por la menor presión parcial de oxígeno.

2.2. Hipoxia hipobárica e hipoxia normobárica

La hipoxia hipobárica es la que se produce en la altitud real. En este caso, la presión atmosférica disminuye y, como consecuencia, también baja la presión parcial de oxígeno. Es la situación típica de la montaña, las ciudades elevadas o las cámaras hipobáricas.

La hipoxia normobárica se produce cuando la presión atmosférica se mantiene normal, pero se reduce la fracción inspirada de oxígeno. Es decir, se respira una mezcla gaseosa con menor porcentaje de oxígeno, como ocurre en algunas cámaras, tiendas o sistemas de altitud simulada.

Ambas situaciones reducen la disponibilidad de oxígeno, pero no son exactamente iguales. En la hipoxia hipobárica cambia la presión total del ambiente; en la hipoxia normobárica cambia la composición del gas inspirado. Además, en la altitud real intervienen factores ambientales adicionales como frío, sequedad, radiación solar o viento.

En el ámbito deportivo, esta distinción es importante porque muchas estrategias modernas de entrenamiento utilizan hipoxia artificial. Estas herramientas pueden simular parte del estímulo de la altitud, pero no reproducen por completo todas las condiciones fisiológicas y ambientales de la montaña.

2.3. Clasificación funcional de la altitud

La altitud puede clasificarse de forma funcional según el grado de estrés hipóxico que produce. Aunque los límites pueden variar ligeramente según la fuente, suele distinguirse entre altitud moderada, alta, muy alta y extrema.

La altitud moderada es aquella en la que la hipoxia empieza a tener efectos claros sobre el ejercicio, especialmente sobre el rendimiento aeróbico, pero suele permitir la práctica deportiva con ajustes adecuados de la intensidad. Muchas concentraciones de entrenamiento se realizan en este rango porque combina estímulo hipóxico y cierta posibilidad de entrenar.

La alta altitud produce una disminución más marcada de la presión parcial de oxígeno. En ella se reduce con mayor claridad el VO_2máx, aumenta la dificultad para sostener intensidades elevadas y la aclimatación adquiere mayor importancia.

La muy alta altitud y la altitud extrema representan situaciones de mayor riesgo y menor aplicabilidad deportiva convencional. En estos niveles, la hipoxia limita de forma intensa el ejercicio, aumenta la probabilidad de problemas asociados a la altura y la prioridad deja de ser el rendimiento para centrarse en la tolerancia, la seguridad y la supervivencia.

Para el profesional de Ciencias del Deporte, esta clasificación no debe entenderse solo como una cuestión geográfica. Lo importante es relacionar cada nivel de altitud con su impacto funcional: cuánto reduce el oxígeno disponible, cómo modifica la carga interna y qué precauciones exige.

2.4. Factores ambientales asociados: frío, radiación, baja humedad y viento

La altitud no implica únicamente hipoxia. En la montaña suelen aparecer otros factores ambientales que también afectan al ejercicio, al rendimiento y a la recuperación. Entre los más importantes están el frío, la mayor radiación solar, la baja humedad y el viento.

El frío aumenta las demandas de termorregulación. El organismo debe conservar la temperatura corporal al mismo tiempo que realiza ejercicio, lo que puede elevar el gasto energético y modificar la percepción del esfuerzo. Además, si la protección no es adecuada, aumenta el riesgo de problemas relacionados con la exposición al frío.

La radiación solar suele ser mayor en altura porque la atmósfera filtra menos radiación. Esto exige medidas de protección, especialmente en actividades prolongadas al aire libre. La baja humedad favorece una mayor pérdida de agua por la respiración y por evaporación, lo que aumenta el riesgo de deshidratación.

El viento puede incrementar la pérdida de calor y dificultar el mantenimiento de la intensidad prevista, sobre todo en deportes de resistencia al aire libre. Por tanto, cuando se analiza el rendimiento en altura, no debe atribuirse todo exclusivamente a la hipoxia.

El ambiente de altitud combina una menor disponibilidad de oxígeno con condiciones externas que aumentan el estrés fisiológico total. Por ello, el rendimiento y la tolerancia al ejercicio en altura dependen tanto del estímulo hipóxico como del conjunto de factores ambientales que acompañan a la altitud.

3. Respuesta cardiorrespiratoria aguda a la hipoxia

3.1. Detección de la hipoxia y aumento de la ventilación

La primera respuesta del organismo ante la hipoxia depende de la detección de la caída de la presión arterial de oxígeno. Esta detección se realiza principalmente en los quimiorreceptores periféricos, situados en los cuerpos carotídeos y, en menor medida, en los cuerpos aórticos.

Cuando la presión arterial de oxígeno disminuye, estos receptores envían señales al centro respiratorio. Como respuesta, aumenta la ventilación. Este mecanismo es esencial porque permite introducir más aire por minuto en los pulmones y elevar parcialmente la presión alveolar de oxígeno.

La hiperventilación es, por tanto, la respuesta aguda más característica ante la hipoxia. Se produce por un aumento de la frecuencia respiratoria y, en muchos casos, también del volumen corriente. Gracias a ello, entra más aire en los pulmones por unidad de tiempo y se favorece la captación de oxígeno.

En reposo, esta respuesta ayuda a compensar la menor disponibilidad ambiental de oxígeno. Durante el ejercicio, se vuelve todavía más importante, porque el músculo activo aumenta mucho su demanda de oxígeno. Sin embargo, aunque la ventilación aumente, no puede compensar por completo la reducción de la presión parcial de oxígeno propia de la altura.

Durante el ejercicio en altura, la ventilación es mayor que al nivel del mar para una misma carga absoluta. Esto significa que correr a una determinada velocidad o pedalear a una potencia concreta exige una respuesta ventilatoria más elevada. El deportista percibe el esfuerzo respiratorio como mayor, incluso aunque la carga externa sea conocida.

La hiperventilación es necesaria, pero también tiene un coste. Aumenta el trabajo de los músculos respiratorios y puede contribuir a la sensación de fatiga, sobre todo en esfuerzos prolongados o intensos.

3.2. Descenso del CO_2, alcalosis respiratoria y compensación inicial

Al aumentar la ventilación, el organismo elimina más dióxido de carbono. Como consecuencia, disminuye la presión arterial de CO_2. Este descenso modifica el equilibrio ácido-base, porque el CO_2 está relacionado con la concentración de hidrogeniones en sangre.

Cuando baja el CO_2, aumenta el pH sanguíneo y aparece una alcalosis respiratoria. Esta situación es típica de los primeros momentos de exposición a la altura. El organismo intenta captar más oxígeno respirando más, pero al mismo tiempo elimina demasiado CO_2.

La alcalosis respiratoria puede limitar inicialmente la propia respuesta ventilatoria, ya que el descenso del CO_2 reduce parte del estímulo respiratorio central. Por eso, la aclimatación requiere tiempo: el sistema respiratorio intenta aumentar la ventilación, mientras que el equilibrio ácido-base debe reajustarse para permitir que esa hiperventilación se mantenga.

Con la permanencia en altura, el riñón contribuye a compensar esta alcalosis eliminando bicarbonato. Esta compensación facilita que la ventilación permanezca elevada de forma más estable. Así, la respuesta respiratoria aguda no depende solo del pulmón, sino también de la regulación ácido-base.

3.3. Difusión pulmonar, saturación arterial y contenido arterial de oxígeno

El intercambio de oxígeno en los pulmones depende del gradiente de presión entre el alveolo y la sangre capilar. El oxígeno se desplaza desde donde su presión parcial es mayor, el alveolo, hacia donde es menor, la sangre venosa que llega al pulmón.

En altura, la presión alveolar de oxígeno disminuye porque también se reduce la presión inspirada de oxígeno. Como consecuencia, el gradiente alveolo-capilar es menor y la difusión de oxígeno hacia la sangre se vuelve menos favorable.

Durante el ejercicio, esta situación se agrava porque el gasto cardiaco aumenta y la sangre pasa más rápido por los capilares pulmonares. Hay menos tiempo para cargar la hemoglobina de oxígeno. Por eso, en hipoxia, especialmente a intensidades altas, puede disminuir la saturación arterial de oxígeno.

La saturación arterial de oxígeno indica qué porcentaje de la hemoglobina está unida al oxígeno en la sangre arterial. Al nivel del mar suele mantenerse alta en reposo y durante la mayor parte del ejercicio, pero en altura puede disminuir por la menor presión alveolar de oxígeno.

Cuando la presión arterial de oxígeno baja, la hemoglobina se satura menos. Esto significa que, aunque haya una cantidad normal de hemoglobina, cada molécula transporta menos oxígeno en promedio. La consecuencia es una reducción del oxígeno disponible para los tejidos.

La curva de disociación de la hemoglobina ayuda a comprender este fenómeno. Esta curva describe la relación entre la presión parcial de oxígeno y la saturación de la hemoglobina. Su forma sigmoidea permite que la hemoglobina se cargue bien de oxígeno en los pulmones y lo libere con facilidad en los tejidos.

En altura, la menor presión de oxígeno desplaza el funcionamiento hacia zonas de la curva donde pequeños descensos de presión pueden producir reducciones importantes de la saturación. Por eso, a partir de determinadas altitudes, la oxigenación arterial puede caer de forma evidente.

Durante el ejercicio intervienen además factores como el aumento de temperatura, el descenso del pH y el incremento del CO_2 en el músculo activo. Estos cambios facilitan la liberación de oxígeno desde la hemoglobina hacia los tejidos, lo cual es útil para el músculo. Sin embargo, en hipoxia existe una tensión funcional: interesa liberar oxígeno al músculo, pero también mantener una buena carga de oxígeno en el pulmón.

El contenido arterial de oxígeno es la cantidad total de oxígeno transportada por la sangre arterial. Depende sobre todo de la concentración de hemoglobina y de su saturación. Una pequeña parte del oxígeno viaja disuelta en el plasma, pero la mayor parte lo hace unida a la hemoglobina.

En hipoxia, el contenido arterial de oxígeno puede disminuir porque baja la saturación de la hemoglobina. Aunque el organismo tenga la misma cantidad de hemoglobina, esta transporta menos oxígeno si no se carga completamente en los pulmones.

Para el ejercicio, el contenido arterial de oxígeno es fundamental porque determina cuánto oxígeno puede llegar al músculo por cada litro de sangre. Si este contenido baja, el corazón debe aumentar el flujo sanguíneo para intentar mantener el aporte de oxígeno.

3.4. Respuesta cardiovascular: frecuencia cardiaca, volumen sistólico y gasto cardiaco

La hipoxia activa el sistema nervioso simpático. Esta respuesta forma parte de los mecanismos inmediatos de compensación: si la sangre transporta menos oxígeno, el organismo intenta aumentar el flujo hacia los tejidos.

Uno de los efectos más evidentes es el aumento de la frecuencia cardiaca. En altura, para una misma carga absoluta, la frecuencia cardiaca suele ser mayor que al nivel del mar. Por ejemplo, correr a una velocidad conocida o pedalear a una potencia habitual exige una respuesta cardiovascular más elevada.

Esta respuesta permite mantener parcialmente el aporte de oxígeno al músculo, pero también aumenta el coste interno del ejercicio. El deportista percibe antes la fatiga y trabaja a un porcentaje más alto de su capacidad máxima.

El gasto cardiaco es la cantidad de sangre que el corazón expulsa por minuto. Depende de la frecuencia cardiaca y del volumen sistólico. En hipoxia aguda, el aumento de la frecuencia cardiaca ayuda a sostener el gasto cardiaco durante el ejercicio.

Sin embargo, el volumen sistólico puede verse limitado. La reducción del volumen plasmático, la mayor frecuencia cardiaca y el menor tiempo de llenado ventricular pueden dificultar que el corazón expulse la misma cantidad de sangre en cada latido.

Durante esfuerzos submáximos, el gasto cardiaco puede mantenerse o aumentar para compensar el menor contenido arterial de oxígeno. En cambio, durante esfuerzos máximos, esta compensación no es suficiente. Por eso, aunque el sistema cardiovascular responda aumentando el flujo, el VO_2máx disminuye en altura.

3.5. Redistribución del flujo y respuesta vascular pulmonar

Durante el ejercicio, el organismo redistribuye la sangre hacia los tejidos con mayor demanda, especialmente el músculo esquelético activo y el corazón. En hipoxia, esta redistribución se vuelve más importante porque el oxígeno disponible es menor.

El flujo sanguíneo hacia el músculo ayuda a mantener el aporte de oxígeno y la retirada de metabolitos. Sin embargo, como la sangre arterial contiene menos oxígeno, el aumento del flujo no siempre logra compensar completamente la reducción del contenido de oxígeno.

Además, los músculos respiratorios también trabajan más debido a la hiperventilación. Esto puede aumentar sus necesidades de sangre y oxígeno. En esfuerzos intensos o prolongados, parte del flujo puede dirigirse a sostener la ventilación, lo que contribuye a la sensación global de fatiga.

La hipoxia también produce una respuesta vascular particular en el pulmón. Mientras que en muchos tejidos la falta de oxígeno favorece la vasodilatación para aumentar el flujo, en la circulación pulmonar ocurre lo contrario: se produce vasoconstricción hipóxica.

Esta vasoconstricción aumenta la presión en la arteria pulmonar. En condiciones moderadas puede ser una respuesta funcional, pero en altitudes elevadas o en personas susceptibles puede aumentar la carga sobre el ventrículo derecho.

Durante el ejercicio, el gasto cardiaco aumenta y la circulación pulmonar debe manejar un flujo mayor. Si a esto se suma la vasoconstricción hipóxica, el sistema cardiovascular trabaja con una exigencia añadida. Esta respuesta ayuda a entender por qué la altura no solo afecta al transporte de oxígeno, sino también al esfuerzo mecánico del sistema cardiopulmonar.

3.6. Consecuencia integrada: misma carga externa, mayor carga interna

Una de las ideas más importantes para la práctica deportiva es que la misma carga externa produce una mayor carga interna en hipoxia. A una determinada velocidad, potencia o ritmo, el organismo necesita una mayor respuesta ventilatoria y cardiovascular para intentar mantener el aporte de oxígeno.

Esto ocurre porque el contenido arterial de oxígeno es menor. Para compensarlo, el deportista aumenta la ventilación, eleva la frecuencia cardiaca y trata de mantener el gasto cardiaco. El resultado es que el ejercicio se percibe más intenso aunque la carga mecánica sea la misma.

La carga absoluta es el trabajo externo realizado: velocidad de carrera, potencia en vatios, ritmo de nado, pendiente o peso desplazado. La carga relativa expresa cuánto representa ese trabajo respecto a la capacidad máxima del deportista.

En altura, la carga absoluta puede ser la misma, pero la carga relativa aumenta porque el VO_2máx disminuye. Por ejemplo, una potencia que al nivel del mar suponía un porcentaje moderado del VO_2máx puede representar un porcentaje mucho mayor en hipoxia.

Esta diferencia es esencial para interpretar el rendimiento. Cuando un deportista reduce su ritmo en altura, no necesariamente está peor entrenado; está ajustando la carga a una capacidad aeróbica temporalmente reducida.

Desde el punto de vista aplicado, la hipoxia obliga a individualizar la intensidad. No es adecuado trasladar directamente las intensidades del nivel del mar a la altura. Un entrenamiento que al nivel del mar era extensivo o moderado puede convertirse en demasiado exigente en hipoxia. El objetivo debe ser conseguir el estímulo adecuado sin generar una fatiga excesiva ni comprometer la adaptación.

4. Transporte de oxígeno, metabolismo muscular y fatiga

4.1. Del contenido arterial de oxígeno al aporte muscular

El oxígeno que llega al músculo depende de la cantidad de oxígeno transportada por la sangre y del flujo sanguíneo que recibe el tejido activo. Por tanto, el aporte de oxígeno al músculo no depende solo de la respiración, sino de la integración entre pulmones, sangre, corazón, vasos sanguíneos y músculo esquelético.

En hipoxia, la sangre arterial puede contener menos oxígeno porque disminuye la saturación de la hemoglobina. Esto significa que, aunque el corazón aumente la frecuencia cardiaca y trate de mantener el gasto cardiaco, cada litro de sangre puede transportar menos oxígeno que al nivel del mar.

Durante el ejercicio, el músculo activo aumenta la extracción de oxígeno desde la sangre. Esta extracción se refleja en la diferencia arteriovenosa de oxígeno, que representa la cantidad de oxígeno que los tejidos retiran de la sangre durante su paso por la circulación muscular.

En condiciones normales, la diferencia arteriovenosa aumenta con la intensidad del ejercicio porque el músculo necesita producir más ATP por vía aeróbica. En hipoxia, esta extracción sigue siendo importante, pero parte de una sangre arterial con menor contenido de oxígeno. Por tanto, el músculo puede intentar aprovechar mejor el oxígeno disponible, pero no puede extraer lo que no llega.

Esta idea es clave para entender la limitación del ejercicio en altura. La fatiga no aparece únicamente porque el músculo sea incapaz de utilizar oxígeno, sino porque el aporte total de oxígeno al tejido activo está reducido desde el inicio de la cadena.

4.2. Menor disponibilidad de oxígeno y metabolismo oxidativo

Las mitocondrias son las estructuras celulares donde se produce la mayor parte del ATP aeróbico. Su funcionamiento depende de la disponibilidad de oxígeno, que actúa como aceptor final de electrones en la cadena respiratoria.

En hipoxia, la menor presión de oxígeno reduce el margen para sostener altas tasas de metabolismo oxidativo. Esto no significa que la respiración mitocondrial se detenga, sino que la capacidad del músculo para mantener una elevada producción aeróbica de ATP se ve limitada.

Aunque el músculo conserve su capacidad mitocondrial, esta no puede expresarse plenamente si el aporte de oxígeno es insuficiente. Desde una perspectiva estructura-función, la mitocondria representa el punto final de la cadena de transporte de oxígeno: el aire, los pulmones, la sangre y el corazón solo mejoran el rendimiento si finalmente el oxígeno llega al músculo y puede ser utilizado para producir ATP.

Durante el ejercicio en altura, esta limitación se hace especialmente evidente en esfuerzos prolongados o de intensidad moderada-alta. Una misma carga externa exige una mayor proporción de la capacidad aeróbica disponible, por lo que el deportista trabaja más cerca de su límite fisiológico.

Con exposiciones repetidas o prolongadas, pueden aparecer ajustes musculares relacionados con la utilización del oxígeno, la regulación enzimática y la eficiencia metabólica. No obstante, estos cambios dependen de la intensidad del estímulo, la duración de la exposición y el tipo de entrenamiento realizado.

4.3. Mayor dependencia glucolítica, lactato y glucógeno

En hipoxia, el músculo dispone de menos oxígeno para producir ATP por vía oxidativa. Ante esta limitación, aumenta la participación relativa del metabolismo glucolítico, especialmente cuando la intensidad del ejercicio es moderada-alta o alta.

La glucólisis permite obtener energía con mayor rapidez y con menor dependencia directa del oxígeno, aunque de forma menos eficiente que el metabolismo oxidativo. Por eso, una misma velocidad o potencia puede exigir más glucólisis en altura que al nivel del mar.

El lactato suele aumentar durante el ejercicio intenso porque la glucólisis se acelera y la producción de piruvato supera la capacidad de oxidación mitocondrial. En hipoxia, esta situación puede aparecer antes, ya que la menor disponibilidad de oxígeno limita la vía oxidativa.

Al inicio de la exposición a la altura, para una misma carga absoluta, puede observarse una mayor concentración de lactato que al nivel del mar. Esto refleja que el ejercicio tiene mayor intensidad relativa y que el músculo depende más de rutas anaeróbicas.

Sin embargo, tras varios días o semanas de aclimatación, la respuesta del lactato puede modificarse. En algunos casos se observa una menor acumulación de lactato ante esfuerzos similares, fenómeno que suele interpretarse como una adaptación metabólica y reguladora al ambiente hipóxico.

La hipoxia también puede aumentar la dependencia de los hidratos de carbono como fuente energética. Esto ocurre porque, para una misma cantidad de oxígeno consumido, la oxidación de carbohidratos permite obtener más energía útil que la oxidación de grasas.

En ejercicios realizados en altura, especialmente si la intensidad relativa es elevada, el músculo puede utilizar más glucógeno. Esto tiene importancia práctica porque las reservas de glucógeno son limitadas y su agotamiento se relaciona con la aparición de fatiga.

Además, en estancias en altura pueden coexistir otros factores que afectan al balance energético, como menor apetito, mayor gasto ventilatorio, frío o dificultad para recuperar adecuadamente. Si la ingesta de hidratos de carbono no es suficiente, el deportista puede acumular fatiga y reducir la calidad del entrenamiento.

Por tanto, los valores de lactato y la utilización de glucógeno en altura deben interpretarse con cuidado. No siempre equivalen directamente a los registrados al nivel del mar, porque la carga interna y el contexto fisiológico son diferentes.

4.4. Fatiga periférica y central en hipoxia

La fatiga en hipoxia no depende de un único factor. Puede aparecer por mecanismos periféricos, localizados en el músculo, y por mecanismos centrales, relacionados con el sistema nervioso.

A nivel muscular, la menor disponibilidad de oxígeno limita la producción aeróbica de ATP, aumenta la dependencia glucolítica y favorece la acumulación de metabolitos asociados al esfuerzo. Esto dificulta mantener la contracción muscular durante ejercicios prolongados o intensos.

La menor capacidad oxidativa funcional también puede afectar a procesos importantes para la recuperación entre esfuerzos, como la resíntesis de fosfocreatina y la eliminación de metabolitos.

Por ello, aunque una acción explosiva aislada pueda verse poco afectada, la repetición de esfuerzos intensos puede deteriorarse en hipoxia.

A nivel central, la hipoxia puede afectar al sistema nervioso y aumentar la percepción de dificultad. El cerebro también necesita un aporte continuo de oxígeno, y aunque está muy protegido, la reducción de la oxigenación puede influir en la motivación, la coordinación, la toma de decisiones y la tolerancia al esfuerzo.

En deportes de resistencia, ambos componentes se combinan. El músculo se fatiga antes por la limitación energética, y el sistema nervioso puede reducir la capacidad de sostener voluntariamente intensidades altas como mecanismo de protección.

4.5. Percepción del esfuerzo, tolerancia y eficiencia mecánica

En hipoxia, la percepción subjetiva del esfuerzo suele aumentar para una misma carga absoluta. El deportista respira más, su frecuencia cardiaca es mayor y el músculo trabaja con menor disponibilidad de oxígeno. Todo ello hace que el ejercicio se sienta más exigente.

Esta percepción no es solo psicológica. Refleja señales fisiológicas reales procedentes del aparato respiratorio, el sistema cardiovascular, el músculo y el sistema nervioso. Por eso, la escala de esfuerzo percibido puede ser una herramienta útil para ajustar la intensidad en altura.

