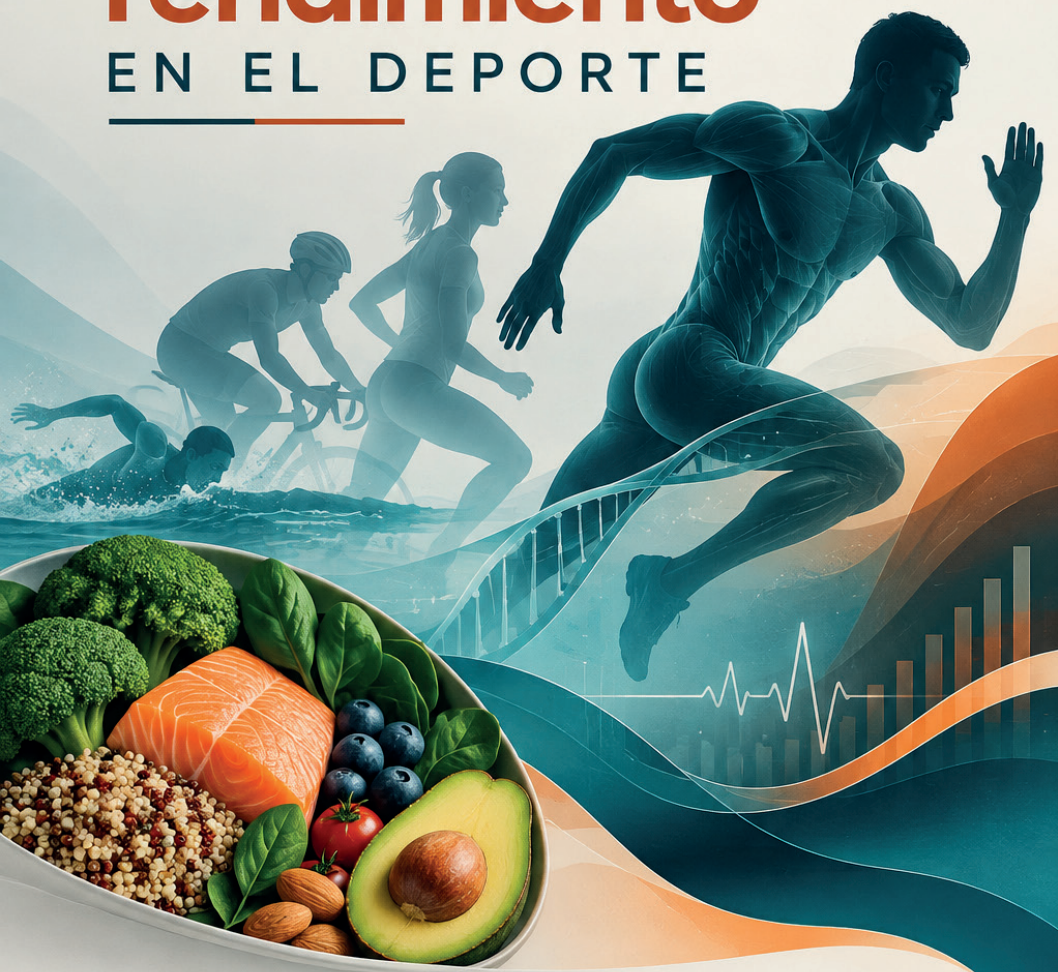


Nutrición, recuperación y rendimiento

EN EL DEPORTE

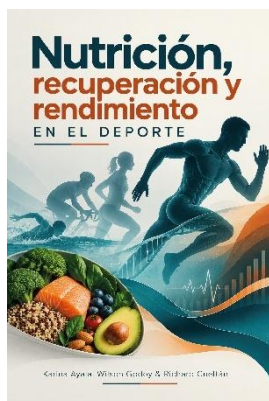


Karina Ayala, Wilson Godoy & Richard Cueltán

Nutrición, recuperación y rendimiento en el deporte

Karina Elizabeth Ayala Díaz
Wilson Mateo Godoy Miño
Richard Leonardo Cueltán Cardenas





Datos bibliográficos

ISBN:	978-9907-803-93-8
Título del libro:	Nutrición, recuperación y rendimiento en el deporte
Autores:	Ayala Díaz, Karina Elizabeth Godoy Miño, Wilson Mateo Cueltán Cardenas, Richard Leonardo
Editorial:	SAGA
Materia:	613.71 - Ejercicio y actividades deportivas
Público objetivo:	Profesional / académico
Publicado:	2026-10-24
Número de edición:	1
Tamaño:	5Mb
Soporte:	Libro digital descargable
Formato:	Pdf (.pdf)
Idioma:	Español
DOI:	https://doi.org/10.63415/saga.2026.147

Hecho En el Ecuador / Made in Ecuador

Autores

Karina Elizabeth Ayala Díaz

Universidad Politécnica Estatal del Carchi



karina.ayala@upec.edu.ec



<https://orcid.org/0009-0004-1017-4378>

Tulcán, Ecuador

Wilson Mateo Godoy Miño

Universidad Politécnica Estatal del Carchi



wilson.godoy@upec.edu.ec



<https://orcid.org/0009-0006-3072-5928>

Tulcán, Ecuador

Richard Leonardo Cuelbán Cardenas

Universidad Politécnica Estatal del Carchi



richard.cueltan@upec.edu.ec



<https://orcid.org/0009-0009-9382-0019>

Tulcán, Ecuador



El contenido y las ideas expuestas en esta obra se encuentran protegidos por la normativa vigente en materia de propiedad intelectual y constituyen derechos exclusivos de su(s) autor(es)

Todos los derechos reservados © 2026

Sinopsis

Nutrición, recuperación y rendimiento en el deporte presenta un análisis académico de las relaciones entre la alimentación y las respuestas fisiológicas que determinan la adaptación al ejercicio físico. La obra examina los mecanismos de regulación metabólica y la utilización de sustratos energéticos durante diferentes modalidades de entrenamiento. Aborda la periodización nutricional desde una perspectiva individualizada. Asimismo, estudia la influencia de los macronutrientes y la hidratación sobre la capacidad funcional del deportista, considerando la evidencia científica disponible y las particularidades de cada disciplina. La recuperación ocupa un lugar central mediante el análisis de la reparación muscular y la restauración energética posterior al esfuerzo. Se profundiza en la interacción entre microbiota intestinal e inmunometabolismo para comprender su participación en la salud y el rendimiento físico. El libro incorpora avances relacionados con la nutrigenómica y las tecnologías de monitorización fisiológica que permiten examinar las respuestas individuales al entrenamiento. También analiza las aplicaciones de la inteligencia artificial y las ciencias ómicas en la evaluación nutricional. Su desarrollo integra conocimientos de fisiología del ejercicio y ciencias de la nutrición mediante un enfoque interdisciplinario orientado a interpretar procesos biológicos y sustentar decisiones profesionales en el ámbito deportivo contemporáneo.

Palabras clave: nutrición, deporte, fisiología, salud, alimentación

Synopsis

Nutrition, Recovery and Performance in Sport presents an academic analysis of the relationships between dietary practices and the physiological responses that determine adaptation to physical exercise. The book examines the mechanisms of metabolic regulation and energy substrate utilization across different training modalities. It addresses nutritional periodization from an individualized perspective. Furthermore, it investigates the influence of macronutrients and hydration on athletes' functional capacity, considering available scientific evidence and the specific characteristics of each sporting discipline. Recovery occupies a central position through the analysis of muscle repair and energy restoration following physical exertion. Particular attention is devoted to the interaction between gut microbiota and immunometabolism to understand their involvement in health and physical performance. The book incorporates advances in nutrigenomics and physiological monitoring technologies that facilitate the examination of individual responses to training. It also analyzes applications of artificial intelligence and omics sciences in nutritional assessment. Its interdisciplinary approach integrates exercise physiology and nutritional sciences to interpret biological processes and support professional decision-making in contemporary sports practice.

Keywords: nutrition, sport, physiology, health, food

Índice General

Sinopsis.....	v
Índice General	7
Índice de Tablas	10
Índice de Figuras.....	11
Introducción	13
Capítulo I Regulación metabólica y adaptación nutricional al ejercicio	17
1.1. Flexibilidad metabólica y selección de sustratos energéticos según la intensidad y duración del esfuerzo físico	21
1.2. Regulación molecular del metabolismo energético y señalización celular inducida por el ejercicio	24
1.3. Periodización de carbohidratos y disponibilidad de glucógeno en las adaptaciones al entrenamiento	28
1.4. Metabolismo proteico, recambio muscular y regulación de la síntesis de proteínas durante la preparación deportiva	31
1.5. Disponibilidad energética, regulación endocrina y consecuencias fisiológicas del déficit energético relativo en el deporte	34
1.6. Crononutrición y sincronización de la ingesta alimentaria con los ritmos circadianos y las cargas de entrenamiento	37
Capítulo II Estrategias nutricionales para la optimización del rendimiento deportivo	43
2.1. Individualización de los requerimientos nutricionales mediante indicadores fisiológicos, metabólicos y funcionales	47
2.2. Distribución temporal de macronutrientes y respuestas adaptativas en diferentes modalidades deportivas.....	50
2.3. Hidratación de precisión, equilibrio electrolítico y regulación de la termorregulación durante el ejercicio	54

2.4. Suplementación ergogénica basada en evidencia: mecanismos de acción, eficacia y seguridad	57
2.5. Nutrición aplicada a la función cognitiva, la toma de decisiones y la resistencia a la fatiga mental en competición	61
2.6. Variabilidad interindividual de la respuesta nutricional: nutrigenética, nutrigenómica y fenotipos metabólicos.....	64

Capítulo III Recuperación fisiológica y reparación tisular posterior al ejercicio..... 69

3.1. Cinética de resíntesis de glucógeno y restauración de las reservas energéticas tras el esfuerzo físico	73
3.2. Remodelación muscular, daño inducido por el ejercicio y regulación nutricional de los procesos de reparación.....	76
3.3. Respuesta inflamatoria, estrés oxidativo y papel de los compuestos bioactivos en la recuperación deportiva	80
3.4. Interacciones entre sueño, metabolismo de nutrientes y recuperación neuromuscular	83
3.5. Recuperación del tejido conectivo: metabolismo del colágeno, integridad tendinosa y adaptación osteomuscular	87
3.6. Biomarcadores bioquímicos y funcionales para evaluar la recuperación y la tolerancia a las cargas de entrenamiento	90

Capítulo IV Microbiota intestinal, inmunometabolismo y resiliencia fisiológica del deportista..... 95

4.1. Eje intestino-músculo y participación de la microbiota en el metabolismo energético y la capacidad física	99
4.2. Metabolitos microbianos, ácidos grasos de cadena corta y señalización metabólica durante el ejercicio	103
4.3. Permeabilidad intestinal, estrés gastrointestinal y tolerancia digestiva en deportes de resistencia	106
4.4. Interacción entre nutrición, inmunidad de mucosas y susceptibilidad a infecciones durante periodos de entrenamiento intensivo	109

4.5. Modulación dietética de la microbiota mediante fibra, prebióticos, probióticos y alimentos fermentados.....	113
4.6. Comunicación bidireccional del eje intestino-cerebro y su relación con la fatiga central, el estrés y la recuperación	116

Capítulo V Nutrición de precisión y tecnologías para la gestión del rendimiento deportivo 121

5.1. Integración de datos fisiológicos, nutricionales y biomecánicos para la caracterización individual del deportista	125
5.2. Monitorización continua de glucosa y evaluación de su utilidad en la regulación nutricional del entrenamiento	129
5.3. Inteligencia artificial y modelos predictivos aplicados a la planificación alimentaria y la recuperación deportiva.....	132
5.4. Metabolómica, proteómica y lipidómica en la identificación de perfiles de adaptación al ejercicio	136
5.5. Sensores portátiles y análisis longitudinal de indicadores de fatiga, hidratación y recuperación fisiológica	139
5.6. Modelos integrados de nutrición personalizada, periodización del entrenamiento y evaluación multidimensional del rendimiento	142

Conclusiones 147

Referencias Bibliográficas..... 151

Índice de Tablas

Tabla 1 <i>Regulación metabólica y adaptación nutricional durante la preparación deportiva</i>	41
Tabla 2 <i>Estrategias nutricionales para la optimización del rendimiento deportivo: fundamentos y aplicaciones</i>	67
Tabla 3 <i>Procesos fisiológicos y nutricionales relacionados con la recuperación posterior al ejercicio</i>	93
Tabla 4 <i>Microbiota intestinal, regulación inmunometabólica y adaptación fisiológica en el rendimiento deportivo</i>	119
Tabla 5 <i>Aplicaciones de la nutrición de precisión y las tecnologías digitales en la evaluación y gestión del rendimiento deportivo</i>	146

Índice de Figuras

Figura 1 <i>Regulación metabólica y adaptación nutricional al ejercicio</i>	19
Figura 2 <i>Señalización molecular inducida por el ejercicio</i>	25
Figura 3 <i>Recambio proteico y adaptación muscular</i>	33
Figura 4 <i>Estrategias nutricionales para el rendimiento deportivo</i>	45
Figura 5 <i>Distribución temporal de macronutrientes y adaptación deportiva</i>	53
Figura 6 <i>Fundamentos de la suplementación ergogénica</i>	59
Figura 7 <i>Procesos fisiológicos de recuperación deportiva</i>	71
Figura 8 <i>Daño muscular y reparación nutricional</i>	79
Figura 9 <i>Sueño, nutrición y recuperación neuromuscular</i>	85
Figura 10 <i>Microbiota intestinal y adaptación fisiológica del deportista</i>	97
Figura 11 <i>Metabolitos microbianos y señalización energética</i>	105
Figura 12 <i>Nutrición e inmunidad durante el entrenamiento intensivo</i>	111
Figura 13 <i>Integración tecnológica para el rendimiento deportivo</i>	123
Figura 14 <i>Monitorización glucémica y regulación nutricional</i>	131
Figura 15 <i>Perfiles moleculares de adaptación al ejercicio</i>	137

Introducción

La relación entre nutrición y rendimiento deportivo ha experimentado una transformación significativa a partir del desarrollo de investigaciones sobre metabolismo energético y adaptación fisiológica al ejercicio. La alimentación interviene en procesos que regulan la disponibilidad de energía y la reparación de los tejidos sometidos a cargas físicas. Impey et al. (2018) analizaron la periodización de carbohidratos mediante un modelo teórico que relaciona la disponibilidad de glucógeno con las adaptaciones al entrenamiento. Tal perspectiva amplía la comprensión científica de las intervenciones nutricionales en el deporte.

La preparación deportiva contemporánea requiere examinar las respuestas del organismo ante cargas de entrenamiento variables y periodos de recuperación diferenciados. La diversidad de disciplinas plantea necesidades nutricionales relacionadas con la intensidad del esfuerzo y las características fisiológicas individuales. Jäger et al. (2017) documentaron la importancia de la ingesta proteica para favorecer las adaptaciones musculares asociadas al ejercicio. Por su parte, Kerksick et al. (2017) abordaron la distribución temporal de nutrientes y sus implicaciones para el rendimiento físico y la recuperación posterior al entrenamiento.

La recuperación deportiva constituye un proceso fisiológico complejo que involucra mecanismos metabólicos y respuestas celulares vinculadas con la restauración funcional del organismo. Su estudio adquiere relevancia ante la necesidad de comprender las relaciones entre alimentación y reparación tisular. Barclay et al. (2024) investigaron los efectos del colágeno hidrolizado y las proteínas lácteas sobre la recuperación posterior al ejercicio excéntrico. De manera complementaria, Doherty et al.

(2024) examinaron las relaciones entre nutrición y sueño en deportistas, ampliando el análisis de los procesos de recuperación.

La investigación nutricional también ha incorporado dimensiones relacionadas con la salud metabólica y la disponibilidad energética durante la práctica deportiva. Las restricciones alimentarias prolongadas pueden alterar funciones fisiológicas y comprometer la adaptación al entrenamiento. Mountjoy et al. (2023) desarrollaron un consenso internacional sobre la deficiencia energética relativa en el deporte y sus consecuencias para la salud y el rendimiento. Dicha contribución permite reconocer la necesidad de intervenciones nutricionales sustentadas en evidencia científica que consideren las particularidades biológicas de cada deportista.

Los avances en microbiología intestinal han ampliado las posibilidades de investigación sobre las interacciones entre alimentación y funcionamiento fisiológico durante el ejercicio. La microbiota participa en procesos metabólicos e inmunológicos que pueden relacionarse con la respuesta al entrenamiento. Pérez-Castillo et al. (2024) examinaron el conocimiento científico disponible sobre la microbiota intestinal del deportista y sus aplicaciones prácticas. Kearns et al. (2024) analizaron mediante una revisión sistemática la relación entre probióticos y manifestaciones gastrointestinales e inflamatorias asociadas con la actividad deportiva.

La incorporación de tecnologías analíticas ha favorecido una comprensión más detallada de la variabilidad individual frente a las intervenciones nutricionales. La monitorización fisiológica permite obtener información sobre determinadas respuestas metabólicas durante el ejercicio. Bedrač et al. (2024) revisaron las aplicaciones de las ciencias ómicas y los dispositivos portátiles en la nutrición de precisión para deportistas de resistencia. Mason et al. (2024) investigaron la utilización de monitores continuos de

glucosa en corredores recreativos sin diabetes, aportando evidencia sobre sus posibilidades de aplicación.

La pertinencia académica de la obra reside en integrar conocimientos procedentes de la fisiología del ejercicio y las ciencias de la nutrición mediante una perspectiva interdisciplinaria. Su objetivo general consiste en analizar los mecanismos nutricionales y fisiológicos relacionados con la recuperación y el rendimiento deportivo. Entre sus propósitos específicos figuran examinar la regulación metabólica y valorar las intervenciones alimentarias respaldadas por investigaciones científicas. También se busca identificar aplicaciones de las tecnologías de precisión para interpretar las diferencias individuales en la respuesta al entrenamiento.

El desarrollo conceptual parte de interrogantes orientadas a comprender la relación entre disponibilidad de nutrientes y adaptación fisiológica. ¿Qué mecanismos metabólicos intervienen en la respuesta del organismo ante diferentes cargas de ejercicio? ¿De qué manera la distribución temporal de nutrientes influye en la recuperación muscular? ¿Qué evidencia respalda la aplicación de estrategias nutricionales individualizadas? Gejl y Nybo (2021) aportaron elementos para abordar tales cuestiones mediante una revisión sistemática y metaanálisis sobre la restricción periodizada de carbohidratos en deportistas de resistencia.

La organización del libro responde a una secuencia temática que relaciona los procesos biológicos con sus aplicaciones nutricionales. El primer capítulo examina la regulación metabólica y las adaptaciones inducidas por el ejercicio. El segundo desarrolla estrategias nutricionales orientadas al rendimiento deportivo mediante el análisis de nutrientes y recursos ergogénicos. El tercer capítulo aborda la recuperación fisiológica y los mecanismos de reparación tisular. Las contribuciones de Guest et al. (2021) sobre cafeína y rendimiento permiten ampliar la discusión científica relativa a la suplementación deportiva.

El cuarto capítulo profundiza en las relaciones entre microbiota intestinal e inmunometabolismo mediante el estudio de sus posibles implicaciones fisiológicas. El quinto examina la nutrición de precisión y las tecnologías aplicadas a la evaluación del rendimiento. Malsagova et al. (2024) aportaron evidencia sobre perfiles metabolómicos y proteómicos en deportistas sometidos a actividad física bajo condiciones de hipoxia. La articulación de los cinco capítulos ofrece una perspectiva académica para interpretar la evidencia disponible y orientar la investigación nutricional aplicada al deporte.

Capítulo I

Regulación metabólica y adaptación nutricional al ejercicio

El rendimiento deportivo se construye mediante una interacción permanente entre las exigencias del entrenamiento y la capacidad del organismo para responder a ellas. Cada esfuerzo modifica procesos fisiológicos que intervienen en la producción de energía, la conservación de los tejidos y la recuperación funcional. La alimentación participa en dicha relación mediante mecanismos que trascienden el aporte inmediato de nutrientes. Comprender tales mecanismos permite examinar la preparación deportiva desde una perspectiva integradora, donde las respuestas metabólicas adquieren significado dentro del proceso adaptativo.

El metabolismo humano posee una notable capacidad para ajustar sus funciones ante variaciones de la actividad física. Sin embargo, dicha capacidad depende de condiciones biológicas que cambian entre individuos y momentos de la preparación. La disponibilidad de nutrientes interviene en la regulación de tales respuestas y puede modificar sus resultados. Smith y Betts (2022) examinan la relación entre el momento de la ingesta y la regulación metabólica, aportando elementos para comprender la interacción entre alimentación y ejercicio.

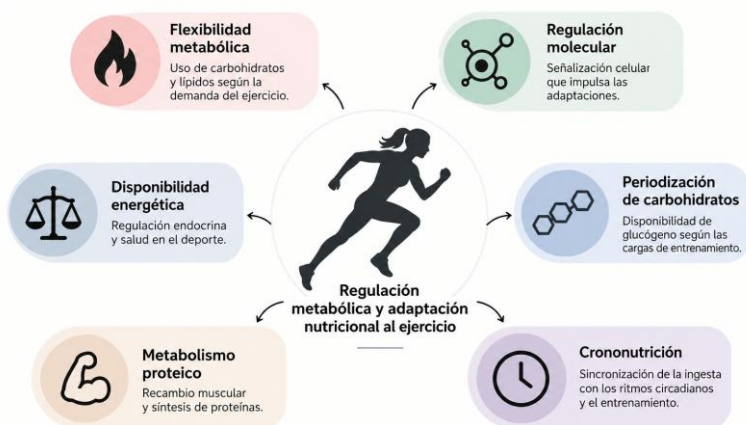
Las adaptaciones al entrenamiento comienzan mediante modificaciones celulares que responden a señales mecánicas y energéticas. Su desarrollo requiere continuidad, aunque cada sesión produce respuestas particulares que dependen del estímulo recibido. El organismo interpreta dichas señales dentro de un ambiente fisiológico influido por la alimentación y la recuperación. Desde una perspectiva aplicada, comprender la regulación molecular permite reconocer que las modificaciones funcionales observadas durante la preparación deportiva resultan de procesos acumulativos cuya expresión varía con las condiciones individuales.

La disponibilidad de carbohidratos constituye una variable relevante para interpretar las relaciones entre nutrición y entrenamiento. Su importancia depende de las exigencias físicas y de la organización de las cargas durante la preparación. Gejl y Nybo

(2021) analizaron los efectos de la restricción periodizada de carbohidratos sobre el rendimiento en deportistas de resistencia y encontraron evidencia insuficiente de beneficios superiores. Dicho resultado invita a distinguir las respuestas metabólicas inmediatas de las mejoras funcionales sostenidas.

Figura 1

Regulación metabólica y adaptación nutricional al ejercicio



La adaptación muscular también requiere una renovación constante de componentes estructurales y funcionales. Durante la preparación deportiva, el tejido responde a estímulos que modifican sus necesidades de mantenimiento y reparación. Jäger et al. (2017) destacan la importancia del aporte proteico para favorecer las adaptaciones al ejercicio y conservar la masa muscular. La regulación de dichos procesos depende de la interacción entre alimentación y entrenamiento, cuya continuidad determina buena parte de las modificaciones fisiológicas alcanzadas.

El equilibrio energético adquiere especial relevancia cuando las demandas deportivas aumentan durante períodos prolongados. Una ingesta insuficiente puede comprometer

funciones fisiológicas incluso cuando el rendimiento inmediato parece mantenerse. Mountjoy et al. (2023) describen las consecuencias multisistémicas del déficit energético relativo en el deporte y destacan su relación con alteraciones endocrinas y metabólicas. La valoración nutricional requiere, por tanto, considerar indicadores de salud que permitan reconocer posibles desequilibrios antes de que aparezcan manifestaciones clínicas persistentes.

La organización temporal de la alimentación introduce otra dimensión en la respuesta fisiológica al ejercicio. Los horarios de entrenamiento condicionan las oportunidades de consumo y pueden modificar las necesidades de recuperación entre sesiones. Kerkick et al. (2017) examinan la importancia de distribuir los nutrientes según las demandas del esfuerzo y los objetivos deportivos. Dicha perspectiva permite relacionar las decisiones alimentarias con la estructura cotidiana del entrenamiento, considerando también los períodos de descanso y las particularidades individuales.

Los procesos metabólicos examinados mantienen relaciones que dificultan interpretarlos de manera independiente. Una modificación en la disponibilidad energética puede influir en la respuesta hormonal y alterar las condiciones necesarias para la recuperación muscular. Del mismo modo, la distribución de nutrientes adquiere significados diferentes según las cargas previstas. Comprender tales interacciones requiere considerar la preparación deportiva como un proceso dinámico, donde las decisiones nutricionales deben responder a necesidades fisiológicas cambiantes y objetivos de entrenamiento definidos.

La investigación contemporánea ha ampliado el conocimiento sobre los mecanismos mediante los cuales la nutrición participa en las adaptaciones deportivas. Sin embargo, trasladar los hallazgos experimentales a situaciones reales exige reconocer diferencias metodológicas y respuestas individuales. Los

resultados obtenidos mediante indicadores celulares no siempre anticipan mejoras competitivas. Por ello, la interpretación científica debe mantener una relación prudente entre los mecanismos identificados y sus aplicaciones prácticas, evitando atribuir efectos universales a intervenciones evaluadas bajo condiciones particulares.

