BIOELEMENTOS Y BIOMOLÉCULAS: CARBOHIDRATOS, LÍPIDOS, PROTEÍNAS Y ÁCIDOS NUCLEICOS

La vida a nivel molecular está construida sobre una base química extraordinariamente organizada. Para comprender cómo el cuerpo humano produce energía, contrae músculos, repara tejidos y se adapta al ejercicio, es indispensable conocer primero los materiales con que está hecho: los bioelementos y las biomoléculas. Estos componentes no solo constituyen la arquitectura del organismo, sino que son los actores directos de cada reacción metabólica que ocurre durante el entrenamiento y la competencia (Lehninger et al., 2021).

En el contexto deportivo, esta base bioquímica no es teoría abstracta: determina cuánto tiempo puede correr un atleta antes de fatigarse, qué nutrientes debe consumir para recuperarse y cómo su cuerpo se adapta morfológica y funcionalmente al entrenamiento sistemático (McArdle et al., 2022).

Bioelementos

Los bioelementos son los elementos químicos que constituyen la materia viva. De los más de 118 elementos de la tabla periódica, únicamente entre 25 y 30 son esenciales para los organismos vivos (Lehninger et al., 2021). Esta selectividad no es arbitraria: los bioelementos seleccionados por la evolución poseen propiedades fisicoquímicas —como la capacidad de formar enlaces covalentes estables o de participar en reacciones redox— que los hacen insustituibles para la vida.

Se clasifican en tres categorías según su abundancia relativa en la materia viva:

Bioelementos primarios (≈ 96% de la materia viva)

Carbono (C), Hidrógeno (H), Oxígeno (O), Nitrógeno (N), Fósforo (P) y Azufre (S). Estos seis elementos forman el esqueleto de todas las biomoléculas orgánicas. El carbono es especialmente singular: su capacidad para formar hasta cuatro enlaces covalentes estables y para encadenarse en estructuras lineales, ramificadas y cíclicas lo convierte en el elemento central de la química de la vida (Murray et al., 2021). El fósforo, por su parte, es imprescindible en la estructura del ATP y de los ácidos nucleicos.

Bioelementos secundarios (≈ 3.9%)

Calcio (Ca), Sodio (Na), Potasio (K), Magnesio (Mg) y Cloro (Cl). Aunque presentes en menor proporción, cumplen funciones fisiológicas críticas. En el deporte son determinantes: el Ca^{2+} es el disparador molecular de la contracción muscular; el Na^{+} y K^{+} generan los gradientes electroquímicos que permiten la transmisión del impulso nervioso y la despolarización de la membrana muscular; el Mg^{2+} actúa como cofactor en más de 300 reacciones enzimáticas, incluyendo la síntesis de ATP (Guyton & Hall, 2021).

Oligoelementos (< 0.1%)

Hierro (Fe), Cobre (Cu), Zinc (Zn), Yodo (I), Selenio (Se), Manganeso (Mn), entre otros. A pesar de estar en cantidades traza, su deficiencia genera patologías graves. El Fe^{2+}/Fe^{3+} es esencial en la hemoglobina para el transporte de oxígeno y en la cadena transportadora de electrones mitocondrial; el Zn^{2+} es cofactor de más de 200 enzimas; el Se es componente del sistema antioxidante glutatión peroxidasa, de gran importancia en la protección contra el estrés oxidativo inducido por el ejercicio intenso (Gropper & Smith, 2021).

Tabla: Clasificación de los bioelementos y su relevancia en el rendimiento deportivo

Categoría	Elementos	% en materia viva	Función principal en el deporte
Primarios	C, H, O, N, P, S	≈ 96%	Estructura de biomoléculas y fuentes de energía
Secundarios	Ca, Na, K, Mg, Cl	≈ 3.9%	Contracción muscular, transmisión nerviosa, catálisis enzimática
Oligoelementos	Fe, Cu, Zn, Se, I, Mn…	< 0.1%	Transporte de O_2, antioxidación, cofactores enzimáticos

Nota. *Clasificación de los bioelementos y su relevancia en el rendimiento deportivo. Adaptado de Lehninger et al. (2021) y Gropper y Smith (2021).*

Biomoléculas Orgánicas

Las biomoléculas son compuestos orgánicos producidos por los seres vivos mediante sus procesos metabólicos. Se forman cuando los bioelementos se combinan mediante enlaces covalentes, generando estructuras con propiedades y funciones específicas. Se agrupan en cuatro familias principales: carbohidratos, lípidos, proteínas y ácidos nucleicos (Lieberman & Marks, 2019).