La tolerancia al ejercicio disminuye especialmente en esfuerzos continuos de intensidad moderada-alta o alta. Para mantener el trabajo durante más tiempo, suele ser necesario reducir el ritmo, aumentar las pausas o modificar la estructura de la sesión.

La eficiencia mecánica expresa la relación entre el trabajo externo realizado y la energía que el organismo necesita para producirlo. En hipoxia, el coste energético de una misma tarea puede aumentar porque se eleva el trabajo ventilatorio y cardiovascular.

Aunque la técnica deportiva no cambie, el organismo debe invertir más recursos en sostener funciones básicas: respirar más, mantener el flujo sanguíneo y compensar la menor disponibilidad de oxígeno. Esto reduce el margen disponible para sostener intensidades altas.

Además, si aumenta la participación glucolítica y se acelera el uso de glucógeno, el ejercicio puede volverse menos sostenible desde el punto de vista metabólico. El deportista puede realizar la misma acción mecánica, pero con mayor coste fisiológico.

Por tanto, en hipoxia no solo importa cuánto trabajo se realiza, sino cuánto le cuesta al organismo realizarlo. Esta diferencia entre rendimiento externo y coste interno es esencial para planificar el entrenamiento y evitar una acumulación excesiva de fatiga.

5. Efectos de la hipoxia sobre el rendimiento físico

5.1. Disminución del VO_2máx con la altitud

El efecto más característico de la hipoxia sobre el rendimiento es la disminución del VO_2máx. Al reducirse la presión parcial de oxígeno, disminuye la presión alveolar de oxígeno, puede bajar la saturación arterial y se reduce el contenido de oxígeno disponible para el músculo.

El VO_2máx depende de la capacidad integrada para captar, transportar y utilizar oxígeno. En altura, esta cadena se ve limitada desde el inicio, porque el oxígeno llega con menos presión al pulmón. Aunque el deportista aumente la ventilación y la frecuencia cardiaca, la compensación no suele ser suficiente para mantener los valores del nivel del mar.

La consecuencia práctica es que el techo aeróbico del deportista disminuye. Por eso, una intensidad que antes era sostenible puede convertirse en demasiado exigente en altura. Una velocidad o potencia que al nivel del mar representaba un porcentaje moderado del VO_2máx puede representar un porcentaje mucho mayor en hipoxia.

Esta reducción no afecta por igual a todos los deportistas ni a todas las modalidades. Su magnitud depende de la altitud, de la duración del esfuerzo, del grado de dependencia aeróbica de la prueba, del nivel de entrenamiento y de la capacidad individual para tolerar la hipoxia.

5.2. Rendimiento en pruebas de resistencia

Las pruebas de resistencia son las más afectadas por la hipoxia. Carrera de fondo, ciclismo, esquí de fondo, trail, alpinismo o deportes de montaña dependen de la capacidad para mantener una producción elevada de energía aeróbica durante mucho tiempo.

En altura, para una misma velocidad o potencia, el ejercicio representa un porcentaje mayor del VO_2máx. Esto aumenta la ventilación, la frecuencia cardiaca, la utilización de glucógeno y la percepción del esfuerzo. Como resultado, el deportista suele tener que reducir el ritmo para poder sostener la actividad.

La pérdida de rendimiento es mayor cuanto más elevada es la altitud y cuanto más prolongada y dependiente del metabolismo aeróbico sea la prueba. Por eso, en competiciones de resistencia realizadas en altura, la estrategia de ritmo debe ajustarse desde el inicio.

Desde el punto de vista aplicado, no debe interpretarse la reducción del ritmo como una pérdida repentina de condición física. En muchos casos, refleja simplemente que el deportista está trabajando con una capacidad aeróbica máxima temporalmente reducida.

5.3. Rendimiento anaeróbico, sprints y esfuerzos repetidos

Las actividades breves y de alta intensidad dependen menos del oxígeno durante su ejecución inmediata. Por ello, esfuerzos como sprints muy cortos, saltos, lanzamientos o acciones explosivas aisladas pueden verse menos perjudicados por la hipoxia que las pruebas de resistencia.

En estos esfuerzos, la energía procede principalmente del sistema de fosfágenos y de la glucólisis anaeróbica. Como la duración es breve, la menor disponibilidad de oxígeno no limita tanto el rendimiento instantáneo.

Sin embargo, la hipoxia sí puede afectar cuando estas acciones se repiten muchas veces o cuando la recuperación entre esfuerzos depende del metabolismo aeróbico. En deportes de equipo, por ejemplo, un sprint aislado puede mantenerse, pero la capacidad de repetir sprints puede deteriorarse.

Esta limitación se debe, en parte, a que la recuperación entre esfuerzos intensos requiere oxígeno. La resíntesis de fosfocreatina, la restauración del equilibrio interno y la eliminación de metabolitos dependen en gran medida del metabolismo oxidativo. Si el aporte de oxígeno está reducido, la recuperación entre repeticiones puede ser más lenta.

Por tanto, el impacto de la hipoxia sobre el rendimiento anaeróbico depende de la duración, la repetición de esfuerzos y el tiempo de recuperación disponible. Una acción explosiva aislada puede verse poco afectada, mientras que una secuencia prolongada de esfuerzos intensos puede deteriorarse de forma clara.

5.4. Influencia del nivel de altitud sobre el rendimiento

La magnitud del efecto de la hipoxia depende del nivel de altitud. En altitudes moderadas, el rendimiento aeróbico ya puede verse afectado, especialmente en deportistas entrenados o en esfuerzos intensos, pero todavía es posible realizar sesiones de calidad con ajustes adecuados de la intensidad.

En altitudes altas, la disminución del $VO_2máx$ es más marcada. La ventilación y la frecuencia cardiaca aumentan para cargas relativamente bajas, la fatiga aparece antes y la aclimatación se vuelve más necesaria.

En altitudes muy altas o extremas, el ejercicio queda fuertemente limitado. La prioridad deja de ser el rendimiento deportivo y pasa a ser la tolerancia fisiológica y la seguridad. En estas condiciones, la hipoxia puede afectar al sueño, el apetito, la recuperación, la función cognitiva y el estado general.

Por tanto, la altitud no debe valorarse solo en metros, sino por su efecto funcional sobre el organismo y sobre la tarea deportiva concreta. La misma altitud puede representar un desafío distinto según el tipo de prueba, el nivel del deportista, el grado de aclimatación y las condiciones ambientales asociadas.

5.5. Menor densidad del aire: posibles ventajas mecánicas

La altitud no solo reduce la disponibilidad de oxígeno. También disminuye la densidad del aire. Esto puede reducir la resistencia aerodinámica y favorecer algunas pruebas donde la velocidad de desplazamiento o la trayectoria del implemento son importantes.

En pruebas muy breves de velocidad, la menor resistencia del aire puede facilitar mejores marcas, siempre que la hipoxia no limite de forma importante la producción energética durante el esfuerzo. Algo similar puede ocurrir en ciertos lanzamientos o saltos, donde la menor densidad del aire puede modificar la trayectoria.

Sin embargo, este posible beneficio mecánico se limita sobre todo a esfuerzos cortos. En pruebas más largas, la pérdida fisiológica por menor transporte de oxígeno supera claramente cualquier ventaja aerodinámica.

Por eso, la altura puede tener efectos opuestos según la modalidad: puede perjudicar pruebas de resistencia y, en algunos casos, favorecer parcialmente acciones rápidas o balísticas.

5.6. Diferencias entre deportes de resistencia, equipo y potencia

En deportes de resistencia, la hipoxia suele ser claramente perjudicial porque limita el transporte y la utilización de oxígeno. El deportista debe ajustar ritmos, controlar la fatiga y aceptar una reducción del rendimiento externo.

En deportes de equipo, el efecto es mixto. Las acciones explosivas aisladas pueden mantenerse, pero se reduce la capacidad de repetir esfuerzos, recuperar entre acciones y sostener una alta intensidad durante todo el partido. También puede verse afectada la toma de decisiones si la fatiga y la hipoxia son elevadas.

En deportes de potencia y velocidad, el impacto depende de la duración y de la recuperación. Un gesto explosivo aislado puede verse poco afectado, pero sesiones con muchas repeticiones pueden generar más fatiga de lo habitual.

En síntesis, la hipoxia no afecta por igual a todos los deportes. Su impacto depende de la duración del esfuerzo, la participación del metabolismo aeróbico, la necesidad de repetir acciones intensas y la importancia de la recuperación entre esfuerzos.

6. Aclimatación a la altura

6.1. Concepto y cronología general de la aclimatación

La aclimatación es el conjunto de ajustes fisiológicos que aparecen cuando una persona permanece durante varios días o semanas en altura. Su objetivo es mejorar la tolerancia a la hipoxia y reducir el impacto de la menor disponibilidad de oxígeno sobre el organismo.

No debe confundirse aclimatación con adaptación completa. Aclimatarse permite respirar mejor, tolerar mejor el esfuerzo y reducir algunos síntomas asociados a la altura, pero no elimina totalmente la limitación impuesta por la menor presión parcial de oxígeno.

Desde el punto de vista del ejercicio, la aclimatación mejora la respuesta funcional, pero el rendimiento aeróbico en altura suele seguir siendo inferior al del nivel del mar, especialmente cuanto mayor es la altitud.

Las respuestas a la altura no aparecen todas al mismo tiempo. Algunas son inmediatas, como el aumento de la ventilación y de la frecuencia cardiaca. Otras requieren días, como la compensación renal del equilibrio ácido-base. Las adaptaciones hematológicas y musculares necesitan más tiempo.

Durante las primeras horas predomina la respuesta ventilatoria y simpática. En los primeros días se producen ajustes en el volumen plasmático, el equilibrio ácido-base y la tolerancia al esfuerzo. Con una exposición más prolongada, aumenta el estímulo eritropoyético y puede incrementarse progresivamente la masa de glóbulos rojos.

Esta cronología es importante para la planificación deportiva. Los primeros días suelen ser los más delicados, porque el organismo aún no ha estabilizado sus respuestas. Por ello, las cargas de entrenamiento deben reducirse inicialmente y aumentarse de forma progresiva.

6.2. Adaptaciones ventilatorias y equilibrio ácido-base

La adaptación ventilatoria es una de las respuestas más importantes a la altura. La hipoxia estimula los quimiorreceptores periféricos y aumenta la ventilación para elevar la presión alveolar de oxígeno.

Al principio, esta hiperventilación reduce el CO_2 y produce alcalosis respiratoria. Esta alcalosis puede frenar parcialmente la ventilación, porque el descenso del CO_2 reduce el estímulo respiratorio central.

Con el paso de los días, el riñón compensa esta situación eliminando bicarbonato. Así, el pH se acerca de nuevo a valores más adecuados y la ventilación puede mantenerse elevada de forma más estable.

La aplicación al ejercicio es clara: una mejor respuesta ventilatoria permite defender mejor la oxigenación arterial durante el esfuerzo, aunque no restaura completamente las condiciones del nivel del mar.

Esta adaptación ayuda a explicar por qué una persona aclimatada puede tolerar mejor una misma altitud que durante los primeros días de exposición. Sin embargo, la ventilación elevada sigue

teniendo un coste energético y puede contribuir al esfuerzo respiratorio, especialmente durante ejercicios intensos o prolongados.

6.3. Adaptaciones cardiovasculares

En la exposición aguda a la altura, la frecuencia cardiaca aumenta para compensar el menor contenido arterial de oxígeno. Con la aclimatación, la frecuencia cardiaca en reposo y durante cargas submáximas puede disminuir respecto a los primeros días, porque el organismo se vuelve más eficiente.

También se producen cambios en el volumen plasmático y en el volumen sistólico. La reducción inicial del volumen plasmático puede limitar el llenado cardiaco, pero forma parte de los ajustes tempranos a la altura.

Durante el ejercicio, el sistema cardiovascular intenta mantener el aporte de oxígeno al músculo activo. Sin embargo, aunque la aclimatación mejore la tolerancia, el gasto cardiaco máximo y el transporte total de oxígeno pueden seguir siendo insuficientes para alcanzar el mismo rendimiento que al nivel del mar.

Por tanto, la aclimatación cardiovascular mejora la estabilidad funcional, pero no compensa por completo la reducción de oxígeno ambiental. El deportista puede sentirse mejor que durante los primeros días, pero una misma carga externa seguirá representando una carga interna mayor que en normoxia.

6.4. Adaptaciones hematológicas: EPO, hemoglobina, hematocrito y hierro

Una de las respuestas más conocidas a la exposición prolongada a la altura es la adaptación hematológica. La menor disponibilidad de oxígeno es detectada por el organismo como una señal para aumentar la capacidad de transporte sanguíneo.

Uno de los mecanismos principales es la secreción de eritropoyetina, una hormona producida sobre todo por el riñón. La eritropoyetina estimula la eritropoyesis, es decir, la formación de nuevos glóbulos rojos en la médula ósea.

Esta respuesta no es inmediata. La eritropoyetina puede aumentar pronto tras la exposición a la hipoxia, pero la producción efectiva de nuevos glóbulos rojos requiere días o semanas. Por tanto, sus efectos son más importantes en estancias prolongadas que en exposiciones muy breves.

La hemoglobina es la proteína de los glóbulos rojos encargada de transportar la mayor parte del oxígeno en la sangre. El hematocrito expresa el porcentaje del volumen sanguíneo ocupado por los glóbulos rojos. En altura, ambos parámetros pueden aumentar, pero es importante diferenciar entre cambios rápidos y adaptaciones reales.

En los primeros días de exposición a la altura suele producirse una reducción del volumen plasmático. Esto significa que disminuye la parte líquida de la sangre, por lo que los glóbulos rojos y la hemoglobina quedan más concentrados. Este fenómeno se denomina hemoconcentración.

La hemoconcentración puede hacer que el hematocrito y la concentración de hemoglobina aumenten de forma rápida, pero no porque el organismo haya producido muchos glóbulos rojos nuevos, sino porque hay menos plasma. Por eso, no debe interpretarse cualquier aumento inicial del hematocrito como una verdadera adaptación hematológica.

La adaptación hematológica real aparece cuando aumenta la masa eritrocitaria, es decir, cuando el organismo produce más glóbulos rojos. Este proceso requiere un estímulo hipóxico suficiente, disponibilidad de hierro y tiempo de exposición.

El aumento de la masa de hemoglobina puede mejorar la capacidad total de transporte de oxígeno. Sin embargo, más hemoglobina no siempre significa mejor rendimiento de forma automática. Para que el oxígeno llegue al músculo, también son necesarios un buen gasto cardiaco, una adecuada perfusión muscular y una correcta utilización periférica del oxígeno.

Además, cuando aumenta la concentración de glóbulos rojos, la sangre puede volverse más viscosa. Una mayor viscosidad significa que la sangre fluye con más dificultad a través de los vasos. Por un lado, más glóbulos rojos pueden aumentar la capacidad de transporte de oxígeno; por otro, si la viscosidad aumenta demasiado, el corazón debe trabajar más y puede dificultarse el flujo en la microcirculación.

El hierro es imprescindible para formar hemoglobina. Si un deportista tiene reservas de hierro bajas, la respuesta eritropoyética a la altura puede ser insuficiente, aunque el estímulo hipóxico sea adecuado. Durante la exposición a la hipoxia, el organismo puede aumentar la demanda de hierro porque necesita producir nuevos glóbulos rojos.

Esto tiene una aplicación práctica clara: antes de una estancia en altura conviene valorar el estado del hierro, especialmente en deportistas de resistencia, mujeres deportistas o atletas con antecedentes de ferropenia. Una mala disponibilidad de hierro puede limitar la adaptación y aumentar la fatiga.

En síntesis, la respuesta sanguínea a la hipoxia busca mejorar el transporte de oxígeno, pero depende del equilibrio entre volumen plasmático, masa de glóbulos rojos, hemoglobina, viscosidad y disponibilidad de hierro.

6.5. Adaptaciones musculares y metabólicas

El músculo también se ajusta a la hipoxia. Estos cambios pueden incluir modificaciones en la utilización de sustratos, en la actividad enzimática, en la regulación del metabolismo oxidativo y en la tolerancia al esfuerzo.

Durante los primeros días puede aumentar la dependencia relativa del metabolismo glucolítico, porque el aporte de oxígeno es menor. Con la aclimatación, el organismo puede mejorar la eficiencia con la que gestiona el oxígeno disponible y reducir parte del estrés metabólico inicial.

También pueden aparecer ajustes relacionados con la función mitocondrial y con la capacidad del músculo para trabajar en condiciones de menor disponibilidad de oxígeno. Sin embargo, estos cambios dependen de la intensidad del estímulo, la duración de la exposición y el tipo de entrenamiento realizado.

La hipoxia es un estímulo fisiológico, pero también una carga adicional. Si la altitud es excesiva o la carga de entrenamiento no se ajusta, puede aparecer fatiga acumulada, pérdida de masa muscular, deterioro del rendimiento y peor recuperación.

Por ello, las adaptaciones musculares dependen mucho de que la exposición se combine con entrenamiento adecuado, recuperación suficiente y nutrición correcta. No basta con estar en altura; es necesario que el estímulo hipóxico se integre dentro de una planificación coherente.

6.6. Límites de la aclimatación

La aclimatación mejora la tolerancia a la altura, pero no elimina la causa principal del problema: la menor presión parcial de oxígeno. Aunque aumente la ventilación, mejore el transporte sanguíneo y se produzcan ajustes musculares, el ambiente sigue ofreciendo menos oxígeno que al nivel del mar.

Por esta razón, el rendimiento aeróbico en altura continúa reducido, especialmente en altitudes elevadas. El deportista puede sentirse mejor que en los primeros días, pero no necesariamente recupera sus ritmos o potencias habituales.

Esta idea es esencial para la práctica: aclimatarse no significa poder entrenar o competir igual que al nivel del mar. Significa tolerar mejor la hipoxia, reducir riesgos y sostener mejor el esfuerzo dentro de un entorno que sigue siendo limitante.

Además, la aclimatación presenta una importante variabilidad individual. Algunos deportistas responden con mejoras claras en ventilación, tolerancia al esfuerzo o masa de hemoglobina, mientras que otros muestran respuestas más discretas. Esta variabilidad explica por qué el entrenamiento o la estancia en altura no producen los mismos resultados en todos.

En síntesis, la aclimatación es una respuesta funcional útil, pero incompleta. Permite compensar parte del estrés hipóxico, aunque no anula sus efectos sobre el transporte de oxígeno y el rendimiento aeróbico.

7. Modelos de entrenamiento en altura e hipoxia

7.1. Fundamentos y objetivos del entrenamiento en altura

El entrenamiento en altura se basa en utilizar la hipoxia como un estímulo adicional al entrenamiento. Al disminuir la disponibilidad de oxígeno, el organismo activa respuestas ventilatorias, cardiovasculares, hematológicas y musculares orientadas a mantener el aporte de oxígeno a los tejidos.

El fundamento principal es que, si el estímulo hipóxico se aplica durante suficiente tiempo y con una carga bien planificada, puede favorecer adaptaciones útiles para el rendimiento, especialmente en deportes de resistencia. Entre ellas destacan el aumento del estímulo eritropoyético, la mejora de ciertas respuestas ventilatorias y posibles ajustes metabólicos musculares.

Sin embargo, la hipoxia también reduce la capacidad de entrenar a intensidades elevadas. Por tanto, el entrenamiento en altura tiene una doble cara: puede aportar un estímulo adaptativo, pero también puede limitar la calidad del entrenamiento si la carga no se ajusta correctamente.

La clave no es simplemente “estar en altura”, sino combinar de forma adecuada altitud, duración, intensidad de entrenamiento, recuperación y características individuales del deportista.

El entrenamiento en altura puede perseguir varios objetivos. El primero es aclimatar al deportista para competir o realizar actividad física en altitud. En este caso, el objetivo principal no es mejorar el rendimiento al nivel del mar, sino tolerar mejor el ambiente hipóxico y reducir la pérdida de rendimiento en altura.

El segundo objetivo es mejorar la capacidad de transporte de oxígeno, principalmente mediante adaptaciones hematológicas. Una exposición suficiente a la hipoxia puede estimular la eritropoyetina y favorecer un aumento de la masa de hemoglobina, siempre que exista tiempo suficiente y disponibilidad adecuada de hierro.

El tercer objetivo es generar un estímulo muscular y metabólico diferente. Entrenar con menos oxígeno puede aumentar la exigencia relativa de una misma carga, modificar la utilización de sustratos y aumentar el estrés fisiológico de determinadas sesiones.

En todos los casos, el objetivo debe estar claramente definido. No se planifica igual una estancia para preparar una carrera en montaña que una concentración para intentar mejorar el rendimiento aeróbico posterior al nivel del mar.

7.2. Modelo vivir alto-entrenar alto

El modelo vivir alto-entrenar alto consiste en residir y entrenar en altitud. Es el modelo clásico de entrenamiento en altura. El deportista permanece durante días o semanas en un entorno hipóxico y realiza allí la mayor parte de sus sesiones.

Su ventaja principal es que combina exposición continua a la hipoxia y entrenamiento en el mismo ambiente. Esto favorece la aclimatación y puede estimular adaptaciones hematológicas si la duración de la estancia es suficiente.

Sin embargo, presenta una limitación importante: al entrenar en altura, el deportista no siempre puede alcanzar las mismas intensidades absolutas que al nivel del mar. Los ritmos, las potencias y la tolerancia al esfuerzo se reducen, sobre todo en los primeros días y en sesiones de alta intensidad.

Por ello, este modelo puede ser útil para aclimatarse a competir en altura, pero debe aplicarse con cuidado si el objetivo es mejorar el rendimiento al nivel del mar. Una reducción excesiva de la calidad del entrenamiento puede limitar sus beneficios.

Desde el punto de vista práctico, este modelo exige ajustar las cargas durante los primeros días, controlar la fatiga y aceptar que el rendimiento externo puede ser menor. El objetivo no debe ser reproducir automáticamente las intensidades habituales, sino permitir que el organismo se adapte progresivamente al nuevo entorno.

7.3. Modelo vivir alto-entrenar bajo

El modelo vivir alto-entrenar bajo intenta combinar dos estímulos: exposición prolongada a la hipoxia durante el descanso y posibilidad de entrenar con mayor calidad en condiciones de menor hipoxia o al nivel del mar.

La lógica fisiológica es clara. Vivir en altura proporciona el estímulo para adaptaciones ventilatorias y hematológicas, mientras que entrenar más bajo permite mantener intensidades altas, ritmos específicos y mayor calidad mecánica.