El presente capítulo examina los fundamentos fisiológicos que permiten comprender la regulación metabólica y su relación con la adaptación nutricional al ejercicio. Su desarrollo articula la utilización de combustibles energéticos con los mecanismos celulares y las condiciones alimentarias que influyen en la preparación deportiva. También considera la regulación endocrina y la organización temporal de la ingesta. La exposición busca establecer una base conceptual para interpretar decisiones nutricionales fundamentadas en las necesidades funcionales del deportista.

1.1. Flexibilidad metabólica y selección de sustratos energéticos según la intensidad y duración del esfuerzo físico

La flexibilidad metabólica representa la capacidad del organismo para modificar la utilización de combustibles energéticos según las exigencias del ejercicio. Su expresión depende de la interacción entre disponibilidad de nutrientes, actividad muscular y regulación hormonal. Durante el esfuerzo físico, los músculos ajustan continuamente la oxidación de carbohidratos y lípidos para sostener la producción de adenosín trifosfato. Dicha capacidad de adaptación permite responder a demandas energéticas cambiantes y constituye una propiedad funcional del metabolismo humano durante la actividad deportiva.

En condiciones de reposo y durante ejercicios de baja intensidad, la oxidación de ácidos grasos contribuye considerablemente al suministro energético muscular. La

disponibilidad de oxígeno favorece su aprovechamiento mediante procesos mitocondriales relativamente prolongados. Cuando aumenta la exigencia mecánica, la participación de los carbohidratos adquiere mayor relevancia debido a su capacidad para proporcionar energía con mayor rapidez. La transición entre combustibles ocurre gradualmente y responde tanto al reclutamiento muscular como al estado metabólico previo del deportista.

La intensidad del ejercicio modifica la distribución relativa de los sustratos mediante mecanismos vinculados con la contracción muscular y la regulación enzimática. A medida que aumenta la potencia desarrollada, se incrementa la glucogenólisis y adquiere protagonismo la oxidación de carbohidratos. Smith y Betts (2022) examinan la relación entre disponibilidad nutricional y regulación metabólica, una perspectiva pertinente para comprender dichas respuestas. La selección energética refleja, por tanto, una interacción dinámica entre demanda fisiológica y recursos disponibles durante el esfuerzo.

La duración introduce otra dimensión en la utilización de combustibles. Durante actividades prolongadas de intensidad moderada, la contribución relativa de los lípidos puede aumentar conforme disminuyen las reservas de glucógeno muscular. Sin embargo, dicha modificación depende del ritmo sostenido y de la disponibilidad de carbohidratos circulantes. El organismo mantiene una combinación variable de fuentes energéticas para preservar la continuidad contráctil. La fatiga puede aparecer cuando la provisión de energía deja de satisfacer las exigencias musculares.

El glucógeno muscular desempeña una función determinante durante esfuerzos intensos y actividades intermitentes que requieren aceleraciones repetidas. Su almacenamiento dentro de las fibras facilita el acceso inmediato a unidades de glucosa destinadas a la producción energética. Cuando

sus concentraciones disminuyen considerablemente, puede deteriorarse la capacidad para mantener determinadas intensidades de trabajo. La magnitud del efecto depende de las características del ejercicio y del estado de entrenamiento, además de la distribución intramuscular de dichas reservas.

La utilización de grasas también presenta límites fisiológicos relacionados con su movilización, transporte y oxidación mitocondrial. Aunque las reservas corporales de lípidos contienen abundante energía, su aprovechamiento requiere una secuencia metabólica relativamente compleja. Durante esfuerzos de elevada intensidad, la velocidad necesaria para regenerar ATP favorece una mayor dependencia de los carbohidratos. La disponibilidad de oxígeno y la capacidad oxidativa muscular condicionan dicha respuesta, especialmente cuando las exigencias energéticas cambian de manera repentina durante la competición.

El entrenamiento de resistencia modifica progresivamente la capacidad muscular para aprovechar diferentes combustibles. Entre sus adaptaciones destacan el aumento de la densidad mitocondrial, la actividad de enzimas oxidativas y la capacidad de transporte de ácidos grasos. Dichas modificaciones pueden favorecer una mayor oxidación lipídica ante cargas submáximas equivalentes. Sin embargo, una elevada utilización de grasas no garantiza automáticamente un rendimiento superior. La eficacia metabólica debe interpretarse considerando las necesidades específicas de cada disciplina deportiva y su intensidad.

La disponibilidad nutricional previa al ejercicio también modifica la selección de sustratos durante la actividad. Las concentraciones circulantes de glucosa y ácidos grasos influyen en las rutas metabólicas predominantes. Smith y Betts (2022) destacan la importancia de considerar el momento de ingesta dentro de la regulación metabólica vinculada con el ejercicio. Desde dicha perspectiva, la alimentación interviene en las condiciones

fisiológicas que preceden al esfuerzo y puede modificar las respuestas energéticas posteriores del tejido muscular activo.

Las diferencias individuales impiden establecer una distribución universal de combustibles para cada intensidad de ejercicio. El nivel de entrenamiento, la composición de las fibras musculares y las características hormonales contribuyen a modificar las respuestas metabólicas. También intervienen la disponibilidad energética reciente y las condiciones ambientales. Dos deportistas sometidos a una carga externa semejante pueden presentar proporciones diferentes de oxidación lipídica y glucídica. Por ello, la interpretación fisiológica requiere considerar la intensidad relativa del esfuerzo realizado.

La flexibilidad metabólica adquiere relevancia cuando se examina la relación entre exigencia deportiva y capacidad de respuesta energética. Un organismo adaptado puede ajustar la participación de los combustibles sin comprometer innecesariamente la continuidad del trabajo muscular. Smith y Betts (2022) permiten situar la regulación nutricional dentro de dicha interacción fisiológica. Comprender la selección de sustratos según intensidad y duración proporciona fundamentos para interpretar las respuestas individuales al ejercicio y sus implicaciones sobre el rendimiento deportivo.

1.2. Regulación molecular del metabolismo energético y señalización celular inducida por el ejercicio

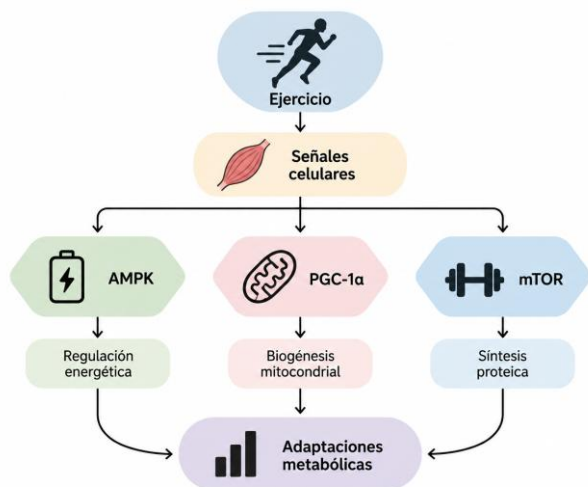
El ejercicio físico activa una red de señales intracelulares que permite transformar las demandas mecánicas en respuestas metabólicas específicas. Cada contracción modifica temporalmente el equilibrio energético de la fibra muscular y desencadena procesos de regulación enzimática. La magnitud de tales respuestas depende de la intensidad del esfuerzo y de su repetición. En consecuencia, la adaptación al entrenamiento comienza mucho antes de que

aparezcan cambios visibles en la estructura o capacidad funcional del músculo esquelético humano.

Entre los sensores celulares destaca la proteína quinasa activada por AMP, conocida como AMPK. Su actividad aumenta cuando se altera la relación entre nucleótidos energéticos durante la contracción. Una vez activada, favorece procesos que contribuyen a restaurar la disponibilidad de ATP y limita temporalmente ciertas rutas consumidoras de energía. Su respuesta tampoco es uniforme: intervienen la duración del ejercicio, el reclutamiento de fibras y las condiciones metabólicas existentes antes de iniciar cada sesión de entrenamiento.

Figura 2

Señalización molecular inducida por el ejercicio



El calcio liberado durante la contracción cumple funciones que trascienden la interacción entre actina y miosina. Sus variaciones intracelulares activan proteínas reguladoras capaces de modificar la expresión de genes vinculados con el metabolismo oxidativo. Entre ellas participan quinasas dependientes de calcio y otras moléculas sensibles a la frecuencia de estimulación muscular.

De manera gradual, la repetición de tales señales contribuye a consolidar adaptaciones que mejoran la capacidad de respuesta del tejido ante esfuerzos físicos posteriores.

La proteína PGC-1 α ocupa un lugar destacado en la coordinación de respuestas relacionadas con la biogénesis mitocondrial. Su regulación integra señales procedentes del estado energético y de la actividad contráctil. Aunque suele asociarse con el entrenamiento de resistencia, su comportamiento depende de múltiples factores fisiológicos. La expresión transitoria de genes no equivale necesariamente a una adaptación permanente. Para que ocurran cambios funcionales relevantes, las señales deben repetirse dentro de un proceso de entrenamiento y recuperación.

El contenido de glucógeno muscular también puede influir en la señalización desencadenada por una sesión. Betts et al. (2018) presentan un marco teórico que relaciona la disponibilidad de carbohidratos con las exigencias específicas del entrenamiento. Desde esa perspectiva, iniciar determinados esfuerzos con reservas reducidas podría modificar algunas respuestas moleculares. Sin embargo, la intensidad alcanzable y la calidad del trabajo también importan. Una señal celular más intensa no garantiza por sí misma mayores beneficios deportivos sostenidos.

Las rutas relacionadas con la síntesis proteica responden igualmente al estímulo físico. La señalización mediante mTOR participa en la regulación del crecimiento y la remodelación muscular, especialmente después de ejercicios de fuerza. Su actividad interactúa con la disponibilidad de aminoácidos y con otras señales generadas por la carga mecánica. Conviene distinguir la activación inmediata de una vía molecular del resultado acumulado del entrenamiento. El desarrollo muscular requiere tiempo y depende de procesos de renovación tisular.

Durante el esfuerzo también se generan especies reactivas de oxígeno que participan en la comunicación intracelular. En

concentraciones reguladas, tales moléculas intervienen en mecanismos de adaptación y defensa antioxidante. Su producción excesiva, en cambio, puede contribuir al daño celular cuando supera la capacidad de control del organismo. La respuesta depende del tipo de ejercicio y de la preparación fisiológica. Por ello, interpretar toda señal oxidativa como perjudicial conduciría a una comprensión incompleta del fenómeno fisiológico.

La disponibilidad de nutrientes modifica el entorno en que operan las rutas de señalización muscular. Betts et al. (2018) plantean que la periodización de carbohidratos debe relacionarse con el trabajo previsto y con los posibles efectos de entrenar bajo diferentes niveles de glucógeno. La propuesta requiere prudencia al trasladarse a la práctica. Una respuesta molecular favorable en condiciones experimentales puede coexistir con limitaciones para sostener la carga o recuperarse adecuadamente entre sesiones exigentes sucesivas programadas.

La comunicación entre músculo y otros tejidos amplía el alcance de la regulación inducida por el ejercicio. Las mioquinas liberadas durante la actividad participan en intercambios de información que afectan procesos fisiológicos. Paralelamente, las señales hormonales ajustan la movilización y utilización de nutrientes según las necesidades del organismo. Tales mecanismos operan simultáneamente y cambian durante la recuperación. Su coordinación ayuda a explicar por qué la adaptación deportiva involucra sistemas más amplios que el músculo activo.

Comprender la señalización celular permite interpretar las adaptaciones al entrenamiento sin reducirlas a un marcador molecular aislado. La respuesta observada después de una sesión representa un momento dentro de procesos biológicos más extensos. Betts et al. (2018) ofrecen una base conceptual para examinar la relación entre disponibilidad de glucógeno y estímulo de entrenamiento. La utilidad de tales conocimientos reside en vincular mecanismos celulares con resultados funcionales

verificables y necesidades concretas del deportista durante su preparación.

1.3. Periodización de carbohidratos y disponibilidad de glucógeno en las adaptaciones al entrenamiento

La periodización de carbohidratos constituye una estrategia nutricional orientada a ajustar su disponibilidad según las características de cada sesión de entrenamiento. Su fundamento reside en reconocer que las necesidades energéticas varían durante la preparación deportiva y que las reservas de glucógeno participan en la regulación de las respuestas musculares. La distribución alimentaria puede modificarse entre jornadas sin mantener una ingesta uniforme. Tal planteamiento requiere relacionar objetivos fisiológicos con cargas de trabajo y posibilidades reales de recuperación.

El glucógeno almacenado en el músculo representa una reserva energética cuya disponibilidad condiciona la ejecución de esfuerzos prolongados o intensos. Sus concentraciones cambian según el ejercicio realizado y la cantidad de carbohidratos consumidos posteriormente. Una recuperación incompleta puede modificar las condiciones metabólicas de la siguiente sesión. Sin embargo, las reservas reducidas no producen efectos idénticos en todas las circunstancias. Su influencia depende del entrenamiento previsto y de las exigencias energéticas propias de cada disciplina deportiva.

La planificación nutricional puede contemplar sesiones realizadas con diferentes niveles de glucógeno muscular. Algunas buscan garantizar una elevada disponibilidad de carbohidratos para sostener cargas exigentes. Otras introducen restricciones temporales con el propósito de modificar determinados estímulos adaptativos. Gejl y Nybo (2021) examinaron los efectos de tales estrategias sobre el rendimiento de deportistas entrenados en resistencia. Su revisión permite distinguir entre modificaciones

fisiológicas observadas y beneficios competitivos que requieren demostración mediante resultados funcionales consistentes.

Entrenar con disponibilidad reducida de carbohidratos puede intensificar determinadas respuestas asociadas con el metabolismo oxidativo. Entre ellas figuran modificaciones transitorias en la expresión de genes relacionados con la función mitocondrial. Sin embargo, la magnitud de dichas respuestas depende de las condiciones experimentales y del estado de entrenamiento. La activación molecular inmediata tampoco permite anticipar automáticamente mejoras del rendimiento. Por ello, cualquier interpretación debe considerar la distancia existente entre las señales celulares y las adaptaciones funcionales acumuladas.

La restricción de carbohidratos también puede comprometer la calidad de sesiones que requieren elevada producción de potencia. Cuando las reservas de glucógeno resultan insuficientes, mantener intensidades exigentes puede volverse especialmente difícil. La reducción del trabajo realizado modifica el estímulo que recibe el músculo y puede limitar determinados objetivos del entrenamiento. Gejl y Nybo (2021) encontraron que las estrategias de restricción periodizada no demostraron ventajas generales de rendimiento frente a una disponibilidad adecuada de carbohidratos.

La aplicación práctica de la periodización exige distinguir las sesiones prioritarias de aquellas destinadas a desarrollar capacidades específicas mediante cargas moderadas. Los entrenamientos interválicos intensos y las competiciones suelen requerir una disponibilidad suficiente de carbohidratos. En cambio, determinadas sesiones aeróbicas podrían admitir variaciones nutricionales cuidadosamente planificadas. La decisión depende de la duración del esfuerzo y de su ubicación dentro del programa semanal. También importa evitar que una intervención comprometa el entrenamiento posterior.

La recuperación del glucógeno entre sesiones depende principalmente de la cantidad de carbohidratos ingeridos y del tiempo disponible para su reposición. Cuando los entrenamientos se encuentran próximos, la distribución de las comidas adquiere mayor relevancia. En jornadas con intervalos amplios, una ingesta diaria suficiente puede permitir recuperar las reservas sin recurrir a procedimientos especiales. La planificación debe considerar además el volumen de trabajo acumulado y las necesidades individuales de cada deportista durante su preparación.

La respuesta a una estrategia de restricción periodizada presenta diferencias individuales que dificultan establecer protocolos universales. El historial deportivo y la tolerancia al entrenamiento influyen en sus posibles resultados. También intervienen la disponibilidad energética total y la frecuencia de las sesiones exigentes. Gejl y Nybo (2021) identificaron limitaciones en la evidencia disponible sobre mejoras del rendimiento. Dichos hallazgos respaldan una interpretación prudente de las intervenciones que buscan modificar las reservas de glucógeno muscular.

El seguimiento de la periodización requiere observar indicadores que permitan valorar sus efectos sobre el proceso de entrenamiento. La capacidad para completar las sesiones y la percepción del esfuerzo aportan información relevante. También conviene examinar la recuperación entre jornadas y la evolución del rendimiento específico. Las mediciones directas de glucógeno pueden resultar poco accesibles fuera de entornos especializados. Por ello, las decisiones nutricionales suelen apoyarse en registros alimentarios y respuestas funcionales observadas durante períodos definidos.

La periodización de carbohidratos adquiere sentido cuando responde a necesidades concretas del programa deportivo y mantiene una relación razonable entre estímulo y recuperación. Su aplicación no debería depender de la búsqueda indiscriminada

de sesiones con glucógeno reducido. Gejl y Nybo (2021) muestran que las ventajas competitivas de la restricción periodizada permanecen insuficientemente demostradas. La planificación nutricional requiere valorar cada intervención según sus efectos sobre la calidad del entrenamiento y el rendimiento deportivo posterior.

1.4. Metabolismo proteico, recambio muscular y regulación de la síntesis de proteínas durante la preparación deportiva

El metabolismo proteico muscular comprende procesos continuos de síntesis y degradación que permiten conservar la estructura del tejido y responder al entrenamiento. Ambas actividades ocurren simultáneamente, aunque sus velocidades cambian según la alimentación y el estímulo físico. El balance resultante influye en la conservación o modificación de la masa muscular. Durante la preparación deportiva, su regulación adquiere relevancia porque las fibras necesitan renovar componentes dañados y ajustar sus propiedades funcionales ante cargas progresivas de trabajo.

El ejercicio de fuerza estimula la síntesis de proteínas miofibrilares mediante señales asociadas con la tensión mecánica. La respuesta aparece después de la sesión y puede mantenerse elevada durante un período variable. Su duración depende de la experiencia del deportista y de las características del estímulo. Sin embargo, una respuesta aguda elevada no permite calcular la hipertrofia. El crecimiento muscular refleja la acumulación de adaptaciones durante semanas de entrenamiento acompañadas por recuperación y alimentación suficientes.

La disponibilidad de aminoácidos esenciales condiciona la respuesta sintética posterior al esfuerzo. Entre ellos, la leucina participa en la activación de mecanismos celulares relacionados con la construcción de proteínas. Jäger et al. (2017) destacan que la

calidad proteica y el aporte de aminoácidos influyen en la adaptación al ejercicio. Aun cuando ciertos aminoácidos cumplen funciones reguladoras, la formación de tejido requiere disponer del conjunto de componentes necesarios para sostener la síntesis muscular durante la recuperación.

El recambio proteico también participa en la reparación y reorganización de estructuras musculares sometidas a esfuerzos repetidos. La degradación de proteínas permite retirar componentes deteriorados y facilita su reemplazo mediante nuevas moléculas. Interpretar dicho proceso como una pérdida necesariamente perjudicial sería incorrecto. Su función depende del equilibrio mantenido con la síntesis. Durante períodos de entrenamiento intenso, las alteraciones transitorias de ambas tasas forman parte de una respuesta fisiológica compleja y variable entre deportistas en cada sesión.

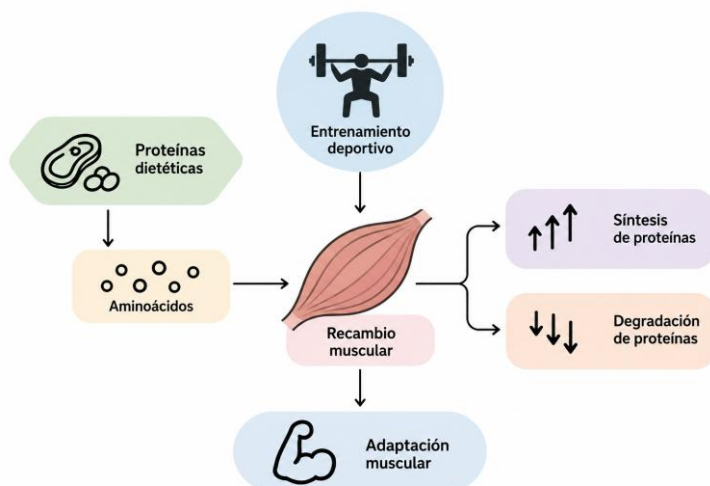
La cantidad diaria de proteína constituye una variable relevante para sostener las adaptaciones al entrenamiento. Jäger et al. (2017) plantean que una ingesta aproximada de 1,4 a 2,0 gramos por kilogramo de peso corporal al día resulta adecuada para numerosas personas físicamente activas. Las necesidades concretas dependen del objetivo deportivo y de la situación energética. El aporte alimentario debe evaluarse junto con la carga física de entrenamiento y las características individuales del atleta en preparación.

La distribución de proteínas entre comidas puede influir en la estimulación repetida de la síntesis muscular. Consumir cantidades adecuadas a lo largo del día facilita oportunidades sucesivas de disponibilidad de aminoácidos. Sin embargo, la respuesta no aumenta indefinidamente al incrementar cada porción. Jäger et al. (2017) consideran pertinente distribuir el consumo proteico durante la jornada. La utilidad práctica de tal organización depende también de la ingesta total y de los horarios habituales del deportista individual.

Las modalidades de resistencia producen adaptaciones proteicas que difieren parcialmente de las asociadas con el entrenamiento de fuerza. En ellas adquiere relevancia la renovación de proteínas mitocondriales y de otros componentes relacionados con la capacidad oxidativa. La síntesis muscular responde, por tanto, a funciones diversas que exceden el aumento de volumen. Cuando ambas modalidades conviven en un programa deportivo, la respuesta depende de las cargas aplicadas y de la recuperación disponible entre estímulos de entrenamiento.

Figura 3

Recambio proteico y adaptación muscular



La restricción energética puede dificultar la conservación del tejido muscular durante etapas de preparación deportiva. Una disponibilidad insuficiente de energía modifica el entorno hormonal y puede limitar procesos de reparación y crecimiento. En tales circunstancias, un aporte proteico adecuado adquiere especial interés, aunque no compensa todas las consecuencias de una alimentación deficitaria. El seguimiento de la composición corporal requiere considerar también el rendimiento, la recuperación y la salud del deportista a lo largo del proceso.

La procedencia alimentaria de las proteínas influye en su digestibilidad y en el perfil de aminoácidos aportado. Las fuentes animales y vegetales pueden contribuir a cubrir los requerimientos cuando la dieta se organiza adecuadamente. Jäger et al. (2017) destacan la relevancia de la calidad de las proteínas para favorecer las respuestas al ejercicio. La selección habitual de alimentos debe atender también a preferencias personales y tolerancia digestiva, evitando reducir la planificación a un producto específico.

La regulación del metabolismo proteico requiere interpretar conjuntamente las señales del entrenamiento y la disponibilidad de nutrientes. Ninguna comida determina por sí misma el desarrollo muscular ni una sesión aislada define la adaptación alcanzada. Los cambios observables dependen de estímulos repetidos y de períodos suficientes de recuperación. En la preparación deportiva, comprender el recambio muscular permite valorar las necesidades proteicas con criterios fisiológicos y relacionar las decisiones alimentarias con objetivos funcionales verificables a largo plazo.

1.5. Disponibilidad energética, regulación endocrina y consecuencias fisiológicas del déficit energético relativo en el deporte

La disponibilidad energética expresa la cantidad de energía alimentaria que permanece para sostener las funciones fisiológicas después de descontar el gasto asociado con el ejercicio. Su valoración considera la masa libre de grasa como referencia del tejido metabólicamente activo. Durante la preparación deportiva, dicho equilibrio puede modificarse por variaciones en la ingesta o por incrementos de las cargas. Cuando el aporte resulta persistentemente insuficiente, el organismo comienza a reorganizar funciones para conservar recursos energéticos disponibles.

El déficit energético relativo en el deporte constituye un síndrome asociado con alteraciones fisiológicas derivadas de una baja disponibilidad energética problemática. Mountjoy et al. (2023) explican que sus manifestaciones pueden afectar a deportistas de ambos sexos y de distintas disciplinas. La condición no requiere necesariamente una reducción evidente del peso corporal. En ocasiones, las modificaciones endocrinas y funcionales aparecen mientras la composición corporal permanece relativamente estable, dificultando su reconocimiento mediante observaciones superficiales durante el seguimiento deportivo.

La regulación endocrina responde de manera sensible a períodos prolongados de disponibilidad energética insuficiente. Entre las modificaciones posibles se encuentran alteraciones de hormonas tiroideas y señales relacionadas con el metabolismo energético. La reducción de determinadas funciones permite disminuir el gasto fisiológico, aunque puede comprometer procesos necesarios para el rendimiento. La magnitud de las respuestas depende de la duración del déficit y de las características individuales. No todos los deportistas presentan patrones hormonales idénticos ante restricciones semejantes.

El sistema reproductivo figura entre los procesos sensibles a una disponibilidad energética persistentemente reducida. En mujeres pueden aparecer alteraciones menstruales relacionadas con modificaciones de la regulación hipotalámica y ovárica. En hombres también pueden observarse cambios hormonales y reproductivos. Mountjoy et al. (2023) reconocen tales manifestaciones dentro del espectro clínico del déficit energético relativo. Su presencia requiere una evaluación cuidadosa, pues las alteraciones reproductivas pueden responder a causas diferentes de la restricción energética deportiva.