Carbohidratos (glúcidos o sacáridos)

Los carbohidratos son polihidroxialdehídos o polihidroxicetonas, o compuestos que los generan por hidrólisis. Su fórmula empírica general es $(CH_2O)n$. Son la principal fuente de energía inmediata del organismo y desempeñan también funciones estructurales, de señalización y de reconocimiento celular (Lehninger et al., 2021).

Clasificación y estructura

Monosacáridos. Son las unidades básicas no hidrolizables. Los más relevantes fisiológicamente son:

- Glucosa ($C_6H_{12}O_6$): el sustrato energético central de la célula. Combustible preferente del cerebro y del músculo en ejercicio intenso.
- Fructosa: presente en frutas y miel; metabolizada principalmente en el hígado.
- Galactosa: componente de la lactosa (azúcar de la leche); se convierte en glucosa en el hígado.
- Ribosa y desoxirribosa (pentosas, C_5): componentes estructurales del ARN y ADN, respectivamente.

Disacáridos. Dos monosacáridos unidos por un enlace glucosídico. Los principales son sacarosa (glucosa + fructosa, el azúcar de mesa), lactosa (glucosa + galactosa, presente en leche) y maltosa (glucosa + glucosa, producto de la digestión del almidón).

Polisacáridos. Cadenas largas de monosacáridos. Los de mayor relevancia deportiva son:

- Glucógeno: polisacárido de reserva animal. Se almacena en el músculo esquelético (~300-400 g) y en el hígado (~80-100 g). Estructura altamente ramificada (enlaces α-1,4 con ramificaciones α-1,6 cada 8-12 residuos) que permite su movilización rápida durante el ejercicio (McArdle et al., 2022).
- Almidón: polisacárido de reserva vegetal (amilosa + amilopectina). Principal fuente de carbohidratos en la dieta humana.
- Celulosa: polisacárido estructural de las plantas (enlaces β-1,4). Los humanos no tienen la enzima para digerirla, pero tiene función de fibra dietética.

Metabolismo de los carbohidratos en el ejercicio

Durante el ejercicio, los carbohidratos se metabolizan por tres vías principales interconectadas (Powers & Howley, 2017):

- **Glucólisis:** degradación de glucosa en el citosol produciendo 2 moléculas de piruvato y 2 ATP netos (con 2 NADH). Es la vía de producción de energía rápida, activa especialmente en ejercicio de intensidad moderada-alta.

- **Glucogenólisis:** degradación del glucógeno muscular (mediada por la glucógeno fosforilasa, activada por adrenalina y AMP) para liberar glucosa-1-fosfato, que entra directamente a la glucólisis sin necesidad de pasar por la membrana plasmática.
- **Metabolismo aeróbico:** el piruvato resultante de la glucólisis ingresa a la mitocondria, se convierte en acetil-CoA (por la piruvato deshidrogenasa) y se oxida completamente en el ciclo de Krebs + cadena transportadora de electrones, generando hasta 38 ATP por molécula de glucosa.

La famosa "pared" que experimentan los maratonistas alrededor del kilómetro 30-32 refleja el agotamiento de las reservas de glucógeno muscular y hepático. En ese punto, el organismo debe depender casi exclusivamente de la beta-oxidación de ácidos grasos, un proceso más lento que no puede cubrir la demanda energética a ritmos de carrera elevados (McArdle et al., 2022).