Este modelo surgió como respuesta a una limitación del modelo clásico: si todo el entrenamiento se realiza en altura, la intensidad puede disminuir demasiado. Al entrenar bajo, el deportista puede sostener cargas más parecidas a las competitivas, especialmente en sesiones de intensidad elevada.

Desde el punto de vista aplicado, suele considerarse uno de los modelos más interesantes para deportes de resistencia. No obstante, requiere una organización logística más compleja y una adecuada individualización de la altitud, la duración de exposición y la carga de entrenamiento.

La ventaja principal es que permite separar parcialmente el estímulo hipóxico de la calidad del entrenamiento. El deportista recibe la exposición a la hipoxia durante muchas horas al día, pero conserva la posibilidad de realizar sesiones exigentes con menor limitación fisiológica.

7.4. Entrenamiento intermitente en hipoxia

El entrenamiento intermitente en hipoxia consiste en realizar sesiones concretas de ejercicio en condiciones hipóxicas, alternadas con sesiones normales en normoxia. Puede llevarse a cabo en cámaras, salas hipóxicas, sistemas de mascarilla o entornos naturales.

Su objetivo no siempre es aumentar la masa de hemoglobina, ya que la exposición total puede ser insuficiente para lograr una gran respuesta hematológica. En cambio, busca generar un estímulo específico durante el ejercicio: mayor estrés metabólico, mayor exigencia ventilatoria y cardiovascular, y posibles adaptaciones musculares.

Este modelo puede ser útil cuando se quiere introducir hipoxia sin desplazar al deportista a la montaña durante semanas. También permite controlar mejor la dosis de exposición y combinar sesiones hipóxicas con entrenamiento de calidad en normoxia.

Sin embargo, debe planificarse con cuidado. Si la intensidad se mantiene igual que en normoxia, la carga interna será mayor. Si se reduce demasiado, el estímulo mecánico o deportivo puede perder calidad. Por ello, es necesario ajustar la sesión según el objetivo.

Desde el punto de vista aplicado, el entrenamiento intermitente en hipoxia puede utilizarse para aumentar la dificultad fisiológica de determinadas sesiones, pero no debe añadirse sin control a una planificación ya exigente. La hipoxia aumenta el estrés total del entrenamiento y puede comprometer la recuperación si no se dosifica correctamente.

7.5. Exposición hipóxica intermitente en reposo

La exposición hipóxica intermitente en reposo consiste en permanecer durante periodos breves o moderados en hipoxia sin realizar ejercicio. Puede hacerse mediante cámaras, tiendas hipóxicas o dispositivos que reducen la disponibilidad de oxígeno inspirado.

Este modelo busca estimular respuestas a la hipoxia reduciendo el impacto mecánico y metabólico del entrenamiento. En teoría, permite aumentar la exposición hipóxica sin añadir demasiada carga muscular.

No obstante, sus efectos sobre el rendimiento deportivo suelen ser más variables que los modelos que combinan hipoxia y entrenamiento. La razón es que el estímulo en reposo puede ser insuficiente para generar adaptaciones funcionales transferibles al ejercicio, especialmente si la dosis total de hipoxia es baja.

Desde un punto de vista práctico, puede utilizarse como complemento, pero no debería sustituir al entrenamiento bien planificado. Para el deportista, la hipoxia en reposo solo tiene sentido si se integra dentro de una estrategia global de carga, recuperación y objetivos competitivos.

La exposición hipóxica en reposo puede ser atractiva porque reduce la interferencia con la carga mecánica del entrenamiento. Sin embargo, su utilidad depende de que el estímulo sea suficiente y de que no altere negativamente el sueño, la recuperación o el estado general del deportista.

7.6. Hipoxia natural, hipoxia artificial y altitud simulada

La hipoxia natural es la que se produce en la montaña o en ciudades situadas a elevada altitud. En ella disminuye la presión atmosférica y, con ello, la presión parcial de oxígeno. Además, aparecen otros factores ambientales como frío, baja humedad, radiación solar y viento.

La hipoxia artificial intenta reproducir parte de ese estímulo mediante cámaras, tiendas, habitaciones o sistemas de mezcla gaseosa. Puede ser hipobárica, si disminuye la presión total, o normobárica, si se reduce la fracción inspirada de oxígeno manteniendo la presión atmosférica normal.

La altitud simulada ofrece ventajas prácticas: permite controlar la dosis de hipoxia, evitar desplazamientos largos y combinar exposición hipóxica con entrenamiento habitual. Sin embargo, no reproduce siempre todas las condiciones de la altitud real.

En la práctica, la elección entre hipoxia natural y artificial depende del objetivo, los recursos disponibles, el calendario competitivo y la respuesta individual del deportista. Lo importante no es el método en sí, sino que el estímulo hipóxico esté bien dosificado y no deteriore la calidad global del entrenamiento.

Por tanto, los diferentes modelos de entrenamiento en altura deben entenderse como herramientas, no como soluciones universales. Su utilidad depende de que exista un objetivo claro, una dosis adecuada, un control individualizado y una integración correcta dentro de la planificación general del deportista.

8. Planificación y control del entrenamiento en hipoxia

8.1. Dosis de hipoxia: altitud, duración y frecuencia

La eficacia del entrenamiento en hipoxia depende en gran medida de la dosis aplicada. Esta dosis se define por la altitud utilizada, la duración de cada exposición, la frecuencia semanal y el número total de días o semanas de intervención.

Si la altitud es demasiado baja, el estímulo puede ser insuficiente. Si es demasiado alta, el deportista puede acumular fatiga, dormir peor, perder calidad de entrenamiento y aumentar el riesgo de mala adaptación. Por eso, la altitud debe elegirse según el objetivo: aclimatarse para competir en altura, estimular respuestas hematológicas o introducir sesiones específicas en hipoxia.

La duración también es decisiva. Las adaptaciones ventilatorias aparecen relativamente pronto, pero los cambios hematológicos requieren más tiempo. Por ello, una exposición breve puede mejorar la tolerancia a la altura, pero no siempre produce cambios relevantes en la masa de hemoglobina.

La frecuencia de exposición determina la continuidad del estímulo. Una exposición aislada puede generar una respuesta aguda, pero las adaptaciones más estables requieren una repetición suficiente del estímulo hipóxico. Sin embargo, acumular demasiada exposición sin controlar la recuperación puede aumentar el estrés total y reducir la calidad del entrenamiento.

En la práctica, la dosis de hipoxia debe aumentar de forma progresiva y controlada. No se trata de acumular la máxima exposición posible, sino de aplicar un estímulo suficiente sin comprometer la recuperación ni la calidad del entrenamiento.

8.2. Control de la intensidad: carga externa frente a carga interna

En hipoxia, la intensidad externa no tiene el mismo significado que al nivel del mar. Una velocidad, potencia o ritmo habitual genera una carga interna mayor porque el organismo dispone de menos oxígeno.

Por eso, las primeras sesiones en altura deben ajustarse. Mantener los ritmos normales puede convertir un entrenamiento moderado en una sesión excesivamente intensa. Esta es una de las causas más frecuentes de fatiga acumulada durante concentraciones en altura.

El control de la intensidad debe combinar variables externas e internas. Las variables externas indican lo que el deportista hace: velocidad, potencia, distancia, desnivel, ritmo o carga desplazada. Las variables internas muestran cómo responde el organismo: frecuencia cardiaca, ventilación, saturación de oxígeno, percepción del esfuerzo y sensación de fatiga.

En hipoxia, las variables internas adquieren especial importancia porque permiten detectar si una carga aparentemente conocida está generando una respuesta fisiológica excesiva. Una misma potencia puede ser adecuada al nivel del mar y demasiado exigente en altura.

La aplicación práctica es clara: durante los primeros días conviene reducir la intensidad, priorizar la adaptación y progresar según la respuesta individual. A medida que mejora la tolerancia, pueden reintroducirse sesiones más exigentes.

8.3. Variables de seguimiento: frecuencia cardiaca, percepción del esfuerzo y saturación de oxígeno

La frecuencia cardiaca es una variable útil para controlar la respuesta cardiovascular al ejercicio en hipoxia. En altura suele ser mayor para una misma carga absoluta, especialmente durante los primeros días. Esto indica que el organismo necesita aumentar el trabajo cardiovascular para compensar el menor contenido arterial de oxígeno.

Sin embargo, la frecuencia cardiaca no debe interpretarse de forma aislada. Puede verse influida por la fatiga, la deshidratación, el sueño, la temperatura, el estrés y el grado de aclimatación. Por ello, conviene combinarla con otras variables.

La percepción subjetiva del esfuerzo es especialmente útil en altura. El deportista puede percibir como intenso un ritmo que al nivel del mar consideraba moderado. Esta percepción refleja señales fisiológicas reales procedentes del sistema respiratorio, cardiovascular, muscular y nervioso.

La saturación de oxígeno permite valorar de forma sencilla la respuesta a la hipoxia. Una saturación más baja indica una menor oxigenación arterial y puede ayudar a identificar deportistas que desaturan más ante una misma altitud o intensidad. No obstante, también debe interpretarse junto con los síntomas, la carga de entrenamiento y el estado general.

El seguimiento del entrenamiento en hipoxia debe integrar todas estas variables. No basta con controlar la velocidad o la potencia. Es necesario valorar cómo responde el organismo y ajustar la carga cuando aparezcan señales de fatiga excesiva, mala recuperación o baja tolerancia a la altura.

8.4. Respuesta individual: respondedores y no respondedores

No todos los deportistas responden igual a la hipoxia. Algunos muestran una buena tolerancia, aumentan de forma eficaz la ventilación, mantienen mejor la saturación de oxígeno y desarrollan adaptaciones hematológicas o metabólicas favorables. Otros presentan respuestas más discretas o una mayor dificultad para adaptarse.

Esta variabilidad puede deberse a diferencias en la respuesta ventilatoria hipóxica, el estado de entrenamiento, la disponibilidad de hierro, la capacidad de recuperación, la calidad del sueño, la nutrición y la sensibilidad individual al estrés hipóxico.

Desde el punto de vista aplicado, esto significa que no debe utilizarse una misma estrategia para todos los deportistas. Dos atletas con un nivel similar al nivel del mar pueden responder de manera muy diferente a la misma altitud o al mismo programa de entrenamiento en hipoxia.

La existencia de respondedores y no respondedores obliga a individualizar la exposición. En algunos casos, la hipoxia puede ser una herramienta útil. En otros, puede generar más fatiga que beneficio si reduce demasiado la calidad del entrenamiento o empeora la recuperación.

Por ello, la planificación debe incluir una evaluación continua de la respuesta individual. Si el deportista presenta fatiga persistente, mal sueño, pérdida de apetito, bajo rendimiento, saturaciones excesivamente bajas o dificultad para completar sesiones básicas, puede ser necesario reducir la dosis de hipoxia, modificar la carga o abandonar temporalmente la estrategia.

8.5. Factores condicionantes: nivel, hierro, sueño, recuperación y nutrición

El efecto del entrenamiento en hipoxia depende de varios factores condicionantes. Uno de los más importantes es el nivel del deportista. Los deportistas entrenados pueden beneficiarse de ciertos estímulos hipóxicos, pero también pueden ver más afectada la calidad de sus sesiones intensas, porque necesitan entrenar a ritmos o potencias elevados.

El estado de hierro es otro factor esencial. El hierro es necesario para formar hemoglobina. Si las reservas son bajas, la respuesta eritropoyética a la altura puede ser insuficiente, aunque el estímulo hipóxico sea adecuado. Por ello, antes de una estancia en altura conviene valorar el estado del hierro, especialmente en deportistas de resistencia, mujeres deportistas o atletas con antecedentes de ferropenia.

El sueño también puede alterarse en altura. La hipoxia puede dificultar el descanso, aumentar los despertares nocturnos y reducir la calidad de la recuperación. Si el deportista duerme mal durante varios días, la carga total de la concentración aumenta y puede aparecer fatiga acumulada.

La recuperación debe controlarse de forma cuidadosa. La hipoxia no sustituye al entrenamiento, sino que añade un estrés adicional. Por tanto, una planificación que ya es exigente al nivel del mar puede volverse excesiva si se traslada sin cambios a la altura.

La nutrición también adquiere importancia. En altura puede aumentar la utilización de hidratos de carbono, aparecer menor apetito y aumentar las pérdidas de agua por la ventilación y la baja humedad. Si la ingesta energética, la hidratación o el aporte de hidratos de carbono no son adecuados, el deportista puede reducir la calidad del entrenamiento y aumentar el riesgo de fatiga.

En conjunto, la respuesta a la hipoxia depende de la interacción entre estímulo, entrenamiento y recuperación. La altitud por sí sola no garantiza una mejora del rendimiento; debe estar acompañada de una planificación coherente y de un control adecuado del estado general del deportista.

8.6. Errores frecuentes en la planificación

Uno de los errores más frecuentes es trasladar directamente a la altura las intensidades utilizadas al nivel del mar. Como el VO_2máx disminuye en hipoxia, una misma velocidad o potencia

representa una carga relativa mayor. Mantener los ritmos habituales puede generar fatiga excesiva desde los primeros días.

Otro error habitual es considerar que más hipoxia siempre es mejor. Una altitud demasiado elevada, una exposición demasiado prolongada o una frecuencia excesiva pueden reducir la calidad del entrenamiento, empeorar el sueño, aumentar la fatiga y limitar las adaptaciones buscadas.

También es un error no individualizar la respuesta. Algunos deportistas toleran bien la hipoxia, mientras que otros muestran peor saturación, mayor percepción del esfuerzo o recuperación deficiente. Aplicar el mismo programa a todos puede hacer que algunos acumulen una carga excesiva.

No valorar el estado de hierro antes de una estancia en altura es otro problema importante. Si el deportista no dispone de hierro suficiente, la respuesta hematológica puede verse limitada y la exposición puede aumentar la fatiga sin generar el beneficio esperado.

También puede ser problemático utilizar la hipoxia sin un objetivo claro. No es lo mismo aclimatarse para competir en altitud que intentar mejorar el rendimiento posterior al nivel del mar o introducir sesiones específicas en hipoxia. Cada objetivo requiere una dosis, una duración y una organización diferentes.

Por último, un error frecuente es centrarse solo en el estímulo hipóxico y descuidar la recuperación. El entrenamiento en altura no debe evaluarse únicamente por los metros de altitud o las horas de exposición, sino por el equilibrio entre estímulo, carga de entrenamiento, descanso, nutrición y respuesta individual.

8.7. Criterios para decidir si utilizar entrenamiento en altura

El entrenamiento en altura o hipoxia debe utilizarse cuando existe un objetivo claro y cuando el contexto permite controlar adecuadamente la carga. No debería aplicarse simplemente porque sea una estrategia atractiva o porque otros deportistas la utilicen.

Un primer criterio es la modalidad deportiva. La hipoxia puede tener más sentido en deportes de resistencia o en deportistas que deben competir en altitud. En deportes donde predominan acciones muy breves y explosivas, su utilidad dependerá más de la necesidad de repetir esfuerzos y de la importancia de la recuperación entre acciones.

Un segundo criterio es el momento de la temporada. Una concentración en altura o un bloque de entrenamiento hipóxico puede generar fatiga, por lo que debe ubicarse en un momento compatible con los objetivos competitivos y con el estado de forma del deportista.

Un tercer criterio es la posibilidad de controlar la respuesta individual. Si no se pueden monitorizar variables básicas como frecuencia cardiaca, percepción del esfuerzo, saturación de oxígeno, sueño, fatiga y rendimiento, aumenta el riesgo de aplicar una dosis inadecuada.

Un cuarto criterio es el estado general del deportista. La hipoxia no debería añadirse cuando existe fatiga acumulada, mala recuperación, bajo estado de hierro, enfermedad reciente, mal descanso o una carga de entrenamiento ya excesiva.

Finalmente, debe valorarse si la hipoxia mejora realmente la planificación o si complica innecesariamente el proceso. En algunos casos puede ser una herramienta útil; en otros, entrenar bien en normoxia, recuperar mejor y ajustar adecuadamente las cargas puede ser más eficaz.

Por tanto, la decisión de utilizar entrenamiento en hipoxia debe basarse en la relación entre beneficio esperado, riesgo de fatiga, recursos disponibles y respuesta individual del deportista. La hipoxia es una herramienta de entrenamiento, no un objetivo en sí misma.

9. Aplicación según modalidad deportiva

9.1. Deportes de resistencia

Los deportes de resistencia son los más afectados por la hipoxia porque dependen en gran medida de la capacidad para captar, transportar y utilizar oxígeno durante periodos prolongados. Carrera de fondo, ciclismo, esquí de fondo, trail, alpinismo o pruebas de montaña requieren mantener una producción elevada de energía aeróbica.

En altura, la menor presión parcial de oxígeno reduce la disponibilidad de oxígeno para el músculo y disminuye el VO_2máx. Como consecuencia, una misma velocidad o potencia representa una carga relativa mayor que al nivel del mar. El deportista respira más, aumenta su frecuencia cardiaca, utiliza más glucógeno y percibe el esfuerzo como más intenso.

Por ello, en deportes de resistencia es necesario ajustar el ritmo desde el inicio. Intentar mantener las mismas intensidades que al nivel del mar puede provocar fatiga prematura y una caída marcada del rendimiento. La estrategia debe basarse en la respuesta interna del deportista y no solo en referencias externas como ritmo, velocidad o potencia.

La hipoxia también puede utilizarse como herramienta de entrenamiento en estos deportes, especialmente cuando el objetivo es mejorar la tolerancia a la altura o estimular adaptaciones relacionadas con el transporte de oxígeno. Sin embargo, su utilidad depende de una planificación adecuada. Si la hipoxia reduce demasiado la calidad del entrenamiento, el beneficio esperado puede verse limitado.

9.2. Deportes de equipo

En los deportes de equipo, el efecto de la hipoxia es más complejo. Estos deportes combinan acciones explosivas, cambios de dirección, sprints, periodos de baja intensidad, toma de decisiones y recuperación entre esfuerzos. Por tanto, no dependen exclusivamente del metabolismo aeróbico, pero sí necesitan una buena capacidad de recuperación.

Un sprint aislado, un salto o una acción técnica breve pueden verse poco afectados por la hipoxia, ya que dependen en gran parte del sistema de fosfágenos y de la glucólisis anaeróbica. Sin embargo, cuando estas acciones se repiten muchas veces a lo largo del partido o del entrenamiento, la menor disponibilidad de oxígeno puede dificultar la recuperación entre esfuerzos.

La capacidad de repetir sprints, sostener una alta intensidad durante todo el encuentro y recuperarse entre acciones puede disminuir en altura. Además, la fatiga acumulada puede afectar a la precisión técnica, la toma de decisiones y la concentración, especialmente si la hipoxia es marcada o el deportista no está aclimatado.

Desde el punto de vista práctico, en deportes de equipo es importante controlar tanto la carga física como la calidad técnica y táctica. En altura, una sesión que parece similar en volumen o duración puede generar una carga interna superior. Por ello, puede ser necesario aumentar las pausas, reducir la densidad de esfuerzos o ajustar la intensidad de las tareas.

9.3. Deportes de potencia y velocidad

Los deportes de potencia y velocidad suelen verse menos perjudicados por la hipoxia cuando las acciones son muy breves. Sprints cortos, saltos, lanzamientos o gestos explosivos aislados dependen menos del oxígeno durante su ejecución inmediata.

Además, la menor densidad del aire en altura puede reducir la resistencia aerodinámica y favorecer algunas acciones rápidas o balísticas. Esto puede beneficiar parcialmente pruebas de velocidad, lanzamientos o saltos, siempre que la duración del esfuerzo sea corta y la hipoxia no limite de forma importante la producción energética.

Sin embargo, este posible beneficio no debe generalizarse. Cuando los esfuerzos explosivos se repiten muchas veces, la recuperación entre repeticiones depende en parte del metabolismo aeróbico. En esas situaciones, la hipoxia puede aumentar la fatiga y reducir la capacidad de mantener la calidad de las acciones.

Por tanto, en deportes de potencia y velocidad, el efecto de la altitud depende de la duración del esfuerzo, del número de repeticiones y del tiempo de recuperación. Una acción aislada puede verse poco afectada o incluso beneficiada por la menor densidad del aire, mientras que una sesión con muchas repeticiones puede resultar más exigente que al nivel del mar.

9.4. Deportistas recreativos

En deportistas recreativos, la exposición a la altura debe abordarse con especial prudencia. Aunque las intensidades absolutas puedan ser menores que en deportistas de alto rendimiento, la hipoxia puede aumentar de forma clara la carga interna y la percepción del esfuerzo.

Una persona que realiza actividad física ocasional puede notar más dificultad respiratoria, mayor frecuencia cardiaca, fatiga temprana o menor tolerancia al ejercicio en altura. Esto no significa necesariamente que su condición física haya empeorado, sino que el organismo está trabajando en un ambiente con menor disponibilidad de oxígeno.

En este grupo, el objetivo principal debe ser la tolerancia y la seguridad. Es recomendable reducir la intensidad inicial, aumentar los descansos, hidratarse adecuadamente y prestar atención a síntomas como dolor de cabeza, mareo, náuseas, fatiga excesiva o alteraciones del sueño.

La progresión debe ser gradual. En actividades como senderismo, esquí, rutas de montaña o carreras populares en altitud, es importante evitar aumentos bruscos de intensidad o desnivel durante los primeros días. La percepción subjetiva del esfuerzo puede ser una herramienta sencilla y útil para ajustar la carga.

9.5. Alto rendimiento

En deportistas de alto rendimiento, la hipoxia puede ser una herramienta útil, pero también un factor de riesgo para la calidad del entrenamiento. Estos deportistas necesitan trabajar a intensidades muy específicas, por lo que una reducción excesiva de la potencia, la velocidad o el volumen de calidad puede comprometer la preparación.

La planificación debe ser especialmente precisa. Es necesario definir si el objetivo es competir en altura, mejorar la tolerancia a la hipoxia, estimular adaptaciones hematológicas o introducir sesiones específicas con mayor estrés fisiológico. Cada objetivo requiere una estrategia diferente.

En alto rendimiento, el control de la respuesta individual es fundamental. Deben valorarse variables como frecuencia cardiaca, percepción del esfuerzo, saturación de oxígeno, sueño, fatiga,

estado de hierro, recuperación y evolución del rendimiento. No todos los deportistas responden igual, por lo que el programa debe ajustarse según la tolerancia y la adaptación observada.

También es importante evitar que la hipoxia interfiera con las sesiones clave. En algunos casos, puede ser preferible separar el estímulo hipóxico de los entrenamientos de mayor calidad, como ocurre en el modelo vivir alto-entrenar bajo. En otros, puede utilizarse la hipoxia en sesiones concretas con un objetivo metabólico o fisiológico específico.