La salud ósea puede deteriorarse cuando la disponibilidad energética insuficiente afecta los mecanismos de formación y remodelación del tejido. Las modificaciones hormonales y

nutricionales alteran el equilibrio necesario para conservar su resistencia estructural. Con el tiempo, algunos deportistas presentan mayor susceptibilidad a lesiones óseas por estrés. Mountjoy et al. (2023) destacan la relevancia de reconocer dichas consecuencias dentro de la evaluación clínica. La ausencia de fracturas no descarta alteraciones tempranas del metabolismo óseo durante el entrenamiento.

La función inmunitaria también puede verse comprometida por una exposición prolongada a condiciones energéticas desfavorables. El organismo necesita recursos suficientes para mantener las respuestas defensivas y reparar tejidos sometidos a exigencias repetidas. Cuando la recuperación resulta incompleta, pueden aparecer manifestaciones compatibles con una menor tolerancia al entrenamiento. Sin embargo, las infecciones recurrentes tienen causas diversas. Su interpretación requiere considerar el descanso y otros factores clínicos antes de atribuirlos al déficit energético.

Las consecuencias del déficit energético relativo alcanzan también el funcionamiento psicológico y la conducta alimentaria. La preocupación persistente por el peso corporal puede coexistir con restricciones dietéticas que dificultan cubrir las necesidades del entrenamiento. Mountjoy et al. (2023) reconocen la interacción entre factores psicológicos y manifestaciones fisiológicas del síndrome. No obstante, una baja disponibilidad energética también puede producirse sin intención de restringir alimentos, especialmente cuando el gasto aumenta sin ajustes proporcionales de la ingesta habitual.

El rendimiento deportivo puede deteriorarse cuando la insuficiencia energética limita la capacidad de sostener las cargas programadas. Entre las manifestaciones posibles figuran menor resistencia al esfuerzo y dificultades para recuperar el funcionamiento muscular. La respuesta varía según la disciplina y el tiempo de exposición. Algunos deportistas mantienen

temporalmente resultados competitivos aceptables pese a presentar alteraciones fisiológicas. Por ello, el rendimiento inmediato no constituye un indicador suficiente para descartar consecuencias relacionadas con la disponibilidad energética reducida.

La identificación del síndrome requiere integrar información nutricional y clínica con antecedentes de entrenamiento. Mountjoy et al. (2023) proponen un enfoque de evaluación que considera diferentes indicadores de riesgo y gravedad. Ninguna medición aislada permite establecer con certeza todas las manifestaciones del déficit energético relativo. La valoración debe contemplar posibles diagnósticos alternativos y las particularidades del deportista. La participación coordinada de profesionales sanitarios facilita decisiones proporcionadas a las necesidades detectadas durante el seguimiento individual.

La prevención del déficit energético relativo exige mantener una correspondencia razonable entre las demandas deportivas y el aporte alimentario disponible. Las modificaciones del entrenamiento deben acompañarse de una valoración periódica de las necesidades energéticas y del estado de salud. Mountjoy et al. (2023) destacan la importancia de abordar sus consecuencias mediante estrategias individualizadas. Preservar las funciones endocrinas y metabólicas permite sostener procesos de adaptación compatibles con una preparación deportiva segura y fisiológicamente sostenible.

1.6. Crononutrición y sincronización de la ingesta alimentaria con los ritmos circadianos y las cargas de entrenamiento

La crononutrición examina la relación entre los horarios de alimentación y los procesos biológicos que organizan el metabolismo durante el día. En el deporte, dicha relación adquiere particular interés porque las sesiones de entrenamiento modifican

las necesidades nutricionales en momentos específicos. La respuesta del organismo depende tanto de los nutrientes consumidos como del momento de su administración. Comprender dicha interacción permite organizar las comidas respetando las exigencias físicas y patrones habituales de descanso del deportista.

Los ritmos circadianos coordinan variaciones periódicas en la secreción hormonal, la temperatura corporal y el aprovechamiento de nutrientes. Su regulación depende de un sistema central sensible a la luz y de relojes periféricos presentes en distintos tejidos. Los horarios alimentarios pueden actuar como señales temporales para algunos de dichos relojes. Cuando las rutinas cambian constantemente, la coordinación metabólica puede alterarse. Sin embargo, la magnitud de sus efectos deportivos todavía requiere investigaciones específicas y comparaciones rigurosas.

La tolerancia a la glucosa y la sensibilidad a la insulina presentan variaciones relacionadas con la hora biológica. Tales diferencias pueden modificar la respuesta metabólica ante comidas de composición semejante. En deportistas, el ejercicio añade un estímulo capaz de influir en la captación muscular de glucosa. Por ello, las respuestas observadas en personas sedentarias no pueden trasladarse automáticamente al entrenamiento. La planificación debe considerar el horario de actividad y las necesidades reales de recuperación energética.

La alimentación previa al entrenamiento influye en la disponibilidad de energía y en la comodidad gastrointestinal durante el esfuerzo. Kerkick et al. (2017) describen la importancia del momento de ingesta de nutrientes para apoyar determinadas demandas del ejercicio. La distancia entre una comida y la sesión debe ajustarse a su composición y al grado de tolerancia individual. Un intervalo adecuado puede facilitar la digestión sin comprometer el aporte energético requerido para completar el trabajo previsto.

Durante sesiones extensas, la ingesta de carbohidratos puede contribuir a mantener la disponibilidad de combustible y la capacidad de trabajo. Su utilidad depende principalmente de la duración e intensidad del ejercicio. El horario circadiano no elimina dichas necesidades inmediatas. Cuando una sesión coincide con horas destinadas habitualmente al descanso, aparecen dificultades adicionales para organizar alimentos y líquidos. La estrategia nutricional debe responder a esas condiciones sin introducir molestias que interfieran con el desempeño físico sostenido.

Después del ejercicio, la organización de las comidas adquiere relevancia cuando existe poco tiempo antes de una nueva sesión. Kerksick et al. (2017) analizan la relación entre distribución de nutrientes y recuperación posterior al esfuerzo. La reposición de carbohidratos y el consumo de proteínas pueden planificarse según la proximidad del siguiente entrenamiento. En cambio, cuando existe suficiente tiempo de recuperación, la ingesta diaria completa mantiene una importancia determinante para sostener las adaptaciones fisiológicas buscadas.

El entrenamiento nocturno plantea dificultades particulares porque puede retrasar la cena y modificar los horarios habituales de sueño. Evitar alimentos después de una sesión exigente podría dificultar la recuperación si impide cubrir los requerimientos diarios. Por otra parte, consumir comidas muy abundantes inmediatamente antes de acostarse puede generar molestias en personas susceptibles. La elección del tamaño y composición de la ingesta requiere equilibrar necesidades nutricionales, tolerancia digestiva y descanso efectivo durante toda la noche deportiva.

Los desplazamientos entre husos horarios alteran temporalmente la correspondencia entre los ritmos internos y las actividades programadas. En competiciones internacionales, los cambios de horario afectan las oportunidades de alimentación y pueden coincidir con modificaciones del sueño. La exposición a la

luz y la regularidad de las rutinas ayudan a reorganizar progresivamente los ritmos biológicos. Los horarios de comida pueden acompañar dicho ajuste, aunque su eficacia específica sobre el rendimiento necesita todavía mayor respaldo experimental.

Las diferencias individuales condicionan la aplicación de estrategias crononutricionales. El cronotipo, las obligaciones laborales y la hora habitual de entrenamiento influyen en la organización alimentaria. Kerksick et al. (2017) señalan que la distribución temporal de nutrientes debe interpretarse junto con las necesidades de ejercicio y recuperación. Una pauta rígida puede resultar poco viable cuando el deportista alterna sesiones matutinas y vespertinas. La regularidad resulta útil siempre que permita cubrir las demandas nutricionales individuales correspondientes.

La sincronización alimentaria requiere integrar los ritmos diarios con las exigencias concretas de cada etapa deportiva. Los horarios de comida pueden favorecer una organización coherente de la ingesta, aunque todavía existen incertidumbres sobre sus efectos independientes en el rendimiento. La evidencia sobre distribución de nutrientes no demuestra por sí misma beneficios derivados de modificar el reloj circadiano. Conviene valorar las decisiones mediante indicadores de recuperación, tolerancia y cumplimiento del entrenamiento durante períodos de seguimiento prolongados.

Tabla 1

Regulación metabólica y adaptación nutricional durante la preparación deportiva

Componente fisiológico y nutricional	Fundamentos y aplicaciones en el entrenamiento deportivo
Flexibilidad metabólica y selección de sustratos energéticos	La utilización de carbohidratos y lípidos varía según la intensidad y duración del ejercicio. La capacidad oxidativa muscular y la disponibilidad de nutrientes condicionan la selección de combustibles.
Regulación molecular y señalización celular	La contracción muscular activa rutas de señalización como AMPK y mTOR. Dichos mecanismos intervienen en la regulación energética y las adaptaciones celulares inducidas por el entrenamiento.
Periodización de carbohidratos y disponibilidad de glucógeno	La distribución de carbohidratos responde a las exigencias de cada sesión. Una disponibilidad reducida de glucógeno puede modificar determinadas señales adaptativas, aunque no garantiza mejoras adicionales del rendimiento.
Metabolismo proteico y recambio muscular	El equilibrio entre síntesis y degradación proteica interviene en la reparación y remodelación muscular. El aporte adecuado de proteínas favorece la recuperación y las adaptaciones funcionales.
Disponibilidad energética y regulación endocrina	El aporte energético insuficiente puede alterar funciones hormonales y comprometer la salud ósea. El déficit energético relativo afecta diversos sistemas fisiológicos y puede perjudicar el rendimiento deportivo.
Crononutrición y ritmos circadianos	La organización temporal de las comidas considera los horarios de entrenamiento y los períodos de descanso. La distribución de nutrientes puede facilitar la recuperación y responder a las necesidades energéticas de cada jornada.

Nota. Elaboración basada en Smith y Betts (2022), Gejl y Nybo (2021), Jäger et al. (2017), Mountjoy et al. (2023) y Kerksick et al. (2017). Los contenidos presentan los principales mecanismos fisiológicos y criterios nutricionales abordados en el capítulo.

Capítulo II

Estrategias nutricionales para la optimización del rendimiento deportivo

-

La búsqueda de un rendimiento deportivo sostenido exige comprender la alimentación como parte de los procesos fisiológicos que acompañan el entrenamiento y la competición. Cada decisión nutricional adquiere significado cuando responde a necesidades identificables y se relaciona con las condiciones particulares del esfuerzo. La diversidad de disciplinas impide establecer pautas igualmente eficaces para todos los deportistas. Desde tal perspectiva, las estrategias nutricionales requieren fundamentos científicos que permitan interpretar las respuestas orgánicas sin desconocer la complejidad de la práctica deportiva.

La evolución de la nutrición deportiva ha favorecido una comprensión más detallada de las relaciones entre alimentación y adaptación al ejercicio. Las recomendaciones generales conservan utilidad como referencias iniciales, pero presentan limitaciones frente a diferencias individuales significativas. Jäger et al. (2017) examinan la relación entre el aporte proteico y las demandas del entrenamiento, destacando la importancia de considerar las características del ejercicio. Tal aproximación permite comprender que las necesidades nutricionales deben interpretarse mediante criterios fisiológicos y objetivos deportivos definidos.

El organismo responde al entrenamiento mediante modificaciones que afectan la utilización de energía y los mecanismos de recuperación. Tales respuestas dependen de la intensidad del trabajo y de las condiciones en que se desarrolla la actividad. La planificación nutricional necesita reconocer dicha variabilidad para acompañar los procesos adaptativos. Una pauta alimentaria adecuada durante determinada etapa puede requerir modificaciones cuando cambian las exigencias competitivas. La observación sistemática adquiere valor al relacionar las decisiones nutricionales con resultados funcionales verificables.

La organización de la ingesta alimentaria representa otra dimensión relevante para comprender las respuestas al esfuerzo. El momento de consumo puede adquirir importancia cuando las

sesiones presentan intervalos reducidos o demandas energéticas elevadas. Kerkicks et al. (2017) analizan la distribución temporal de nutrientes y sus posibles efectos sobre el rendimiento y la recuperación. Sus aportaciones permiten examinar la alimentación desde una perspectiva dinámica, donde las oportunidades de consumo se relacionan con las características del trabajo físico realizado.

Figura 4
Estrategias nutricionales para el rendimiento deportivo



Las condiciones ambientales también intervienen en la relación entre nutrición y desempeño deportivo. El ejercicio modifica la producción de calor y exige mecanismos capaces de preservar el equilibrio interno. La disponibilidad de líquidos y electrolitos participa en tales procesos, particularmente durante actividades prolongadas o desarrolladas bajo temperaturas elevadas. Su valoración requiere reconocer diferencias individuales que pueden cambiar durante la preparación deportiva. El ambiente deja de ser una circunstancia secundaria cuando modifica las demandas fisiológicas del organismo activo.

El interés por mejorar el rendimiento ha impulsado igualmente la investigación sobre sustancias capaces de modificar determinadas respuestas fisiológicas. Sin embargo, la utilización de ayudas ergogénicas requiere distinguir beneficios comprobados de expectativas comerciales. Kreider et al. (2017) presentan evidencia sobre la eficacia y seguridad de la suplementación con creatina en diferentes condiciones de ejercicio. Su análisis demuestra la necesidad de valorar cada intervención mediante resultados reproducibles y criterios de seguridad compatibles con la salud deportiva.

La competición exige capacidades que trascienden la ejecución muscular. Mantener la atención y responder ante situaciones cambiantes puede determinar el resultado de una acción deportiva. La nutrición participa en el estudio de tales exigencias mediante intervenciones orientadas a determinadas funciones del sistema nervioso. Guest et al. (2021) examinan los efectos de la cafeína sobre el rendimiento físico y diversas respuestas cognitivas. Sus hallazgos invitan a considerar beneficios potenciales junto con diferencias individuales y limitaciones metodológicas.

Las diferencias entre deportistas adquieren mayor profundidad cuando se examinan los mecanismos moleculares relacionados con la respuesta alimentaria. La investigación contemporánea permite estudiar variaciones genéticas y metabólicas que intervienen en procesos de adaptación. Bedrač et al. (2024) analizan las posibilidades de integrar tecnologías ómicas y dispositivos portátiles en la nutrición deportiva de precisión. Aunque tales herramientas amplían las oportunidades de investigación, su aplicación requiere comprobar la utilidad práctica de los datos obtenidos.

La incorporación de nuevos conocimientos plantea responsabilidades metodológicas y profesionales. Una asociación estadística no garantiza que determinada intervención produzca

beneficios deportivos relevantes. Tampoco resulta adecuado trasladar automáticamente resultados experimentales a poblaciones con características diferentes. La calidad de la evidencia debe examinarse junto con las condiciones de aplicación y los posibles efectos adversos. El criterio profesional adquiere especial importancia cuando existen resultados contradictorios o información insuficiente para establecer recomendaciones nutricionales individualizadas con respaldo científico verificable.

El desarrollo de estrategias nutricionales orientadas al rendimiento requiere articular conocimientos fisiológicos con observaciones procedentes de la práctica deportiva. La evaluación individual y la interpretación crítica de la evidencia permiten fundamentar decisiones adaptadas a exigencias cambiantes. Desde tal enfoque, el capítulo aborda dimensiones complementarias de la intervención nutricional y sus relaciones con el desempeño humano. La atención se dirige hacia procedimientos que favorezcan respuestas funcionales pertinentes sin desvincular los objetivos competitivos del bienestar del deportista.

2.1. Individualización de los requerimientos nutricionales mediante indicadores fisiológicos, metabólicos y funcionales

La individualización de los requerimientos nutricionales constituye un proceso de evaluación continua que relaciona las necesidades del organismo con las exigencias particulares de cada disciplina deportiva. Su aplicación requiere reconocer diferencias en composición corporal, capacidad de adaptación y respuesta al esfuerzo. Dos deportistas sometidos a cargas semejantes pueden presentar demandas nutricionales distintas debido a sus características fisiológicas. Por ello, la planificación alimentaria debe apoyarse en indicadores verificables que permitan ajustar las intervenciones según las respuestas individuales observadas durante el entrenamiento.

Los indicadores fisiológicos proporcionan información sobre el funcionamiento orgánico y su capacidad para responder a diferentes estímulos deportivos. Entre las variables de mayor utilidad destacan la masa corporal, la composición de los tejidos y las modificaciones asociadas al entrenamiento. Su interpretación exige considerar el momento de la temporada y las características de cada especialidad. Una variación ponderal adquiere significado cuando se relaciona con otros parámetros que permiten distinguir adaptaciones favorables de posibles alteraciones del equilibrio nutricional del deportista evaluado.

La evaluación metabólica permite comprender las diferencias individuales en la utilización de nutrientes durante el ejercicio y los periodos de recuperación. El gasto energético, la disponibilidad de sustratos y las respuestas bioquímicas ofrecen información relevante para estimar necesidades alimentarias. Sin embargo, ningún indicador aislado describe completamente el estado metabólico. La interpretación conjunta de diversas mediciones favorece decisiones más precisas y evita atribuir significado clínico a fluctuaciones transitorias relacionadas con el esfuerzo físico o las condiciones de evaluación nutricional.

La disponibilidad de proteínas adquiere particular relevancia cuando se examinan los procesos de adaptación muscular. Jäger et al. (2017) describen que las necesidades proteicas de quienes practican ejercicio regularmente pueden superar las recomendaciones destinadas a poblaciones sedentarias. Su determinación requiere valorar la modalidad deportiva, el volumen de entrenamiento y los objetivos individuales. También importa considerar la distribución diaria del consumo, pues la respuesta muscular depende de diversos factores fisiológicos que modifican el aprovechamiento de los aminoácidos ingeridos durante el día.

Los indicadores funcionales permiten relacionar la valoración nutricional con manifestaciones concretas del desempeño deportivo. La fuerza muscular, la resistencia al esfuerzo

y la capacidad para mantener intensidades determinadas aportan información sobre la respuesta del organismo. Su utilidad aumenta cuando las mediciones siguen protocolos reproducibles y condiciones comparables. Una disminución persistente del rendimiento puede justificar una revisión alimentaria, aunque también requiere examinar factores relacionados con el descanso, la carga física y las condiciones generales de salud del deportista evaluado.

La interpretación de los indicadores nutricionales requiere atender las variaciones que experimenta el organismo durante diferentes etapas del entrenamiento. Los periodos de preparación intensiva pueden modificar el apetito, el gasto energético y la respuesta metabólica. En cambio, las fases de menor actividad presentan exigencias distintas. Mantener cantidades alimentarias invariables durante toda la temporada puede generar desequilibrios. La evaluación periódica permite reconocer tales modificaciones y establecer ajustes proporcionados a las necesidades fisiológicas que manifiesta cada deportista durante su preparación.

La respuesta individual al consumo proteico también merece atención dentro del seguimiento nutricional. Según Jäger et al. (2017), la cantidad ingerida y su distribución entre las comidas pueden influir en la síntesis de proteínas musculares. Sin embargo, la aplicación de sus recomendaciones requiere examinar las características del deportista y las demandas del entrenamiento. La valoración funcional contribuye a determinar si la estrategia alimentaria acompaña las adaptaciones esperadas sin recurrir a incrementos indiscriminados del aporte nutricional diario.

Los parámetros bioquímicos complementan la evaluación fisiológica cuando existen motivos para investigar posibles insuficiencias nutricionales o alteraciones metabólicas. Su selección debe responder a preguntas clínicas concretas y considerar las condiciones previas a la extracción. El ejercicio

reciente, la hidratación y determinadas variaciones biológicas pueden modificar los resultados. Por consiguiente, las concentraciones sanguíneas necesitan interpretarse junto con la historia alimentaria y los hallazgos funcionales. Tal integración reduce errores derivados de mediciones aisladas y favorece intervenciones nutricionales justificadas clínicamente.

La individualización también exige reconocer diferencias relacionadas con la edad, el sexo y la trayectoria deportiva. Las modificaciones hormonales, el desarrollo corporal y la experiencia de entrenamiento influyen en las necesidades nutricionales y en la interpretación de determinados indicadores. A ello se añaden las particularidades de cada deportista respecto al apetito, la tolerancia digestiva y los horarios disponibles para alimentarse. Una valoración rigurosa incorpora tales circunstancias sin perder de vista los objetivos fisiológicos que orientan la intervención nutricional personalizada.

La integración de indicadores fisiológicos, metabólicos y funcionales permite construir perfiles nutricionales que evolucionan conforme cambian las condiciones del deportista. Jäger et al. (2017) destacan la importancia de relacionar el aporte proteico con las demandas del ejercicio y los procesos de adaptación muscular. Desde una perspectiva aplicada, las decisiones alimentarias requieren seguimiento y revisión mediante mediciones pertinentes. La calidad de la individualización depende de interpretar tendencias consistentes y reconocer cuándo resulta necesario modificar las pautas nutricionales previamente establecidas.

2.2. Distribución temporal de macronutrientes y respuestas adaptativas en diferentes modalidades deportivas

La distribución temporal de macronutrientes permite vincular la alimentación con las exigencias del entrenamiento y la

competición. Su utilidad depende de identificar los momentos en que el organismo necesita disponer de energía o favorecer procesos de recuperación. La cantidad diaria consumida conserva una importancia central, aunque el horario de ingesta puede modificar algunas respuestas fisiológicas. Por ello, organizar las comidas requiere atender la modalidad deportiva, la duración del esfuerzo y la frecuencia de las sesiones programadas.

En las disciplinas de resistencia, la disponibilidad de carbohidratos adquiere relevancia durante esfuerzos prolongados. Una ingesta previa adecuada contribuye a iniciar la actividad con reservas energéticas suficientes, mientras que el aporte durante determinadas sesiones ayuda a sostener el trabajo muscular. Kerksick et al. (2017) destacan que la oportunidad del consumo de nutrientes debe valorarse según la duración y las características del ejercicio. La planificación considera la tolerancia gastrointestinal, especialmente cuando existen competiciones de varias horas consecutivas.

La recuperación entre sesiones cercanas plantea necesidades diferentes de las observadas cuando existe un descanso prolongado. Tras un ejercicio que reduce las reservas de glucógeno, consumir carbohidratos tempranamente puede favorecer su reposición. Tal medida adquiere mayor interés cuando el deportista debe volver a entrenar en pocas horas. Kerksick et al. (2017) relacionan la oportunidad de la ingesta con la rapidez requerida para recuperar la disponibilidad energética. La urgencia disminuye cuando el intervalo permite completar una alimentación suficiente.

En los deportes de fuerza, el reparto de proteínas a lo largo del día ofrece una vía práctica para acompañar las adaptaciones musculares. El entrenamiento genera estímulos cuya respuesta depende de la disponibilidad de aminoácidos. Kerksick et al. (2017) examinan la ingesta proteica cercana al ejercicio como parte de una estrategia nutricional más amplia. Sin embargo, concentrar toda la

atención en una comida posterior puede restar importancia al aporte total y a su distribución cotidiana.

Las modalidades intermitentes combinan aceleraciones intensas con periodos de actividad moderada y pausas breves. Tal alternancia modifica el uso de sustratos y exige considerar tanto la preparación energética como la recuperación posterior. En deportes colectivos, además, los horarios de competición pueden desplazar las comidas habituales. Conviene organizar ingestas que permitan llegar al encuentro con comodidad digestiva y suficiente disponibilidad de carbohidratos. La planificación debe adaptarse a los minutos efectivos de participación y al calendario competitivo.

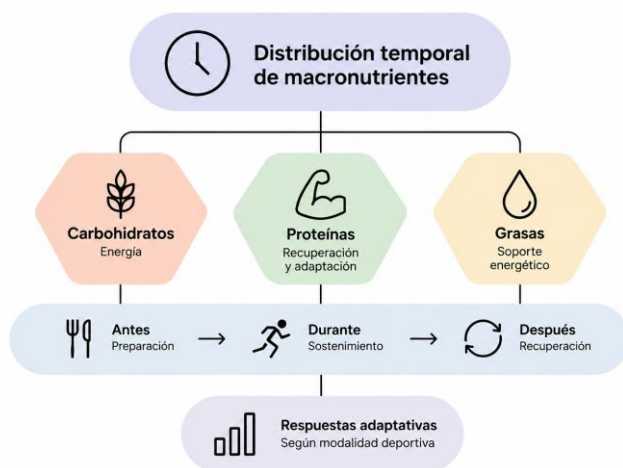
La alimentación previa al ejercicio requiere equilibrar disponibilidad energética y tolerancia digestiva. El tamaño de la comida, su composición y el tiempo restante hasta la actividad condicionan la respuesta individual. Los alimentos ricos en grasa suelen retrasar el vaciamiento gástrico, circunstancia relevante antes de esfuerzos exigentes. No obstante, evitar molestias no implica establecer restricciones idénticas para todos. Los ensayos durante el entrenamiento permiten identificar combinaciones y horarios compatibles con el desempeño de cada deportista en competición.

Durante el ejercicio, la conveniencia de ingerir nutrientes depende principalmente de su duración e intensidad. En sesiones breves puede resultar innecesario incorporar energía adicional, mientras que las pruebas prolongadas requieren valorar el suministro de carbohidratos. Kerkick et al. (2017) señalan beneficios potenciales de determinadas estrategias temporales cuando las demandas del esfuerzo justifican su aplicación. La decisión debe contemplar también la facilidad de consumo y la respuesta digestiva, factores capaces de limitar una pauta teóricamente adecuada.