Relevancia clínico-deportiva

La cantidad de glucógeno almacenado es un determinante crítico del rendimiento en ejercicios de más de 60-90 minutos. El entrenamiento de resistencia aumenta la capacidad de almacenamiento de glucógeno muscular hasta en un 50% respecto a individuos sedentarios. Las estrategias de carga de carbohidratos (3-5 g/kg/día durante los 3 días previos a la competencia) saturan las reservas y pueden mejorar el rendimiento en eventos prolongados en un 2-3% (Burke et al., 2015).

Lípidos

Los lípidos son un grupo heterogéneo de moléculas con la característica común de ser hidrofóbicas (insolubles en agua) y solubles en disolventes orgánicos. No constituyen una familia química homogénea como los carbohidratos, sino que se agrupan por su solubilidad. Desempeñan funciones de reserva energética, componentes estructurales de membranas, señalización hormonal y protección física (Gropper & Smith, 2021).

Clasificación y estructura

Triglicéridos (Triacilgliceroles). Son la forma principal de almacenamiento de energía en el tejido adiposo y en menor medida en el músculo (depósitos de grasa intramuscular, IMTG). Están formados por una molécula de glicerol esterificada con tres ácidos grasos. Un gramo de triglicéridos proporciona 9 kcal, más del doble que carbohidratos o proteínas (4 kcal/g), lo que los convierte en la reserva energética de mayor capacidad del organismo (Lehninger et al., 2021).

Los ácidos grasos que componen los triglicéridos pueden ser:

- Saturados: sin dobles enlaces en la cadena hidrocarbonada (p. ej., ácido palmítico C16:0, ácido esteárico C18:0). Predominan las grasas animales y el aceite de coco.
- Monoinsaturados: un doble enlace (p. ej., ácido oleico C18:1, presente en aceite de oliva). Considerados cardioprotectores.
- Poliinsaturados: dos o más dobles enlaces. Los omega-3 (ácido alfa-linolénico, EPA, DHA) y omega-6 (ácido linoleico) son esenciales: el organismo no puede sintetizarlos y deben obtenerse de la dieta.

Fosfolípidos. Son los componentes principales de las membranas celulares. Tienen una cabeza hidrofílica (glicerol + fosfato + grupo polar) y dos colas hidrofóbicas (ácidos grasos), lo que les confiere la propiedad de automontarse en bicapas lipídicas. La fluidez de la membrana, esencial para el funcionamiento de receptores, transportadores y canales iónicos, depende de la composición en ácidos grasos de los fosfolípidos. Una dieta rica en omega-3 aumenta la fluidez de membrana, mejorando el intercambio de nutrientes y metabolitos (Gropper & Smith, 2021).

Esteroides. Derivados del ciclopentanoperhidrofenantreno (núcleo esteroide). El **colesterol** es el precursor de todos los esteroides del organismo: hormonas sexuales (testosterona, estradiol, progesterona), corticosteroides (cortisol, aldosterona), vitamina D y ácidos biliares. La testosterona es especialmente relevante en el deporte por su efecto anabólico sobre el músculo esquelético (Murray et al., 2021).

Cuerpos cetónicos. Acetoacetato, β-hidroxibutirato y acetona, producidos en el hígado a partir de acetil-CoA durante ayuno prolongado o dietas muy bajas en carbohidratos. Constituyen un combustible alternativo para el cerebro y el músculo cuando la glucosa escasea (Lieberman & Marks, 2019).

Metabolismo de los lípidos en el ejercicio

La movilización de lípidos comienza con la lipólisis: la hormona sensible a lipasa (HSL) —estimulada por adrenalina y glucagón, inhibida por insulina— hidroliza los triglicéridos del tejido adiposo, liberando ácidos grasos libres (AGL) al plasma. Los AGL se transportan unidos a la albúmina hasta el músculo, donde cruzan la membrana mitocondrial interna mediante el sistema transportador carnitina-aciltransferasa (CAT) para someterse a la beta-oxidación (Chamorro, 2018).