Por tanto, en alto rendimiento la hipoxia debe entenderse como una herramienta avanzada. Su aplicación requiere planificación, seguimiento y capacidad para modificar la carga si aparecen signos de fatiga excesiva o mala adaptación.

9.6. Retorno al nivel del mar y momento óptimo de competición

Tras una estancia en altura, el retorno al nivel del mar debe planificarse con cuidado. El objetivo suele ser aprovechar las adaptaciones conseguidas durante la exposición hipóxica, especialmente la mejora de la tolerancia al esfuerzo y, en algunos casos, el aumento de la capacidad de transporte de oxígeno.

Sin embargo, la respuesta tras volver al nivel del mar puede variar entre deportistas. Algunos se sienten mejor rápidamente, mientras que otros necesitan varios días para recuperar sensaciones normales de entrenamiento. La fatiga acumulada durante la estancia, la calidad del sueño, la carga realizada y la respuesta individual influyen en este proceso.

El momento óptimo para competir después de una concentración en altura no es igual para todos. Depende del tipo de deporte, la duración de la estancia, la magnitud del estímulo hipóxico, el grado de fatiga y la adaptación conseguida. Por ello, no debe aplicarse una regla única de forma automática.

Durante los primeros días tras el retorno, conviene controlar la respuesta del deportista y ajustar las cargas. Si existe fatiga acumulada, puede ser necesario priorizar la recuperación antes de introducir sesiones intensas. Si la adaptación ha sido favorable, el deportista puede beneficiarse de una mejor tolerancia al esfuerzo en normoxia.

En síntesis, la aplicación de la hipoxia debe adaptarse a la modalidad deportiva y al perfil del deportista. No tiene el mismo significado en una prueba de resistencia, un deporte de equipo, una disciplina de potencia o una actividad recreativa. La clave es comprender qué limita el rendimiento en cada caso y utilizar la hipoxia solo cuando aporte un beneficio claro dentro de la planificación general.

10. Riesgos, problemas asociados y cuidados básicos

10.1. Mal agudo de montaña

El mal agudo de montaña es uno de los problemas más frecuentes asociados a la exposición a la altura. Suele aparecer cuando una persona asciende a una altitud para la que todavía no está aclimatada, especialmente si el ascenso es rápido o si se realiza ejercicio intenso durante los primeros días.

Sus síntomas más habituales son dolor de cabeza, náuseas, mareo, fatiga, pérdida de apetito, dificultad para dormir y sensación general de malestar. Estos síntomas pueden confundirse inicialmente con cansancio normal, mala recuperación o falta de forma física, pero en el contexto de la altura deben interpretarse con precaución.

El mal agudo de montaña refleja que el organismo no está tolerando bien la hipoxia. Aunque en muchos casos es leve, puede empeorar si se continúa ascendiendo, si se mantiene una carga de ejercicio elevada o si no se permite una recuperación adecuada.

Desde el punto de vista deportivo, la prevención es fundamental. El ascenso debe ser progresivo siempre que sea posible, las cargas de entrenamiento deben reducirse durante los primeros días y el deportista debe estar atento a la aparición de síntomas. La aclimatación no debe forzarse mediante sesiones intensas, porque la hipoxia ya supone una carga fisiológica adicional.

Si aparecen síntomas compatibles con mal agudo de montaña, debe reducirse la intensidad del ejercicio, priorizar el descanso y evitar seguir ascendiendo hasta que la situación mejore. En casos más intensos o persistentes, la medida más importante es descender a menor altitud y recibir atención médica si es necesario.

10.2. Edema pulmonar y edema cerebral de altura

Además del mal agudo de montaña, existen complicaciones más graves asociadas a la altura, como el edema pulmonar de altura y el edema cerebral de altura. Aunque son menos frecuentes, pueden comprometer seriamente la salud y requieren una actuación rápida.

El edema pulmonar de altura se produce cuando se acumula líquido en los pulmones. Esto dificulta el intercambio gaseoso y reduce aún más la oxigenación arterial. Puede manifestarse con dificultad respiratoria marcada, tos, fatiga intensa, sensación de ahogo, disminución importante del rendimiento y empeoramiento progresivo del estado general.

El edema cerebral de altura se relaciona con la acumulación de líquido en el cerebro. Puede aparecer como una progresión grave del mal agudo de montaña. Sus signos pueden incluir dolor de cabeza intenso, confusión, alteraciones de la coordinación, dificultad para caminar, somnolencia excesiva o cambios en el comportamiento.

Estas situaciones no deben considerarse simples molestias propias de la altura. En el contexto deportivo, cualquier empeoramiento neurológico, respiratorio o funcional debe tomarse en serio. Continuar entrenando o ascendiendo en estas condiciones puede aumentar el riesgo.

La actuación básica ante sospecha de una complicación grave por altura es interrumpir la actividad, descender lo antes posible a menor altitud y buscar atención médica. En estos casos, el objetivo deja de ser el rendimiento o la aclimatación y pasa a ser la seguridad del deportista.

10.3. Sueño, hidratación, apetito y pérdida de masa corporal

La altura puede alterar el sueño. La hipoxia puede provocar despertares frecuentes, sueño menos reparador y sensación de descanso insuficiente. Esto es especialmente relevante en concentraciones de entrenamiento, porque una mala calidad del sueño dificulta la recuperación y aumenta la fatiga acumulada.

La hidratación también puede verse comprometida. En altura suele haber menor humedad ambiental y la ventilación aumenta, lo que incrementa la pérdida de agua por la respiración. Además, el frío puede reducir la sensación de sed, por lo que el deportista puede beber menos de lo necesario.

La combinación de mayor pérdida de agua, menor ingesta y ejercicio puede favorecer la deshidratación. Esto puede aumentar la percepción del esfuerzo, dificultar la termorregulación, reducir el volumen plasmático y empeorar la tolerancia al entrenamiento.

El apetito también puede disminuir durante la exposición a la altura. Si el deportista come menos, puede no cubrir sus necesidades energéticas, especialmente cuando realiza entrenamientos exigentes o actividades prolongadas en montaña. Esta situación puede favorecer la fatiga, reducir la calidad del entrenamiento y dificultar la recuperación.

En algunos casos, la estancia en altura puede asociarse con pérdida de masa corporal. Esto puede deberse a menor ingesta energética, mayor gasto, peor recuperación, pérdida de líquidos o, si la carga no está bien ajustada, pérdida de masa muscular. Por ello, durante una estancia en altura conviene vigilar no solo el rendimiento, sino también el sueño, la hidratación, el apetito y el estado general.

10.4. Soporte nutricional básico: hidratos de carbono, hierro e hidratación

La nutrición es un aspecto importante durante la exposición a la hipoxia. En altura, el ejercicio puede aumentar la dependencia de los hidratos de carbono, especialmente cuando la intensidad relativa es elevada. Por ello, una ingesta insuficiente puede acelerar la fatiga y reducir la calidad de las sesiones.

Los hidratos de carbono ayudan a mantener las reservas de glucógeno y a sostener el trabajo durante esfuerzos prolongados o repetidos. Si el deportista entrena en hipoxia con baja disponibilidad energética o baja disponibilidad de hidratos de carbono, puede acumular más fatiga y tolerar peor la carga.

El hierro es otro elemento clave. Es necesario para formar hemoglobina y, por tanto, para que se produzca una respuesta hematológica adecuada a la altura. Si las reservas de hierro son bajas, el estímulo de la eritropoyetina puede no traducirse en una producción suficiente de glóbulos rojos.

Por esta razón, antes de una estancia en altura es recomendable valorar el estado del hierro, especialmente en deportistas de resistencia, mujeres deportistas o personas con antecedentes de ferropenia. Una mala disponibilidad de hierro puede limitar las adaptaciones buscadas y aumentar la sensación de fatiga.

La hidratación debe cuidarse de forma específica. La mayor ventilación, la baja humedad y el ejercicio aumentan las pérdidas de agua. Además, la reducción del volumen plasmático durante los primeros días puede hacer que el estado hídrico sea especialmente importante para mantener la función cardiovascular y la tolerancia al esfuerzo.

En conjunto, el soporte nutricional durante la exposición a la altura debe buscar mantener la disponibilidad energética, asegurar una ingesta suficiente de hidratos de carbono, cuidar el estado de hierro y prevenir la deshidratación. Estos aspectos no sustituyen a la aclimatación, pero ayudan a que el deportista tolere mejor la carga hipóxica.

10.5. Prevención y criterios de seguridad en contexto deportivo

La prevención de problemas asociados a la altura se basa en una idea principal: la hipoxia debe introducirse de forma progresiva y controlada. No todos los deportistas toleran igual la misma altitud, por lo que la planificación debe adaptarse a la respuesta individual.

Durante los primeros días, conviene reducir la intensidad y el volumen de entrenamiento. El organismo necesita tiempo para ajustar la ventilación, el equilibrio ácido-base, la respuesta cardiovascular y la tolerancia general al esfuerzo. Entrenar demasiado fuerte al inicio puede aumentar el riesgo de fatiga, mala adaptación o síntomas asociados a la altura.

El control de síntomas es fundamental. Dolor de cabeza persistente, mareo, náuseas, fatiga desproporcionada, alteraciones del sueño, pérdida marcada de apetito, dificultad respiratoria o problemas de coordinación deben interpretarse como señales de alerta. En estos casos, la carga debe reducirse y debe valorarse la necesidad de descender o recibir atención médica.

También es importante controlar variables sencillas como la percepción del esfuerzo, la frecuencia cardiaca, la saturación de oxígeno, la calidad del sueño, la hidratación y la evolución del rendimiento. Estas variables ayudan a detectar si el deportista está tolerando la exposición o si la carga total es excesiva.

En actividades recreativas o de montaña, la seguridad debe prevalecer sobre el objetivo deportivo. El ascenso progresivo, las pausas adecuadas, la hidratación, la protección frente al frío y la atención a los síntomas son medidas básicas. En deportes de alto rendimiento, además, es necesario integrar la hipoxia dentro de una planificación precisa para evitar que el estímulo se convierta en una fuente excesiva de fatiga.

En síntesis, la altura puede ser un entorno de entrenamiento o competición, pero también un factor de riesgo. La clave es diferenciar entre una respuesta normal de adaptación y una mala tolerancia a la hipoxia. Cuando aparecen síntomas importantes o deterioro funcional, el objetivo debe dejar de ser el rendimiento y pasar a ser la seguridad.

Bibliografía

Fox SI. Fisiología Humana. 15ª ed. McGraw-Hill Interamericana; 2021.

Katch, V. L., MacArdle, W. D., & Katch, F. I. (2014). *Fisiología del ejercicio : "fundamentos"* (4ª ed). Editorial Médica Panamericana.

López Chicharro, J., & Fernández Vaquero, A. (2023). *Fisiología del ejercicio* (4a ed). Editorial Médica Panamericana.

Millet, G. P., Chapman, R. F., Girard, O., & Brocherie, F. (2019). Is live high-train low altitude training relevant for elite athletes? Flawed analysis from inaccurate data. *British Journal of Sports Medicine, 53*(15), 923–925.

Mujika, I., Sharma, A. P., & Stellingwerff, T. (2019). Contemporary periodization of altitude training for elite endurance athletes: A narrative review. *Sports Medicine, 49*(11), 1651–1669.

Vicente Campos, D. (2020). *Fisiología del Entrenamiento Aeróbico Una visión integrada*. Editorial Médica Panamericana.

Wilmore. (2014) Fisiología del Deporte y el Ejercicio. (5ª ed). Editorial Médica Panamericana.

Tema 14. Ejercicio y entrenamiento en condiciones de calor

1. Introducción: ejercicio, calor y equilibrio térmico

El ejercicio físico aumenta de forma importante la producción interna de calor. El músculo esquelético transforma energía química en trabajo mecánico, pero esta transformación no es completamente eficiente: solo una parte de la energía se utiliza para producir movimiento y el resto se libera como calor. Por ello, cuanto mayor es la intensidad del ejercicio y mayor es la masa muscular implicada, mayor es la cantidad de calor que el organismo debe eliminar para mantener estable la temperatura corporal.

En ambientes calurosos, el problema fisiológico no depende solo de la temperatura externa. Durante el esfuerzo coinciden dos fuentes de estrés térmico: el calor producido por la contracción muscular y las condiciones ambientales que dificultan su disipación. Si la pérdida de calor no compensa la producción interna y la ganancia desde el exterior, la temperatura central aumenta, se incrementa la carga cardiovascular y aparece antes la fatiga.

La temperatura central corresponde a la de los órganos profundos, como el encéfalo, el corazón, los pulmones y las vísceras abdominales. Su estabilidad es esencial para el funcionamiento del sistema nervioso, la actividad enzimática, la contracción muscular y la circulación. Por eso, cuando la temperatura central se eleva durante el ejercicio, el organismo activa mecanismos de defensa, principalmente el aumento del flujo sanguíneo hacia la piel y la sudoración.

El ejercicio en calor exige integrar estructura, función y aplicación práctica. La estructura principal que produce calor es el músculo esquelético; la piel, los vasos sanguíneos cutáneos y las glándulas sudoríparas actúan como estructuras disipadoras; y la aplicación al ejercicio consiste en mantener el rendimiento sin comprometer la homeostasis térmica. El organismo debe aportar sangre al músculo activo y, al mismo tiempo, dirigir parte del flujo sanguíneo hacia la piel para eliminar calor. Esta doble demanda explica buena parte de la sobrecarga cardiovascular del ejercicio en ambientes calurosos.

La evaporación del sudor es el mecanismo más importante de pérdida de calor durante el ejercicio intenso en calor. Sin embargo, sudar no siempre significa enfriar eficazmente el cuerpo. Para que el sudor sea útil debe evaporarse; si permanece sobre la piel, empapa la ropa o cae al suelo, se pierde agua, pero apenas se elimina calor. Esta idea permite comprender por qué la humedad ambiental aumenta tanto el riesgo térmico: en ambientes húmedos, el aire admite menos vapor de agua y la evaporación se dificulta.

Desde el punto de vista del rendimiento, el calor modifica la respuesta al ejercicio. Para una misma velocidad, potencia o carga externa, el deportista suele presentar mayor frecuencia cardiaca, mayor percepción subjetiva del esfuerzo, más sudoración y una aparición más temprana de la fatiga. Además, si la temperatura central aumenta de forma excesiva, pueden alterarse la coordinación, la concentración y la toma de decisiones, aspectos importantes tanto en deportes de resistencia como en deportes colectivos e intermitentes.

El estudio del ejercicio en ambientes calurosos es especialmente relevante en Ciencias del Deporte porque muchas actividades se realizan al aire libre, en épocas cálidas, con alta humedad o con equipamientos que dificultan la pérdida de calor. Comprender esta respuesta permite al profesional ajustar la intensidad, modificar el volumen, aumentar las pausas, elegir horarios más seguros, planificar la hidratación, preparar procesos de aclimatación y reconocer signos de alarma.

Aunque el tema se centra en el calor, el contraste con el frío ayuda a entender la lógica general de la termorregulación. En calor, el organismo necesita disipar; en frío, necesita conservar. En ambos casos, el objetivo es mantener la temperatura central dentro de límites seguros. Por tanto, el rendimiento físico no depende solo del músculo, el corazón o los pulmones de forma aislada, sino de la capacidad del organismo para mantener la homeostasis en condiciones ambientales cambiantes.

2. Bases fisiológicas de la termorregulación

La termorregulación es el conjunto de mecanismos que permiten mantener la temperatura corporal dentro de un intervalo compatible con el funcionamiento normal del organismo. Durante el ejercicio, esta regulación adquiere una importancia especial porque la contracción muscular aumenta mucho la producción de calor. Si el ejercicio se realiza en ambiente caluroso, la dificultad es mayor: el cuerpo debe eliminar el calor generado por el metabolismo y, al mismo tiempo, enfrentarse a un entorno que puede limitar la pérdida de calor.

La temperatura corporal no es igual en todos los tejidos. Se distingue entre temperatura central y temperatura cutánea. La temperatura central corresponde a los órganos profundos y es la que el organismo protege con mayor precisión. La temperatura cutánea, en cambio, es más variable y depende del ambiente, del flujo sanguíneo hacia la piel, de la sudoración y de la ropa. Durante el ejercicio, el calor producido en los músculos debe desplazarse desde el interior del cuerpo hacia la piel para poder eliminarse.

Entre la temperatura central y la temperatura cutánea existe un gradiente térmico. Cuando el interior del cuerpo está más caliente que la piel, el calor tiende a desplazarse hacia la superficie. Este transporte se facilita aumentando el flujo sanguíneo cutáneo. Sin embargo, para que el calor salga finalmente al ambiente, debe existir también diferencia entre la piel y el exterior. Si el aire está más frío que la piel, la pérdida de calor es más fácil; si el aire es muy caliente y se aproxima a la temperatura cutánea, la pérdida por radiación y convección disminuye y el organismo depende cada vez más de la evaporación del sudor.

El control de la temperatura corporal está coordinado principalmente por el hipotálamo. Esta región del sistema nervioso central recibe información de termorreceptores centrales y periféricos. Los receptores centrales detectan cambios en la temperatura de la sangre y de los tejidos profundos; los periféricos, situados sobre todo en la piel, informan de las condiciones térmicas del ambiente. A partir de esta información, el hipotálamo activa respuestas dirigidas a conservar o disipar calor.

Cuando la temperatura corporal aumenta, como ocurre durante el ejercicio en calor, se activan dos respuestas fundamentales: la vasodilatación cutánea y la sudoración. La vasodilatación aumenta el flujo de sangre hacia la piel, permitiendo transportar calor desde el núcleo corporal hasta la superficie. La sudoración aporta agua a la piel y, si esta se evapora, permite retirar calor del organismo. Ambas respuestas son esenciales, pero también tienen un coste: la vasodilatación exige redistribuir el flujo sanguíneo y la sudoración provoca pérdida de agua y electrolitos.

El equilibrio térmico depende del balance entre producción, ganancia y pérdida de calor. La producción interna procede sobre todo del metabolismo muscular. La ganancia externa depende de la temperatura ambiental, la radiación solar, las superficies calientes, la ropa y la humedad. La pérdida de calor se realiza a través de diferentes mecanismos: radiación, conducción, convección y evaporación. Cuando la producción y la ganancia superan a la pérdida, la temperatura corporal aumenta; cuando la pérdida supera a la producción, disminuye.

La radiación es el intercambio de calor entre el cuerpo y las superficies que lo rodean sin contacto directo. Puede permitir perder calor hacia objetos más fríos, pero también ganar calor cuando existe exposición solar intensa o superficies muy calientes. La conducción es el intercambio por contacto directo, por ejemplo con agua, suelo o material deportivo. En la mayoría de deportes terrestres tiene menor importancia, aunque puede ser relevante en medios acuáticos o al contactar con superficies calientes.

La convección es la transferencia de calor entre la piel y el aire o el agua que se mueve alrededor del cuerpo. Si el aire es más frío que la piel, el viento o la ventilación favorecen la pérdida de calor. Si el aire es muy caliente, este mecanismo pierde eficacia. La evaporación, por su parte, es la pérdida de calor asociada al paso del agua del sudor a vapor. Durante el ejercicio intenso en ambientes calurosos, es el mecanismo más importante de enfriamiento.

La eficacia de la evaporación depende de que el sudor pueda evaporarse realmente. En ambientes secos, el aire acepta mejor el vapor de agua y el sudor enfría con mayor eficacia. En ambientes húmedos, el sudor se acumula o gotea, pero se evapora poco. En ese caso, el deportista pierde líquido y electrolitos sin conseguir una refrigeración proporcional. Por ello, la humedad es uno de los factores que más limita la termorregulación durante el ejercicio en calor.

La piel desempeña un papel central en este proceso. No es solo una barrera protectora, sino un órgano de intercambio térmico. Su red vascular permite llevar calor desde el interior hacia la superficie, y sus glándulas sudoríparas permiten producir sudor para favorecer la evaporación. Las glándulas sudoríparas ecrinas son las más importantes en la respuesta al ejercicio; secretan un sudor compuesto principalmente por agua, aunque también contiene electrolitos, sobre todo sodio y cloro.

Esta respuesta integrada tiene límites. Si el ambiente es muy caluroso, si la humedad es elevada, si la ropa impide la evaporación o si la deshidratación reduce el volumen plasmático, la pérdida de calor se dificulta. En esas condiciones aumenta la temperatura central, se incrementa la frecuencia cardiaca y el ejercicio se vuelve más exigente. Por tanto, las bases de la termorregulación permiten entender por qué el mismo entrenamiento puede tener consecuencias fisiológicas muy diferentes según las condiciones ambientales.

3. Respuesta del organismo al ejercicio en ambiente caluroso

El ejercicio en ambiente caluroso obliga al organismo a responder a dos demandas simultáneas: sostener el trabajo muscular y eliminar el calor producido. Esta doble exigencia convierte al calor

en un factor que aumenta la carga interna del ejercicio. Una misma intensidad externa puede generar una respuesta fisiológica mayor cuando la temperatura y la humedad son elevadas.

El punto de partida es la producción metabólica de calor. Durante la contracción muscular, el músculo utiliza ATP para generar fuerza, mantener el transporte de calcio y conservar los gradientes iónicos. Para regenerar ese ATP se activan las vías energéticas, pero una parte importante de la energía liberada se transforma en calor. Cuanto mayor es la intensidad del ejercicio y mayor la masa muscular implicada, mayor es la producción térmica.

El calor generado en los músculos debe desplazarse hacia la piel para poder eliminarse. Para ello, la sangre actúa como medio de transporte. Durante el ejercicio en calor aumenta el flujo sanguíneo cutáneo mediante vasodilatación. Esta respuesta permite llevar sangre caliente desde las zonas profundas hacia la superficie corporal, donde el calor puede perderse hacia el ambiente, sobre todo mediante la evaporación del sudor.

La sudoración es la otra respuesta esencial. Las glándulas sudoríparas liberan sudor sobre la piel y, cuando este se evapora, se retira calor del organismo. En ambientes calurosos, la evaporación se convierte en el mecanismo principal de enfriamiento. Sin embargo, su eficacia depende mucho de la humedad. En ambientes húmedos, el sudor se evapora peor, por lo que el deportista puede perder mucho líquido sin conseguir una pérdida de calor proporcional.

Durante el ejercicio en calor se produce una competencia entre el flujo sanguíneo dirigido al músculo y el flujo sanguíneo dirigido a la piel. El músculo necesita sangre para recibir oxígeno y nutrientes y para eliminar productos metabólicos. La piel necesita sangre para disipar calor. En ejercicios de baja o moderada intensidad, el organismo puede atender ambas demandas con cierta eficacia. En esfuerzos intensos, prolongados o realizados con alta humedad, esta distribución se vuelve más difícil.