La función de las grasas dentro de la planificación temporal presenta particularidades. Su contribución energética resulta importante en numerosas actividades, pero aumentar su consumo inmediatamente antes del esfuerzo no garantiza una mejora del rendimiento. En cambio, mantener una ingesta cotidiana apropiada favorece la cobertura de necesidades energéticas y nutricionales. La organización de comidas debe evitar que preparaciones muy grasas dificulten la tolerancia previa al entrenamiento. Importa preservar una alimentación suficiente sin atribuir efectos inmediatos a cada macronutriente.

Figura 5

Distribución temporal de macronutrientes y adaptación deportiva



Los entrenamientos realizados en distintos momentos del día plantean ajustes prácticos. Una sesión matutina puede limitar el tiempo disponible para desayunar, mientras que una actividad nocturna obliga a reconsiderar la cena y el descanso. Cuando se programan dos sesiones diarias, la alimentación entre ambas adquiere mayor relevancia. Kerkick et al. (2017) destacan que la secuencia de ingestas puede apoyar la recuperación bajo

determinadas condiciones. La organización debe resultar viable dentro de las rutinas del deportista.

La eficacia de una estrategia temporal se aprecia mediante su relación con la calidad del entrenamiento y la recuperación entre esfuerzos. Registrar horarios, cantidades y tolerancia permite detectar patrones que merecen ajustes. Las respuestas no permanecen constantes durante toda la temporada, pues cambian las cargas y las oportunidades de alimentación. Por tanto, la distribución de macronutrientes requiere revisiones periódicas sustentadas en resultados observables. Su valor reside en facilitar decisiones compatibles con las demandas de cada disciplina deportiva.

2.3. Hidratación de precisión, equilibrio electrolítico y regulación de la termorregulación durante el ejercicio

La hidratación de precisión responde a la necesidad de ajustar el aporte de líquidos a las pérdidas individuales producidas durante el ejercicio. Su aplicación requiere considerar la intensidad del esfuerzo, las condiciones ambientales y las características fisiológicas del deportista. La regulación hídrica participa directamente en el mantenimiento del volumen sanguíneo y la disipación del calor corporal. Cuando dicho equilibrio se altera, pueden aparecer modificaciones cardiovasculares y térmicas que comprometen la capacidad de sostener esfuerzos físicos prolongados.

La producción de sudor constituye uno de los principales mecanismos de eliminación del calor generado por la actividad muscular. Su magnitud varía considerablemente entre individuos y puede modificarse según la aclimatación térmica. La evaporación del sudor favorece el enfriamiento corporal, aunque su eficacia disminuye cuando aumenta la humedad ambiental. Por ello, estimar las pérdidas hídricas exige considerar tanto las

características del ejercicio como las condiciones que determinan la transferencia de calor hacia el ambiente exterior.

La estimación de la tasa de sudoración permite establecer referencias prácticas para organizar el consumo de líquidos. El procedimiento puede apoyarse en las diferencias de masa corporal registradas antes y después del ejercicio, considerando las bebidas ingeridas y las pérdidas urinarias. Sin embargo, una medición aislada presenta limitaciones debido a las variaciones ambientales y fisiológicas. Repetir las evaluaciones bajo condiciones representativas facilita reconocer patrones individuales y ajustar progresivamente las cantidades destinadas a la reposición hídrica.

El equilibrio electrolítico depende de mecanismos que regulan la distribución de minerales entre los compartimentos corporales. El sodio desempeña una función destacada en el mantenimiento del volumen extracelular y la transmisión nerviosa. Durante la sudoración se producen pérdidas cuya magnitud varía según la concentración individual del sudor. La reposición debe considerar tales diferencias, especialmente en actividades prolongadas. Consumir cantidades excesivas de agua sin atender el equilibrio mineral puede favorecer alteraciones de la concentración sanguínea de sodio.

La termorregulación durante el ejercicio exige una coordinación permanente entre la circulación sanguínea y los mecanismos de intercambio térmico. Cuando aumenta la temperatura corporal, el organismo incrementa el flujo sanguíneo cutáneo para facilitar la eliminación del calor. Dicho proceso puede competir con las demandas circulatorias de los músculos activos. La reducción del volumen plasmático asociada a pérdidas hídricas importantes intensifica tal exigencia. Su repercusión depende de la duración del esfuerzo y del ambiente.

Las estrategias de hidratación previas al ejercicio buscan favorecer un estado hídrico adecuado sin provocar molestias

digestivas ni una eliminación urinaria excesiva. La valoración puede incorporar cambios recientes de masa corporal, características de la orina y antecedentes de consumo de líquidos. Ninguna de tales observaciones resulta concluyente por separado. Su interpretación conjunta permite reconocer situaciones que requieren atención. El propósito consiste en iniciar la actividad con condiciones fisiológicas compatibles con las demandas térmicas y circulatorias previstas.

Durante las sesiones prolongadas, la ingesta de líquidos debe relacionarse con las oportunidades reales de consumo y las pérdidas esperadas. La sensación de sed aporta información fisiológica relevante, aunque su utilidad puede variar según las circunstancias deportivas. Los programas rígidos presentan limitaciones cuando ignoran diferencias individuales en sudoración. También resulta necesario evitar una reposición que exceda las pérdidas. El seguimiento del deportista permite ajustar las cantidades sin perseguir una sustitución exacta e inmediata.

La aclimatación al calor modifica progresivamente las respuestas sudorales y cardiovasculares durante exposiciones repetidas. Entre las adaptaciones pueden observarse un inicio más temprano de la sudoración y una mayor eficiencia circulatoria. Tales cambios alteran las necesidades de reposición hídrica y electrolítica. Por consiguiente, las pautas utilizadas al comenzar una temporada pueden requerir modificaciones posteriores. La evaluación debe reconocer que la adaptación térmica depende de la exposición acumulada y de las características individuales del entrenamiento.

La recuperación del equilibrio hídrico después del ejercicio requiere valorar las pérdidas acumuladas y el tiempo disponible antes de una nueva sesión. El consumo de bebidas acompañado de alimentos puede contribuir a recuperar líquidos y electrolitos. Jäger et al. (2017) abordan principalmente la relación entre proteínas y adaptación muscular, por lo que sus aportaciones no permiten

establecer pautas específicas de hidratación. Distinguir ambos procesos evita atribuir recomendaciones hídricas a investigaciones centradas en otros componentes nutricionales.

La integración de mediciones de sudoración, condiciones ambientales y respuestas funcionales permite perfeccionar las decisiones relacionadas con la hidratación deportiva. Su aplicación requiere procedimientos accesibles y registros suficientemente consistentes para identificar variaciones relevantes. La tolerancia digestiva y la disponibilidad de bebidas también condicionan la ejecución de las pautas. Una estrategia individualizada debe preservar el equilibrio hídrico y electrolítico mientras favorece la regulación térmica. Su ajuste continuo responde a las exigencias reales del entrenamiento deportivo.

2.4. Suplementación ergogénica basada en evidencia: mecanismos de acción, eficacia y seguridad

La suplementación ergogénica requiere distinguir entre efectos fisiológicos demostrados y beneficios atribuidos mediante argumentos comerciales. Su valoración comienza por identificar el mecanismo de acción y la magnitud de las mejoras observadas en condiciones deportivas comparables. También importa reconocer que una respuesta favorable en laboratorio puede tener escasa relevancia competitiva. La decisión de incorporar un suplemento demanda examinar su utilidad específica, las características del deportista y la calidad metodológica de las investigaciones disponibles antes de recomendar su consumo.

Entre los compuestos investigados, la creatina destaca por su participación en el metabolismo energético de esfuerzos breves e intensos. Al aumentar las reservas musculares de fosfocreatina, puede favorecer la resíntesis rápida de adenosín trifosfato durante contracciones repetidas. Kreider et al. (2017) describen beneficios asociados con el rendimiento de alta intensidad y las adaptaciones al entrenamiento. La magnitud de tales efectos depende del

protocolo utilizado y de las características iniciales de cada deportista evaluado en particular.

La eficacia de un suplemento debe examinarse mediante resultados obtenidos en investigaciones controladas y reproducibles. Las modificaciones de fuerza, potencia o capacidad de trabajo adquieren significado cuando superan la variabilidad habitual de las mediciones. También conviene diferenciar los cambios estadísticamente significativos de aquellos que representan ventajas deportivas apreciables. Una intervención puede producir respuestas fisiológicas mensurables sin traducirse necesariamente en mejores resultados competitivos. Tal distinción orienta decisiones prudentes frente a productos respaldados por evidencias todavía limitadas.

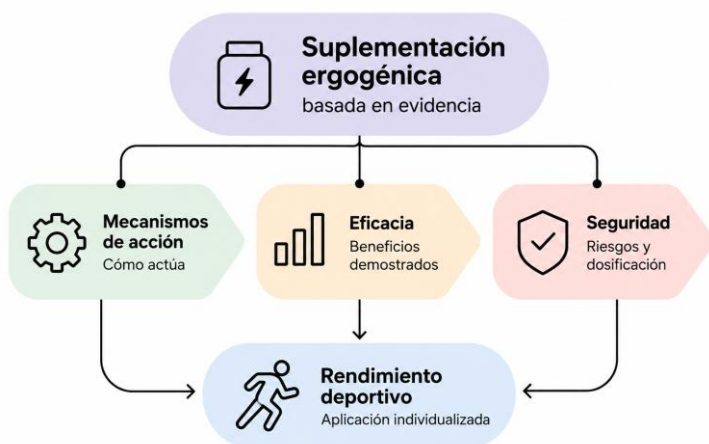
La suplementación con creatina presenta particularidades relacionadas con su acumulación progresiva en el tejido muscular. Kreider et al. (2017) explican que diferentes protocolos pueden incrementar las reservas corporales mediante fases de carga o consumos diarios sostenidos. La elección depende de las necesidades deportivas y del tiempo disponible para alcanzar concentraciones musculares elevadas. Sin embargo, una mayor cantidad ingerida no garantiza beneficios proporcionales. La dosificación debe responder a criterios establecidos mediante investigaciones y seguimiento profesional individualizado.

La seguridad constituye una dimensión inseparable de cualquier intervención ergogénica. Su evaluación requiere considerar la dosis, la duración del consumo y las condiciones clínicas individuales. Kreider et al. (2017) documentan un perfil favorable de seguridad para la creatina monohidrato en personas sanas cuando se utiliza mediante protocolos estudiados. Dichos resultados no justifican extender automáticamente tal valoración a formulaciones diferentes. Tampoco eliminan la necesidad de supervisión cuando existen enfermedades previas o tratamientos farmacológicos que requieren precauciones particulares.

La calidad de fabricación representa otro componente relevante para la seguridad de los suplementos deportivos. Las diferencias entre productos pueden relacionarse con pureza, concentración real y presencia de sustancias no declaradas. En el deporte competitivo, la contaminación adquiere especial importancia debido a las normas antidopaje. Por ello, la selección debe favorecer fabricantes sometidos a controles independientes y procedimientos verificables. Una etiqueta atractiva o una declaración comercial de calidad no constituyen pruebas suficientes de inocuidad del producto.

Figura 6

Fundamentos de la suplementación ergogénica



La respuesta a los suplementos presenta diferencias individuales que dificultan establecer expectativas uniformes. En el caso de la creatina, las reservas musculares previas pueden influir en la magnitud de su acumulación posterior. Kreider et al. (2017) reconocen variaciones en las respuestas observadas entre participantes sometidos a protocolos semejantes. La experiencia deportiva y las características musculares también merecen consideración. Evaluar cambios funcionales permite determinar si

el consumo produce beneficios relevantes para las exigencias particulares de cada disciplina.

La interpretación de posibles efectos adversos requiere distinguir entre respuestas esperadas y manifestaciones que justifican atención clínica. El incremento inicial de masa corporal asociado al consumo de creatina puede relacionarse con modificaciones del contenido hídrico muscular. Tal variación adquiere implicaciones diferentes según la modalidad deportiva. Kreider et al. (2017) examinan los datos disponibles sobre tolerancia y seguridad del compuesto. La valoración individual debe considerar síntomas persistentes y antecedentes médicos antes de mantener cualquier intervención prolongada.

La incorporación de ayudas ergogénicas demanda establecer objetivos verificables y periodos adecuados de observación. Conviene registrar las condiciones del entrenamiento para evitar atribuir al suplemento mejoras producidas por otros factores. Las pruebas funcionales repetidas permiten reconocer tendencias, aunque su interpretación requiere considerar el aprendizaje y la variabilidad cotidiana. Cuando los resultados carecen de relevancia práctica, mantener el consumo merece una revisión. La continuidad de una intervención debe justificarse mediante beneficios observables y condiciones aceptables de seguridad.

La suplementación ergogénica encuentra mayor fundamento cuando existe correspondencia entre el mecanismo fisiológico del compuesto y las demandas reales de la actividad deportiva. La evidencia reunida por Kreider et al. (2017) permite comprender las aplicaciones de la creatina dentro de determinadas condiciones de ejercicio. Sin embargo, cada decisión requiere valorar eficacia, seguridad y pertinencia individual. El seguimiento profesional facilita reconocer beneficios y limitaciones sin convertir el consumo de suplementos en una práctica indiscriminada o permanente.

2.5. Nutrición aplicada a la función cognitiva, la toma de decisiones y la resistencia a la fatiga mental en competición

La función cognitiva interviene en el rendimiento deportivo mediante procesos de atención, anticipación y selección de respuestas bajo presión. Durante la competición, el deportista debe interpretar señales cambiantes mientras regula el esfuerzo físico y emocional. La alimentación puede influir en condiciones fisiológicas relacionadas con tales procesos, aunque sus efectos no son uniformes. Examinar la relación entre nutrición y desempeño mental exige distinguir las mejoras perceptivas de los cambios demostrables en tareas deportivas específicas y reproducibles.

La fatiga mental puede manifestarse mediante una mayor percepción del esfuerzo y dificultades para mantener la concentración durante actividades prolongadas. Su aparición depende de la carga cognitiva previa, las exigencias competitivas y las oportunidades de descanso. Desde la nutrición interesa identificar intervenciones capaces de modificar determinadas respuestas sin atribuirles efectos generales sobre la inteligencia o el juicio. La evaluación debe considerar pruebas de atención y decisiones representativas de las condiciones reales de cada disciplina deportiva.

La cafeína ocupa un lugar destacado entre las sustancias estudiadas por sus efectos sobre el estado de alerta y el rendimiento. Su acción se relaciona principalmente con el antagonismo de los receptores de adenosina en el sistema nervioso central. Guest et al. (2021) describen beneficios sobre diversas manifestaciones del desempeño físico y señalan posibles efectos cognitivos. Sin embargo, la respuesta depende de la dosis, las características individuales y las tareas utilizadas para medirla experimentalmente habitualmente.

En deportes colectivos, una decisión acertada requiere reconocer patrones de juego y responder antes de que cambien las oportunidades disponibles. La atención sostenida resulta importante, pero también lo es inhibir respuestas impulsivas. Una intervención nutricional que aumente la vigilancia no garantiza por sí misma una mejor lectura táctica. Conviene estudiar sus efectos mediante situaciones cercanas a la competición, donde intervienen experiencia, presión temporal y coordinación con otros participantes durante secuencias de esfuerzo físico intenso repetido.

La cantidad de cafeína ingerida condiciona tanto los posibles beneficios como la aparición de molestias. Guest et al. (2021) indican que dosis moderadas pueden mejorar distintas variables de rendimiento, aunque existen respuestas individuales considerables. Incrementar el consumo indiscriminadamente puede provocar nerviosismo y otras manifestaciones incompatibles con la precisión requerida en determinadas pruebas. La elección de una pauta necesita valorar antecedentes de tolerancia, horarios competitivos y sensibilidad personal antes de aplicarse en situaciones deportivas especialmente decisivas.

El momento de consumo también influye en la utilidad práctica de una estrategia estimulante. La absorción y el inicio de los efectos varían según la presentación utilizada y las circunstancias individuales. Guest et al. (2021) examinan protocolos administrados antes del ejercicio y reconocen diferencias entre formas de suministro. En competiciones extensas, la duración del efecto merece atención particular. Una planificación debe evitar que la estimulación interfiera con el descanso posterior o genere molestias durante la actividad.

La relación entre alimentación y claridad mental no puede reducirse al empleo de estimulantes. Las restricciones energéticas intensas y los periodos prolongados sin comer pueden afectar el bienestar y la disposición para competir. Sin embargo, las

respuestas cognitivas a las variaciones alimentarias dependen de múltiples circunstancias. Resulta preferible examinar patrones habituales de consumo y síntomas asociados antes de atribuir un error deportivo a una deficiencia nutricional. El rendimiento decisional requiere una interpretación especialmente cuidadosa.

La privación de sueño representa una dificultad particular cuando las competiciones implican desplazamientos o jornadas extensas. La cafeína puede aumentar temporalmente el estado de alerta, pero su utilización no reemplaza las funciones recuperadoras del descanso. Guest et al. (2021) advierten sobre la importancia de considerar efectos secundarios y diferencias de sensibilidad. El consumo tardío merece especial vigilancia por sus posibles repercusiones sobre el sueño posterior. La intervención debe contemplar las exigencias de jornadas competitivas sucesivas.

La valoración de estrategias nutricionales dirigidas al rendimiento cognitivo necesita indicadores pertinentes y procedimientos consistentes. Los tiempos de reacción aportan información útil, aunque una respuesta rápida puede resultar incorrecta. También importa medir precisión, atención sostenida y estabilidad del desempeño bajo fatiga. Los resultados deben compararse con condiciones semejantes de entrenamiento y competición. Registrar percepciones subjetivas complementa las mediciones objetivas sin reemplazarlas, especialmente cuando el deportista experimenta cambios en ansiedad o activación emocional.

La aplicación de intervenciones nutricionales sobre la función cognitiva exige prudencia ante resultados heterogéneos. Guest et al. (2021) reconocen que la cafeína puede favorecer determinados componentes del rendimiento, pero las respuestas cognitivas presentan variabilidad según las pruebas examinadas. La decisión profesional debe considerar beneficios observables y efectos no deseados. Mantener registros de concentración, tolerancia y ejecución deportiva permite ajustar las pautas

individuales sin atribuir a una sustancia capacidades que la evidencia científica disponible no demuestra.

2.6. Variabilidad interindividual de la respuesta nutricional: nutrigenética, nutrigenómica y fenotipos metabólicos

La variabilidad interindividual de la respuesta nutricional refleja diferencias biológicas que condicionan el aprovechamiento de nutrientes durante la práctica deportiva. Deportistas con características físicas semejantes pueden experimentar adaptaciones distintas ante una misma intervención alimentaria. Parte de dicha diversidad procede de factores genéticos, aunque también intervienen hábitos y condiciones ambientales. Comprender tales relaciones exige abandonar interpretaciones deterministas y reconocer que el rendimiento surge de interacciones dinámicas entre procesos moleculares, entrenamiento y circunstancias personales durante la competición.

La nutrigenética estudia la influencia de las variantes genéticas sobre las respuestas individuales a determinados componentes alimentarios. Su aplicación deportiva pretende identificar diferencias relacionadas con el metabolismo energético y la utilización de nutrientes. Sin embargo, una variante aislada rara vez permite anticipar resultados complejos. La mayoría de las características vinculadas al rendimiento depende de numerosos genes y factores externos. Por tanto, interpretar perfiles genéticos requiere prudencia metodológica y evidencia reproducible en poblaciones deportivas amplias representativas.

La nutrigenómica examina las modificaciones de la expresión génica asociadas con la exposición a nutrientes y patrones alimentarios. A diferencia del análisis de variantes heredadas, aborda procesos moleculares sensibles a cambios fisiológicos y ambientales. Bedrač et al. (2024) describen el interés de las tecnologías ómicas para avanzar hacia estrategias

nutricionales personalizadas en deportistas de resistencia. Su utilización todavía requiere esclarecer la relevancia práctica de numerosas señales moleculares detectadas mediante procedimientos analíticos de elevada complejidad técnica.

Los fenotipos metabólicos representan manifestaciones observables de la interacción entre características hereditarias y condiciones adquiridas. Pueden estudiarse mediante perfiles de metabolitos, respuestas a cargas nutricionales y variaciones relacionadas con el esfuerzo. Su interpretación permite reconocer diferencias que no resultan evidentes mediante mediciones corporales convencionales. Sin embargo, los perfiles metabólicos cambian con el entrenamiento y otras circunstancias cotidianas. Una clasificación útil necesita considerar tal variabilidad antes de establecer categorías permanentes para orientar decisiones alimentarias individuales posteriores.

Las técnicas metabolómicas permiten examinar conjuntos amplios de compuestos vinculados con rutas energéticas y procesos de adaptación. Bedrač et al. (2024) identifican oportunidades para integrar información molecular en el estudio de la nutrición deportiva de precisión. Aun cuando determinados metabolitos muestran asociaciones con respuestas fisiológicas, tales relaciones no demuestran necesariamente causalidad. La utilidad clínica depende de validar biomarcadores y establecer criterios interpretativos capaces de distinguir fluctuaciones habituales de modificaciones relevantes para cada deportista individual evaluado.

El estudio conjunto de datos genéticos y metabólicos plantea posibilidades para comprender respuestas nutricionales aparentemente contradictorias. Una misma pauta alimentaria puede relacionarse con cambios diferentes según la regulación molecular y las condiciones fisiológicas previas. No obstante, integrar múltiples mediciones incrementa la complejidad estadística y el riesgo de asociaciones casuales. Los modelos predictivos requieren muestras amplias y comprobaciones

independientes. Sin tales garantías, una recomendación personalizada puede adquirir apariencia científica sin demostrar ventajas frente a procedimientos convencionales.

Las tecnologías portátiles amplían las oportunidades de observar respuestas fisiológicas durante actividades habituales de entrenamiento. Los registros continuos pueden aportar información sobre patrones de actividad y determinadas variables corporales. Bedrač et al. (2024) examinan su posible integración con herramientas ómicas para apoyar decisiones nutricionales individualizadas. Sin embargo, la precisión de los dispositivos depende del parámetro medido y de las condiciones de uso. La disponibilidad de datos abundantes no garantiza interpretaciones fiables ni recomendaciones nutricionales eficaces.

La construcción de perfiles nutricionales personalizados requiere relacionar mediciones moleculares con resultados funcionales verificables. Identificar una diferencia bioquímica carece de utilidad suficiente cuando no permite orientar decisiones que beneficien al deportista. Conviene evaluar si las intervenciones derivadas de tales perfiles modifican respuestas relevantes bajo condiciones comparables. También importa considerar el coste y la accesibilidad de las pruebas. La investigación debe demostrar beneficios adicionales antes de incorporar procedimientos complejos a la práctica deportiva cotidiana habitual general.

El empleo de información genética introduce responsabilidades relacionadas con privacidad y consentimiento informado. Los resultados pueden revelar características biológicas cuya interpretación excede las necesidades deportivas inmediatas. Por ello, la recopilación de datos requiere objetivos definidos y medidas de protección adecuadas. La comunicación profesional debe evitar presentar probabilidades como destinos inevitables. Ningún perfil molecular determina por completo la capacidad competitiva. Reconocer sus límites contribuye a prevenir

decisiones discriminatorias y expectativas injustificadas sobre el potencial deportivo individual.

Tabla 2
Estrategias nutricionales para la optimización del rendimiento deportivo: fundamentos y aplicaciones

Estrategia nutricional	Fundamentos y aplicaciones en el rendimiento deportivo
Individualización de los requerimientos nutricionales	Evaluación de indicadores fisiológicos, metabólicos y funcionales para ajustar las necesidades alimentarias según las características del deportista y las exigencias del entrenamiento.
Distribución temporal de macronutrientes	Organización del consumo de carbohidratos, proteínas y grasas en relación con las sesiones deportivas. Favorece la disponibilidad energética y los procesos de adaptación y recuperación muscular.
Hidratación de precisión y equilibrio electrolítico	Regulación del aporte hídrico y mineral según las pérdidas por sudoración y las condiciones ambientales. Contribuye al mantenimiento del equilibrio corporal y al control de la temperatura durante el ejercicio.
Suplementación ergogénica basada en evidencia	Valoración de mecanismos fisiológicos y beneficios demostrados de los suplementos deportivos. Considera la eficacia de la creatina y los criterios de dosificación y seguridad para su aplicación individualizada.
Nutrición y rendimiento cognitivo	Aplicación de estrategias nutricionales relacionadas con la atención y la toma de decisiones durante la competición. Examina los efectos de la cafeína sobre el estado de alerta y la respuesta ante la fatiga mental.
Variabilidad interindividual y nutrición de precisión	Integración de nutrigenética, nutrigenómica y perfiles metabólicos para comprender diferencias individuales en la respuesta alimentaria. Considera tecnologías ómicas y dispositivos portátiles como herramientas de evaluación personalizada.

Nota. Elaboración basada en Jäger et al. (2017), Kerksick et al. (2017), Kreider et al. (2017), Guest et al. (2021) y Bedrač et al. (2024).