En la beta-oxidación, la cadena de carbono del ácido graso se va acortando de dos en dos carbonos, generando acetil-CoA, NADH y $FADH_2$. El ácido palmítico (C16) produce, tras 7 ciclos, 8 acetil-CoA, 7 NADH y 7 $FADH_2$, con un rendimiento neto de ~129 ATP, muy superior al de la glucosa (Lehninger et al., 2021).

Sin embargo, la oxidación de grasas es metabólicamente más lenta que la glucólisis, ya que requiere un mayor aporte de oxígeno por ATP sintetizado. Por eso, a intensidades de ejercicio superiores al 65-70% del VO_2max, los carbohidratos se convierten en el sustrato predominante ("crossover point" o punto de cruce). Los deportistas de resistencia entrenados tienen mayor densidad mitocondrial y expresión de enzimas oxidativas, lo que desplaza el crossover hacia intensidades más altas, permitiéndoles oxidar más grasas a mayor intensidad (Jeukendrup & Gleeson, 2018).

Relevancia clínico-deportiva

Los IMTG (triglicéridos intramusculares) constituyen una reserva lipídica de rápido acceso dentro del propio músculo, relevante en ejercicios de resistencia de intensidad moderada. El entrenamiento aeróbico aumenta el contenido de IMTG y la capacidad de movilizarlos.

La adiposidad excesiva no es inherentemente perjudicial; el problema es el exceso de grasa visceral, asociado a resistencia a la insulina y deterioro del metabolismo energético (Gropper & Smith, 2021).

Proteínas

Las proteínas son polímeros de aminoácidos unidos por enlaces peptídicos. Son las biomoléculas más versátiles del organismo: catalizan reacciones químicas (enzimas), dan estructura a tejidos (colágeno, actina, miosina), transportan moléculas (hemoglobina), defienden al organismo (anticuerpos), regulan procesos fisiológicos (hormonas peptídicas) y facilitan el movimiento (proteínas contráctiles). En el ser humano hay aproximadamente 20,000-25,000 proteínas distintas codificadas en el genoma (Murray et al., 2021).

Aminoácidos: los bloques de construcción

Los aminoácidos son moléculas que poseen un grupo amino ($-NH_2$), un grupo carboxilo ($-COOH$), un hidrógeno y una cadena lateral (R) variables, todos unidos al mismo carbono alfa. Las diferencias en la cadena R determinan las propiedades fisicoquímicas de cada aminoácido (Lieberman & Marks, 2019).

De los 20 aminoácidos proteogénicos, se clasifican en:

- Esenciales (9): histidina, isoleucina, leucina, lisina, metionina, fenilalanina, treonina, triptófano y valina. No pueden sintetizarse en cantidades suficientes y deben obtenerse de la dieta.
- No esenciales (11): el organismo puede sintetizarlos a partir de precursores metabólicos.
- Condicionalmente esenciales: normalmente no esenciales, pero se vuelven esenciales en situaciones de estrés fisiológico elevado (p. ej., arginina, glutamina y cisteína en el ejercicio intenso o la cirugía).

Los aminoácidos de cadena ramificada (BCAA: leucina, isoleucina y valina) tienen especial importancia deportiva. La leucina es el activador más potente de la vía mTORC1, que regula la síntesis proteica muscular. Además, los BCAA pueden utilizarse directamente como sustrato energético en el músculo durante ejercicios prolongados, contribuyendo a la fatiga central mediante la hipótesis de la serotonina (Powers & Howley, 2017).

Niveles de estructura proteica

La función de una proteína depende absolutamente de su estructura tridimensional específica. Se distinguen cuatro niveles organizativos (Murray et al., 2021):

- **Estructura primaria:** secuencia lineal de aminoácidos. Es la información codificada en el ADN. Determina todos los niveles superiores de estructura.
- **Estructura secundaria:** plegamientos locales estabilizados por puentes de hidrógeno entre grupos peptídicos: hélices alfa (estructura helicoidal compacta, p. ej., cadenas de miosina) y láminas beta (p. ej., proteínas del cristalino).
- **Estructura terciaria:** conformación tridimensional global, estabilizada por puentes de hidrógeno, interacciones hidrofóbicas, puentes disulfuro y fuerzas de Van der Waals. Es donde reside la funcionalidad específica de la proteína (p. ej., el sitio activo de una enzima o el sitio de unión al O_2 de la hemoglobina).
- **Estructura cuaternaria:** asociación de dos o más cadenas polipeptídicas. La hemoglobina ($\alpha_2\beta_2$) y las miosfibrilas musculares son ejemplos paradigmáticos.