Esta competencia se agrava si aparece deshidratación. La pérdida de líquido por sudor reduce el volumen plasmático, disminuye el retorno venoso y puede reducir el volumen sistólico. Para intentar mantener el gasto cardiaco, el organismo aumenta la frecuencia cardiaca. Así, una misma carga externa puede realizarse con una frecuencia cardiaca más elevada en calor que en un ambiente templado.

Este fenómeno se relaciona con la deriva cardiovascular. Durante un ejercicio prolongado a intensidad constante, la frecuencia cardiaca tiende a aumentar progresivamente mientras el volumen sistólico disminuye. Esto ocurre por la combinación de sudoración, reducción del volumen plasmático, vasodilatación cutánea y aumento de la temperatura corporal. Para el entrenador, esta idea es importante porque muestra que una carga externa estable no siempre significa una carga fisiológica estable.

El calor también modifica la respuesta metabólica. Para una misma intensidad absoluta, puede aumentar la utilización relativa de hidratos de carbono, en parte por la mayor activación simpática y el aumento de catecolaminas. Esto puede acelerar el consumo de glucógeno durante esfuerzos prolongados. Además, la hipertermia puede alterar la función muscular y aumentar el coste fisiológico de sostener una misma intensidad.

La percepción subjetiva del esfuerzo también aumenta. El deportista siente que la tarea es más dura porque se combinan mayor temperatura corporal, frecuencia cardiaca elevada, sudoración intensa, sed y malestar térmico. Esta percepción no debe interpretarse como un dato menor; en

ambientes calurosos es una herramienta útil para regular la intensidad y prevenir una acumulación excesiva de estrés térmico.

El sistema nervioso central participa de forma importante en la limitación del rendimiento en calor. Cuando la temperatura central aumenta demasiado, pueden alterarse la motivación, la coordinación, la concentración y la capacidad para mantener intensidades elevadas. En este sentido, la fatiga no debe entenderse solo como fallo muscular, sino también como una respuesta protectora que reduce la producción de calor antes de alcanzar niveles peligrosos.

Las consecuencias sobre el rendimiento dependen del tipo de ejercicio. En deportes de resistencia, el calor reduce la capacidad para mantener ritmos altos durante mucho tiempo. En deportes intermitentes, como los deportes colectivos, puede disminuir la capacidad para repetir esfuerzos intensos y recuperarse entre acciones. También pueden verse afectadas la precisión técnica, la toma de decisiones y la concentración, especialmente cuando se combinan hipertermia y deshidratación.

La respuesta al calor no es igual en todos los deportistas. Influyen el nivel de entrenamiento, la aclimatación, el estado de hidratación, la ropa, la composición corporal, la intensidad y la experiencia previa en ambientes cálidos. Un deportista entrenado y aclimatado suele tolerar mejor el calor porque presenta adaptaciones cardiovasculares y sudorales más eficaces. Aun así, la aclimatación no elimina el riesgo, solo aumenta el margen de tolerancia.

En conjunto, el ejercicio en ambiente caluroso se caracteriza por una respuesta integrada: el músculo produce calor, la sangre lo transporta, la piel y el sudor intentan eliminarlo, el corazón sostiene la distribución del flujo y el sistema nervioso regula la respuesta global. Cuando estos mecanismos no bastan, aumenta la temperatura central, aparece antes la fatiga y disminuye el rendimiento.

4. Factores ambientales y personales que condicionan el estrés térmico

El estrés térmico durante el ejercicio no depende solo de la temperatura del aire. La carga real que soporta el organismo resulta de la interacción entre el ambiente, la intensidad del esfuerzo, la duración, la ropa, el estado de hidratación y las características individuales del deportista. Por ello, una misma sesión puede ser tolerable en unas condiciones y excesivamente exigente en otras.

La temperatura ambiental influye en el gradiente entre la piel y el entorno. Cuando el aire está más frío que la piel, el cuerpo puede perder calor con mayor facilidad por radiación y convección. Sin embargo, cuando la temperatura del aire se aproxima a la temperatura cutánea, estos mecanismos pierden eficacia. Si la temperatura ambiental supera a la de la piel, el cuerpo puede incluso ganar calor desde el exterior, por lo que la evaporación del sudor se vuelve imprescindible.

La humedad relativa es uno de los factores más importantes. En ambientes secos, el sudor se evapora con facilidad y enfría la piel. En ambientes húmedos, el aire ya contiene mucho vapor de agua y la evaporación se dificulta. En esta situación, el deportista puede sudar mucho, pero disipar poco calor. Por eso, la combinación de alta temperatura y alta humedad es especialmente exigente: aumenta la pérdida de líquido, pero reduce el beneficio térmico de la sudoración.

La radiación solar también incrementa la carga térmica. Entrenar bajo el sol no equivale a entrenar a la sombra, aunque la temperatura del aire sea la misma. La exposición directa al sol, las superficies que acumulan calor y la ropa oscura pueden aumentar la ganancia de calor. El asfalto, el cemento, la arena o algunas pistas sintéticas pueden elevar la temperatura radiante alrededor del deportista y hacer más exigente la sesión.

La velocidad del aire modifica la pérdida de calor por convección y evaporación. Una ligera brisa o una buena ventilación pueden favorecer la disipación térmica, porque eliminan la capa de aire caliente y húmedo que se forma alrededor de la piel. En cambio, en ambientes cerrados, mal ventilados o con aire inmóvil, el calor y la humedad se acumulan con más facilidad. Si el aire es extremadamente caliente, el viento puede perder parte de su efecto beneficioso.

La ropa y el equipamiento deportivo pueden facilitar o dificultar la termorregulación. Las prendas ligeras y transpirables favorecen la evaporación del sudor. Por el contrario, la ropa gruesa, impermeable, muy ajustada o poco ventilada retiene humedad y dificulta la pérdida de calor. Esto es especialmente importante en deportes con protecciones, cascos, uniformes pesados o material obligatorio, donde la carga térmica real puede ser mayor que la estimada solo por la temperatura ambiental.

La intensidad del ejercicio es otro factor decisivo. A mayor intensidad, mayor producción metabólica de calor. Los esfuerzos intensos generan una carga térmica elevada incluso si no son muy largos. La duración también importa: en ejercicios prolongados se acumula calor y se pierden progresivamente agua y electrolitos por sudor. Por ello, el riesgo térmico aumenta cuando coinciden alta intensidad, larga duración, pausas insuficientes y condiciones ambientales desfavorables.

La modalidad deportiva condiciona la respuesta al calor. Los deportes de resistencia producen calor de forma sostenida durante mucho tiempo. Los deportes colectivos combinan esfuerzos intermitentes, pausas incompletas y exposición prolongada al ambiente. Los deportes de combate o aquellos con equipamiento pesado añaden el problema de la ropa y las protecciones. En competición, además, la presión por mantener el rendimiento puede llevar al deportista a ignorar señales de fatiga térmica.

Las características individuales también modifican la tolerancia al calor. El nivel de entrenamiento mejora la capacidad cardiovascular y facilita el transporte de calor hacia la piel, pero no elimina el riesgo. La aclimatación es especialmente importante: el deportista aclimatado suele iniciar antes la sudoración, conserva mejor el sodio, presenta menor frecuencia cardiaca para una misma carga submáxima y tolera mejor el esfuerzo en calor.

La edad, la composición corporal, el estado de hidratación y la experiencia previa también influyen. Los niños, las personas mayores o los deportistas no acostumbrados al calor pueden presentar más dificultades para regular la temperatura. Una mayor masa corporal puede aumentar la producción total de calor durante el movimiento, y un exceso de tejido adiposo puede dificultar su transferencia hacia la superficie. Además, comenzar una sesión ya deshidratado reduce el volumen plasmático y limita la capacidad de transportar calor hacia la piel.

Para valorar el riesgo térmico pueden utilizarse índices ambientales, como la temperatura de globo y bulbo húmedo, conocida como WBGT. Estos índices integran variables como temperatura, humedad, radiación y movimiento del aire, y ofrecen una información más completa que la temperatura ambiental aislada. Su utilidad práctica es ayudar a decidir si conviene mantener, modificar o suspender una sesión.

No obstante, ningún índice sustituye a la observación del deportista. La frecuencia cardiaca, la percepción subjetiva del esfuerzo, la pérdida de peso corporal, el ritmo, la calidad técnica, la conducta y la presencia de síntomas deben formar parte del control. El riesgo térmico depende del ambiente, pero también de cómo responde cada persona. Por eso, la planificación en calor

debe combinar información ambiental, características de la tarea y respuesta individual del deportista.

5. Sudoración, deshidratación y equilibrio hidroelectrolítico

La sudoración es una respuesta esencial para disipar calor durante el ejercicio en ambientes calurosos. Su función principal no es eliminar líquido, sino permitir la pérdida de calor por evaporación. Cuando el agua del sudor pasa de líquido a vapor, toma calor de la superficie corporal y contribuye al enfriamiento de la piel. Desde ahí, puede mantenerse el gradiente que permite trasladar calor desde el interior del cuerpo hacia la superficie.

Durante el ejercicio intenso en calor, la evaporación del sudor se convierte en el mecanismo más importante de refrigeración. Sin embargo, su eficacia depende del ambiente. En condiciones secas, el sudor se evapora con facilidad y enfría de forma eficiente. En ambientes húmedos, la evaporación se dificulta; el sudor se acumula, empapa la ropa o cae al suelo, pero no retira suficiente calor. Por eso, una sudoración abundante no siempre significa una termorregulación eficaz.

La producción de sudor depende de la intensidad y duración del ejercicio, la temperatura ambiental, la humedad, la radiación solar, la ropa, el nivel de entrenamiento y el grado de aclimatación. A mayor intensidad, mayor producción metabólica de calor y mayor necesidad de sudar. En ejercicios prolongados, la pérdida de líquido se acumula con el tiempo y puede alcanzar valores importantes. Además, los deportistas aclimatados suelen iniciar antes la sudoración y pueden producir más sudor, aunque con menor concentración de electrolitos.

La tasa de sudoración varía mucho entre personas. Por ello, no tiene sentido aplicar la misma pauta de hidratación a todos los deportistas. Una forma práctica de estimarla es comparar el peso corporal antes y después de una sesión, teniendo en cuenta el líquido ingerido y la orina eliminada. La pérdida aguda de peso durante una sesión en calor representa sobre todo pérdida de agua, no pérdida de grasa. Esta idea es importante para evitar interpretaciones erróneas en el entrenamiento.

El sudor está compuesto principalmente por agua, pero también contiene electrolitos, sobre todo sodio y cloro. La pérdida de sodio es relevante porque este electrolito participa en el mantenimiento del volumen extracelular, la presión osmótica y la función neuromuscular. En ejercicios cortos, la alimentación habitual y el agua pueden ser suficientes para reponer las pérdidas. En esfuerzos prolongados, sesiones repetidas o deportistas con gran sudoración, puede ser necesario incluir sodio en la estrategia de reposición.

La deshidratación aparece cuando la pérdida de líquido supera a la ingesta. Su consecuencia más importante durante el ejercicio en calor es la reducción del volumen plasmático. Al haber menos líquido circulante, disminuye el retorno venoso al corazón y puede reducirse el volumen sistólico. Para mantener el gasto cardiaco, aumenta la frecuencia cardiaca. Por eso, un deportista deshidratado realiza la misma carga externa con mayor esfuerzo cardiovascular.

Además, la deshidratación dificulta la termorregulación. Si disminuye el volumen plasmático, el organismo tiene más dificultad para mantener simultáneamente el flujo sanguíneo hacia los músculos y hacia la piel. También puede reducirse la capacidad de producir sudor de forma eficaz. Como resultado, aumenta la temperatura central y se acelera la aparición de fatiga. Esta relación explica por qué calor y deshidratación actúan de manera conjunta sobre el rendimiento.

Los efectos sobre el rendimiento dependen del grado de deshidratación, del ambiente y del tipo de ejercicio. En deportes de resistencia, suele disminuir la capacidad para mantener la velocidad o la potencia. En deportes intermitentes, puede reducirse la repetición de esfuerzos intensos y la recuperación entre acciones. Cuando la deshidratación se combina con hipertermia, también pueden alterarse la concentración, la coordinación, la precisión técnica y la toma de decisiones.

La hidratación debe plantearse antes, durante y después del ejercicio. Antes de la sesión, el objetivo es comenzar en un estado adecuado de hidratación. Durante el ejercicio, se busca limitar pérdidas excesivas de líquido, especialmente en sesiones largas o muy calurosas. Después, la prioridad es recuperar el déficit hídrico y electrolítico, sobre todo si habrá otra sesión en pocas horas. La reposición será más eficaz cuando incluye sodio, ya sea en bebidas o alimentos, porque facilita la retención de agua.

No siempre es necesario reponer todo el líquido perdido durante la propia sesión. En muchos casos, esto no es práctico ni cómodo. El objetivo es evitar un déficit suficiente como para comprometer el rendimiento o la seguridad. Por eso, la estrategia debe individualizarse según la tasa de sudoración, la duración del ejercicio, la temperatura, la humedad, las oportunidades para beber y la tolerancia digestiva del deportista.

También debe evitarse el extremo contrario: beber en exceso. En esfuerzos muy prolongados, una ingesta excesiva de agua sin suficiente sodio puede favorecer la hiponatremia asociada al ejercicio, es decir, una disminución anormal de la concentración de sodio en sangre. Esta situación recuerda que hidratarse no significa beber todo lo posible, sino mantener un equilibrio adecuado entre agua y electrolitos.

En resumen, la sudoración permite disipar calor, pero produce pérdida de agua y sales. La deshidratación reduce el volumen plasmático, aumenta la carga cardiovascular, dificulta la pérdida de calor y perjudica el rendimiento físico y cognitivo. La reposición hídrica debe ser práctica, flexible e individualizada, evitando tanto el déficit excesivo de líquido como la sobrehidratación en esfuerzos prolongados.

6. Aclimatación al calor

La aclimatación al calor es el conjunto de adaptaciones fisiológicas que aparecen tras exposiciones repetidas al ejercicio en ambiente caluroso. Su objetivo es mejorar la tolerancia al calor, reducir la carga interna de una misma tarea y disminuir el riesgo de fatiga o trastornos térmicos. No significa que el calor deje de afectar al organismo, sino que este responde de forma más eficaz.

Conviene diferenciar aclimatación y aclimatización. La aclimatación suele referirse a adaptaciones inducidas en condiciones controladas, como cámaras ambientales o sesiones planificadas en calor. La aclimatización se produce en condiciones naturales, por ejemplo al entrenar durante varios días en un clima caluroso. En la práctica deportiva, ambos procesos buscan preparar al deportista para rendir y entrenar con mayor seguridad en calor.

Una de las primeras adaptaciones es el aumento del volumen plasmático. Al disponer de más plasma, mejora el retorno venoso y se facilita el mantenimiento del volumen sistólico. Esto permite que, para una misma intensidad submáxima, la frecuencia cardiaca sea menor tras la aclimatación. Desde el punto de vista funcional, el sistema cardiovascular puede atender mejor la doble demanda del ejercicio en calor: llevar sangre al músculo activo y transportar calor hacia la piel.

La aclimatación también mejora la respuesta sudoral. El deportista aclimatado comienza a sudar antes, es decir, con menor aumento de la temperatura corporal. Además, puede aumentar la tasa de sudoración, lo que favorece la pérdida de calor si el ambiente permite la evaporación. Esta respuesta es útil sobre todo en calor seco o con buena ventilación. En ambientes muy húmedos, aunque se produzca más sudor, la evaporación sigue limitada, por lo que el riesgo térmico no desaparece.

Otra adaptación importante es la reducción de la concentración de sodio y cloro en el sudor. Con la exposición repetida al calor, las glándulas sudoríparas conservan mejor los electrolitos, de modo que el sudor se vuelve más diluido. Esto permite disipar calor con una menor pérdida relativa de sales. Aun así, en sesiones largas o con sudoración muy abundante, la pérdida total de sodio puede seguir siendo relevante y debe considerarse en la reposición.

Como consecuencia de estas adaptaciones, el deportista aclimatado suele presentar menor temperatura central durante ejercicios submáximos, menor deriva cardiovascular y menor percepción subjetiva del esfuerzo. La misma tarea se tolera mejor porque el organismo reparte el flujo sanguíneo con más eficacia, suda antes y conserva mejor el equilibrio hidroelectrolítico. También mejora la sensación de control ante el calor, lo que ayuda a regular la intensidad y reconocer señales de alarma.

El proceso de aclimatación requiere tiempo. Muchas adaptaciones comienzan durante los primeros días, especialmente la reducción de la frecuencia cardiaca y la expansión del volumen plasmático. Sin embargo, una aclimatación más completa suele necesitar entre una y dos semanas de exposición progresiva. Las sesiones deben ser frecuentes y suficientemente estimulantes para elevar la temperatura corporal y activar la sudoración, pero sin llegar a cargas excesivas que aumenten el riesgo.

La exposición debe progresar de forma gradual. En los primeros días conviene reducir la intensidad o la duración respecto a lo habitual, aumentar las pausas y controlar la respuesta individual. A medida que el deportista se adapta, puede incrementarse la carga y hacerse más específica. En deportes colectivos, por ejemplo, puede empezarse con tareas técnicas o aeróbicas controladas y avanzar hacia ejercicios más intensos e intermitentes.

La aclimatación también se pierde si cesa la exposición al calor. Esta pérdida es progresiva, por lo que debe planificarse cerca de la competición o del periodo en el que se entrenará en ambiente caluroso. Los deportistas entrenados suelen adaptarse con mayor rapidez, pero incluso ellos necesitan un periodo específico si viajan a un clima diferente o compiten en condiciones de calor y humedad a las que no están habituados.

Durante este proceso, la hidratación es fundamental. Al mejorar la respuesta sudoral, puede aumentar la pérdida total de líquido. Por ello, conviene controlar el peso corporal antes y después de algunas sesiones, asegurar el acceso a bebidas y reponer sodio cuando la duración o la sudoración lo justifiquen. Una mala hidratación puede limitar la adaptación y aumentar el riesgo de fatiga térmica.

En resumen, la aclimatación al calor mejora la respuesta cardiovascular, adelanta y aumenta la sudoración, favorece la conservación de electrolitos, reduce la temperatura corporal para una misma carga y disminuye la percepción del esfuerzo. Es una herramienta clave para entrenar y competir en calor, pero no sustituye a la planificación de la carga, la hidratación ni el control de las condiciones ambientales.

7. Entrenamiento y competición en ambientes calurosos

Entrenar o competir en calor exige adaptar la planificación. No basta con aplicar las mismas cargas que en un ambiente templado, porque la respuesta interna del deportista cambia. Una misma velocidad, potencia, tarea técnica o ejercicio intermitente puede provocar mayor frecuencia cardiaca, mayor percepción de esfuerzo, más sudoración y mayor aumento de la temperatura corporal cuando la temperatura y la humedad son elevadas.

La primera decisión es valorar el ambiente. La temperatura, la humedad, la radiación solar, la ventilación y el tipo de superficie condicionan la carga térmica. Si el riesgo es alto, la sesión debe modificarse: cambiar el horario, buscar sombra, reducir la intensidad, acortar el volumen, aumentar pausas o trasladar el entrenamiento a un espacio más ventilado. Esta adaptación no debe interpretarse como una reducción de calidad, sino como una forma de mantener el estímulo evitando una carga térmica excesiva.

La intensidad es una variable clave. A mayor intensidad, mayor producción metabólica de calor. Por eso, en días calurosos puede ser necesario reducir el ritmo de carrera, la potencia de pedaleo, la carga de trabajo o la densidad de las tareas. En sesiones interválicas, puede aumentarse el tiempo de recuperación o disminuir el número de repeticiones. En deportes colectivos, conviene controlar la duración de las tareas, el espacio, el número de jugadores y la relación entre trabajo y pausa.

El volumen también debe ajustarse. Las sesiones prolongadas en calor aumentan la pérdida acumulada de agua y electrolitos, favorecen la deriva cardiovascular y elevan el riesgo de fatiga térmica. En muchos casos es preferible realizar bloques más cortos, con pausas programadas, que mantener un trabajo continuo largo. Las pausas permiten hidratarse, buscar sombra, mejorar la ventilación, reducir la acumulación de calor y observar el estado del deportista.

La elección del horario y del espacio es una de las medidas más eficaces. Las primeras horas de la mañana o las últimas de la tarde suelen reducir la exposición al calor y a la radiación solar. Aun así, debe considerarse la humedad, que en algunos lugares puede ser elevada a primera hora. Siempre que sea posible, conviene utilizar zonas sombreadas, superficies menos calientes, instalaciones ventiladas y ropa ligera y transpirable.

El control de la carga interna es fundamental. En calor, la carga externa puede permanecer estable mientras la carga fisiológica aumenta. Por ello, deben observarse indicadores como frecuencia cardiaca, percepción subjetiva del esfuerzo, pérdida de peso corporal, calidad técnica, ritmo de ejecución, conducta y síntomas de malestar. Una frecuencia cardiaca más alta de lo habitual para una misma tarea o una percepción de esfuerzo desproporcionada indican que el calor está aumentando la exigencia real.

La hidratación debe estar planificada. El deportista debe comenzar la sesión bien hidratado, tener acceso a líquidos durante el ejercicio y recuperar las pérdidas después. En sesiones largas, con alta sudoración o con poco tiempo de recuperación posterior, puede ser necesario incluir sodio. La estrategia debe individualizarse, porque no todos los deportistas sudan igual ni pierden la misma cantidad de electrolitos.

Las estrategias de enfriamiento pueden ayudar a reducir la carga térmica. Antes del ejercicio, puede ser útil permanecer en un ambiente fresco, usar prendas refrigerantes o ingerir bebidas frías si la situación lo permite. Durante la actividad, las medidas más prácticas son buscar sombra en las pausas, aplicar agua sobre la piel cuando pueda evaporarse, favorecer la ventilación y utilizar

líquidos frescos. Después del ejercicio, conviene facilitar la recuperación en un lugar fresco, retirar equipamiento innecesario y reponer líquidos y electrolitos.

La aclimatación debe formar parte de la preparación cuando se prevé competir en calor. El proceso debe ser progresivo, con exposiciones frecuentes y controladas, aumentando la especificidad a medida que el deportista se adapta. Durante los primeros días conviene reducir la carga y controlar con más atención la frecuencia cardiaca, la percepción de esfuerzo, la pérdida de peso y los signos de fatiga térmica.

El papel del entrenador, preparador físico o profesional del deporte es anticipar el riesgo y tomar decisiones. Antes de la sesión debe revisar el ambiente, la disponibilidad de agua, sombra y medios de enfriamiento. Durante la práctica debe observar la respuesta individual y modificar la tarea si es necesario. Después, debe favorecer la recuperación y registrar la respuesta para ajustar las siguientes sesiones.