La nutrición deportiva de precisión avanza mediante la integración gradual de conocimientos moleculares y observaciones obtenidas durante el entrenamiento. Bedrač et al. (2024) reconocen

posibilidades prometedoras para las tecnologías ómicas y portátiles, junto con limitaciones que dificultan su aplicación generalizada. La investigación necesita comprobar la reproducibilidad de los hallazgos y su utilidad en intervenciones reales. Mientras tanto, la interpretación individual debe mantener una relación proporcionada entre evidencia disponible, complejidad tecnológica y beneficios deportivos realmente demostrables.

Capítulo III

Recuperación fisiológica y reparación tisular posterior al ejercicio

La recuperación fisiológica posterior al ejercicio constituye una dimensión fundamental del rendimiento deportivo y de la adaptación del organismo a las exigencias del entrenamiento. Cada esfuerzo provoca modificaciones que comprometen temporalmente el equilibrio metabólico y la capacidad funcional de distintos tejidos. La recuperación comienza mientras algunas respuestas al ejercicio permanecen activas y continúa durante periodos variables. Comprender su desarrollo exige considerar la interacción entre procesos celulares y condiciones nutricionales que determinan la disponibilidad de recursos para restablecer el funcionamiento corporal.

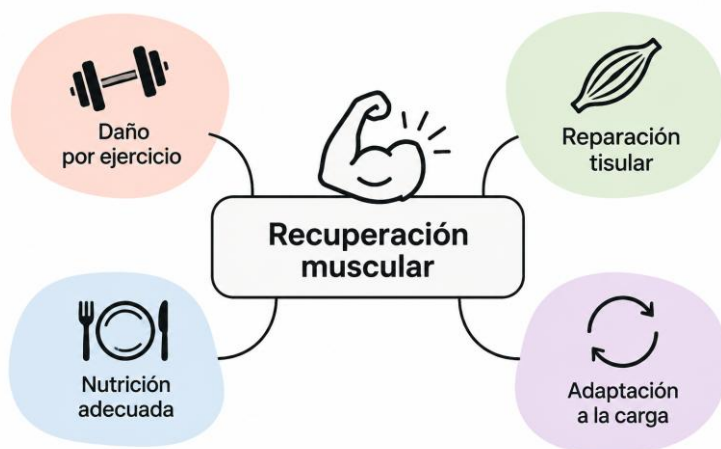
El organismo responde a las cargas físicas mediante mecanismos de regulación cuya duración depende de la intensidad del esfuerzo y de las características individuales. Algunos procesos recuperan rápidamente sus condiciones habituales, mientras otros requieren periodos prolongados de reorganización. La disponibilidad de nutrientes interviene en dicha evolución mediante funciones relacionadas con el metabolismo energético y el mantenimiento tisular. Por tanto, estudiar la recuperación implica reconocer diferencias temporales entre respuestas fisiológicas que participan simultáneamente en la adaptación al entrenamiento deportivo.

La restauración energética representa una de las primeras necesidades fisiológicas después de actividades que demandan una utilización considerable de sustratos musculares. Sin embargo, su importancia debe interpretarse según la organización del entrenamiento y las exigencias posteriores. Gejl y Nybo (2021) analizaron los efectos de periodizar la restricción de carbohidratos sobre el rendimiento de deportistas de resistencia. Sus aportaciones permiten examinar la relación entre disponibilidad energética y adaptación, considerando las particularidades metabólicas de diferentes estrategias nutricionales.

La recuperación también comprende modificaciones estructurales que afectan la capacidad del aparato locomotor para responder a nuevos estímulos mecánicos. Durante el ejercicio pueden producirse alteraciones celulares cuya resolución depende de mecanismos coordinados de reparación y renovación proteica. Barclay et al. (2024) investigaron los efectos de diferentes fuentes proteicas sobre la recuperación posterior al ejercicio excéntrico. Su trabajo contribuye a comprender el interés de la nutrición en procesos reparadores cuya evolución presenta diferencias entre tejidos y deportistas.

Figura 7

Procesos fisiológicos de recuperación deportiva



Las respuestas inflamatorias y oxidativas participan en la regulación de acontecimientos celulares posteriores al esfuerzo. Su presencia responde a necesidades fisiológicas relacionadas con la comunicación entre tejidos y la adaptación metabólica. Gonzalez et al. (2026) examinaron los efectos de los antioxidantes alimentarios sobre el ejercicio y el rendimiento deportivo. Sus aportaciones permiten abordar la intervención nutricional considerando que determinadas señales bioquímicas cumplen funciones reguladoras.

La recuperación requiere interpretar dichos mecanismos según su intensidad y evolución temporal.

El descanso nocturno introduce otra dimensión en la recuperación al relacionarse con procesos neurofisiológicos y metabólicos que continúan después del entrenamiento. Las modificaciones en los patrones de sueño pueden influir en la capacidad funcional y en determinadas respuestas vinculadas con la alimentación. Doherty et al. (2024) abordaron las relaciones entre sueño y nutrición en deportistas. Su perspectiva permite reconocer que la recuperación depende también de condiciones cotidianas cuya regularidad puede verse alterada por exigencias competitivas.

La adaptación del aparato locomotor presenta diferencias entre estructuras sometidas a esfuerzos mecánicos semejantes. Los tejidos conectivos poseen características metabólicas particulares que condicionan sus respuestas frente a la carga y sus tiempos de renovación. La investigación de Barclay et al. (2024) aporta una referencia para examinar intervenciones proteicas vinculadas con la recuperación del ejercicio. Aunque sus resultados deben interpretarse según los tejidos evaluados, permiten ampliar la discusión sobre disponibilidad nutricional y mantenimiento estructural.

La complejidad de los procesos recuperadores plantea dificultades para determinar cuándo un deportista ha recuperado suficientemente su capacidad de entrenamiento. Las manifestaciones subjetivas y los cambios funcionales pueden evolucionar de manera diferente respecto de determinados indicadores bioquímicos. Malsagova et al. (2024) estudiaron perfiles metabolómicos y proteómicos asociados con actividad física en condiciones hipóxicas. Su investigación refleja el interés de examinar respuestas moleculares diversas para comprender las modificaciones fisiológicas vinculadas con esfuerzos realizados bajo condiciones particulares.

La interpretación de la recuperación exige integrar información procedente de diferentes niveles de observación. Los cambios celulares adquieren significado cuando se relacionan con la capacidad de ejecutar movimientos y tolerar nuevas cargas físicas. A su vez, los indicadores funcionales necesitan examinarse considerando antecedentes individuales y condiciones de entrenamiento. Ninguna variable representa por completo la diversidad de respuestas posteriores al esfuerzo. La evaluación requiere criterios que permitan distinguir fluctuaciones habituales de modificaciones relevantes para la preparación deportiva.

El presente capítulo aborda la recuperación fisiológica mediante una secuencia que relaciona restauración energética y reparación tisular con regulación inflamatoria y descanso. Posteriormente examina la adaptación de las estructuras conectivas y los procedimientos empleados para valorar las respuestas al entrenamiento. La perspectiva nutricional atraviesa cada apartado como parte de una interacción fisiológica más amplia. Su desarrollo permite comprender las condiciones que intervienen en la recuperación y su relación con la continuidad del rendimiento deportivo.

3.1. Cinética de resíntesis de glucógeno y restauración de las reservas energéticas tras el esfuerzo físico

La recuperación del glucógeno muscular constituye un proceso metabólico determinante para restablecer la capacidad de trabajo después del ejercicio físico. Durante esfuerzos prolongados o intensos, las fibras musculares utilizan sus depósitos de glucógeno para sostener la producción de energía mediante distintas vías metabólicas. Su agotamiento parcial modifica la disponibilidad de sustratos y puede comprometer el rendimiento posterior. La velocidad de reposición depende del grado de utilización previo, la alimentación recibida y las condiciones fisiológicas individuales del deportista.

La resíntesis de glucógeno comienza durante las primeras etapas de recuperación y presenta una evolución temporal variable. Inicialmente puede observarse una fase de elevada actividad metabólica favorecida por el aumento de la permeabilidad muscular a la glucosa. La contracción previa facilita la movilización de transportadores GLUT4 hacia la membrana celular. Posteriormente, la acción de la insulina adquiere mayor relevancia en la captación del sustrato. Ambos mecanismos contribuyen a reconstruir progresivamente las reservas utilizadas durante el esfuerzo físico.

La actividad de la glucógeno sintasa representa otro componente fundamental de la recuperación energética muscular. Su regulación responde a señales intracelulares relacionadas con la contracción y el contenido residual de glucógeno. Cuando las reservas disminuyen considerablemente, aumenta la capacidad del músculo para incorporar glucosa a sus depósitos. Sin embargo, la respuesta no permanece constante durante toda la recuperación. Conforme avanza la reposición, la velocidad de síntesis tiende a reducirse debido a modificaciones en la regulación metabólica celular.

La disponibilidad de carbohidratos después del ejercicio condiciona directamente la magnitud de la recuperación energética. Cuando existen intervalos breves entre sesiones, una ingestión temprana y suficiente favorece tasas elevadas de resíntesis muscular. En determinadas circunstancias deportivas se emplean aportes cercanos a 1,0–1,2 gramos de carbohidratos por kilogramo de masa corporal cada hora durante las primeras horas. Dicha pauta requiere adaptación a la tolerancia digestiva y al gasto energético. Su pertinencia disminuye cuando existe tiempo amplio para recuperarse.

La restauración de glucógeno presenta diferencias entre los compartimentos musculares y hepáticos. Mientras el primero abastece principalmente las necesidades energéticas locales

durante la contracción, el segundo participa en el mantenimiento de la glucemia. Después de actividades prolongadas, ambos depósitos pueden encontrarse reducidos en proporciones distintas. La reposición hepática depende de la disponibilidad de sustratos procedentes de la alimentación y del metabolismo intermediario. Por ello, recuperar las reservas energéticas exige considerar funciones fisiológicas que responden a demandas metabólicas diferentes.

La recuperación energética también depende de las características del esfuerzo realizado y de la distribución del trabajo muscular. Las actividades intermitentes de alta intensidad pueden producir reducciones importantes del glucógeno en determinadas fibras, incluso cuando el contenido muscular promedio permanece relativamente conservado. Tal heterogeneidad influye en la capacidad posterior de generar fuerza y mantener contracciones repetidas. En consecuencia, la recuperación funcional puede avanzar a un ritmo diferente del observado mediante estimaciones generales de las reservas energéticas musculares disponibles.

La manipulación de la disponibilidad de carbohidratos ha despertado interés por sus posibles efectos sobre las adaptaciones al entrenamiento de resistencia. Gejl y Nybo (2021) examinaron mediante una revisión sistemática y metaanálisis los efectos de periodizar la restricción de carbohidratos en deportistas entrenados. Su investigación permite distinguir entre las respuestas metabólicas asociadas al entrenamiento con reservas reducidas y los resultados efectivos sobre el rendimiento. La utilidad de dichas estrategias requiere valorar cuidadosamente la carga física y los objetivos deportivos.

El tiempo disponible entre esfuerzos modifica las prioridades de reposición energética. Cuando una nueva sesión ocurre durante las horas posteriores, la rapidez de resíntesis adquiere especial relevancia para conservar la calidad del trabajo muscular. En cambio, los periodos prolongados permiten distribuir

la ingestión de carbohidratos mediante las comidas habituales. Gejl y Nybo (2021) aportan una perspectiva pertinente al analizar estrategias de disponibilidad variable de carbohidratos, cuya aplicación debe distinguir las adaptaciones metabólicas de las exigencias competitivas inmediatas.

La restauración de las reservas energéticas tampoco sigue una trayectoria idéntica entre deportistas sometidos a cargas semejantes. El entrenamiento habitual, la magnitud del agotamiento previo y la disponibilidad alimentaria modifican la respuesta de recuperación. Además, la sensibilidad muscular a la insulina puede permanecer elevada durante varias horas después del esfuerzo. Dicho fenómeno facilita la utilización de glucosa cuando existe aporte nutricional suficiente. La recuperación adquiere entonces un carácter dinámico, condicionado por mecanismos celulares y circunstancias individuales.

Desde una perspectiva fisiológica, la cinética de resíntesis del glucógeno permite comprender por qué la recuperación energética exige una correspondencia entre demanda muscular y disponibilidad nutricional. Gejl y Nybo (2021) muestran la pertinencia de estudiar la periodización de carbohidratos considerando sus efectos sobre el rendimiento de resistencia. La interpretación de dichos hallazgos debe mantener una distinción entre adaptación y recuperación inmediata. El restablecimiento progresivo de las reservas contribuye a preservar la capacidad funcional ante esfuerzos posteriores.

3.2. Remodelación muscular, daño inducido por el ejercicio y regulación nutricional de los procesos de reparación

La remodelación muscular posterior al ejercicio comprende una secuencia de acontecimientos celulares orientados a recuperar la integridad estructural y adaptar el tejido a nuevas exigencias funcionales. Las contracciones intensas generan

tensiones mecánicas que pueden alterar componentes del aparato contráctil y de las estructuras asociadas. La magnitud de dichas modificaciones depende del entrenamiento previo y de las características del movimiento. Su evolución determina parcialmente el tiempo necesario para recuperar la capacidad muscular tras esfuerzos exigentes.

El daño muscular inducido por el ejercicio adquiere particular relevancia durante las contracciones excéntricas, cuando las fibras desarrollan tensión mientras experimentan alargamiento. Bajo determinadas condiciones aparecen alteraciones en los sarcómeros y en las proteínas encargadas de transmitir fuerza. También pueden producirse modificaciones en las membranas celulares y en la regulación del calcio intracelular. Tales fenómenos afectan temporalmente la función contráctil y desencadenan respuestas biológicas cuya intensidad varía según la exposición previa al estímulo mecánico.

La respuesta inflamatoria posterior al daño muscular participa activamente en la eliminación de componentes alterados y en la reorganización del tejido. Durante las primeras etapas intervienen células inmunitarias que reconocen señales de lesión y contribuyen a regular el ambiente celular. Los macrófagos desempeñan funciones relacionadas con la eliminación de residuos y la coordinación de procesos reparadores. Una inflamación transitoria puede resultar compatible con la adaptación muscular, aunque su persistencia excesiva dificulta la recuperación funcional.

La reparación de las fibras musculares requiere mecanismos de señalización que coordinen la síntesis proteica y la regeneración celular. Las células satélite pueden activarse ante determinados niveles de daño y participar en la restauración de estructuras musculares. Paralelamente, las vías intracelulares sensibles a estímulos mecánicos y nutricionales regulan la producción de proteínas contráctiles. La eficacia del proceso depende de la interacción entre disponibilidad energética, estado

fisiológico y magnitud de las alteraciones acumuladas durante el entrenamiento físico.

La disponibilidad de aminoácidos constituye un factor nutricional relevante para sostener la reparación de proteínas musculares afectadas por el esfuerzo. La ingestión de proteínas de calidad favorece la síntesis proteica mediante el suministro de aminoácidos esenciales. Entre ellos, la leucina participa en la activación de mecanismos relacionados con el crecimiento muscular. Sin embargo, la respuesta depende también de la cantidad ingerida y del estado de entrenamiento. La alimentación debe responder a las necesidades del tejido durante su recuperación.

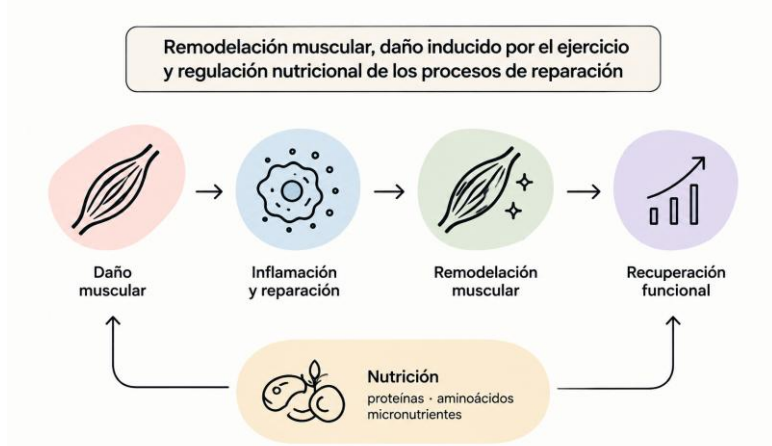
Las características de las fuentes proteicas pueden modificar la disponibilidad de aminoácidos y su aprovechamiento durante la recuperación. Barclay et al. (2024) investigaron los efectos del colágeno hidrolizado y la proteína láctea después de ejercicio excéntrico mediante un estudio doble ciego controlado con placebo. Dicha comparación permite examinar distintas alternativas nutricionales frente al daño muscular. La composición de cada proteína adquiere relevancia al considerar sus posibles funciones en la reparación de estructuras contráctiles y componentes del tejido conectivo.

El tejido conectivo participa en la transmisión de fuerzas y en la estabilidad mecánica del músculo durante el movimiento. Sus componentes extracelulares experimentan procesos continuos de renovación que pueden intensificarse ante determinadas cargas físicas. El colágeno aporta aminoácidos relacionados con la formación de proteínas estructurales, aunque su composición difiere de las fuentes ricas en aminoácidos esenciales. Barclay et al. (2024) abordaron dicha distinción nutricional mediante la comparación de suplementos proteicos durante la recuperación del ejercicio excéntrico.

La interpretación del dolor muscular tardío requiere distinguir entre percepción subjetiva y alteraciones funcionales objetivas. La sensibilidad local puede aumentar durante las horas posteriores al ejercicio y alcanzar valores elevados cuando ya comenzaron los procesos reparadores. Sin embargo, su intensidad no refleja necesariamente la magnitud del daño estructural. Las evaluaciones de fuerza y movilidad proporcionan información complementaria sobre la recuperación. Por ello, valorar una intervención nutricional exige considerar diferentes indicadores antes de atribuirle beneficios reparadores específicos.

Figura 8

Daño muscular y reparación nutricional



La regulación nutricional de la reparación muscular también depende del equilibrio energético mantenido durante los periodos de entrenamiento. Una disponibilidad insuficiente de energía puede limitar los recursos necesarios para sostener la renovación proteica y otros procesos celulares. La distribución diaria de proteínas adquiere interés cuando se pretende favorecer respuestas repetidas de síntesis muscular. Entretanto, la progresión adecuada de las cargas permite moderar el daño acumulado. La

recuperación responde a una interacción continua entre alimentación y exigencia mecánica.

La remodelación muscular constituye un fenómeno progresivo cuya expresión depende de la experiencia de entrenamiento y de la capacidad individual de recuperación. Las exposiciones repetidas al ejercicio excéntrico pueden reducir la magnitud del daño provocado por esfuerzos posteriores semejantes. En el ámbito nutricional, Barclay et al. (2024) contribuyen al estudio de fuentes proteicas destinadas a favorecer la recuperación. Su investigación permite abordar la reparación tisular desde una perspectiva experimental que relaciona suplementación y respuesta muscular al esfuerzo.

3.3. Respuesta inflamatoria, estrés oxidativo y papel de los compuestos bioactivos en la recuperación deportiva

La respuesta inflamatoria posterior al ejercicio forma parte de los mecanismos fisiológicos que regulan la recuperación del tejido muscular sometido a cargas exigentes. Su activación responde a modificaciones mecánicas y metabólicas que estimulan la comunicación entre células musculares e inmunitarias. Durante dicho proceso intervienen mediadores capaces de coordinar respuestas locales y sistémicas. La intensidad de la reacción depende del tipo de esfuerzo y de la condición física individual. Su regulación influye directamente en la recuperación funcional posterior.

El ejercicio intenso modifica temporalmente el equilibrio entre la producción de especies reactivas y los sistemas encargados de controlar su actividad. Las mitocondrias y determinadas enzimas celulares participan en la generación de moléculas oxidantes durante el esfuerzo. En concentraciones moderadas, dichas sustancias intervienen en mecanismos de señalización relacionados con la adaptación fisiológica. Cuando su producción excede la capacidad reguladora del organismo, pueden aparecer

alteraciones en lípidos, proteínas y otros componentes celulares sensibles a la oxidación.

La relación entre inflamación y estrés oxidativo presenta una interacción dinámica durante las horas posteriores al esfuerzo físico. Determinadas especies reactivas participan en la activación de vías celulares que regulan la expresión de mediadores inflamatorios. A su vez, la actividad de células inmunitarias puede incrementar temporalmente la producción de oxidantes. La magnitud de dicha respuesta depende de factores individuales y ambientales. Su evolución permite comprender por qué la recuperación presenta diferencias entre esfuerzos aparentemente semejantes.

La regulación nutricional del equilibrio oxidativo ha recibido atención por sus posibles efectos sobre la recuperación y el rendimiento deportivo. Gonzalez et al. (2026) examinan la influencia de los antioxidantes alimentarios desde una perspectiva orientada a la nutrición deportiva. Su planteamiento permite considerar que las especies reactivas participan en funciones fisiológicas necesarias para la adaptación. Por ello, reducir indiscriminadamente su actividad mediante suplementación puede interferir con determinadas respuestas celulares vinculadas al entrenamiento físico regular.

Los compuestos fenólicos presentes en frutas y vegetales constituyen una categoría de sustancias bioactivas investigadas por su interacción con mecanismos celulares de defensa. Entre ellos destacan las antocianinas y otros flavonoides capaces de intervenir en procesos relacionados con la señalización inflamatoria. Su actividad biológica depende de la absorción intestinal y de las transformaciones metabólicas posteriores. La respuesta fisiológica también puede variar según la matriz alimentaria y las cantidades consumidas durante periodos de entrenamiento deportivo intenso.

La utilización de antioxidantes concentrados plantea interrogantes sobre sus efectos durante programas de entrenamiento prolongados. Gonzalez et al. (2026) abordan la relación entre suplementación antioxidante y respuestas fisiológicas vinculadas al ejercicio. Desde dicha perspectiva, la cantidad administrada adquiere relevancia porque una intervención nutricional puede modificar señales celulares relacionadas con la adaptación muscular. La evaluación de sus efectos requiere distinguir entre alivio de manifestaciones transitorias y modificaciones sostenidas de la capacidad funcional del deportista ante cargas sucesivas.

La biodisponibilidad de los compuestos bioactivos condiciona su posible participación en los procesos de recuperación. Después de su ingestión, numerosas sustancias experimentan transformaciones intestinales y hepáticas que modifican sus propiedades biológicas. La microbiota intestinal interviene en el metabolismo de determinados polifenoles y contribuye a generar compuestos derivados con actividad fisiológica. Tales variaciones dificultan establecer respuestas uniformes entre individuos. La composición de la alimentación habitual también influye en la exposición metabólica a dichas sustancias.

La evaluación del estrés oxidativo durante la recuperación deportiva requiere interpretar cuidadosamente los indicadores utilizados en investigación. Las concentraciones de determinados productos de oxidación pueden modificarse según el momento de extracción y las características del esfuerzo. Además, los marcadores circulantes no siempre representan fielmente los acontecimientos celulares del músculo. Gonzalez et al. (2026) ofrecen un marco científico pertinente para examinar la relación entre antioxidantes y rendimiento. La interpretación debe considerar las limitaciones metodológicas de cada medición.

La alimentación habitual proporciona una combinación diversa de vitaminas y compuestos vegetales que participan en mecanismos relacionados con el equilibrio oxidativo. Su contribución fisiológica depende de la variedad alimentaria y de la disponibilidad de nutrientes necesarios para mantener las defensas endógenas. En deportistas sometidos a entrenamientos exigentes, la suficiencia nutricional adquiere relevancia para sostener dichos sistemas. Sin embargo, incrementar indiscriminadamente el consumo de suplementos antioxidantes no garantiza una recuperación muscular más rápida ni adaptaciones superiores.

La interacción entre inflamación y señalización oxidativa permite comprender la recuperación como un proceso regulado por respuestas celulares de duración variable. La evidencia examinada por Gonzalez et al. (2026) invita a valorar los antioxidantes alimentarios considerando sus posibles efectos sobre el rendimiento y las adaptaciones al ejercicio. La intervención nutricional requiere atender las características del esfuerzo y la respuesta individual. Preservar el equilibrio fisiológico favorece una interpretación prudente de los beneficios atribuidos a los compuestos bioactivos.

3.4. Interacciones entre sueño, metabolismo de nutrientes y recuperación neuromuscular

El sueño constituye una condición fisiológica determinante para recuperar la capacidad neuromuscular después de jornadas de entrenamiento exigentes. Durante el descanso nocturno se producen modificaciones en la actividad cerebral y en la regulación autónoma que favorecen la reorganización funcional del organismo. La continuidad del sueño adquiere relevancia porque sus interrupciones pueden alterar procesos asociados con la recuperación. Su duración y calidad interactúan con las demandas metabólicas del ejercicio y con las características individuales del deportista.

La arquitectura del sueño comprende fases que presentan diferencias en la actividad neuronal y en la regulación fisiológica. Durante el sueño de ondas lentas predominan condiciones asociadas con una mayor actividad parasimpática y determinados procesos endocrinos. El sueño de movimientos oculares rápidos participa en funciones relacionadas con el procesamiento cerebral. La distribución de ambas fases puede modificarse por horarios irregulares y cargas competitivas. Tales variaciones repercuten potencialmente en la recuperación física y en el funcionamiento cognitivo.

La relación entre nutrición y sueño presenta mecanismos bidireccionales que afectan la disponibilidad energética y la regulación del apetito. Doherty et al. (2024) examinan dichas interacciones en deportistas y destacan la pertinencia de considerar conjuntamente alimentación y descanso. La restricción del sueño puede modificar señales hormonales vinculadas con el hambre y la saciedad. Paralelamente, determinadas decisiones alimentarias influyen en las condiciones metabólicas previas al descanso nocturno. Ambas dimensiones requieren una interpretación integrada dentro de la preparación deportiva.