La desnaturalización (pérdida de la estructura nativa por calor extremo, pH extremo o agentes caótrópicos) implica la pérdida de función biológica. Este principio es relevante en la práctica: un calentamiento excesivo puede reducir la actividad de enzimas metabólicas musculares, mientras que un calentamiento moderado la optimiza (Lieberman & Marks, 2019).

Funciones proteicas y aplicación deportiva

Las funciones principales de las proteínas en el contexto deportivo son (McArdle et al., 2022; Chamorro, 2018):

- **Función contráctil:** Actina y miosina son las proteínas de los filamentos del sarcómero. La interacción entre ellas —dependiente de ATP y Ca^{2+}— genera la fuerza y el acortamiento muscular. El entrenamiento de fuerza aumenta la síntesis de estas proteínas, incrementando la sección transversal muscular (hipertrofia).
- **Función enzimática:** Todas las reacciones del metabolismo energético son catalizadas por enzimas proteicas. La fosfofructoquinasa-1 (PFK-1), el piruvato deshidrogenasa, el citrato sintasa y la succinato deshidrogenasa son ejemplos clave.

El entrenamiento aeróbico incrementa la concentración de estas enzimas mitocondriales, mejorando la capacidad oxidativa.

- **Función de transporte:** La hemoglobina transporta O_2 desde los pulmones hasta los tejidos; la mioglobina almacena O_2 en el músculo. Ambas aumentan con el entrenamiento de resistencia. La transferrina transporta Fe^{3+} en plasma.
- **Función estructural:** El colágeno (proteína más abundante del cuerpo) da resistencia a tendones, ligamentos, huesos y cartílagos. Su síntesis requiere vitamina C y los aminoácidos glicina, prolina e hidroxiprolina. La síntesis de colágeno aumenta como respuesta adaptativa al entrenamiento mecánico.
- **Función reguladora:** La insulina, el glucagón, la GH, el IGF-1 y otras hormonas peptídicas regulan el metabolismo energético y la síntesis proteica. La leptina y la grelina regulan el apetito y el balance energético, con relevancia en la composición corporal del deportista.

Síntesis y degradación proteica en el ejercicio

El entrenamiento genera un balance dinámico entre síntesis proteica muscular (MPS, Muscle Protein Synthesis) y degradación proteica muscular (MPB, Muscle Protein Breakdown). El entrenamiento de fuerza incrementa tanto MPS como MPB, pero la MPS supera a la MPB en presencia de suficientes aminoácidos, resultando en hipertrofia neta. Sin disponibilidad de aminoácidos, el balance puede ser negativo incluso con entrenamiento (Gropper & Smith, 2021).

La ventana metabólica post-ejercicio (0-2 horas) es el periodo de mayor sensibilidad anabólica: la maquinaria de síntesis proteica está activada y los transportadores de aminoácidos en el sarcolema están sobreexpresados. Consumir 20-40 g de proteína de alta calidad (especialmente whey, rica en leucina) en ese periodo maximiza la respuesta hipertrófica (ACSM, 2023).

Ácidos Nucleicos

Los ácidos nucleicos son biopolímeros formados por nucleótidos. Son las moléculas de la información genética y participan directamente en la síntesis de todas las proteínas del

organismo (y por tanto, de todos los procesos metabólicos). Existen dos tipos principales: el ácido desoxirribonucleico (ADN) y el ácido ribonucleico (ARN) (Lehninger et al., 2021).