En competición, la presión por mantener el rendimiento puede hacer que el deportista ignore señales de alarma. Por eso, las estrategias deben ensayarse previamente: hidratación, ritmo de esfuerzo, uso de sombra, enfriamiento y comunicación con el equipo técnico. Improvisar en condiciones de calor aumenta el riesgo de errores.

En resumen, entrenar y competir en ambientes calurosos requiere ajustar intensidad, volumen, pausas, horario, ropa, hidratación y enfriamiento. La finalidad no es evitar cualquier exposición al calor, sino controlar la carga térmica para que el organismo pueda sostener el esfuerzo sin comprometer la salud ni el rendimiento.

8. Riesgos asociados al ejercicio en calor

El ejercicio en ambientes calurosos puede realizarse con seguridad si se planifica correctamente, pero también puede provocar alteraciones cuando la producción de calor, la ganancia ambiental y la pérdida de líquido superan la capacidad de compensación del organismo. Estos problemas no aparecen siempre de forma brusca; suelen formar un continuo que va desde molestias leves hasta situaciones graves.

El aumento moderado de la temperatura corporal es normal durante el ejercicio. El riesgo aparece cuando la temperatura central aumenta demasiado, la sudoración no consigue disipar suficiente calor, la deshidratación compromete la circulación o el deportista continúa esforzándose pese a mostrar signos de alarma. En ese momento, el calor deja de ser solo una dificultad para el rendimiento y se convierte en un problema para la salud.

Los calambres asociados al ejercicio son contracciones musculares involuntarias y dolorosas. En ambientes calurosos pueden relacionarse con fatiga neuromuscular, sudoración abundante y pérdidas de agua y electrolitos, especialmente sodio. Aunque no siempre indican un trastorno grave, deben interpretarse como una señal de que la sesión está generando una carga importante y conviene revisar intensidad, hidratación, reposición de sales y recuperación.

El síncope por calor consiste en una pérdida transitoria de conciencia o sensación de desmayo. Suele relacionarse con una reducción momentánea del retorno venoso y del flujo sanguíneo cerebral. Puede aparecer al detener bruscamente el ejercicio en calor, cuando existe vasodilatación cutánea, acumulación de sangre en las extremidades y cierto grado de deshidratación. La bomba muscular deja de ayudar al retorno venoso y puede disminuir temporalmente la presión arterial.

El agotamiento por calor es una situación más importante. Se produce cuando el organismo no consigue mantener de forma adecuada la función cardiovascular y termorreguladora. Puede acompañarse de fatiga intensa, debilidad, mareo, dolor de cabeza, náuseas, vómitos, sudoración abundante, frecuencia cardiaca elevada y dificultad para continuar el esfuerzo. En el contexto deportivo debe llevar a detener la actividad, trasladar al deportista a un lugar fresco o sombreado, favorecer el enfriamiento y reponer líquidos si está consciente y puede beber.

El golpe de calor por esfuerzo es el trastorno más grave. Se caracteriza por una elevación excesiva de la temperatura central junto con alteración del sistema nervioso central. Puede manifestarse con confusión, desorientación, conducta extraña, irritabilidad, pérdida de coordinación, disminución del nivel de conciencia, convulsiones o colapso. Es una urgencia porque una temperatura corporal muy elevada puede dañar órganos y sistemas esenciales.

Es importante destacar que el deportista con golpe de calor por esfuerzo puede seguir sudando. Por tanto, la presencia de sudor no descarta una situación grave. En el ámbito deportivo, la señal más preocupante es la alteración neurológica o el comportamiento anormal en un contexto de ejercicio intenso y calor. Ante esta sospecha, debe detenerse la actividad, activar la asistencia sanitaria y comenzar el enfriamiento de forma inmediata.

Los factores de riesgo pueden ser ambientales, propios de la actividad o individuales. Entre los ambientales destacan temperatura elevada, humedad alta, radiación solar intensa, escasa ventilación y superficies que acumulan calor. Entre los relacionados con la actividad se encuentran alta intensidad, larga duración, pausas insuficientes, sesiones repetidas, presión competitiva y uso de ropa o equipamiento que dificulta la evaporación.

Entre los factores individuales destacan falta de aclimatación, deshidratación previa, baja condición física, antecedentes de problemas por calor, enfermedad reciente, fiebre, sueño insuficiente, consumo de alcohol, algunos medicamentos, alta tasa de sudoración y escasa experiencia en ambientes calurosos. La falta de aclimatación es especialmente relevante en deportistas que viajan desde climas templados a zonas cálidas o húmedas.

La prevención es la herramienta principal. Antes de la sesión deben valorarse las condiciones ambientales, el horario, la superficie, la ropa, la disponibilidad de agua, la sombra y la ventilación. Si el riesgo térmico es elevado, se debe modificar la sesión: reducir intensidad, acortar duración, aumentar pausas, cambiar el horario, buscar espacios más frescos o suspender la actividad si es necesario.

Durante la sesión, el profesional del deporte debe observar signos de alarma: fatiga desproporcionada, mareo, náuseas, dolor de cabeza, escalofríos en ambiente caluroso, pérdida de coordinación, confusión, conducta extraña, piel muy caliente o deterioro brusco del rendimiento. Ante estos signos, la prioridad no es completar la tarea, sino proteger al deportista.

La actuación básica consiste en retirar al deportista de la actividad, llevarlo a un lugar fresco o sombreado, quitar o aflojar ropa y equipamiento innecesario, favorecer la ventilación, enfriar la piel y ofrecer líquidos si está consciente, orientado y puede beber con seguridad. Si hay confusión, pérdida de conciencia o sospecha de golpe de calor, debe activarse asistencia sanitaria de inmediato y comenzar el enfriamiento rápido.

En resumen, los riesgos del ejercicio en calor se explican por la interacción entre producción metabólica de calor, dificultad para disiparlo, pérdida de líquido y sobrecarga cardiovascular. El

profesional del deporte debe saber prevenirlos, reconocerlos y actuar con rapidez, aplicando la fisiología a decisiones prácticas de seguridad.

9. Contraste fisiológico: ejercicio en ambiente frío

Aunque el tema se centra en el ejercicio en calor, el contraste con el frío ayuda a comprender mejor la termorregulación. En ambos ambientes el objetivo es el mismo: mantener la temperatura central dentro de límites seguros. Sin embargo, el desafío fisiológico es opuesto. En calor, el organismo necesita disipar el exceso de calor producido por el metabolismo muscular; en frío, necesita conservarlo y evitar que la temperatura central descienda.

En ambientes fríos, la respuesta principal es la vasoconstricción cutánea. Al reducirse el flujo sanguíneo hacia la piel, disminuye la pérdida de calor hacia el exterior y se conserva más sangre caliente en las zonas profundas. Esta respuesta protege órganos vitales, pero puede enfriar las extremidades. Por ello, en deportes de invierno o actividades al aire libre con baja temperatura pueden disminuir la sensibilidad, la destreza manual y la coordinación fina.

Si el frío es intenso o la producción normal de calor no es suficiente, puede aparecer el temblor o escalofrío. Se trata de contracciones musculares involuntarias cuya finalidad es aumentar la producción interna de calor. En este caso, el músculo esquelético no actúa para producir movimiento útil, sino como generador de calor. Esta respuesta ayuda a defender la temperatura central, pero incrementa el gasto energético y puede interferir con la ejecución motriz.

Durante el ejercicio, la contracción muscular voluntaria ya produce calor, por lo que una persona activa suele tolerar mejor el frío que una persona en reposo. Sin embargo, el riesgo aumenta si la intensidad es baja, si hay pausas prolongadas, viento, humedad, ropa mojada o exposición durante mucho tiempo. El agua y la ropa húmeda favorecen la pérdida de calor, y el viento aumenta la pérdida por convección.

La comparación con el calor permite ver diferencias claras. En calor predominan la vasodilatación cutánea y la sudoración para favorecer la pérdida térmica. En frío predominan la vasoconstricción cutánea y, si es necesario, el aumento de la producción de calor por escalofríos. En calor, la ropa debe facilitar la evaporación del sudor; en frío, debe conservar el calor, pero sin retener excesiva humedad. En ambos casos, una ropa inadecuada puede alterar la termorregulación.

Los principales riesgos del ejercicio en frío son la hipotermia, la congelación y el broncoespasmo inducido por el ejercicio. La hipotermia aparece cuando la pérdida de calor supera de forma mantenida a la producción y desciende la temperatura central. La congelación afecta sobre todo a zonas periféricas, como dedos, orejas, nariz o mejillas. El broncoespasmo puede aparecer en personas sensibles al respirar grandes volúmenes de aire frío y seco durante esfuerzos intensos.

Desde la práctica deportiva, el frío exige estrategias distintas al calor. Es necesario usar ropa por capas, proteger extremidades, evitar permanecer mojado, realizar un calentamiento progresivo y controlar las pausas para no enfriarse. En calor se busca ayudar al organismo a disipar; en frío, a conservar. Esta comparación refuerza la idea de que el ambiente modifica la carga interna del ejercicio y debe tenerse en cuenta en la planificación del entrenamiento.

10. Mensaje final

El ejercicio en ambientes calurosos debe entenderse como una situación de respuesta integrada. El músculo produce calor, la sangre lo transporta hacia la piel, las glándulas sudoríparas permiten perderlo mediante evaporación y el sistema cardiovascular sostiene la distribución del flujo

sanguíneo. Si estos mecanismos compensan la producción y la ganancia de calor, el ejercicio puede mantenerse con seguridad. Si son insuficientes, aumenta la temperatura central, aparece antes la fatiga y se incrementa el riesgo para la salud.

La aplicación práctica del tema consiste en transformar la fisiología en decisiones. Antes de una sesión en calor, el profesional debe valorar temperatura, humedad, radiación solar, viento, superficie, ropa y disponibilidad de sombra, agua y ventilación. También debe considerar la tarea prevista: no tiene el mismo riesgo una sesión técnica suave que un entrenamiento interválico, una carrera prolongada o una competición con pausas escasas. La intensidad aumenta la producción de calor; la duración incrementa la pérdida de agua y electrolitos; y la densidad de trabajo reduce las oportunidades de recuperación térmica.

También debe valorarse al deportista. La aclimatación, el estado de hidratación, el nivel de entrenamiento, la edad, la composición corporal, la experiencia previa en calor y los antecedentes de problemas térmicos modifican la tolerancia individual. Una misma sesión puede ser adecuada para un deportista aclimatado y excesiva para otro que acaba de llegar a un clima caluroso. Por ello, la planificación en calor debe combinar información ambiental, características de la tarea y respuesta individual.

Adaptar una sesión no significa necesariamente suspenderla. Puede bastar con cambiar el horario, buscar sombra, reducir la intensidad, acortar el volumen, aumentar las pausas, mejorar la ventilación o introducir momentos específicos para hidratarse. En días de alto estrés térmico, una menor carga externa puede representar una carga interna suficiente, porque el organismo trabaja más para disipar calor y mantener la homeostasis.

Durante la sesión deben controlarse indicadores simples pero útiles: frecuencia cardiaca, percepción subjetiva del esfuerzo, pérdida de peso corporal, calidad técnica, ritmo de ejecución, conducta y presencia de síntomas. Una frecuencia cardiaca más alta de lo habitual, una percepción de esfuerzo desproporcionada, la pérdida de coordinación, el mareo, las náuseas, los escalofríos en calor o la confusión son señales que obligan a modificar o detener la actividad.

La educación del deportista es una parte esencial de la prevención. Debe comprender que sudar mucho no siempre significa enfriar bien, que la pérdida rápida de peso en calor refleja principalmente pérdida de agua, que la hidratación debe individualizarse y que beber sin límite tampoco es adecuado en esfuerzos prolongados. También debe conocer la importancia de la ropa transpirable, la aclimatación progresiva y la comunicación temprana de síntomas.

Como ideas clave, el calor aumenta la carga cardiovascular del ejercicio; la evaporación del sudor es el principal mecanismo de pérdida de calor durante el esfuerzo intenso; la humedad dificulta esa evaporación; la deshidratación reduce el volumen plasmático y perjudica la termorregulación; la aclimatación mejora la tolerancia al calor, pero no elimina el riesgo; y la misma carga externa puede tener una carga interna muy diferente según el ambiente.

En conclusión, entrenar y competir en ambientes calurosos exige interpretar el ejercicio como una interacción entre organismo, tarea y ambiente. El profesional de las Ciencias del Deporte debe ajustar la carga, planificar la hidratación, favorecer la aclimatación, reconocer signos de alarma y tomar decisiones preventivas. El objetivo no es evitar siempre el calor, sino aprender a gestionarlo para proteger la salud y mantener el rendimiento.

Bibliografía

Fox SI. Fisiología Humana. 15ª ed. McGraw-Hill Interamericana; 2021.

Jenkins, E. J., Edgett, B. A., Hughes, M. G., Tremblay, J. C., & Stembridge, M. (2025). Mechanisms of haemoglobin mass expansion following heat stress. *The Journal of Physiology*. Advance online publication. https://doi.org/10.1113/JP288997

Katch, V. L., MacArdle, W. D., & Katch, F. I. (2014). *Fisiología del ejercicio : "fundamentos"* (4ª ed). Editorial Médica Panamericana.

López Chicharro, J., & Fernández Vaquero, A. (2023). *Fisiología del ejercicio* (4a ed). Editorial Médica Panamericana.

Vicente Campos, D. (2020). *Fisiología del Entrenamiento Aeróbico Una visión integrada*. Editorial Médica Panamericana.

Wilmore. (2014) Fisiología del Deporte y el Ejercicio. (5ª ed). Editorial Médica Panamericana.

BLOQUE V.

TABLAS CONCEPTUALES POR TEMAS

TEMA 1. REPASO DE FISIOLOGÍA CELULAR

Concepto	Definición básica	Función principal	Aplicación en fisiología y ejercicio
Fisiología humana	Ciencia que estudia el funcionamiento normal del organismo	Explicar los mecanismos que mantienen la vida	Base para comprender la respuesta al ejercicio
Homeostasis	Mantenimiento estable del medio interno	Conservar condiciones compatibles con la vida	Clave en regulación de temperatura, pH, agua y glucosa
Retroalimentación negativa	Mecanismo que corrige desviaciones de una variable	Restablecer el equilibrio fisiológico	Base de la mayoría de controles del organismo
Sistema nervioso	Sistema de control rápido mediante impulsos eléctricos	Coordinar respuestas inmediatas	Fundamental en movimiento y control del ejercicio
Sistema endocrino	Sistema de regulación mediante hormonas	Coordinar respuestas más lentas y duraderas	Importante en metabolismo y adaptación al entrenamiento
Tejido	Conjunto de células organizadas con una función común	Especializar funciones del organismo	Base estructural de órganos y sistemas
Tejido muscular	Tejido especializado en la contracción	Generar fuerza y movimiento	Base de la locomoción y el rendimiento
Tejido nervioso	Tejido especializado en recibir e integrar información	Coordinar funciones del organismo	Clave en control motor y sensibilidad
Célula	Unidad estructural y funcional básica del organismo	Realizar funciones vitales	Base de toda la fisiología
Membrana plasmática	Estructura que separa medio intra y extracelular	Regular intercambio de sustancias y señales	Esencial para transporte y excitabilidad
Gradiente de concentración	Diferencia de concentración entre dos compartimentos	Impulsar movimiento pasivo de sustancias	Base de difusión y transporte
Gradiente electroquímico	Resultado del gradiente químico y eléctrico	Determinar movimiento de iones	Clave en excitabilidad celular
Difusión simple	Paso pasivo de moléculas a través de la membrana	Permitir intercambio sin gasto energético	Relevante para transporte de gases

Concepto	Definición básica	Función principal	Aplicación en fisiología y ejercicio
Difusión facilitada	Transporte pasivo mediado por proteínas	Mover sustancias que no atraviesan la bicapa	Importante en entrada de glucosa
Transporte activo	Movimiento contra gradiente con gasto energético	Mantener composición interna celular	Imprescindible para conservar gradientes iónicos
Osmolaridad	Concentración de partículas osmóticamente activas	Determinar movimiento de agua	Fundamental para equilibrio hídrico
Tonicidad	Efecto de una solución sobre el volumen celular	Explicar entrada o salida de agua	Relevante en hidratación y ejercicio
Compartimentos intra y extracelular	Espacios líquidos con distinta composición iónica	Permitir funciones celulares específicas	Base del potencial de membrana
Gradientes iónicos	Diferencias de concentración de iones entre interior y exterior	Permitir actividad eléctrica	Fundamentales en contracción y transmisión nerviosa
Excitabilidad celular	Capacidad de responder a estímulos con cambios eléctricos	Detectar y transmitir señales	Base de función nerviosa y muscular
Potencial de membrana	Diferencia de potencial eléctrico entre interior y exterior celular	Permitir actividad eléctrica celular	Punto de partida de la excitabilidad
Potencial de membrana en reposo	Estado eléctrico basal de la célula	Mantenerla preparada para responder	Fundamental en neuronas y músculo
Potenciales graduados	Cambios locales y proporcionales del potencial de membrana	Integrar estímulos subumbrales	Preceden al potencial de acción
Umbral de excitación	Nivel mínimo para desencadenar una respuesta activa	Seleccionar estímulos eficaces	Determina si hay potencial de acción
Potencial de acción	Cambio rápido y transitorio del potencial de membrana	Transmitir información sin pérdida	Base de la conducción nerviosa y activación muscular
Período refractario absoluto	Fase en la que no puede generarse otro potencial de acción	Asegurar dirección de propagación	Ordena la transmisión de señales
Período refractario relativo	Fase en la que se necesita un estímulo mayor	Modular excitabilidad tras la activación	Influye en la frecuencia de descarga

Concepto	Definición básica	Función principal	Aplicación en fisiología y ejercicio
Conducción saltatoria	Propagación del potencial de acción entre nodos en fibras mielínicas	Aumentar velocidad de conducción	Esencial en sistema nervioso
Mielina	Vaina aislante que rodea axones	Mejorar velocidad y eficiencia de conducción	Clave en función nerviosa normal

TEMA 2. CONTROL MOTOR VOLUNTARIO

Concepto	Definición básica	Función principal	Aplicación en actividad física y deporte
Sistema motor somático	Conjunto de estructuras nerviosas que regulan el movimiento voluntario y la postura	Ejecutar y coordinar el movimiento sobre músculo esquelético	Base neural del gesto técnico y del control postural
Motoneurona alfa	Neurona que inerva fibras musculares extrafusales	Generar contracción muscular	Producción final de fuerza
Motoneurona gamma	Neurona que inerva fibras intrafusales	Ajustar sensibilidad del huso muscular	Mantener propiocepción durante el movimiento
Unidad motora	Motoneurona alfa + fibras musculares que inerva	Unidad funcional del control neuromuscular	Regula precisión y fuerza
Reclutamiento de unidades motoras	Activación progresiva de unidades motoras según demanda	Modulación de la fuerza	Fundamental en esfuerzos de distinta intensidad
Frecuencia de descarga	Número de impulsos por unidad de tiempo de la motoneurona	Incrementar tensión muscular	Clave en fuerza máxima y potencia
Huso muscular	Receptor sensorial intramuscular sensible al estiramiento	Detectar longitud y velocidad de estiramiento	Control postural, reflejo miotático, técnica
Órgano tendinoso de Golgi	Receptor sensorial en la unión músculo-tendinosa	Detectar tensión muscular	Regulación de fuerza y protección tisular
Reflejo miotático	Contracción refleja ante un estiramiento rápido	Mantener tono y estabilidad	Importante en carrera, saltos y cambios de apoyo
Reflejo miotático inverso	Inhibición refleja ante tensión excesiva	Regular fuerza y proteger estructuras	Relevante en tareas de alta carga
Interneuronas espinales	Neuronas integradoras de circuitos medulares	Coordinar excitación e inhibición	Facilitan coordinación agonista-antagonista
Médula espinal	Centro integrador motor y sensorial	Integrar reflejos y ajustes posturales	Respuesta rápida en situaciones dinámicas
Tronco encefálico	Centro de regulación postural y tono	Ajustes automáticos posturales	Equilibrio dinámico
Cerebelo	Estructura coordinadora del movimiento	Corregir errores y afinar la ejecución	Precisión técnica y adaptación al entorno

Concepto	Definición básica	Función principal	Aplicación en actividad física y deporte
Ganglios basales	Estructuras implicadas en selección y automatización motora	Facilitar programas motores aprendidos	Automatización del gesto deportivo
Corteza cerebral	Nivel superior del control motor	Planificación y control consciente	Aprendizaje técnico y toma de decisiones motoras

TEMA 3. SISTEMA NERVIOSO AUTÓNOMO

Concepto	Definición básica	Función principal	Aplicación en actividad física y deporte
Sistema nervioso autónomo	División del sistema nervioso que regula de forma involuntaria órganos viscerales, vasos y glándulas	Mantener homeostasis y adaptar el organismo a distintas demandas	Clave en respuesta al ejercicio, recuperación y adaptación al entrenamiento
Neurona preganglionar	Primera neurona de la vía eferente autonómica, con soma en SNC	Transmitir señal hacia ganglios autónomos	Inicio de la respuesta autonómica
Neurona posganglionar	Segunda neurona de la vía autonómica, desde ganglio hasta órgano efector	Inervar directamente vísceras, vasos y glándulas	Ejecución final de la respuesta visceral
Ganglio autónomo	Estructura donde sinaptan neuronas pre y posganglionares	Integrar y modular la señal autonómica	Permite amplificación y distribución de la respuesta
División simpática	Rama del SNA asociada a activación fisiológica	Preparar al organismo para la acción	Aumenta FC, redistribuye flujo, moviliza energía
División parasimpática	Rama del SNA asociada a reposo y recuperación	Favorecer conservación de energía y restauración homeostática	Importante en recuperación postejercicio
Tronco simpático	Cadena de ganglios paravertebrales del sistema simpático	Coordinar respuestas amplias y generalizadas	Participa en activación cardiovascular y vascular durante esfuerzo
Médula suprarrenal	Estructura neuroendocrina asociada al simpático	Liberar adrenalina y noradrenalina a sangre	Amplifica respuesta al ejercicio
Acetilcolina	Neurotransmisor principal de todas las neuronas preganglionares y de posganglionares parasimpáticas	Transmisión colinérgica autonómica	Regula funciones cardíacas, digestivas y glandulares
Noradrenalina	Neurotransmisor principal de la mayoría de neuronas posganglionares simpáticas	Transmisión adrenérgica	Modula vasos, corazón y metabolismo
Receptores nicotínicos	Receptores colinérgicos ganglionares	Transmisión rápida entre neuronas autónomas	Facilitan señal en ganglios