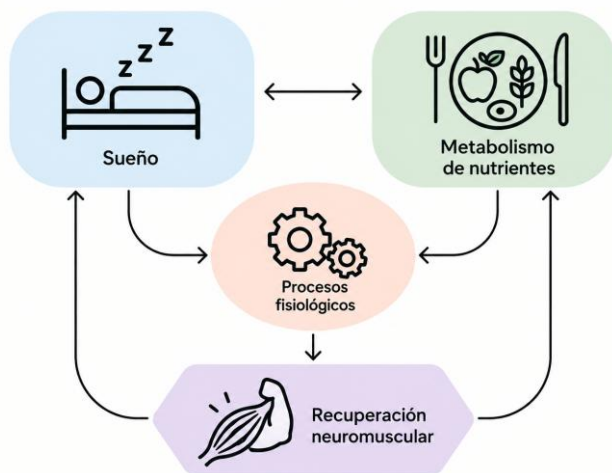
La recuperación neuromuscular depende parcialmente del restablecimiento de procesos relacionados con el control motor y la transmisión de señales nerviosas. Después de esfuerzos prolongados pueden persistir modificaciones en la activación voluntaria y en la capacidad de producir fuerza. El sueño insuficiente puede agravar determinadas manifestaciones de fatiga y alterar la precisión de las respuestas motoras. Sin embargo, sus efectos varían según la tarea evaluada y la acumulación previa de exigencias físicas durante el entrenamiento.

El metabolismo de los carbohidratos también mantiene vínculos con la organización del descanso nocturno. La disponibilidad energética insuficiente puede acompañarse de alteraciones fisiológicas que dificultan una recuperación adecuada.

Por otra parte, las comidas cercanas al horario de sueño deben valorarse según su composición y tolerancia individual. Doherty et al. (2024) consideran relevante examinar las prácticas nutricionales junto con los hábitos de descanso. Esta relación cobra interés durante periodos competitivos caracterizados por desplazamientos y horarios cambiantes habituales.

Figura 9

Sueño, nutrición y recuperación neuromuscular



La ingestión de proteínas durante la jornada contribuye al suministro de aminoácidos necesarios para el mantenimiento de los tejidos. Durante el sueño continúa el recambio proteico, aunque su magnitud depende de múltiples condiciones metabólicas. Una comida proteica antes de acostarse puede aumentar la disponibilidad nocturna de aminoácidos sin garantizar por ello mejoras uniformes del rendimiento. La decisión requiere atender el aporte diario total y las preferencias digestivas del deportista, especialmente tras sesiones realizadas al anochecer.

Los horarios de entrenamiento y alimentación participan en la sincronización de los ritmos circadianos. Cuando las sesiones

terminan tarde, la activación fisiológica residual puede retrasar el inicio del sueño en determinados deportistas. También influyen la exposición luminosa y las obligaciones sociales posteriores. Doherty et al. (2024) sitúan la nutrición dentro del análisis de los hábitos de sueño deportivos. Tal perspectiva permite valorar la regularidad de las comidas sin atribuir efectos universales a horarios específicos.

La hidratación nocturna plantea un equilibrio entre reponer las pérdidas del ejercicio y evitar interrupciones frecuentes del descanso. Una ingestión abundante de líquidos inmediatamente antes de acostarse puede aumentar la necesidad de orinar durante la noche. Sin embargo, restringirlos indiscriminadamente resulta inconveniente después de esfuerzos con sudoración elevada. Conviene distribuir la reposición hídrica durante las horas posteriores a la actividad. Las condiciones ambientales y la respuesta individual orientan las cantidades apropiadas para cada deportista particular.

La privación acumulada de sueño puede afectar la atención y la toma de decisiones durante tareas deportivas. Tales alteraciones adquieren relevancia cuando la ejecución exige coordinación precisa y respuestas rápidas ante estímulos cambiantes. Los cambios en la percepción del esfuerzo también pueden modificar la tolerancia a cargas. Doherty et al. (2024) relacionan el descanso con factores nutricionales de interés deportivo. Evaluar ambas dimensiones ayuda a interpretar variaciones funcionales que no dependen exclusivamente del trabajo muscular.

La integración del sueño en la recuperación exige reconocer diferencias individuales en necesidades de descanso y respuestas alimentarias. Los registros de horarios y calidad percibida pueden aportar información útil cuando se interpretan junto con indicadores de fatiga y desempeño. Ningún alimento compensa de manera automática una restricción persistente del

sueño. La planificación nutricional adquiere mayor sentido cuando respeta los ritmos cotidianos del deportista y facilita condiciones compatibles con la restauración de su capacidad neuromuscular habitual.

3.5. Recuperación del tejido conectivo: metabolismo del colágeno, integridad tendinosa y adaptación osteomuscular

La recuperación del tejido conectivo comprende procesos de renovación estructural que permiten conservar la continuidad mecánica entre músculos y estructuras articulares. Tendones y ligamentos responden a las cargas mediante modificaciones graduales de su matriz extracelular. A diferencia del tejido muscular, presentan características vasculares y metabólicas que condicionan sus tiempos de adaptación. La recuperación depende de la magnitud del estímulo mecánico y de la capacidad celular para mantener una organización adecuada de las fibras de colágeno.

El colágeno constituye el principal componente proteico de numerosos tejidos encargados de resistir fuerzas de tracción. Su síntesis comienza en células especializadas que producen cadenas precursoras sometidas posteriormente a modificaciones enzimáticas. La hidroxilación de determinados aminoácidos requiere vitamina C y permite estabilizar la estructura molecular. Después ocurre la organización extracelular de fibrillas y enlaces resistentes. La calidad del tejido depende tanto de la producción de colágeno como de su disposición espacial y maduración progresiva.

La respuesta tendinosa al ejercicio presenta particularidades relacionadas con la intensidad y frecuencia de las cargas aplicadas. Los tenocitos perciben deformaciones mecánicas y activan mecanismos de señalización que regulan la renovación de la matriz extracelular. Cuando el estímulo resulta apropiado, pueden producirse adaptaciones favorables en las propiedades mecánicas del tendón. Sin embargo, la exposición repetida sin

recuperación suficiente puede alterar dicho equilibrio. La adaptación requiere periodos compatibles con la velocidad de reorganización tisular propia.

La disponibilidad nutricional participa en el mantenimiento de los componentes estructurales del aparato locomotor. Los aminoácidos proporcionan materiales necesarios para la síntesis de proteínas de la matriz extracelular. Barclay et al. (2024) compararon el colágeno hidrolizado y la proteína láctea durante la recuperación posterior al ejercicio excéntrico. Su investigación permite examinar diferencias entre fuentes proteicas con composiciones particulares. Sin embargo, los resultados sobre recuperación muscular no deben extrapolarse automáticamente a modificaciones de resistencia tendinosa estructural.

La composición del colágeno hidrolizado presenta una proporción elevada de glicina y prolina, además de derivados relacionados con su estructura molecular. Tras la digestión pueden aparecer aminoácidos y pequeños péptidos en la circulación. Su disponibilidad constituye una condición necesaria para posibles efectos metabólicos, aunque no demuestra por sí misma una mayor síntesis tendinosa. La respuesta depende también de señales mecánicas y de la actividad celular. Por ello, el aporte nutricional debe interpretarse dentro de procesos fisiológicos complejos.

La integridad tendinosa también depende del equilibrio entre formación y degradación de componentes extracelulares. Determinadas metaloproteinasas participan en la renovación de la matriz mediante mecanismos regulados por señales celulares. Una actividad desproporcionada puede modificar la organización de las fibras y comprometer sus propiedades mecánicas. La investigación de Barclay et al. (2024) aporta elementos para estudiar intervenciones proteicas posteriores al ejercicio. No obstante, evaluar la reparación tendinosa requiere indicadores específicos y periodos de observación suficientemente prolongados.

La adaptación osteomuscular involucra una interacción continua entre fuerzas mecánicas y metabolismo mineral. El tejido óseo responde a las cargas mediante procesos coordinados de formación y resorción. Los osteocitos participan en la detección de deformaciones y regulan señales que afectan la actividad de osteoblastos y osteoclastos. La disponibilidad de calcio y vitamina D contribuye al mantenimiento de funciones relacionadas con la mineralización. Su aprovechamiento depende del estado nutricional y de la regulación endocrina individual del deportista.

La recuperación de las estructuras conectivas requiere considerar diferencias temporales entre respuestas celulares y cambios mecánicos observables. Un aumento transitorio de marcadores relacionados con la síntesis de colágeno no garantiza modificaciones inmediatas en la resistencia del tendón. Barclay et al. (2024) estudiaron respuestas posteriores al ejercicio excéntrico mediante intervenciones nutricionales diferenciadas. Dicho enfoque permite examinar efectos de recuperación, aunque la adaptación estructural prolongada exige investigaciones con mediciones específicas de propiedades tisulares y seguimiento longitudinal adecuado.

La disponibilidad energética insuficiente puede comprometer procesos relacionados con el mantenimiento del tejido óseo y conectivo. Las alteraciones hormonales asociadas con restricciones prolongadas afectan potencialmente el equilibrio entre formación y degradación estructural. En deportistas sometidos a cargas elevadas, la alimentación debe proporcionar recursos compatibles con las necesidades metabólicas y la conservación de la masa ósea. La recuperación también depende de una progresión mecánica razonable. Ninguna intervención nutricional sustituye las condiciones necesarias para una adaptación funcional adecuada.

La recuperación del tejido conectivo representa un proceso de adaptación gradual cuya eficacia depende de la interacción entre

estímulos mecánicos y disponibilidad de nutrientes. La investigación de Barclay et al. (2024) contribuye al análisis de fuentes proteicas utilizadas después del ejercicio excéntrico. Sin embargo, sus implicaciones deben interpretarse según los tejidos y resultados evaluados. Comprender las particularidades del metabolismo del colágeno permite distinguir entre respuestas bioquímicas tempranas y modificaciones estructurales que requieren periodos prolongados de adaptación.

3.6. Biomarcadores bioquímicos y funcionales para evaluar la recuperación y la tolerancia a las cargas de entrenamiento

La evaluación de la recuperación deportiva requiere identificar modificaciones fisiológicas que permitan interpretar la respuesta individual frente a las cargas de entrenamiento. Los biomarcadores bioquímicos proporcionan información sobre procesos metabólicos y celulares asociados con el esfuerzo. Sin embargo, sus variaciones no representan necesariamente una alteración funcional. La interpretación adquiere mayor precisión cuando se consideran mediciones repetidas y condiciones de obtención comparables. Su utilidad depende de relacionar los resultados analíticos con manifestaciones observables del rendimiento físico.

La creatina quinasa constituye uno de los indicadores utilizados para examinar alteraciones musculares posteriores al ejercicio exigente. Su concentración sanguínea puede aumentar cuando determinadas condiciones mecánicas modifican la permeabilidad de las membranas celulares. No obstante, presenta diferencias individuales considerables y una evolución temporal variable. Valores elevados no permiten establecer directamente la magnitud del daño tisular ni el tiempo necesario para recuperarse. Su interpretación requiere considerar antecedentes de

entrenamiento y respuestas previamente registradas en cada deportista.

Los indicadores relacionados con el metabolismo energético permiten examinar determinadas respuestas fisiológicas ante esfuerzos de intensidad variable. Las concentraciones de lactato reflejan parcialmente el equilibrio entre producción y utilización metabólica durante el ejercicio. Su eliminación posterior ocurre mediante procesos relativamente rápidos y no constituye una medida directa de recuperación muscular prolongada. Otros parámetros pueden aportar información sobre disponibilidad de sustratos. Sin embargo, ninguna medición aislada permite describir completamente la restauración de la capacidad funcional tras entrenamientos exigentes.

La investigación metabolómica permite identificar conjuntos de pequeñas moléculas relacionadas con diferentes rutas bioquímicas. Malsagova et al. (2024) estudiaron perfiles metabolómicos y proteómicos de deportistas sometidos a actividad física en condiciones hipóxicas. Su enfoque amplía las posibilidades de examinar respuestas fisiológicas mediante patrones moleculares. La interpretación de dichos perfiles exige considerar que numerosas sustancias cambian simultáneamente durante el esfuerzo. Distinguir modificaciones adaptativas de señales potencialmente desfavorables representa una tarea metodológica relevante para la investigación deportiva.

El análisis proteómico complementa la evaluación metabólica mediante la identificación de proteínas relacionadas con funciones celulares específicas. Determinadas variaciones pueden reflejar modificaciones en procesos de señalización y regulación fisiológica. Malsagova et al. (2024) abordaron conjuntamente perfiles proteómicos y metabolómicos bajo condiciones de disponibilidad reducida de oxígeno. Dicho planteamiento permite examinar respuestas moleculares complejas ante exigencias ambientales particulares. Sin embargo, trasladar

sus resultados a programas habituales de entrenamiento requiere considerar diferencias individuales y características del estímulo aplicado.

La exposición a condiciones hipóxicas introduce modificaciones fisiológicas que pueden influir en la interpretación de los biomarcadores deportivos. La menor disponibilidad de oxígeno altera determinadas rutas metabólicas y estimula mecanismos compensatorios relacionados con el transporte y aprovechamiento energético. También pueden producirse cambios en el equilibrio de líquidos corporales. Malsagova et al. (2024) investigaron respuestas moleculares durante actividad física bajo hipoxia. Sus aportaciones permiten reconocer la necesidad de distinguir efectos ambientales y respuestas específicas al entrenamiento.

Los indicadores funcionales ofrecen información complementaria sobre la capacidad del deportista para recuperar determinadas cualidades físicas. Las pruebas de salto y producción de fuerza permiten detectar variaciones del rendimiento neuromuscular después de sesiones exigentes. Su aplicación requiere protocolos reproducibles y condiciones semejantes entre evaluaciones. Una disminución transitoria puede reflejar fatiga acumulada, aunque también intervienen factores técnicos y motivacionales. La interpretación longitudinal resulta preferible a comparaciones aisladas realizadas sin referencias individuales previamente establecidas durante periodos normales.

La frecuencia cardíaca y su variabilidad proporcionan indicadores indirectos de determinados procesos relacionados con la regulación autónoma. Sus valores pueden modificarse por entrenamiento y condiciones ambientales, además de factores cotidianos como descanso y estado emocional. Las mediciones matutinas permiten establecer referencias individuales cuando se mantienen procedimientos constantes. Sin embargo, una variación aislada no determina necesariamente intolerancia al

entrenamiento. Su utilidad aumenta al examinar tendencias y relacionarlas con indicadores funcionales obtenidos durante periodos comparables.

Tabla 3
Procesos fisiológicos y nutricionales relacionados con la recuperación posterior al ejercicio

Componente de la recuperación	Procesos fisiológicos y consideraciones nutricionales
Resíntesis de glucógeno y restauración energética	La reposición de glucógeno muscular y hepático depende de la disponibilidad de carbohidratos y del tiempo transcurrido entre esfuerzos. Su regulación permite recuperar la capacidad energética y responder a nuevas cargas de entrenamiento.
Remodelación muscular y reparación tisular	La reparación muscular comprende mecanismos de renovación proteica y reorganización celular posteriores al esfuerzo. El aporte suficiente de proteínas y aminoácidos esenciales favorece el mantenimiento estructural y la recuperación funcional.
Respuesta inflamatoria y estrés oxidativo	La inflamación transitoria y la señalización oxidativa intervienen en la adaptación al ejercicio. Los compuestos bioactivos alimentarios pueden modular determinadas respuestas celulares. Su utilización requiere considerar los efectos sobre los mecanismos fisiológicos de adaptación.
Sueño y recuperación neuromuscular	La duración y calidad del sueño influyen en la regulación metabólica y el funcionamiento neuromuscular. La alimentación adecuada y la regularidad de los horarios contribuyen a mantener condiciones favorables para la recuperación.
Metabolismo del colágeno y adaptación osteomuscular	La renovación del tejido conectivo depende de estímulos mecánicos y disponibilidad nutricional. El metabolismo del colágeno participa en el mantenimiento tendinoso. El aporte adecuado de proteínas y micronutrientes contribuye a conservar la integridad estructural del aparato locomotor.
Biomarcadores y tolerancia al entrenamiento	Los indicadores bioquímicos y funcionales permiten examinar respuestas individuales frente a las cargas físicas. Su interpretación conjunta facilita identificar variaciones metabólicas y modificaciones del rendimiento relacionadas con la recuperación.

Nota. Elaboración basada en Gejl y Nybo (2021), Barclay et al. (2024), Gonzalez et al. (2026), Doherty et al. (2024) y Malsagova et al. (2024).

La integración de datos bioquímicos y funcionales exige procedimientos que permitan reconocer variaciones habituales y cambios fisiológicamente relevantes. Los perfiles moleculares estudiados por Malsagova et al. (2024) muestran el interés de examinar múltiples componentes de la respuesta al ejercicio. Sin embargo, las técnicas analíticas avanzadas requieren validación antes de incorporarse como instrumentos rutinarios de decisión deportiva. La selección de indicadores debe responder a objetivos definidos y considerar su reproducibilidad y utilidad práctica en deportistas.

La tolerancia a las cargas de entrenamiento puede interpretarse mediante la evolución conjunta del rendimiento y las respuestas fisiológicas individuales. Las variaciones persistentes adquieren mayor significado cuando coinciden con deterioro funcional o recuperación insuficiente. Los biomarcadores permiten ampliar la observación, aunque sus resultados necesitan una lectura prudente. El seguimiento continuado facilita reconocer patrones personales y ajustar decisiones sin depender de umbrales universales. La evaluación adquiere valor cuando vincula mediciones confiables con exigencias deportivas concretas.

Capítulo IV

Microbiota intestinal, inmunometabolismo y resiliencia fisiológica del deportista

La comprensión del rendimiento deportivo ha experimentado una transformación progresiva al reconocer que las adaptaciones al entrenamiento dependen de relaciones fisiológicas que trascienden la función muscular. Entre los sistemas involucrados, el intestino ocupa una posición relevante por su participación en el aprovechamiento nutricional y la regulación de procesos metabólicos e inmunitarios. Su actividad mantiene vínculos permanentes con otros órganos. Desde dicha perspectiva, la microbiota intestinal constituye un componente de interés para comprender la respuesta integral del organismo al ejercicio físico.

El organismo del deportista afronta demandas variables que requieren una coordinación constante entre disponibilidad energética y mecanismos de regulación interna. La intensidad del esfuerzo modifica temporalmente funciones digestivas y respuestas inmunitarias que pueden repercutir sobre el bienestar físico. Pérez-Castillo et al. (2024) examinan las particularidades de la microbiota intestinal en deportistas y destacan su relación con el ejercicio y los hábitos alimentarios. Dicha aproximación permite considerar las adaptaciones fisiológicas desde una perspectiva más amplia que la capacidad muscular aislada.

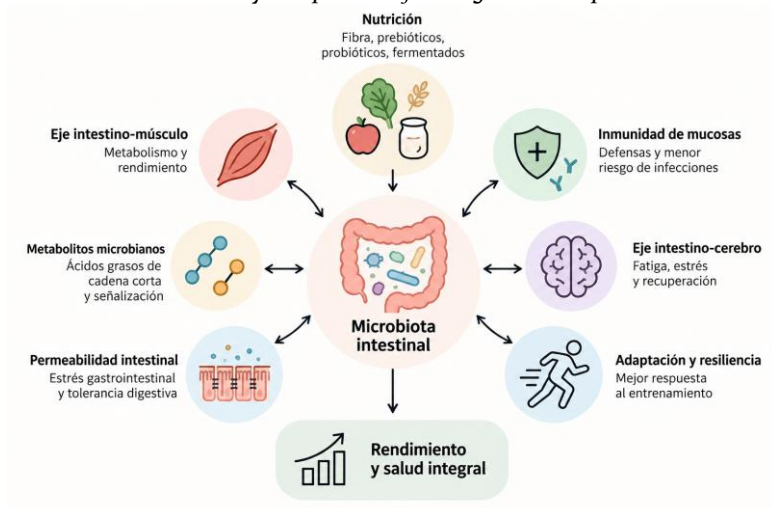
La microbiota intestinal constituye una comunidad biológica dinámica cuya composición y actividad responden a múltiples influencias ambientales. La alimentación habitual, los patrones de actividad física y las características individuales contribuyen a configurar sus propiedades funcionales. Sin embargo, las diferencias observadas entre deportistas no permiten establecer un modelo microbiano universalmente favorable. El interés científico se orienta hacia las funciones que desarrollan dichas comunidades y las condiciones que modifican su comportamiento durante distintas etapas de preparación y competición deportiva.

La relación entre actividad microbiana y metabolismo energético adquiere particular significado cuando aumentan las

exigencias del entrenamiento. Los microorganismos intestinales participan en la transformación de componentes alimentarios y generan sustancias capaces de intervenir en procesos de señalización fisiológica. Su contribución debe interpretarse dentro de un sistema donde participan numerosos tejidos y mecanismos reguladores. Comprender dicha interacción exige distinguir los procesos identificados experimentalmente de sus posibles consecuencias sobre la capacidad física y la adaptación deportiva individual.

Figura 10

Microbiota intestinal y adaptación fisiológica del deportista



La producción de metabolitos bacterianos introduce una dimensión adicional en el estudio de la nutrición deportiva. Determinadas moléculas derivadas de la fermentación intestinal pueden participar en la comunicación entre tejidos y modificar respuestas celulares. No obstante, su presencia no garantiza efectos funcionales específicos durante el esfuerzo. Pérez-Castillo et al. (2024) permiten reconocer el interés de dichas interacciones dentro de la fisiología del deportista, aunque persisten interrogantes sobre

su magnitud y relevancia en condiciones reales de entrenamiento y competición.

El funcionamiento intestinal adquiere especial importancia cuando las demandas del ejercicio comprometen temporalmente el equilibrio digestivo. Las disciplinas de resistencia presentan condiciones particulares debido a la duración del esfuerzo y a las necesidades de alimentación durante la actividad. En determinados deportistas aparecen molestias que dificultan mantener las estrategias nutricionales previstas. Dichas manifestaciones responden a mecanismos diversos y requieren una interpretación individual. Su estudio permite relacionar las condiciones fisiológicas del ejercicio con la tolerancia alimentaria y el bienestar.

La regulación inmunitaria representa otra dimensión de interés durante periodos caracterizados por cargas elevadas y recuperación limitada. Las superficies mucosas participan en la defensa frente a agentes ambientales y mantienen relaciones estrechas con las comunidades microbianas. Kearns et al. (2024) analizaron investigaciones sobre probióticos, inflamación gastrointestinal y fatiga percibida en deportistas. Su revisión permite reconocer las posibilidades de intervención nutricional y las limitaciones de una evidencia que todavía presenta diferencias metodológicas importantes entre estudios publicados.

La alimentación ofrece oportunidades para influir sobre el ambiente intestinal mediante decisiones sostenidas en el tiempo. La selección de alimentos vegetales y productos fermentados puede modificar la disponibilidad de nutrientes utilizados por distintas poblaciones bacterianas. También se investigan intervenciones con microorganismos específicos. Sin embargo, la respuesta individual depende de factores que dificultan formular recomendaciones uniformes. La práctica nutricional requiere equilibrar las necesidades deportivas con la tolerancia digestiva y la calidad general de la alimentación habitual.

Las relaciones entre intestino y sistema nervioso amplían el interés fisiológico de la microbiota hacia experiencias frecuentes durante la preparación deportiva. La percepción de fatiga, el estrés competitivo y la recuperación subjetiva responden a procesos complejos donde intervienen señales corporales y factores psicológicos. Pérez-Castillo et al. (2024) examinan la microbiota del deportista desde una perspectiva integradora. Aun cuando existen mecanismos de comunicación identificados, su influencia específica sobre dichas experiencias continúa requiriendo investigaciones humanas rigurosas.

El estudio de la microbiota intestinal plantea la necesidad de integrar hallazgos biológicos con observaciones obtenidas durante la práctica deportiva. Las asociaciones entre microorganismos y variables fisiológicas ofrecen información relevante, pero requieren confirmación antes de convertirse en criterios de intervención. Desde dicha orientación, el capítulo aborda las relaciones entre metabolismo, función intestinal, regulación inmunitaria y comunicación nerviosa. Su propósito es comprender las posibilidades y límites de la evidencia disponible para fundamentar decisiones nutricionales ajustadas a las necesidades del deportista.

4.1. Eje intestino-músculo y participación de la microbiota en el metabolismo energético y la capacidad física

La relación entre el intestino y el tejido muscular constituye un campo de investigación relevante para comprender las adaptaciones fisiológicas al ejercicio. Ambos sistemas mantienen una comunicación permanente mediante señales metabólicas, inmunitarias y endocrinas que intervienen en la disponibilidad energética y la respuesta al esfuerzo. La microbiota intestinal participa en dicha interacción mediante la transformación de nutrientes y la producción de metabolitos

bioactivos. Su actividad puede modificar las condiciones internas que favorecen el funcionamiento muscular durante el entrenamiento deportivo prolongado.