Nucleótidos: la unidad estructural

Cada nucleótido está compuesto por (Murray et al., 2021):

- Una base nitrogenada: purinas (adenina [A] y guanina [G]) o pirimidinas (citosina [C], timina [T] en ADN, uracilo [U] en ARN).
- Un azúcar de cinco carbonos (pentosa): desoxirribosa en el ADN, ribosa en el ARN.
- Un grupo fosfato (uno o varios).
-

El ATP (adenosín trifosfato) es el nucleótido energético más importante del metabolismo: es simultáneamente un bloque estructural del ARN y la principal moneda energética de la célula. La hidrólisis de sus enlaces fosfoanhídrido libera ~30.5 kJ/mol, energía que se acopla a reacciones termodinámicamente desfavorables (Lieberman & Marks, 2019).

ADN: el genoma del deportista

El ADN es una doble hélice de dos cadenas antiparalelas unidas por puentes de hidrógeno entre bases complementarias (A-T y G-C). Contiene toda la información genética para el desarrollo, funcionamiento y adaptación del organismo. El genoma humano haploide contiene ~3,200 millones de pares de bases que codifican aproximadamente 20,000-25,000 genes (Murray et al., 2021).

En el contexto deportivo, el ADN es el centro de control de la adaptación al entrenamiento. Cada sesión de ejercicio genera señales bioquímicas (AMP, Ca^{2+}, ROS, factores de transcripción como PGC-1α) que activan la expresión de genes específicos. Esto da lugar a adaptaciones como:

- Biogénesis mitocondrial: mayor número y tamaño de mitocondrias en las fibras musculares, incrementando la capacidad oxidativa.
- Síntesis de proteínas contráctiles: mayor expresión de cadenas pesadas de miosina y actina en respuesta al entrenamiento de fuerza.

- Angiogénesis: formación de nuevos capilares en el músculo, mejorando el aporte de oxígeno y nutrientes.
- Sobreexpresión de enzimas antioxidantes: superóxido dismutasa, catalasa y glutatión peroxidasa en respuesta al estrés oxidativo del ejercicio.

La epigenética —modificaciones del ADN y de las histonas que alteran la expresión génica sin cambiar la secuencia nucleotídica— explica cómo el entrenamiento sostenido 'reprograma' el músculo a largo plazo, y por qué el historial deportivo influye en la adaptación futura (Chamorro, 2018).

ARN: la ejecución del programa genético

El ARN es de cadena sencilla y participa en la transferencia de información del ADN a las proteínas. Los principales tipos son (Lehninger et al., 2021):

- **ARN mensajero (ARNm):** copia de un gen que lleva la información al ribosoma para sintetizar una proteína específica. La regulación del ARNm es el principal punto de control de la expresión génica en respuesta al ejercicio.
- **ARN ribosómico (ARNr):** componente estructural y catalítico del ribosoma, la máquina de síntesis proteica.
- **ARN de transferencia (ARNt):** adaptador que lleva los aminoácidos correctos al ribosoma durante la traducción.
- **ARN no codificantes (ARNlnc, miARN):** regulan la expresión génica post-transcripcional. Los miARN son especialmente relevantes en la adaptación muscular y cardiovascular al entrenamiento.

Integración: Las Biomoléculas en el Rendimiento Deportivo

Las cuatro familias de biomoléculas no actúan de forma aislada, sino en un sistema integrado donde cada componente depende de los demás. La siguiente tabla sintetiza su interdependencia en el contexto deportivo.

Tabla: Funciones integradas de las biomoléculas en el rendimiento deportivo

Biomolécula	Función primaria	Función deportiva específica	Consecuencia de su déficit
Carbohidratos	Energía rápida y estructural.	Combustible glucólisis y glucógeno muscular.	Fatiga temprana, pérdida de rendimiento anaeróbico.
Lípidos	Reserva energética y membranas.	Combustible en ejercicio prolongado; síntesis hormonal.	Reducción del rendimiento aeróbico; desequilibrio hormonal.
Proteínas	Catálisis, estructura, transporte.	Contracción muscular, enzimas, hemoglobina, colágeno.	Pérdida de masa muscular, recuperación lenta, lesiones.
Ácidos nucleicos	Información genética.	Adaptación al entrenamiento; síntesis de proteínas.	Pérdida de capacidad adaptativa al entrenamiento.