Concepto	Definición básica	Función principal	Aplicación en actividad física y deporte
Receptores muscarínicos	Receptores colinérgicos de órganos efectores	Respuestas parasimpáticas más lentas y sostenidas	Frecuencia cardíaca, secreción glandular, motilidad digestiva
Receptores alfa	Receptores adrenérgicos	Vasoconstricción y aumento de tono del músculo liso	Redistribución del flujo sanguíneo
Receptores beta	Receptores adrenérgicos	Regulación cardíaca, broncodilatación y metabolismo	Aumento del gasto cardíaco y soporte al esfuerzo
Tono autonómico	Actividad basal continua del SNA	Ajuste fino y constante de la función visceral	Explica regulación en reposo y cambios durante ejercicio
Activación simpática	Predominio funcional del simpático	Preparar al organismo para demanda aguda	Esencial en ejercicio y estrés fisiológico
Reactivación parasimpática	Recuperación progresiva de la influencia vagal tras el esfuerzo	Restaurar equilibrio fisiológico	Indicador de recuperación y adaptación
Feedforward	Control anticipatorio originado en centros superiores	Preparar al organismo antes del cambio fisiológico real	Eleva FC y respuesta autonómica al inicio del ejercicio
Feedback	Control reflejo basado en aferencias periféricas	Ajustar respuesta según estado real del organismo	Modula actividad simpática según intensidad y metabolitos
Comando central	Activación desde centros superiores al iniciar el ejercicio	Coordinar control motor y autonómico	Base del componente anticipatorio de la respuesta
Mecanorreceptores y metabolorreceptores musculares	Receptores periféricos sensibles a cambios mecánicos y metabólicos	Informar sobre el estado del músculo activo	Ajustan respuesta simpática durante esfuerzo prolongado o intenso

TEMA 4. MUSCULO ESQUELÉTICO: LA CONTRACCIÓN MUSCULAR

Concepto	Definición básica	Función principal	Aplicación en actividad física y deporte
Músculo esquelético	Tejido efector del movimiento voluntario	Generar fuerza, movimiento, postura y estabilidad	Base mecánica del rendimiento físico
Fibra muscular	Célula muscular larga y multinucleada	Ejecutar la contracción	Unidad celular de producción de fuerza
Miofibrilla	Estructura intracelular formada por sarcómeros en serie	Transmitir y organizar la contracción	Relacionada con la capacidad contráctil
Sarcómero	Unidad estructural y funcional básica del músculo	Lugar donde se genera la fuerza	Explica el acortamiento muscular
Actina	Proteína principal del filamento fino	Interactuar con miosina durante la contracción	Fundamental en el deslizamiento de filamentos
Miosina	Proteína principal del filamento grueso	Formar puentes cruzados y generar fuerza	Responsable del trabajo mecánico
Troponina-tropomiosina	Complejo regulador del filamento fino	Controlar el acceso de la miosina a la actina	Permite activar o inhibir la contracción
Sarcolema	Membrana de la fibra muscular	Propagar el potencial de acción	Inicio eléctrico de la contracción
Túbulos T	Invaginaciones del sarcolema	Llevar la señal eléctrica al interior de la fibra	Sincronizan la contracción
Retículo sarcoplásmico	Sistema membranoso intracelular	Almacenar y liberar calcio	Clave en contracción y relajación
Tríada	Un túbulo T y dos cisternas terminales	Acoplar excitación eléctrica y liberación de calcio	Permite respuesta rápida y uniforme
Unión neuromuscular	Sinapsis entre motoneurona alfa y fibra muscular	Transmitir señal nerviosa al músculo	Inicio neural de la contracción
Unidad motora	Motoneurona alfa y fibras que inerva	Regular la fuerza muscular	Ajuste fino o potente según músculo
Acoplamiento excitación–contracción	Procesos que transforman señal eléctrica en contracción	Activar el sistema contráctil	Base fisiológica del movimiento
Calcio intracelular	Ion regulador de la contracción	Activar troponina y permitir puentes cruzados	Determina intensidad y duración de la contracción

Concepto	Definición básica	Función principal	Aplicación en actividad física y deporte
Puente cruzado	Unión entre cabeza de miosina y actina	Generar tensión y movimiento	Base molecular de la fuerza
ATP	Fuente inmediata de energía del ciclo contráctil	Permitir golpe de fuerza, separación y recarga	Imprescindible para contracción y relajación
Sumación temporal	Superposición de contracciones por aumento de frecuencia	Incrementar tensión muscular	Explica aumento de fuerza con mayor activación
Tetania	Contracción sostenida de máxima tensión	Mantener elevada producción de fuerza	Relevante en esfuerzos intensos
Relación longitud–tensión	Relación entre longitud inicial del músculo y fuerza producida	Optimizar formación de puentes cruzados	Explica diferencias de fuerza según ángulo articular
Relación fuerza–velocidad	Relación entre velocidad de acortamiento y fuerza	Condicionar producción mecánica	Muy importante en fuerza, potencia y técnica deportiva
Contracción isométrica	Desarrollo de tensión sin cambio de longitud	Estabilizar o sostener cargas	Planchas, agarres, estabilización
Contracción concéntrica	Acortamiento muscular con producción de movimiento	Superar una resistencia	Saltar, levantar, acelerar
Contracción excéntrica	Alargamiento muscular mientras desarrolla tensión	Frenar o controlar una resistencia	Aterrizajes, desaceleraciones, descensos
Fibras lentas	Fibras de contracción lenta y resistentes a la fatiga	Mantener actividad prolongada	Predominan en resistencia y postura
Fibras rápidas	Fibras de contracción rápida y mayor fuerza	Producir acciones potentes y veloces	Clave en sprint, salto y potencia
Hipertrofia muscular	Aumento del tamaño de las fibras	Incrementar capacidad de generar fuerza	Adaptación típica al entrenamiento de fuerza
Atrofia muscular	Reducción del tamaño y capacidad funcional del músculo	Disminución de la función contráctil	Consecuencia de inactividad o desentrenamiento

TEMA 5. ENTRENAMIENTO DE FUERZA

Concepto	Definición básica	Función principal	Aplicación en actividad física y deporte
Fuerza muscular	Capacidad del sistema neuromuscular para generar tensión	Base del movimiento y del rendimiento	Fundamental en fuerza, potencia y control motor
Fuerza máxima	Mayor tensión voluntaria posible	Elevar el techo de producción de fuerza	Base para mejorar el rendimiento global
Fuerza explosiva / potencia	Capacidad de generar fuerza rápidamente	Producir acciones veloces y potentes	Clave en saltos, sprints y lanzamientos
Fuerza-resistencia	Capacidad de mantener o repetir fuerza durante tiempo prolongado	Sostener rendimiento ante fatiga	Importante en esfuerzos repetidos
Unidad motora	Motoneurona alfa y fibras que inerva	Unidad funcional de producción de fuerza	Determina activación muscular
Reclutamiento de unidades motoras	Activación progresiva de unidades motoras según demanda	Ajustar la fuerza generada	Esencial en cargas altas
Frecuencia de descarga	Número de impulsos enviados a una unidad motora	Aumentar tensión muscular	Importante en fuerza máxima y potencia
Coordinación intermuscular	Colaboración eficaz entre agonistas, sinergistas y antagonistas	Mejorar eficiencia del movimiento	Clave en rendimiento técnico
Contracción isométrica	Tensión sin cambio de longitud muscular	Estabilizar o sostener fuerzas	Útil en estabilidad articular
Contracción concéntrica	El músculo se acorta al vencer la resistencia	Generar movimiento	Presente en impulsos y levantamientos
Contracción excéntrica	El músculo se alarga mientras produce tensión	Frenar o controlar la carga	Importante en desaceleración y prevención de lesiones
Relación fuerza-velocidad	La fuerza disminuye al aumentar la velocidad de acortamiento	Explicar producción mecánica	Diferencia fuerza máxima y potencia
Relación longitud-tensión	La fuerza depende de la longitud inicial del músculo	Optimizar formación de puentes cruzados	Explica diferencias según ángulo articular
Potencia	Producto entre fuerza y velocidad	Expresar rendimiento mecánico rápido	Determinante en muchos gestos deportivos

Concepto	Definición básica	Función principal	Aplicación en actividad física y deporte
Fatiga neural transitoria	Disminución temporal de la activación voluntaria tras esfuerzo intenso	Limitar la producción inmediata de fuerza	Condiciona pausas y recuperación
Adaptaciones neurales	Mejoras funcionales del sistema nervioso tras entrenamiento	Aumentar acceso a la capacidad contráctil	Dominan al inicio del entrenamiento
Hipertrofia miofibrilar	Aumento de proteínas contráctiles y miofibrillas	Incrementar capacidad de generar tensión	Relacionada con mejoras de fuerza
Rigidez tendinosa	Mayor capacidad del tendón para transmitir fuerza	Mejorar transferencia de tensión	Importante para potencia y prevención de lesiones
Intensidad	Grado de esfuerzo o carga respecto al máximo	Modular reclutamiento y tensión mecánica	Variable central del entrenamiento
Volumen	Cantidad total de trabajo realizado	Acumular estímulo adaptativo	Muy ligado a hipertrofia
Frecuencia	Número de estímulos por grupo muscular en un periodo	Distribuir el trabajo y facilitar adaptación	Ayuda a optimizar recuperación
RIR	Repeticiones que podrían hacerse antes del fallo	Estimar intensidad interna del esfuerzo	Herramienta de autorregulación
Sobrecarga progresiva	Incremento gradual del estímulo	Favorecer adaptación continua	Principio básico de mejora
Especificidad	Las adaptaciones dependen del tipo de estímulo	Dirigir el entrenamiento al objetivo	Fundamental para transferencia deportiva
Transferencia al rendimiento	Aplicación útil de la fuerza al gesto deportivo	Mejorar rendimiento funcional	Da sentido deportivo al entrenamiento de fuerza

TEMA 6. METABOLISMO ENERGÉTICO DURANTE EL EJERCICIO

Concepto	Definición básica	Función principal	Aplicación en actividad física y deporte
Bioenergética	Estudio de las transformaciones de energía en los sistemas biológicos	Explicar cómo se obtiene y utiliza energía	Base para entender rendimiento y fatiga
ATP	Moneda energética inmediata de la célula	Aportar energía directa para la contracción	Imprescindible en cualquier esfuerzo
Sistema de los fosfágenos	Sistema anaerobio basado en ATP y fosfocreatina	Resintetizar ATP de forma muy rápida	Esfuerzos explosivos y muy breves
Fosfocreatina (PCr)	Reserva intramuscular de fosfato de alta energía	Regenerar ATP rápidamente	Sprint, salto, levantamiento
Glucólisis anaerobia	Degradación rápida de glucosa/glucógeno sin necesidad de oxígeno	Producir ATP con rapidez	Esfuerzos intensos de corta-media duración
Metabolismo oxidativo	Producción aeróbica de ATP en mitocondrias	Sostener ejercicio prolongado	Resistencia y recuperación
Glucógeno muscular	Reserva de hidratos de carbono en el músculo	Aportar glucosa al músculo activo	Determinante del rendimiento en intensidad media-alta
Glucógeno hepático	Reserva de glucosa del hígado	Mantener glucemia	Importante en ejercicio prolongado
Glucogenólisis	Degradación del glucógeno	Liberar glucosa-6-fosfato o glucosa	Aumenta al inicio y durante ejercicio intenso
Piruvato	Producto final de la glucólisis	Punto de conexión entre vías aeróbicas y anaeróbicas	Su destino depende de la intensidad del esfuerzo
Lactato	Producto del metabolismo glucolítico cuando la producción de piruvato supera su oxidación	Permitir continuidad de la glucólisis y servir como sustrato	Indicador de intensidad y adaptaciones
Lipólisis	Degradación de triglicéridos en ácidos grasos y glicerol	Movilizar grasas como combustible	Importante en ejercicio prolongado
Beta-oxidación	Oxidación mitocondrial de ácidos grasos	Producir acetil-CoA y ATP	Predomina en esfuerzos aeróbicos sostenidos
Aminoácidos ramificados	Aminoácidos que pueden metabolizarse en el músculo	Contribución energética limitada y señalización	Más relevantes en ejercicio prolongado o depleción de glucógeno

Concepto	Definición básica	Función principal	Aplicación en actividad física y deporte
Regulación enzimática	Ajuste rápido de la actividad de enzimas metabólicas	Adaptar producción de ATP a la demanda	Permite respuesta inmediata al ejercicio
Calcio intracelular	Ion regulador ligado a contracción y metabolismo	Activar enzimas metabólicas y sistema contráctil	Conecta contracción y producción de energía
Catecolaminas	Hormonas liberadas por activación simpática y médula suprarrenal	Movilizar sustratos y apoyar respuesta al esfuerzo	Aumentan glucogenólisis y lipólisis
Crossover metabólico	Punto a partir del cual predominan hidratos de carbono sobre grasas al aumentar la intensidad	Explicar cambio de sustrato con intensidad	Útil para interpretar adaptación al entrenamiento
VO_2	Consumo de oxígeno	Reflejar metabolismo aeróbico	Fundamental en resistencia
Déficit de oxígeno	Diferencia inicial entre O_2 requerido y consumido	Explicar contribución anaerobia al inicio	Relevante en transiciones al esfuerzo
Deuda de oxígeno / VO_2 postejercicio	Consumo elevado de O_2 tras el esfuerzo	Restaurar equilibrio fisiológico	Relacionado con recuperación
Umbral de lactato	Intensidad a partir de la cual el lactato aumenta sistemáticamente	Marcar cambio metabólico relevante	Indicador del rendimiento aeróbico
Fatiga metabólica	Disminución del rendimiento por alteraciones metabólicas	Limitar el esfuerzo	Depende de sustratos, metabolitos y control fisiológico
Adaptaciones metabólicas al entrenamiento	Cambios funcionales en producción y uso de energía	Mejorar eficiencia y retrasar fatiga	Base del progreso en rendimiento

TEMA 7. CONTROL HORMONAL DURANTE EL EJERCICIO

Concepto	Definición básica	Función principal	Aplicación en fisiología del ejercicio
Sistema endocrino	Sistema regulador que utiliza hormonas	Coordinar metabolismo, crecimiento y adaptación	Fundamental en la respuesta al ejercicio
Hormona	Sustancia química que actúa sobre células con receptores específicos	Transmitir señales reguladoras	Coordina metabolismo y homeostasis durante el esfuerzo
Integración neuroendocrina	Coordinación entre sistema nervioso y endocrino	Ajustar respuestas fisiológicas complejas	Esencial durante el ejercicio
Hormonas lipofílicas	Hormonas que atraviesan la membrana y suelen actuar en el interior celular	Producir efectos lentos y sostenidos	Importantes en adaptación al entrenamiento
Hormonas hidrofílicas	Hormonas que actúan sobre receptores de membrana	Producir respuestas rápidas	Claves en la respuesta aguda al ejercicio
Receptores nucleares	Receptores intracelulares de hormonas lipofílicas	Modificar expresión génica	Explican efectos adaptativos de hormonas esteroideas
Receptores de membrana	Receptores de superficie para hormonas hidrofílicas	Activar cascadas intracelulares rápidas	Esenciales en muchas respuestas agudas
Segundos mensajeros	Moléculas intracelulares que transmiten la señal hormonal	Amplificar la respuesta	Importantes en regulación metabólica durante el ejercicio
Sinergismo hormonal	Interacción en la que varias hormonas potencian juntas un efecto	Reforzar respuestas fisiológicas	Relevante en el control de la glucemia durante el ejercicio
Antagonismo hormonal	Interacción en la que dos hormonas producen efectos opuestos	Mantener equilibrio interno	Ejemplo clásico: insulina y glucagón
Respuesta endocrina aguda al ejercicio	Cambios hormonales que aparecen durante el esfuerzo	Mantener homeostasis y aportar energía	Depende de intensidad y duración del ejercicio

Concepto	Definición básica	Función principal	Aplicación en fisiología del ejercicio
Catecolaminas	Adrenalina y noradrenalina liberadas por activación simpática	Aumentar disponibilidad energética y respuesta cardiovascular	De las primeras hormonas en elevarse durante el ejercicio
Glucagón	Hormona que aumenta la liberación hepática de glucosa	Mantener glucemia	Importante en ejercicio prolongado
Insulina	Hormona que favorece captación y almacenamiento de glucosa	Regular metabolismo de hidratos de carbono	Disminuye durante el ejercicio
Cortisol	Hormona esteroidea relacionada con el estrés	Facilitar disponibilidad de sustratos	Aumenta en esfuerzos prolongados o intensos
Hormona del crecimiento (GH)	Hormona con efectos metabólicos y anabólicos	Favorecer lipólisis y adaptación tisular	Aumenta en ejercicios moderados-altos
ADH o vasopresina	Hormona que favorece reabsorción renal de agua	Mantener volumen plasmático y osmolaridad	Relevante en ejercicio prolongado y con calor
Aldosterona	Hormona que favorece reabsorción de sodio	Regular equilibrio hidroelectrolítico	Importante en resistencia y calor
Feedforward	Activación anticipatoria de respuestas fisiológicas	Preparar al organismo para el esfuerzo	Explica activación simpática precoz
Feedback periférico	Regulación basada en señales aferentes desde tejidos activos	Ajustar respuesta hormonal a la demanda real	Modula la respuesta endocrina durante el ejercicio
Equilibrio hidroelectrolítico	Balance entre agua y electrolitos corporales	Mantener función celular y volumen plasmático	Muy importante en ejercicio prolongado
Adaptaciones endocrinas al entrenamiento	Cambios crónicos en secreción hormonal y sensibilidad tisular	Mejorar eficiencia reguladora	Diferencian al sujeto entrenado del no entrenado
Sensibilidad a la insulina	Capacidad de los tejidos para responder a la insulina	Favorecer control glucémico eficiente	Mejora con entrenamiento
Hormonas anabólicas	Hormonas que favorecen síntesis proteica y adaptación	Promover recuperación y remodelación tisular	Claves en fuerza y adaptación muscular
IGF-1	Factor de crecimiento mediador de muchos efectos de la GH	Estimular síntesis proteica	Importante en adaptación muscular

Concepto	Definición básica	Función principal	Aplicación en fisiología del ejercicio
Testosterona	Hormona esteroidea con efecto anabólico	Favorecer masa muscular y recuperación	Relevante en entrenamiento de fuerza
Balance anabólico-catabólico	Relación entre señales que construyen o degradan tejido	Determinar capacidad de recuperación y adaptación	Influye en rendimiento y planificación

TEMA 8. LA FATIGA

Concepto	Definición básica	Función principal	Aplicación en fisiología del ejercicio
Fatiga	Disminución transitoria de la capacidad para generar fuerza o potencia	Limitar el rendimiento y proteger al organismo	Concepto central para entender el esfuerzo
Fatiga aguda	Fatiga que aparece dentro de una sesión	Reducir progresivamente el rendimiento	Muy relevante en entrenamiento y competición
Fatiga periférica	Fatiga con origen principal en el músculo	Limitar la producción de fuerza	Predomina en ejercicios intensos
Fatiga central	Fatiga relacionada con disminución del impulso neural	Reducir activación voluntaria	Importante en esfuerzos prolongados
Fatiga metabólica	Fatiga asociada a sustratos y metabolitos	Alterar función contráctil y resíntesis energética	Clave en alta intensidad y larga duración
Modelo integrador o multifactorial	Visión actual de la fatiga como resultado de varios mecanismos interactivos	Explicar la fatiga de forma global	Enfoque más útil en fisiología del ejercicio
Fosfocreatina (PCr)	Reserva inmediata de energía del músculo	Resintetizar ATP rápidamente	Su depleción limita esfuerzos máximos breves
Glucógeno muscular	Reserva de hidratos de carbono del músculo	Sostener producción energética	Su agotamiento reduce el rendimiento
ATP	Moneda energética inmediata del músculo	Permitir contracción y función celular	Base energética de la actividad muscular
Lactato	Producto del metabolismo glucolítico reutilizable como sustrato	Permitir continuidad de la glucólisis	No debe interpretarse como única causa de fatiga
Acidosis intramuscular	Disminución del pH dentro del músculo	Alterar función contráctil	Contribuye a la fatiga en ejercicios intensos
Alteraciones iónicas	Cambios en gradientes de K+, Na+ y Ca2+	Modificar excitabilidad y contracción	Importantes en la fatiga de alta intensidad

Concepto	Definición básica	Función principal	Aplicación en fisiología del ejercicio
Calcio	Ion esencial en el acoplamiento excitación-contracción	Activar interacción actina-miosina	Su alteración reduce fuerza
Acoplamiento excitación-contracción	Proceso que transforma la señal eléctrica en fuerza	Conectar activación y contracción	Su alteración es clave en fatiga periférica
Unión neuromuscular	Sinapsis entre motoneurona y fibra muscular	Transmitir señal nerviosa al músculo	Puede contribuir a la fatiga en condiciones extremas
Drive motor	Impulso neural voluntario que llega al músculo	Mantener reclutamiento y frecuencia de descarga	Su descenso caracteriza la fatiga central
Neurotransmisores centrales	Sustancias que modulan motivación y activación cerebral	Regular percepción del esfuerzo y activación	Participan en la fatiga central
Hipertermia	Elevación excesiva de la temperatura corporal	Afectar función muscular, cardiovascular y central	Factor limitante en calor y resistencia
Deshidratación	Pérdida de agua corporal que altera el equilibrio interno	Comprometer función cardiovascular y térmica	Acelera la fatiga en ejercicio prolongado
Daño muscular	Alteración estructural inducida por el ejercicio	Modificar función y activar inflamación	Especialmente relevante tras ejercicio excéntrico
DOMS	Dolor muscular de aparición tardía	Reflejar daño e inflamación postejercicio	Reduce activación y rendimiento posterior
Fatiga en alta intensidad y corta duración	Fatiga propia de esfuerzos máximos breves	Reflejar predominio de limitaciones periféricas rápidas	Típica en sprints y acciones explosivas
Fatiga en resistencia	Fatiga propia de esfuerzos prolongados	Integrar depleción energética y regulación central	Típica de pruebas largas
Fatiga en ejercicio intermitente	Fatiga en deportes con esfuerzos repetidos y recuperación incompleta	Combinar mecanismos de alta intensidad y recuperación parcial	Muy relevante en deportes colectivos
Recuperación	Proceso de restauración funcional tras el ejercicio	Reponer energía, reparar tejidos y normalizar función neuromuscular	Esencial para adaptación y prevención de fatiga acumulada