El eje intestino-músculo funciona mediante mecanismos de comunicación bidireccional que vinculan la actividad microbiana con las necesidades metabólicas del organismo. Durante el ejercicio, el músculo esquelético modifica su consumo de sustratos y libera moléculas capaces de influir sobre otros tejidos. Paralelamente, el ambiente intestinal responde a cambios circulatorios, hormonales y nutricionales. Pérez-Castillo et al. (2024) describen la microbiota del deportista como un ecosistema dinámico relacionado con la práctica física, aunque sus características dependen de múltiples factores individuales y ambientales.

La fermentación bacteriana de carbohidratos no digeribles genera ácidos grasos de cadena corta, principalmente acetato, propionato y butirato. Dichos compuestos representan una vía de aprovechamiento energético complementaria a la digestión convencional. El acetato puede incorporarse al metabolismo periférico, mientras el propionato participa principalmente en procesos hepáticos. El butirato proporciona energía a las células del colon y contribuye al mantenimiento de su integridad. La distribución de dichas funciones permite comprender la influencia metabólica indirecta de la microbiota sobre el rendimiento muscular.

La disponibilidad de combustible durante el esfuerzo depende de una regulación coordinada entre reservas corporales, aporte alimentario y demanda muscular. Dentro de dicha organización, los metabolitos bacterianos pueden intervenir en rutas vinculadas con la oxidación de nutrientes y la sensibilidad a la insulina. Sin embargo, su contribución cuantitativa al ejercicio humano permanece insuficientemente definida. La investigación debe distinguir entre modificaciones metabólicas observadas

experimentalmente y beneficios deportivos comprobados, especialmente cuando se pretende trasladar resultados obtenidos en animales a deportistas entrenados.

La eficiencia mitocondrial representa otro punto de interés dentro de la relación entre microbiota y capacidad física. Determinados metabolitos intestinales participan en procesos celulares asociados con la producción de energía y la regulación del estrés oxidativo. Su influencia podría adquirir relevancia durante esfuerzos prolongados que requieren una elevada actividad aeróbica. Aun cuando existen mecanismos biológicos plausibles, todavía resulta prematuro atribuir mejoras directas de la función mitocondrial humana a modificaciones específicas de la composición bacteriana intestinal del deportista.

La diversidad microbiana también ha despertado interés por su posible relación con la resistencia física y las adaptaciones al entrenamiento. Pérez-Castillo et al. (2024) examinan las particularidades de la microbiota en poblaciones deportistas y destacan la influencia conjunta del ejercicio y la alimentación. Sin embargo, una mayor diversidad bacteriana no garantiza automáticamente un rendimiento superior. Las diferencias entre disciplinas, cargas de entrenamiento y hábitos alimentarios dificultan establecer patrones universales. Cada asociación requiere interpretarse considerando las características fisiológicas individuales del deportista.

El ejercicio prolongado modifica temporalmente la circulación sanguínea intestinal debido a la redistribución del flujo hacia los músculos activos. Cuando la intensidad aumenta, dicha respuesta puede alterar la función digestiva y comprometer el aprovechamiento de nutrientes durante la actividad. La microbiota participa en el mantenimiento del ambiente intestinal mediante interacciones con la mucosa y sus productos metabólicos. Aunque su contribución exacta continúa investigándose, preservar una

función intestinal adecuada resulta importante para sostener las exigencias energéticas del entrenamiento y la competición.

La relación entre microorganismos intestinales y metabolismo muscular adquiere particular interés al considerar la utilización de aminoácidos. Algunas bacterias intervienen en su transformación y generan compuestos capaces de incorporarse a distintas rutas metabólicas. Dichas interacciones pueden modificar la disponibilidad de determinados metabolitos circulantes, aunque sus efectos sobre la síntesis proteica muscular humana requieren mayor investigación. La interpretación debe considerar que el balance proteico depende principalmente del estímulo mecánico, la ingesta nutricional y las condiciones fisiológicas individuales de recuperación.

Las intervenciones nutricionales dirigidas a modificar la microbiota plantean posibilidades para estudiar su participación en la capacidad física. Pérez-Castillo et al. (2024) analizan estrategias relacionadas con probióticos, prebióticos y alimentación deportiva, reconociendo diferencias importantes entre los resultados disponibles. La respuesta puede variar según las cepas utilizadas, las características del deportista y la duración de la intervención. Por ello, todavía no existe fundamento suficiente para considerar cualquier modificación microbiana como una mejora predecible del rendimiento energético o muscular.

Comprender el eje intestino-músculo exige integrar la actividad bacteriana dentro de la fisiología del ejercicio sin atribuirle efectos independientes de otros procesos corporales. La capacidad física responde a interacciones entre disponibilidad energética, adaptación muscular y regulación metabólica. En dicho entramado, la microbiota puede contribuir mediante productos de fermentación y señales bioquímicas que alcanzan distintos tejidos. Su estudio permite ampliar la comprensión del rendimiento deportivo, siempre que las asociaciones observadas se contrasten mediante investigaciones humanas rigurosas y reproducibles.

4.2. Metabolitos microbianos, ácidos grasos de cadena corta y señalización metabólica durante el ejercicio

La actividad metabólica de la microbiota intestinal adquiere interés cuando se examinan las demandas fisiológicas del ejercicio. Los microorganismos transforman componentes alimentarios y compuestos producidos por el organismo en moléculas capaces de intervenir en la comunicación entre tejidos. Entre ellas destacan los ácidos grasos de cadena corta, cuya acción trasciende el aporte energético local. Su presencia en el medio intestinal y circulatorio permite estudiar conexiones entre fermentación bacteriana, regulación celular y respuestas al esfuerzo físico.

El acetato, el propionato y el butirato presentan destinos metabólicos diferentes después de su producción en el colon. Una proporción del acetato alcanza la circulación periférica y puede utilizarse en tejidos. El propionato es captado por el hígado, mientras el butirato constituye un combustible para las células intestinales. Tales diferencias condicionan su disponibilidad sistémica. Por tanto, resulta inadecuado interpretar los ácidos grasos de cadena corta como un conjunto de moléculas funcionalmente equivalentes durante el ejercicio.

Además de participar en rutas energéticas, dichos metabolitos actúan mediante receptores celulares especializados. Los receptores FFAR2 y FFAR3 reconocen determinados ácidos grasos de cadena corta y participan en respuestas hormonales e inmunometabólicas. La intensidad de dichas respuestas depende del tejido y de las concentraciones alcanzadas. Pérez-Castillo et al. (2024) examinan la relación entre microbiota y fisiología deportiva, aunque la traducción de mecanismos moleculares a resultados funcionales humanos todavía exige evidencias experimentales más consistentes en deportistas.

La señalización intestinal puede influir sobre la liberación de hormonas relacionadas con el apetito y la regulación de la glucosa. Entre ellas figuran el péptido YY y el péptido similar al glucagón tipo 1, cuya secreción responde a diversos estímulos nutricionales. Los productos de fermentación bacteriana forman parte de dichos estímulos. Durante el ejercicio, sin embargo, la respuesta hormonal depende también de la intensidad del esfuerzo y del estado alimentario previo de cada persona individual.

El metabolismo del lactato ofrece otra perspectiva sobre las interacciones entre microorganismos y actividad física. Algunas bacterias intestinales pueden utilizarlo o transformarlo mediante rutas fermentativas que generan otros compuestos. El interés científico radica en determinar si tales procesos modifican de manera apreciable el ambiente metabólico del deportista. La evidencia disponible todavía no permite afirmar que la utilización bacteriana del lactato sanguíneo mejore directamente la tolerancia al esfuerzo ni acelere su eliminación muscular después del entrenamiento.

La producción de metabolitos intestinales depende tanto de las comunidades bacterianas como de los sustratos disponibles para su fermentación. Las variaciones en el consumo de fibra pueden alterar los perfiles de ácidos grasos de cadena corta, aunque las respuestas individuales muestran diferencias considerables. Pérez-Castillo et al. (2024) destacan la relevancia de valorar conjuntamente alimentación y práctica deportiva al estudiar la microbiota. Tal enfoque evita atribuir a microorganismos particulares efectos derivados de patrones dietéticos más amplios.

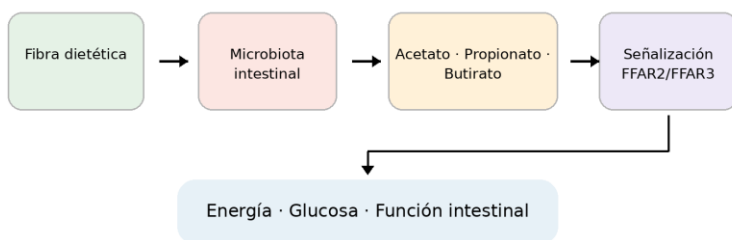
Durante sesiones exigentes, los cambios en la perfusión intestinal y el tránsito digestivo pueden modificar temporalmente las condiciones donde ocurre la fermentación. La relación entre ejercicio y producción de metabolitos no responde necesariamente a una dirección uniforme. Importan la duración del esfuerzo, la hidratación y la disponibilidad de nutrientes fermentables.

Además, las concentraciones medidas en heces no reflejan directamente la cantidad absorbida ni la exposición real de los tejidos periféricos a dichos compuestos en conjunto.

Los metabolitos derivados del triptófano y los ácidos biliares transformados por bacterias amplían el panorama de la señalización intestinal. Algunos interactúan con receptores implicados en la regulación inmunitaria y el metabolismo de nutrientes. Su participación durante el ejercicio despierta interés por las conexiones entre inflamación transitoria y adaptación fisiológica. Sin embargo, identificar una vía de señalización no demuestra que modificarla produzca beneficios deportivos. Es necesario considerar la dosis, el momento y la respuesta del organismo.

Figura 11

Metabolitos microbianos y señalización energética



La evaluación de dichos mecanismos presenta dificultades metodológicas que condicionan la interpretación de los resultados. Las muestras fecales describen parcialmente la actividad microbiana, mientras los análisis sanguíneos ofrecen información diferente sobre metabolitos circulantes. También influyen los horarios de alimentación y la proximidad de la última sesión de entrenamiento. Pérez-Castillo et al. (2024) subrayan la heterogeneidad de los estudios realizados en deportistas. Una caracterización rigurosa requiere relacionar mediciones

bioquímicas con indicadores fisiológicos obtenidos bajo condiciones comparables.

Desde una perspectiva aplicada, el interés de los metabolitos microbianos reside en comprender las respuestas individuales al entrenamiento y a la alimentación. Todavía faltan ensayos capaces de establecer relaciones causales entre perfiles metabólicos específicos y mejoras de la capacidad física. La interpretación prudente reconoce el valor de las rutas identificadas sin convertirlas en promesas de intervención. La investigación deberá precisar qué señales alcanzan relevancia fisiológica durante el esfuerzo y cuáles permanecen como hallazgos experimentales preliminares.

4.3. Permeabilidad intestinal, estrés gastrointestinal y tolerancia digestiva en deportes de resistencia

En los deportes de resistencia, el aparato digestivo afronta exigencias que pueden alterar su funcionamiento digestivo habitual. La carrera prolongada y otras modalidades sostenidas combinan demanda circulatoria, movimiento repetitivo y necesidades elevadas de hidratación. Bajo determinadas condiciones aparecen molestias que dificultan la ingesta y comprometen la continuidad del esfuerzo. La permeabilidad intestinal adquiere relevancia dentro de dicho proceso porque refleja cambios en la función de barrera del epitelio, aunque no equivale necesariamente a enfermedad digestiva.

Durante el ejercicio intenso, parte del flujo sanguíneo se dirige hacia los músculos activos y disminuye la perfusión esplácnica. La reducción transitoria del aporte de oxígeno puede afectar las células intestinales y modificar las uniones que regulan el paso de sustancias. El calor ambiental y la deshidratación agravan dicho fenómeno. Sin embargo, la magnitud de las alteraciones varía entre personas y sesiones, por lo que conviene evitar interpretaciones uniformes basadas en la duración del esfuerzo.

La barrera intestinal depende de la integridad epitelial, el moco protector y la vigilancia inmunitaria local. Cuando aumenta su permeabilidad, ciertos componentes presentes en la luz intestinal pueden atravesarla con mayor facilidad. Ello no implica que aparezca siempre una respuesta inflamatoria clínicamente significativa. Kearns et al. (2024) revisaron investigaciones sobre probióticos, inflamación gastrointestinal y fatiga percibida en deportistas, una relación cuyo estudio requiere distinguir los cambios biológicos medidos de los síntomas durante la actividad física.

Las manifestaciones gastrointestinales durante las pruebas de resistencia abarcan náuseas, distensión abdominal, urgencia defecatoria y dolor. Algunas personas presentan reflujo o sensación de plenitud incluso cuando siguen pautas nutricionales conocidas. Los síntomas superiores pueden relacionarse con alteraciones del vaciamiento gástrico, mientras los inferiores responden a mecanismos diferentes. Su aparición tampoco depende exclusivamente de la permeabilidad intestinal. La interacción entre intensidad, alimentación previa y susceptibilidad individual explica parte de la variabilidad observada entre competiciones y entrenamientos.

La cantidad y composición de los alimentos consumidos antes de competir influyen sobre la tolerancia digestiva. Una carga de grasa o fibra cercana al inicio puede aumentar las molestias en deportistas susceptibles. También importa la concentración de carbohidratos de las bebidas y su velocidad de ingestión. El problema aparece cuando las necesidades energéticas superan la capacidad digestiva momentánea. Por ello, las pautas utilizadas en reposo no siempre resultan apropiadas durante esfuerzos prolongados de intensidad elevada.

La exposición al calor añade una carga fisiológica particular al intestino del deportista. La termorregulación demanda circulación cutánea y modifica el reparto sanguíneo durante el

ejercicio. Si las pérdidas de líquido son importantes, puede reducirse todavía más la perfusión visceral. Las consecuencias digestivas dependen de la intensidad térmica y del estado de hidratación. No obstante, atribuir cualquier molestia al aumento de permeabilidad simplifica un proceso en el que intervienen múltiples mecanismos simultáneos y variables personales.

La microbiota intestinal participa en el mantenimiento de la mucosa y influye en las respuestas locales al estrés físico. Su posible modulación mediante probióticos ha despertado interés por la frecuencia de molestias digestivas en atletas. Kearns et al. (2024) evaluaron la evidencia relacionada con inflamación gastrointestinal y fatiga percibida. La heterogeneidad entre intervenciones impide asumir efectos equivalentes entre cepas o productos. Tampoco permite considerar la suplementación una medida universal para prevenir síntomas durante competiciones exigentes.

El entrenamiento de la tolerancia gastrointestinal constituye una estrategia práctica para adaptar la ingesta a las condiciones de competición. Consiste en ensayar cantidades, concentraciones y horarios de consumo en sesiones representativas. La repetición permite reconocer límites individuales y reducir decisiones improvisadas en carrera. Conviene introducir modificaciones graduales y registrar molestias junto con la intensidad del esfuerzo. Aunque dicha práctica puede favorecer la tolerancia alimentaria, sus efectos sobre la permeabilidad intestinal requieren una evaluación diferenciada individual y específica.

La investigación de las alteraciones intestinales utiliza indicadores de daño epitelial, pruebas de permeabilidad y registros de síntomas. Ninguna medición aislada describe por completo el funcionamiento digestivo durante el ejercicio. Las concentraciones de marcadores pueden variar según el momento de obtención de las muestras. Una modificación bioquímica no siempre coincide

con malestar perceptible. La revisión de Kearns et al. (2024) invita a examinar prudentemente los resultados sobre inflamación y fatiga, cuando proceden de protocolos heterogéneos.

La tolerancia digestiva condiciona la posibilidad de mantener una estrategia nutricional durante pruebas prolongadas. Su valoración exige atender a antecedentes individuales, características del esfuerzo y condiciones ambientales. Ante síntomas persistentes o intensos, resulta necesario descartar causas clínicas que excedan las respuestas habituales al ejercicio. En la preparación deportiva, reconocer los factores desencadenantes permite ajustar la alimentación sin comprometer el aporte energético. La protección intestinal adquiere sentido cuando se vincula con decisiones concretas y observaciones repetidas.

4.4. Interacción entre nutrición, inmunidad de mucosas y susceptibilidad a infecciones durante periodos de entrenamiento intensivo

Durante los periodos de entrenamiento intensivo, la inmunidad de mucosas adquiere relevancia por su contacto permanente con microorganismos y partículas ambientales. Las superficies respiratorias e intestinales mantienen mecanismos defensivos que dependen del estado nutricional y de la regulación inmunitaria. El esfuerzo repetido modifica temporalmente ciertas respuestas celulares y humores, aunque tales variaciones no indican necesariamente inmunodeficiencia. Comprender su significado exige considerar la carga acumulada, la recuperación disponible y la exposición cotidiana habitual a agentes infecciosos.

La inmunoglobulina A secretora participa en la protección de las mucosas mediante el reconocimiento de antígenos y la limitación de su adhesión al epitelio. Su concentración salival ha sido estudiada en deportistas sometidos a cargas elevadas. Sin embargo, los valores fluctúan por factores individuales y por las condiciones de muestreo. Una disminución aislada no permite

diagnosticar susceptibilidad infecciosa. Resulta más informativo observar tendencias junto con síntomas, descanso y características del entrenamiento físico realizado recientemente.

La disponibilidad energética condiciona múltiples funciones inmunitarias porque la proliferación celular y la síntesis de mediadores requieren nutrientes suficientes. Cuando la ingesta energética permanece por debajo del gasto durante periodos prolongados, pueden alterarse procesos relacionados con defensa y reparación tisular. El riesgo depende de la magnitud y duración del déficit. Por ello, valorar la alimentación del deportista exige examinar tanto el aporte total como su distribución alrededor de las sesiones más demandantes del programa deportivo.

Los carbohidratos desempeñan una función relevante durante sesiones prolongadas al contribuir al mantenimiento de la glucemia y reducir determinadas respuestas asociadas al estrés fisiológico. Su consumo durante el esfuerzo puede atenuar algunos cambios hormonales e inmunitarios transitorios. No obstante, esa modulación no demuestra por sí misma una reducción de infecciones. La utilidad de una pauta depende de las demandas de la disciplina y de la tolerancia individual, sin convertir cada variación inmunológica en objetivo nutricional.

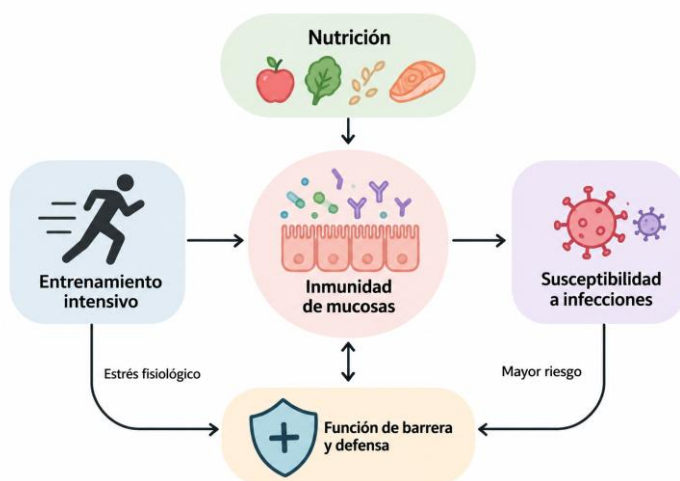
La suficiencia proteica también merece atención por su relación con la renovación de tejidos y la producción de componentes inmunitarios. Los aminoácidos intervienen en la síntesis de anticuerpos y proteínas implicadas en la respuesta defensiva. Sin embargo, consumir cantidades superiores a las necesidades habituales no garantiza protección adicional. El criterio nutricional debe considerar la carga física y la recuperación muscular sin separar artificialmente las necesidades inmunitarias del equilibrio general de la alimentación diaria del deportista.

Los micronutrientes intervienen en procesos que sostienen la integridad epitelial y la actividad de distintas células

inmunitarias. Las deficiencias de hierro, zinc o determinadas vitaminas pueden comprometer funciones fisiológicas relevantes. Sin embargo, la suplementación indiscriminada carece de justificación cuando no existe insuficiencia documentada. Las decisiones requieren valorar hábitos alimentarios y posibles pérdidas asociadas al entrenamiento. También conviene recordar que dosis elevadas de ciertos nutrientes pueden producir efectos adversos o interferir con otras funciones metabólicas normales.

Figura 12

Nutrición e inmunidad durante el entrenamiento intenso



La microbiota intestinal mantiene relaciones estrechas con el tejido inmunitario asociado a las mucosas. Sus productos metabólicos participan en señales que contribuyen a regular la respuesta local frente a estímulos ambientales. El interés por los probióticos procede parcialmente de dichas interacciones. Kearns et al. (2024) examinaron su posible influencia sobre inflamación gastrointestinal y fatiga percibida en deportistas. Sin embargo, los resultados de esas variables no deben extrapolarse directamente a la prevención de infecciones respiratorias.

Durante concentraciones deportivas y calendarios competitivos exigentes, la exposición a patógenos depende también de viajes, convivencia y condiciones generales de higiene. La aparición de síntomas respiratorios puede coincidir con cargas elevadas sin que exista una relación causal directa demostrada. El sueño insuficiente y el estrés psicológico acumulado añaden factores que complican la interpretación. Una evaluación rigurosa distingue infecciones confirmadas de molestias respiratorias ocasionadas por irritantes, alergias u otros procesos no infecciosos relativamente frecuentes en deportistas.

El estudio de intervenciones dirigidas a la microbiota requiere separar efectos sobre síntomas digestivos, marcadores inflamatorios y episodios infecciosos. Kearns et al. (2024) analizaron ensayos con probióticos y señalaron limitaciones derivadas de la diversidad de protocolos y resultados publicados. Las cepas y dosis utilizadas pueden producir respuestas distintas. Por tanto, una mejoría subjetiva de la fatiga no demuestra necesariamente un fortalecimiento de las defensas mucosas. La interpretación clínica exige indicadores clínicos adecuados y seguimiento suficiente.

La protección de las mucosas durante el entrenamiento intensivo depende de una combinación de factores modificables y exposiciones difíciles de controlar. Una alimentación suficiente favorece el mantenimiento de funciones defensivas, mientras la planificación de cargas permite limitar periodos de recuperación insuficiente. Las medidas de higiene y el reconocimiento temprano de síntomas complementan dicho cuidado. Desde la práctica profesional, conviene evitar explicaciones basadas en un biomarcador aislado y priorizar decisiones sustentadas en observaciones clínicas suficientemente consistentes.

4.5. Modulación dietética de la microbiota mediante fibra, prebióticos, probióticos y alimentos fermentados

La alimentación representa una vía accesible para modificar las condiciones ecológicas del intestino durante la preparación deportiva. La composición habitual de la dieta determina qué sustratos alcanzan el colon y cuáles pueden aprovechar las comunidades microbianas. Sin embargo, las respuestas no son uniformes. Influyen la diversidad alimentaria previa, el tránsito intestinal y las características individuales. Desde una perspectiva aplicada, interesa evaluar cambios sostenibles que respeten las necesidades energéticas del deportista y su tolerancia digestiva cotidiana.

La fibra alimentaria comprende compuestos con propiedades físicas y fermentativas diferentes. Algunas fracciones favorecen la formación de metabolitos bacterianos, mientras otras contribuyen principalmente al volumen fecal y al tránsito. Cereales integrales, legumbres, frutas y hortalizas aportan combinaciones variables de dichos componentes. Su incorporación requiere atender al volumen total de alimentos consumidos diariamente. En disciplinas con elevada demanda calórica, una ingesta excesivamente voluminosa puede dificultar alcanzar los requerimientos nutricionales previstos para cada jornada de entrenamiento.

La respuesta a la fibra depende también del momento de consumo. Antes de una competición prolongada, determinados alimentos ricos en residuos pueden incrementar la distensión o la urgencia intestinal en personas susceptibles. Reducir temporalmente su presencia alrededor del esfuerzo no implica abandonar su consumo habitual. Conviene distribuir las fuentes vegetales durante periodos de menor exigencia digestiva. La planificación permite conservar una alimentación variada sin

convertir las recomendaciones generales en reglas rígidas para todos los deportistas.

Los prebióticos son sustratos utilizados selectivamente por microorganismos del huésped que confieren un beneficio para la salud. Entre los más estudiados figuran ciertos fructanos y galactooligosacáridos. Su efecto depende de la dosis y de la capacidad fermentativa individual. Incrementos bruscos pueden producir gases o malestar abdominal. En deportistas resulta razonable valorar primero la alimentación habitual y después examinar si una intervención específica responde a necesidades identificadas mediante seguimiento nutricional y clínico individualizado de cada deportista.

Los probióticos contienen microorganismos vivos que, administrados en cantidades adecuadas, pueden proporcionar beneficios para la salud. Sus efectos no deben atribuirse indistintamente a cualquier especie o formulación comercial. Kearns et al. (2024) revisaron investigaciones sobre inflamación gastrointestinal y fatiga percibida en deportistas, mostrando la necesidad de interpretar cuidadosamente los resultados según las intervenciones evaluadas. La elección de un producto requiere conocer la cepa, la dosis estudiada y el resultado clínico que se pretende modificar.

La duración de una intervención probiótica merece tanta atención como su composición. Las investigaciones utilizan periodos de administración y procedimientos de evaluación distintos, lo que dificulta comparar resultados. También importa registrar la dieta habitual durante el seguimiento. Un cambio simultáneo en fibra, energía o entrenamiento puede alterar la interpretación del efecto observado. Kearns et al. (2024) permiten situar el interés por los probióticos dentro de una evidencia todavía heterogénea respecto de sus beneficios deportivos específicos.