Nota. *Funciones integradas de las biomoléculas en el rendimiento deportivo. Adaptado de McArdle et al. (2022), Powers y Howley (2017) y Chamorro (2018).*

Para ilustrar esta integración, consideremos dos ejemplos deportivos contrastantes (McArdle et al., 2022):

Ejemplo 1: Levantamiento de pesas (potencia máxima)
Durante un intento máximo de sentadilla, en menos de 5 segundos se producen los siguientes eventos bioquímicos simultáneos:

- ATP (ácido nucleico/nucleótido energético) se hidroliza masivamente en el sarcómero para alimentar el ciclo de puentes cruzados actina-miosina (proteínas contráctiles).
- La fosfocreatina (compuesto nitrogenado derivado de aminoácidos) dona su grupo fosfato al ADP para regenerar ATP en milisegundos.
- La glucólisis anaeróbica activa rápidamente el metabolismo de glucógeno (carbohidrato) para sostener el esfuerzo más allá de los primeros segundos.
- Los iones Ca^{2+} liberados del retículo sarcoplásmico (regulados por proteínas como la troponina) desencadenan la contracción.
- Post-ejercicio, el ADN activa genes de síntesis proteica para reparar y agrandar las fibras musculares dañadas.

Ejemplo 2: Maratón (resistencia prolongada)

Durante las horas de carrera, la integración metabólica es distinta:

Los carbohidratos (glucógeno muscular y hepático) son el combustible prioritario a ritmo de carrera competitivo. Su agotamiento determina el rendimiento final.

Los lípidos (ácidos grasos del tejido adiposo e IMTG) aportan energía de forma progresiva, especialmente en los kilómetros finales cuando el glucógeno escasea. La beta-oxidación produce acetil-CoA para el ciclo de Krebs.

Las proteínas musculares sufren degradación (catabolismo proteico) que puede alcanzar el 5-10% de la energía total en esfuerzos muy prolongados.

Los ácidos nucleicos median las adaptaciones crónicas: mayor expresión de PGC-1α activa la biogénesis mitocondrial tras cada entrenamiento, mejorando la capacidad oxidativa a lo largo de la temporada.

Referencias:

American College of Sports Medicine. (2023). ACSM's guidelines for exercise testing and prescription (11.ª ed.). Wolters Kluwer.

Burke, L., Deakin, V., & Minehan, M. (2015). Clinical sports nutrition (5.ª ed.). McGraw-Hill Education.

Chamorro, A. (2018). Bioquímica del ejercicio físico. Editorial Médica Panamericana.

Gropper, S. S., & Smith, J. L. (2021). Advanced nutrition and human metabolism (8.ª ed.). Cengage Learning.

Guyton, A. C., & Hall, J. E. (2021). Guyton y Hall: Tratado de fisiología médica (14.ª ed.). Elsevier.

Jeukendrup, A., & Gleeson, M. (2018). Sport nutrition: An introduction to energy production and performance (3.ª ed.). Human Kinetics.

Lehninger, A. L., Nelson, D. L., & Cox, M. M. (2021). Lehninger principles of biochemistry (8.ª ed.). W. H. Freeman and Company.

Lieberman, M., & Marks, A. D. (2019). Bioquímica médica (7.ª ed.). McGraw-Hill Interamericana.

McArdle, W. D., Katch, F. I., & Katch, V. L. (2022). Fisiología del ejercicio: Nutrición, rendimiento y salud. Wolters Kluwer.

Murray, R. K., Bender, D. A., Botham, K. M., Kennelly, P. J., Rodwell, V. W., & Weil, P. A. (2021). Harper: Bioquímica ilustrada (32.ª ed.). McGraw-Hill Education.

Powers, S. K., & Howley, E. T. (2017). Fisiología del ejercicio: Teoría y aplicación al entrenamiento y al rendimiento. Médica Panamericana.