Concepto	Definición básica	Función principal	Aplicación en fisiología del ejercicio
Sobreentrenamiento	Disminución persistente del rendimiento por exceso de carga y mala recuperación	Reflejar desadaptación fisiológica crónica	Su prevención exige controlar fatiga y recuperación

TEMA 9. SISTEMA CARDIOVASCULAR

Concepto	Definición básica	Función principal	Aplicación en fisiología del ejercicio
Sistema cardiovascular	Sistema formado por corazón, vasos y sangre	Transportar oxígeno y nutrientes	Base del rendimiento y de la homeostasis durante el ejercicio
Corazón	Órgano muscular que impulsa la sangre	Mantener circulación pulmonar y sistémica	Su capacidad funcional condiciona el rendimiento aeróbico
Arterias	Vasos que llevan sangre desde el corazón	Distribuir sangre a alta presión	Importantes en perfusión de los tejidos
Capilares	Vasos donde se produce el intercambio con los tejidos	Permitir paso de gases, nutrientes y desechos	Fundamentales en el músculo activo
Venas	Vasos que devuelven la sangre al corazón	Facilitar retorno venoso	Claves para el llenado ventricular durante el ejercicio
Sangre	Tejido líquido que transporta sustancias	Mantener transporte y homeostasis	Fundamental en oxígeno, nutrientes y regulación térmica
Eritrocitos	Células sanguíneas con hemoglobina	Transportar oxígeno y dióxido de carbono	Condicionan la capacidad aeróbica
Hemoglobina	Proteína que fija oxígeno en los eritrocitos	Facilitar transporte de oxígeno	Su cantidad influye en el aporte al músculo
Sistema nervioso autónomo	Sistema que regula corazón y vasos	Ajustar frecuencia cardiaca y tono vascular	Base de la respuesta aguda al ejercicio
Frecuencia cardiaca	Número de latidos por minuto	Regular parte del gasto cardiaco	Indicador básico de intensidad
Volumen sistólico	Cantidad de sangre expulsada en cada latido	Contribuir al gasto cardiaco	Aumenta con ejercicio y entrenamiento
Gasto cardiaco	Volumen de sangre bombeado por minuto	Sostener transporte global de oxígeno	Determinante central del rendimiento aeróbico
Presión arterial	Fuerza de la sangre sobre la pared vascular	Mantener perfusión tisular	Debe ajustarse al esfuerzo
Retorno venoso	Volumen de sangre que vuelve al corazón	Favorecer llenado ventricular	Esencial para mantener volumen sistólico

Concepto	Definición básica	Función principal	Aplicación en fisiología del ejercicio
Redistribución del flujo sanguíneo	Reparto de sangre hacia los tejidos más activos	Optimizar aporte de oxígeno y sustratos	Característica central del ejercicio
Deriva cardiovascular	Aumento progresivo de la FC durante ejercicio prolongado	Mantener gasto cardiaco cuando cae el VS	Relacionada con calor y deshidratación
Principio de Fick	Relación entre VO_2, gasto cardiaco y extracción de oxígeno	Explicar transporte y utilización de oxígeno	Base del análisis del rendimiento aeróbico
VO_2 máximo	Máxima capacidad de captar, transportar y utilizar oxígeno	Representar el techo del rendimiento aeróbico	Muy dependiente del gasto cardiaco máximo
Recuperación cardiovascular	Retorno progresivo de variables cardiovasculares al reposo	Restablecer homeostasis tras el esfuerzo	Informa sobre estado funcional
Remodelado cardiovascular	Cambios crónicos inducidos por el entrenamiento	Mejorar eficiencia y capacidad funcional	Base de la adaptación al ejercicio
Nivel de entrenamiento	Estado de adaptación del organismo al ejercicio	Mejorar eficiencia cardiovascular	Determina gran parte de la respuesta al esfuerzo

TEMA 10. SISTEMA PULMONAR

Concepto	Definición básica	Función principal	Aplicación en fisiología del ejercicio
Sistema respiratorio	Sistema encargado de la ventilación y del intercambio gaseoso	Aportar oxígeno y eliminar dióxido de carbono	Sostiene el metabolismo aeróbico durante el ejercicio
Ventilación pulmonar	Volumen de aire que entra y sale de los pulmones	Ajustar aporte de O_2 y eliminación de CO_2	Aumenta con la intensidad del ejercicio
Intercambio gaseoso	Difusión de O_2 y CO_2 entre alvéolos y sangre	Oxigenar la sangre y eliminar CO_2	Fundamental para sostener la contracción muscular
Alvéolos	Unidades donde ocurre el intercambio gaseoso	Facilitar difusión entre aire y sangre	Su eficacia condiciona el aporte de oxígeno
Mecánica ventilatoria	Procesos físicos que permiten entrada y salida de aire	Generar ventilación mediante cambios de presión y volumen	Determina eficiencia respiratoria durante el esfuerzo
Diafragma	Principal músculo inspiratorio	Aumentar el volumen torácico	Clave en la ventilación durante el ejercicio
Trabajo respiratorio	Energía necesaria para ventilar los pulmones	Vencer resistencias y fuerzas elásticas	Aumenta con la intensidad del ejercicio
Volumen corriente	Aire movilizado en una respiración normal	Constituir la base de la ventilación	Aumenta al inicio del ejercicio
Ventilación minuto	Producto de volumen corriente por frecuencia respiratoria	Cuantificar ventilación total por minuto	Principal variable ventilatoria en ejercicio
Umbral ventilatorio	Punto en el que la ventilación aumenta de forma desproporcionada	Reflejar cambios metabólicos y ventilatorios	Muy útil en valoración funcional
Difusión pulmonar	Movimiento de gases a través de la membrana respiratoria	Intercambiar O_2 y CO_2 entre alvéolo y sangre	Su eficacia es esencial en el esfuerzo intenso
Transporte de oxígeno	Desplazamiento de O_2 en sangre, sobre todo unido a hemoglobina	Llevar oxígeno a los tejidos	Determina el aporte al músculo activo

Concepto	Definición básica	Función principal	Aplicación en fisiología del ejercicio
Transporte de dióxido de carbono	Desplazamiento de CO_2 desde tejidos a pulmones	Permitir su eliminación y regulación del pH	Aumenta con el metabolismo del ejercicio
Equilibrio ácido-base	Mantenimiento del pH dentro de límites fisiológicos	Preservar función celular	La ventilación ayuda a compensar la acidosis del ejercicio
Regulación de la ventilación	Control neural y químico de la respiración	Ajustar la ventilación a la demanda metabólica	Esencial durante el ejercicio
Quimiorreceptores	Receptores sensibles a cambios de O_2, CO_2 y pH	Modificar la ventilación	Muy importantes en ejercicio intenso
Coordinación cardiorrespiratoria	Integración entre ventilación y respuesta cardiovascular	Optimizar intercambio y transporte de gases	Base del rendimiento aeróbico
Recuperación respiratoria	Descenso progresivo de la ventilación tras el esfuerzo	Restablecer homeostasis gaseosa y ácido-base	Su velocidad informa sobre la carga del ejercicio
Adaptación respiratoria al entrenamiento	Cambios funcionales que mejoran la eficiencia ventilatoria	Reducir coste respiratorio y optimizar la respuesta al esfuerzo	Contribuye indirectamente al rendimiento
Eficiencia ventilatoria	Capacidad de ventilar adecuadamente con menor coste	Optimizar el trabajo respiratorio	Mejora con el entrenamiento

TEMA 11. LA SANGRE Y EL SISTEMA INMUNOLÓGICO

Concepto	Definición básica	Función principal	Aplicación en fisiología del ejercicio
Sangre	Tejido líquido que circula por el sistema cardiovascular	Transportar sustancias y mantener la homeostasis	Elemento clave en rendimiento y recuperación
Plasma	Fracción líquida de la sangre	Transportar solutos, proteínas y hormonas	Importante en volumen circulante e hidratación
Eritrocitos	Células sanguíneas que transportan oxígeno	Llevar O_2 a los tejidos	Determinan gran parte de la capacidad aeróbica
Hemoglobina	Proteína de los eritrocitos que fija oxígeno	Facilitar transporte de O_2	Factor central del rendimiento aeróbico
Hematocrito	Porcentaje del volumen sanguíneo ocupado por eritrocitos	Reflejar concentración celular de la sangre	Influye en transporte de O_2 y viscosidad
Eritropoyesis	Producción de glóbulos rojos en la médula ósea	Mantener capacidad de transporte de oxígeno	Relevante en entrenamiento e hipoxia
Anemia	Disminución de hemoglobina o eritrocitos	Reducir capacidad de transporte de oxígeno	Se asocia a fatiga y menor rendimiento
Leucocitos	Células sanguíneas del sistema inmunitario	Defender frente a patógenos y daño tisular	Su comportamiento cambia con el ejercicio
Sistema inmunitario innato	Primera línea de defensa, rápida e inespecífica	Responder de inmediato frente a agresiones	Participa en inflamación y daño muscular
Sistema inmunitario adaptativo	Sistema defensivo específico y con memoria	Proteger de forma precisa y duradera	Se modula con la carga de ejercicio
Linfocitos	Células clave de la inmunidad adaptativa	Reconocer antígenos y coordinar respuesta específica	Importantes en defensa y recuperación
Inflamación	Respuesta del sistema inmune frente a lesión o infección	Iniciar defensa y reparación tisular	Fundamental tras ejercicio intenso o no habitual

Concepto	Definición básica	Función principal	Aplicación en fisiología del ejercicio
Citocinas	Moléculas señalizadoras del sistema inmune	Coordinar activación, inflamación y reparación	Muy relevantes tras el ejercicio
Integración sangre-inmunidad	Relación funcional entre sangre y sistema inmune	Transportar y coordinar defensa y reparación	Fundamental en ejercicio, recuperación y salud
Respuesta hematológica aguda al ejercicio	Cambios inmediatos de la sangre durante el esfuerzo	Ajustar transporte y homeostasis al estrés físico	Incluye hemoconcentración y cambios celulares
Respuesta leucocitaria al ejercicio	Alteración transitoria del número y distribución de leucocitos	Adaptar vigilancia inmunitaria al esfuerzo	Característica del ejercicio intenso
Inmunosupresión transitoria postejercicio	Modulación temporal de algunas funciones inmunes tras esfuerzo intenso	Reflejar estrés fisiológico elevado	Puede aumentar susceptibilidad a infecciones
Sobreentrenamiento e inmunidad	Alteración inmune por exceso de carga y mala recuperación	Reflejar desequilibrio fisiológico sostenido	Relacionado con peor recuperación e infecciones

TEMA 12. FISIOLOGÍA DEL ENTRENAMIENTO AERÓBICO Y ANAERÓBICO

Concepto	Definición básica	Función principal	Aplicación en actividad física y deporte
Sistemas energéticos	Vías metabólicas que resintetizan ATP durante el ejercicio	Mantener la contracción muscular	Base del rendimiento aeróbico y anaeróbico
ATP	Fuente energética inmediata de la célula muscular	Aportar energía directa al trabajo muscular	Imprescindible en cualquier esfuerzo
Potencia metabólica	Velocidad con la que un sistema produce energía	Resintetizar ATP rápidamente	Determina rendimiento en esfuerzos intensos
Capacidad metabólica	Cantidad total de energía que un sistema puede aportar	Sostener el esfuerzo antes de la fatiga	Clave en actividades prolongadas
Sistema de los fosfágenos	Sistema anaeróbico inmediato basado en ATP y fosfocreatina	Producir energía muy rápida	Fundamental en sprints, saltos y acciones explosivas
Glucólisis anaeróbica	Producción de ATP a partir de glucosa sin necesidad de oxígeno	Sostener esfuerzos intensos de corta-media duración	Importante en acciones de alta intensidad
Metabolismo aeróbico	Producción de ATP mediante oxidación de sustratos con oxígeno	Mantener esfuerzos prolongados	Base de la resistencia
Integración aeróbica y anaeróbica	Participación simultánea de los sistemas energéticos	Ajustar producción de energía a la demanda	Explica la contribución relativa según intensidad y duración
Potencia aeróbica	Máxima capacidad para captar, transportar y utilizar oxígeno	Expresar el límite superior del metabolismo aeróbico	Se relaciona con el VO_2máx
Capacidad aeróbica	Habilidad para sostener ejercicio prolongado con predominio oxidativo	Mantener esfuerzos de larga duración	Fundamental en deportes de resistencia
VO_2máx	Máxima cantidad de oxígeno que el organismo puede utilizar por unidad de tiempo	Reflejar potencia aeróbica	Indicador clave del rendimiento de resistencia
Umbral de lactato	Intensidad a partir de la cual el lactato aumenta progresivamente	Marcar transición metabólica relevante	Muy útil para valorar resistencia y programar entrenamiento

Concepto	Definición básica	Función principal	Aplicación en actividad física y deporte
Umbral ventilatorio	Aumento desproporcionado de la ventilación durante ejercicio incremental	Reflejar cambios metabólicos y ácido-base	Se usa como estimación indirecta del umbral de lactato
Economía de ejercicio	Eficiencia con la que se utiliza energía para una carga determinada	Reducir coste energético del esfuerzo	Muy importante en rendimiento de resistencia
Sistema cardiovascular	Sistema encargado de transportar oxígeno a los músculos	Sostener el aporte de sangre oxigenada	Determinante principal del rendimiento aeróbico
Gasto cardiaco	Cantidad de sangre bombeada por minuto	Transportar oxígeno a los tejidos activos	Factor central del VO_2máx
Volumen sistólico	Cantidad de sangre expulsada en cada latido	Contribuir al gasto cardiaco	Mejora con entrenamiento aeróbico
Hemoglobina	Proteína sanguínea transportadora de oxígeno	Llevar oxígeno desde pulmones a tejidos	Determina capacidad de transporte de oxígeno
Densidad capilar	Número de capilares en el músculo	Facilitar difusión de oxígeno y nutrientes	Mejora con entrenamiento de resistencia
Mitocondrias	Orgánulos donde se produce ATP por vía oxidativa	Utilizar oxígeno para generar energía	Clave en la capacidad aeróbica muscular
Enzimas oxidativas	Enzimas implicadas en el metabolismo aeróbico	Favorecer oxidación de sustratos	Aumentan con entrenamiento aeróbico
Mioglobina	Proteína muscular que facilita el transporte intracelular de oxígeno	Favorecer difusión de O_2 hacia mitocondrias	Relacionada con capacidad oxidativa
Adaptaciones cardiovasculares al entrenamiento aeróbico	Cambios funcionales del sistema cardiovascular inducidos por la resistencia	Mejorar transporte de oxígeno	Incluyen mayor volumen sistólico y menor FC submáxima
Adaptaciones musculares al entrenamiento aeróbico	Cambios estructurales y funcionales en el músculo	Mejorar uso de oxígeno y producción de ATP	Incluyen más capilares y más mitocondrias
Adaptaciones metabólicas al entrenamiento aeróbico	Cambios en la utilización de sustratos y en la capacidad oxidativa	Mejorar eficiencia y retrasar fatiga	Favorecen mayor uso de grasas y menor dependencia del glucógeno
Entrenamiento de resistencia	Entrenamiento orientado a mejorar el metabolismo aeróbico	Aumentar capacidad para sostener esfuerzos prolongados	Base del rendimiento en deportes de resistencia

Concepto	Definición básica	Función principal	Aplicación en actividad física y deporte
Sobrecarga	Aplicación de un estímulo superior al habitual	Provocar adaptación	Principio básico del entrenamiento
Especificidad	Las adaptaciones dependen del tipo de estímulo aplicado	Dirigir el entrenamiento al objetivo	Fundamental para planificar resistencia o potencia
Progresión	Incremento gradual de la carga de entrenamiento	Favorecer mejora continua	Evita estancamiento y exceso de fatiga
Pruebas de laboratorio	Evaluaciones fisiológicas en condiciones controladas	Medir con precisión variables aeróbicas	Útiles para valorar VO_2máx y umbral
Test de campo	Evaluaciones realizadas en condiciones cercanas a la práctica real	Estimar capacidad aeróbica y rendimiento	Muy útiles para seguimiento del entrenamiento

TEMA 13. EJERCICIO Y ENTRENAMIENTO EN CONDICIONES HIPÓXICAS

Concepto	Definición básica	Función principal	Aplicación en fisiología del ejercicio
Hipoxia	Disminución de la disponibilidad de oxígeno para los tejidos	Limitar el aporte de O_2 al organismo	Afecta sobre todo al rendimiento aeróbico
Altitud	Elevación geográfica asociada a menor presión atmosférica	Modificar el ambiente respiratorio	Determina el grado de estrés hipóxico
Presión parcial de oxígeno	Parte de la presión total del aire correspondiente al oxígeno	Determinar el gradiente de difusión del O_2	Su descenso en altura compromete el rendimiento
Aclimatación	Ajustes fisiológicos tras varios días o semanas en altura	Mejorar tolerancia a la hipoxia	Reduce parcialmente el impacto de la altitud
$VO_2máx$	Máxima capacidad de captar, transportar y utilizar oxígeno	Representar el techo del rendimiento aeróbico	Disminuye con la altitud
Hiperventilación	Aumento de la ventilación pulmonar ante hipoxia	Defender la presión alveolar de O_2	Respuesta respiratoria aguda más característica
Saturación arterial de oxígeno	Porcentaje de hemoglobina arterial unida al O_2	Reflejar el grado de oxigenación sanguínea	Desciende en altura, sobre todo con ejercicio intenso
Frecuencia cardiaca en hipoxia	Aumento de latidos por minuto para compensar menor contenido arterial de O_2	Mantener flujo hacia los tejidos	Es mayor para una misma carga absoluta
Gasto cardiaco	Volumen de sangre bombeado por minuto	Sostener transporte global de oxígeno	Intenta compensar la menor disponibilidad de O_2
Eritropoyetina	Hormona renal que estimula la producción de glóbulos rojos	Favorecer eritropoyesis en hipoxia	Base de la adaptación hematológica a la altura
Hemoconcentración inicial	Aumento relativo de células y hemoglobina por reducción del plasma	Elevar concentración sanguínea transitoria	Frecuente en los primeros días en altura
Hemoglobina	Proteína eritrocitaria que transporta oxígeno	Llevar O_2 a los tejidos	Clave en la adaptación al entrenamiento en altura
Hierro	Elemento esencial para sintetizar hemoglobina	Permitir producción eficaz de eritrocitos	Su disponibilidad condiciona la adaptación

Concepto	Definición básica	Función principal	Aplicación en fisiología del ejercicio
Metabolismo glucolítico	Producción de ATP con menor dependencia del oxígeno	Sostener energía cuando limita la vía oxidativa	Gana peso relativo en hipoxia
Lactato	Metabolito asociado al aumento de la glucólisis	Reflejar carga metabólica	Puede elevarse antes en altura
Rendimiento aeróbico	Capacidad de sostener ejercicio dependiente del metabolismo oxidativo	Mantener pruebas de resistencia	Es el más perjudicado por la hipoxia
Rendimiento anaeróbico	Capacidad de realizar esfuerzos breves y muy intensos	Sostener acciones explosivas	Suele afectarse menos que el aeróbico
Vivir alto-entrenar bajo	Modelo que combina residencia en altura y entrenamiento a menor altitud	Buscar adaptaciones sin perder intensidad de entrenamiento	Muy usado en deportes de resistencia
Dosis de hipoxia	Combinación de altitud, duración y frecuencia de exposición	Determinar magnitud del estímulo adaptativo	Variable central en la planificación
Control de la intensidad en hipoxia	Ajuste de la carga según la respuesta interna	Evitar exceso de fatiga	Debe basarse más en variables internas que en ritmos habituales

TEMA 14. EJERCICIO Y ENRENAMIENTO EN CONDICIONES DE CALOR

Concepto	Definición básica	Función principal	Aplicación en fisiología del ejercicio
Equilibrio térmico	Balance entre producción y pérdida de calor	Mantener la temperatura corporal dentro de límites seguros	Determina la tolerancia al ejercicio en calor
Temperatura central	Temperatura de los órganos profundos	Preservar la función de órganos y sistemas	Su aumento excesivo limita el rendimiento
Termorregulación	Conjunto de mecanismos que mantienen estable la temperatura corporal	Defender la homeostasis térmica	Es esencial durante el ejercicio en calor
Producción metabólica de calor	Calor generado por el metabolismo muscular	Reflejar el coste térmico del esfuerzo	Aumenta con la intensidad del ejercicio
Flujo sanguíneo cutáneo	Sangre dirigida a la piel	Transportar calor desde el interior a la superficie	Aumenta en calor y compite con el flujo al músculo
Vasodilatación cutánea	Aumento del calibre vascular en la piel	Facilitar la pérdida de calor	Respuesta básica ante el ejercicio en calor
Sudoración	Producción de sudor durante el esfuerzo	Permitir pérdida de calor por evaporación	Mecanismo principal de enfriamiento
Evaporación	Paso del sudor de líquido a vapor	Retirar calor de la superficie corporal	Es el mecanismo más eficaz de pérdida de calor
Humedad ambiental	Cantidad de vapor de agua presente en el aire	Condicionar la evaporación del sudor	Alta humedad aumenta el riesgo térmico
Estrés térmico	Carga fisiológica producida por calor ambiental y ejercicio	Aumentar la exigencia interna del esfuerzo	Debe valorarse antes y durante la práctica
Deriva cardiovascular	Aumento progresivo de la FC en ejercicio prolongado en calor	Mantener el gasto cardiaco	Típica en calor y deshidratación
Deshidratación	Pérdida neta de agua corporal	Dificultar termorregulación y función cardiovascular	Aumenta fatiga y temperatura corporal

Concepto	Definición básica	Función principal	Aplicación en fisiología del ejercicio
Sodio	Principal electrolito perdido en el sudor	Mantener volumen extracelular y función neuromuscular	Debe considerarse en ejercicios prolongados
Aclimatación al calor	Adaptaciones tras exposiciones repetidas al ejercicio en calor	Mejorar tolerancia térmica y reducir carga interna	Clave para entrenar y competir en calor
Planificación en calor	Ajuste de carga, horario, pausas e hidratación	Mantener el estímulo reduciendo riesgo	Esencial para la seguridad y el rendimiento
Estrategias de enfriamiento	Medidas para reducir la temperatura corporal	Disminuir la carga térmica	Útiles antes, durante y después del ejercicio
Agotamiento por calor	Estado de fatiga intensa y compromiso termorregulador	Indicar incapacidad para sostener el esfuerzo	Requiere detener y enfriar al deportista
Golpe de calor por esfuerzo	Trastorno grave con hipertermia y alteración del SNC	Representar una urgencia médica	Es la complicación más peligrosa del ejercicio en calor
Prevención del riesgo térmico	Decisiones para reducir la probabilidad de trastornos por calor	Proteger salud y rendimiento	Incluye control ambiental, hidratación y aclimatación