Los alimentos fermentados ocupan un lugar particular porque su elaboración implica actividad microbiana, aunque el producto terminado no siempre contiene microorganismos vivos. Yogur, kéfir y determinadas preparaciones vegetales ofrecen perfiles nutricionales diferentes. Tampoco todos cumplen los criterios exigidos para considerarse probióticos. Su valor dietético depende de los ingredientes, la conservación y la cantidad consumida. Incorporarlos puede ampliar la variedad alimentaria, pero no garantiza por sí mismo cambios beneficiosos y persistentes en la microbiota intestinal humana.

La combinación de fibra y microorganismos seleccionados ha motivado el desarrollo de productos simbióticos. Su fundamento consiste en aprovechar interacciones entre sustratos y comunidades microbianas, aunque cada formulación requiere evaluación propia. Una mezcla comercial no adquiere eficacia por reunir ingredientes considerados saludables. Deben examinarse resultados medibles y condiciones de uso comparables con la práctica deportiva. También conviene registrar molestias digestivas, especialmente cuando coinciden suplementos nuevos con aumentos de volumen o intensidad del entrenamiento físico habitual.

La personalización dietética requiere reconocer que dos deportistas pueden responder de manera diferente al mismo alimento. Las restricciones previas, la disponibilidad de fibra y la sensibilidad a carbohidratos fermentables condicionan la tolerancia. En presencia de síntomas persistentes, aumentar prebióticos puede empeorar el bienestar digestivo. La revisión de Kearns et al. (2024) refuerza la conveniencia de distinguir resultados sobre molestias gastrointestinales de aquellos relacionados con fatiga, evitando atribuir beneficios generales a intervenciones particulares sin evidencia suficiente.

La modulación dietética de la microbiota debe integrarse en la planificación nutricional sin desplazar prioridades

establecidas para el rendimiento. La adecuación energética y la tolerancia durante el ejercicio siguen orientando las decisiones inmediatas. Los cambios alimentarios pueden introducirse gradualmente y evaluarse mediante registros de ingesta, síntomas y respuesta individual. Cuando se consideran suplementos microbianos, importa definir previamente el objetivo y revisar la evidencia. La continuidad alimentaria ofrece mejores condiciones para valorar resultados relevantes.

4.6. Comunicación bidireccional del eje intestino-cerebro y su relación con la fatiga central, el estrés y la recuperación

La comunicación entre intestino y cerebro constituye una red de señales nerviosas, endocrinas e inmunitarias que acompaña la respuesta del deportista al esfuerzo. El sistema nervioso regula funciones digestivas mediante circuitos autónomos, mientras las señales originadas en el intestino pueden influir sobre estados fisiológicos y conductuales. Durante cargas exigentes, dicha interacción adquiere interés por su posible relación con la percepción de fatiga. Sin embargo, todavía resulta difícil separar los efectos microbianos de otros factores concurrentes.

El nervio vago participa en la transmisión de información visceral hacia regiones cerebrales implicadas en la regulación autónoma. Sus terminaciones responden a señales provenientes de células intestinales y mediadores locales. La microbiota puede modificar indirectamente algunos de dichos estímulos mediante su actividad metabólica. Aunque los modelos experimentales permiten identificar vías plausibles, su relevancia cuantitativa real durante el ejercicio humano permanece incierta. Conviene distinguir la existencia de comunicación neural de una mejora demostrada del rendimiento físico.

La fatiga central describe procesos relacionados con la reducción de la activación voluntaria del músculo durante

esfuerzos exigentes. Su aparición depende de mecanismos cerebrales y espinales que interactúan con señales periféricas. Los metabolitos intestinales podrían participar indirectamente en dicha integración, pero todavía faltan pruebas causales en deportistas. Pérez-Castillo et al. (2024) examinan la microbiota del atleta desde una perspectiva aplicada y reconocen la complejidad de trasladar asociaciones biológicas a recomendaciones concretas de rendimiento individual.

El estrés psicológico modifica la actividad del sistema nervioso autónomo y del eje hipotálamo-hipófisis-suprarrenal. Dichas respuestas pueden alterar la motilidad intestinal, la secreción digestiva y la sensibilidad visceral. A su vez, las molestias abdominales pueden incrementar la preocupación antes de competir y modificar la percepción del esfuerzo. La relación funciona en ambas direcciones y varía entre personas. Una evaluación adecuada considera las condiciones emocionales junto con la alimentación y las exigencias concretas de cada sesión.

Entre los compuestos de interés figuran metabolitos derivados del triptófano que participan en rutas relacionadas con la señalización intestinal. Algunas bacterias influyen sobre su disponibilidad y transformación, aunque ello no demuestra cambios directos en la serotonina cerebral. La barrera hematoencefálica y la regulación metabólica limitan interpretaciones sencillas. Por esa razón, atribuir estados de ánimo o resistencia a la fatiga a una especie bacteriana particular excede lo demostrado actualmente en humanos deportistas físicamente activos y entrenados.

La inflamación asociada al esfuerzo representa otra vía potencial de comunicación entre tejidos periféricos y sistema nervioso. Las señales inmunitarias pueden modificar temporalmente la conducta, el apetito y las sensaciones corporales. Sin embargo, las respuestas inflamatorias agudas también forman parte de procesos normales de adaptación. Pérez-Castillo et al.

(2024) describen interacciones entre actividad física y microbiota, pero ello no permite interpretar cualquier modificación inmunitaria como causa de agotamiento mental o recuperación individual deficiente en deportistas.

El sueño introduce una dimensión adicional porque influye sobre la regulación autonómica, la conducta alimentaria y la recuperación percibida. Los horarios irregulares y los desplazamientos competitivos pueden modificar simultáneamente rutinas digestivas y patrones de descanso. Aunque se investigan asociaciones entre microbiota y sueño, todavía no puede afirmarse que una intervención intestinal mejore de manera predecible la arquitectura del descanso. Es preferible evaluar primero duración, regularidad y condiciones ambientales antes de atribuir alteraciones a microorganismos específicos.

La percepción subjetiva de fatiga merece atención porque integra señales corporales y experiencias previas que no siempre coinciden con marcadores fisiológicos. Un deportista puede manifestar cansancio elevado pese a conservar determinadas capacidades musculares. El malestar digestivo y la anticipación competitiva también pueden influir en dicha valoración. Para estudiar posibles vínculos microbianos conviene combinar cuestionarios validados con mediciones funcionales adecuadamente seleccionadas. La observación aislada de cambios bacterianos no permite identificar claramente el origen de una sensación compleja.

Las estrategias nutricionales orientadas al eje intestino-cerebro requieren prudencia frente a resultados preliminares. Determinados probióticos se investigan por posibles efectos sobre variables psicológicas, pero las respuestas dependen de cepas y poblaciones estudiadas. Pérez-Castillo et al. (2024) destacan la necesidad de recomendaciones prácticas apoyadas en evidencia específica para deportistas. Ningún perfil microbiano permite predecir actualmente por sí mismo la tolerancia al estrés

competitivo. También deben considerarse expectativas personales y diferencias en las condiciones de evaluación disponibles.

La recuperación deportiva reúne procesos neuromusculares y psicológicos que evolucionan a ritmos diferentes después del esfuerzo. La comunicación intestinal podría intervenir en parte de dicha regulación, aunque sus mecanismos funcionales siguen bajo investigación. Su estudio exige diseños que controlen alimentación, sueño y carga de entrenamiento sin reducir la experiencia del deportista a un marcador biológico. Reconocer dicha complejidad permite interpretar los hallazgos con cautela y preservar una visión integrada de la adaptación al ejercicio prolongado.

Tabla 4
Microbiota intestinal, regulación inmunometabólica y adaptación fisiológica en el rendimiento deportivo

Componente fisiológico	Mecanismos e implicaciones para el deportista
Eje intestino-músculo	La comunicación metabólica entre microbiota y tejido muscular participa en procesos relacionados con la utilización de nutrientes y la adaptación al ejercicio. Su contribución específica al rendimiento humano continúa bajo investigación.
Metabolitos microbianos y señalización metabólica	Los ácidos grasos de cadena corta intervienen en rutas energéticas y mecanismos de señalización celular. Sus efectos dependen de la actividad microbiana y de las condiciones fisiológicas del organismo.
Permeabilidad intestinal y estrés gastrointestinal	El ejercicio prolongado puede reducir la perfusión intestinal y modificar temporalmente la función de barrera. La intensidad del esfuerzo y las condiciones ambientales influyen sobre la aparición de molestias digestivas.
Tolerancia digestiva durante el ejercicio	La adaptación progresiva a la ingesta de líquidos y carbohidratos puede favorecer el cumplimiento de las estrategias nutricionales durante pruebas de resistencia. Las respuestas presentan diferencias individuales.
Nutrición e inmunidad de mucosas	La disponibilidad energética y el aporte adecuado de nutrientes contribuyen al mantenimiento de las funciones inmunitarias. La carga de

Componente fisiológico	Mecanismos e implicaciones para el deportista
	entrenamiento y la recuperación también condicionan la respuesta defensiva.
Susceptibilidad a infecciones	La exposición a agentes infecciosos y las condiciones de recuperación influyen sobre el riesgo de enfermedad. Las modificaciones transitorias de marcadores inmunitarios no demuestran necesariamente mayor susceptibilidad.
Fibra y prebióticos	Los componentes fermentables de la alimentación favorecen determinadas actividades microbianas. Su incorporación debe considerar las necesidades nutricionales y la tolerancia gastrointestinal del deportista.
Probióticos y alimentos fermentados	Determinadas intervenciones pueden modificar variables digestivas o inmunometabólicas. Los beneficios dependen de las cepas utilizadas y de la evidencia disponible para cada aplicación.
Eje intestino-cerebro	La comunicación nerviosa y endocrina conecta las funciones intestinales con mecanismos de regulación central. Su posible participación en la fatiga y el estrés competitivo requiere mayor investigación clínica.
Recuperación y resiliencia fisiológica	La adaptación al entrenamiento depende de interacciones entre nutrición, regulación metabólica y descanso. La microbiota constituye un componente potencial de dicha interacción, sin representar un predictor independiente del rendimiento.

Nota. Elaboración propia a partir de Pérez-Castillo et al. (2024) y Kearns et al. (2024). La información integra mecanismos fisiológicos y aplicaciones nutricionales abordados en el capítulo. Las relaciones descritas presentan distintos niveles de evidencia y no implican causalidad demostrada en todos los casos.

Capítulo V

Nutrición de precisión y tecnologías para la gestión del rendimiento deportivo

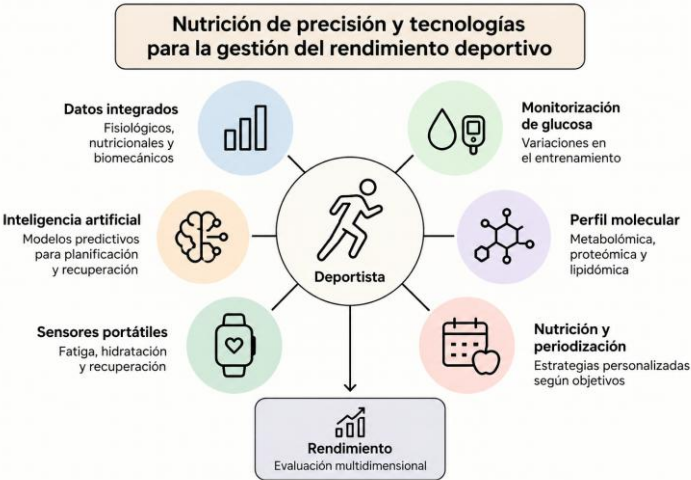
La nutrición deportiva atraviesa una transformación impulsada por la creciente disponibilidad de información biológica y herramientas digitales. Las decisiones alimentarias pueden fundamentarse en observaciones que reflejan diferencias individuales y variaciones durante la preparación física. Sin embargo, disponer de más información no garantiza comprender mejor las necesidades del organismo. El verdadero interés científico reside en interpretar las relaciones entre alimentación, adaptación y rendimiento. Desde dicha perspectiva, la nutrición de precisión plantea nuevas posibilidades para orientar intervenciones ajustadas a las características del deportista.

Durante décadas, la planificación nutricional deportiva se ha apoyado en recomendaciones derivadas de estudios poblacionales y estimaciones de requerimientos energéticos. Tales referencias conservan utilidad, aunque presentan limitaciones cuando se aplican a personas con respuestas fisiológicas diferentes. Bedrač et al. (2024) examinan las posibilidades de avanzar hacia estrategias individualizadas mediante tecnologías portátiles y aproximaciones ómicas. Su revisión permite reconocer un campo de investigación donde la información biológica adquiere relevancia para comprender diferencias que las evaluaciones convencionales no siempre permiten identificar.

La caracterización individual requiere observar al deportista como un organismo sometido a demandas cambiantes. Las respuestas metabólicas dependen de la naturaleza del esfuerzo y de las condiciones que acompañan cada período de entrenamiento. También intervienen las prácticas alimentarias y las características del movimiento. Integrar tales dimensiones permite construir interpretaciones más cercanas a la realidad deportiva. El interés reside en reconocer relaciones fisiológicas verificables sin reducir la complejidad del rendimiento a indicadores aislados o asociaciones estadísticas carentes de explicación biológica.

La incorporación de dispositivos capaces de registrar variables fisiológicas ha ampliado las oportunidades de observación fuera del laboratorio. Entre sus aplicaciones destaca el seguimiento de las fluctuaciones glucémicas durante actividades cotidianas y sesiones deportivas. Mason et al. (2024) investigaron la validez de los monitores continuos de glucosa en corredores recreativos sin diabetes. Su trabajo invita a considerar las posibilidades de dichos instrumentos junto con sus limitaciones. La precisión técnica adquiere especial importancia cuando las mediciones pretenden orientar decisiones alimentarias individuales.

Figura 13
Integración tecnológica para el rendimiento deportivo



La interpretación de información deportiva también comienza a beneficiarse de procedimientos computacionales capaces de identificar relaciones entre numerosas variables. La inteligencia artificial ofrece posibilidades para organizar registros y desarrollar estimaciones relacionadas con las necesidades alimentarias y la recuperación. No obstante, cualquier predicción depende de la calidad de los datos utilizados y de su correspondencia con las características del deportista. La aplicación

profesional exige distinguir entre resultados estadísticamente prometedores y herramientas cuya utilidad haya sido demostrada mediante evaluaciones rigurosas.

El conocimiento molecular aporta otra perspectiva sobre los procesos que acompañan la adaptación al ejercicio. Las modificaciones metabólicas y proteicas pueden reflejar respuestas que permanecen fuera del alcance de las mediciones funcionales habituales. Malsagova et al. (2024) estudiaron perfiles metabolómicos y proteómicos en deportistas sometidos a actividad física bajo condiciones de hipoxia. Dicha investigación permite apreciar el interés de examinar respuestas biológicas específicas, aunque su interpretación requiere reconocer la influencia del ambiente y las condiciones experimentales.

La recuperación fisiológica representa un proceso dinámico cuya evolución difícilmente puede describirse mediante una medición puntual. Las variaciones del descanso y de las respuestas cardiovasculares adquieren significado cuando se observan durante períodos suficientemente prolongados. Bedrač et al. (2024) identifican oportunidades para aprovechar tecnologías portátiles dentro de estrategias de nutrición deportiva individualizada. Sin embargo, el seguimiento continuo también plantea interrogantes sobre fiabilidad e interpretación. La abundancia de registros exige criterios que permitan distinguir variaciones habituales de alteraciones relevantes.

La relación entre alimentación y entrenamiento requiere considerar que las necesidades del deportista evolucionan durante la temporada. Los períodos de mayor exigencia física presentan condiciones diferentes de las jornadas destinadas a reducir cargas o facilitar adaptaciones. Por ello, las estrategias nutricionales necesitan mantener correspondencia con la organización temporal del trabajo deportivo. La información tecnológica puede contribuir a revisar decisiones, siempre que sus resultados se interpreten junto

con objetivos funcionales y circunstancias personales que condicionan la práctica cotidiana.

La incorporación de herramientas digitales plantea responsabilidades que trascienden su capacidad de medición. La información fisiológica y alimentaria requiere protección debido a su carácter personal. También resulta necesario evitar interpretaciones automáticas que generen restricciones innecesarias o decisiones alejadas de las necesidades reales. El acompañamiento profesional conserva una función determinante para valorar incertidumbres y reconocer diferencias individuales. Una aplicación responsable de la tecnología debe favorecer la participación informada del deportista y mantener criterios científicos en cada intervención propuesta.

El desarrollo de la nutrición de precisión abre un campo de trabajo donde convergen conocimientos fisiológicos y procedimientos analíticos cada vez más especializados. Su incorporación al rendimiento deportivo requiere evaluar beneficios reales y reconocer los límites de la evidencia disponible. A lo largo del capítulo se examinan las posibilidades de integrar información biológica y tecnológica en decisiones nutricionales vinculadas con el entrenamiento y la recuperación. La atención permanece centrada en el deportista y en la interpretación responsable de sus respuestas individuales.

5.1. Integración de datos fisiológicos, nutricionales y biomecánicos para la caracterización individual del deportista

La caracterización individual del deportista requiere comprender las relaciones entre sus respuestas fisiológicas, sus hábitos alimentarios y las exigencias mecánicas de la actividad física. Cada dimensión aporta información relevante, aunque su interpretación adquiere mayor profundidad cuando se examinan sus interacciones. La capacidad de sostener un esfuerzo depende de

procesos metabólicos que responden tanto a la disponibilidad de nutrientes como a las características del movimiento. Integrar dichos registros permite reconocer diferencias individuales que habitualmente permanecen ocultas bajo evaluaciones generales convencionales.

Desde la perspectiva fisiológica, la frecuencia cardíaca, el consumo de oxígeno y la variabilidad del ritmo cardíaco permiten examinar distintas manifestaciones de la adaptación al entrenamiento. Su utilidad aumenta cuando las mediciones se relacionan con las condiciones alimentarias y las cargas físicas registradas durante períodos comparables. Bedrač et al. (2024) destacan el potencial de las tecnologías portátiles para ampliar el conocimiento de las respuestas individuales en deportistas de resistencia mediante observaciones continuas realizadas en entornos deportivos reales.

La información nutricional adquiere mayor valor analítico cuando trasciende el registro convencional de alimentos consumidos. Resulta necesario considerar la distribución temporal de las ingestas, la disponibilidad energética y las variaciones alimentarias asociadas con diferentes sesiones de entrenamiento. Un mismo patrón dietético puede producir respuestas distintas según las demandas metabólicas y las características personales. Por ello, relacionar los registros nutricionales con indicadores fisiológicos permite identificar correspondencias que orientan una caracterización alimentaria más representativa de cada deportista durante su preparación habitual.

La dimensión biomecánica incorpora información sobre la organización del movimiento y las demandas mecánicas experimentadas durante el ejercicio. Variables relacionadas con la cadencia, la longitud de zancada y las fuerzas de impacto permiten describir patrones funcionales particulares. Su interpretación conjunta con registros fisiológicos facilita examinar las relaciones entre economía de movimiento y esfuerzo metabólico. Una

modificación técnica aparentemente pequeña puede acompañarse de cambios relevantes en el gasto energético, especialmente cuando la actividad se prolonga durante períodos extensos.

La integración de registros heterogéneos plantea dificultades metodológicas relacionadas con la frecuencia de medición y la calidad de los datos obtenidos. Los dispositivos pueden registrar señales mediante intervalos diferentes y bajo condiciones ambientales variables. Bedrač et al. (2024) examinan las posibilidades de combinar tecnologías portátiles con aproximaciones ómicas para avanzar hacia una nutrición deportiva individualizada. Sin embargo, cualquier interpretación requiere procedimientos de sincronización y depuración que reduzcan inconsistencias antes de establecer relaciones entre las variables estudiadas.

Las tecnologías ómicas amplían la caracterización individual mediante el estudio de componentes moleculares relacionados con el funcionamiento del organismo. La metabolómica permite investigar perfiles de metabolitos asociados con procesos energéticos y respuestas al ejercicio. Otras aproximaciones aportan información sobre características biológicas que podrían contribuir a explicar diferencias interindividuales. Bedrač et al. (2024) reconocen oportunidades para incorporar dichos conocimientos al estudio nutricional de deportistas de resistencia, aunque persisten limitaciones relacionadas con su aplicación práctica y validación científica.

La interpretación integrada también exige distinguir las fluctuaciones habituales de aquellas modificaciones que reflejan respuestas funcionales relevantes. Un aumento de la frecuencia cardíaca durante una sesión puede relacionarse con múltiples factores, entre ellos la intensidad del esfuerzo y las condiciones ambientales. Su significado cambia cuando se examina junto con el consumo alimentario y las características mecánicas del ejercicio. El análisis longitudinal permite establecer referencias personales

que ofrecen mayor precisión interpretativa que las comparaciones aisladas con promedios poblacionales generales.

La construcción de perfiles individuales requiere procedimientos analíticos capaces de relacionar variables sin confundir asociación estadística con causalidad fisiológica. Los modelos multivariados pueden identificar agrupaciones de indicadores que acompañan determinadas respuestas al entrenamiento. Sin embargo, sus resultados necesitan contrastarse con observaciones repetidas y criterios profesionales. La revisión de Bedrač et al. (2024) permite reconocer un campo tecnológico en desarrollo, donde la integración de información biológica y digital todavía demanda investigación para consolidar aplicaciones nutricionales suficientemente verificadas.

La calidad de la caracterización depende igualmente de la participación activa del deportista en los procesos de registro e interpretación. Las percepciones de esfuerzo, las sensaciones digestivas y las modificaciones espontáneas de la alimentación aportan información difícilmente capturada mediante sensores. Incorporar tales observaciones permite comprender discrepancias entre indicadores instrumentales y experiencias personales. También exige establecer criterios de confidencialidad y acceso responsable a los registros, considerando que la información fisiológica y nutricional puede revelar características personales especialmente sensibles.

En conjunto, la caracterización individual adquiere consistencia cuando los registros fisiológicos, nutricionales y biomecánicos se interpretan mediante procedimientos complementarios y temporalmente coordinados. Su valor científico reside en identificar relaciones verificables entre las características del deportista y sus respuestas ante exigencias físicas determinadas. La precisión alcanzada depende de la calidad de las mediciones y de una interpretación prudente de sus resultados. Tal enfoque

proporciona una base analítica para fundamentar decisiones profesionales respetuosas con la variabilidad biológica individual.

5.2. Monitorización continua de glucosa y evaluación de su utilidad en la regulación nutricional del entrenamiento

La monitorización continua de glucosa ha despertado interés en la nutrición deportiva por su capacidad para registrar variaciones glucémicas durante períodos prolongados. Mediante sensores colocados bajo la piel, permite observar cambios en la concentración de glucosa intersticial durante el ejercicio y las actividades cotidianas. Su incorporación al entrenamiento plantea nuevas posibilidades para estudiar las respuestas metabólicas individuales. Sin embargo, interpretar correctamente sus registros exige comprender las diferencias entre disponibilidad energética, regulación glucémica y utilización muscular de sustratos.

El funcionamiento de los monitores continuos se fundamenta en mediciones periódicas de glucosa presentes en el líquido intersticial. Aunque guardan relación con las concentraciones sanguíneas, ambas mediciones pueden diferir durante cambios metabólicos rápidos. La actividad física introduce condiciones particulares debido a las modificaciones del flujo sanguíneo y la captación muscular de glucosa. Mason et al. (2024) investigaron la validez de dichos dispositivos en corredores recreativos sin diabetes, aportando evidencia pertinente para examinar sus aplicaciones deportivas.

Durante el ejercicio, la regulación glucémica responde a mecanismos hormonales y metabólicos que mantienen el suministro de combustible a los tejidos. La intensidad del esfuerzo y su duración modifican las necesidades energéticas sin producir necesariamente variaciones proporcionales en los registros intersticiales. Por tanto, una concentración estable de glucosa no garantiza reservas suficientes de glucógeno muscular. Comprender

dicha distinción resulta indispensable para evitar interpretaciones simplificadas que relacionen directamente cada fluctuación glucémica con una necesidad inmediata de alimentación.

La evaluación nutricional mediante sensores adquiere interés cuando se estudian las respuestas posteriores a comidas realizadas antes del entrenamiento. La cantidad de carbohidratos y su distribución temporal pueden modificar los perfiles glucémicos observados. Sin embargo, dichos cambios también dependen de la composición alimentaria y de las condiciones fisiológicas individuales. Los registros permiten formular preguntas sobre tolerancia y respuesta metabólica, pero requieren acompañarse de información dietética precisa para establecer interpretaciones nutricionales suficientemente fundamentadas en la práctica deportiva.

La fiabilidad instrumental constituye un aspecto determinante para valorar la utilidad de los monitores en personas físicamente activas sin alteraciones conocidas del metabolismo glucémico. Mason et al. (2024) abordaron específicamente la validación de dispositivos de monitorización continua en corredores recreativos sin diabetes. Su investigación resulta pertinente porque las condiciones del ejercicio pueden comprometer la correspondencia entre mediciones intersticiales y valores sanguíneos. Por ello, cualquier decisión alimentaria basada en sensores debe considerar los márgenes de error y las limitaciones metodológicas.

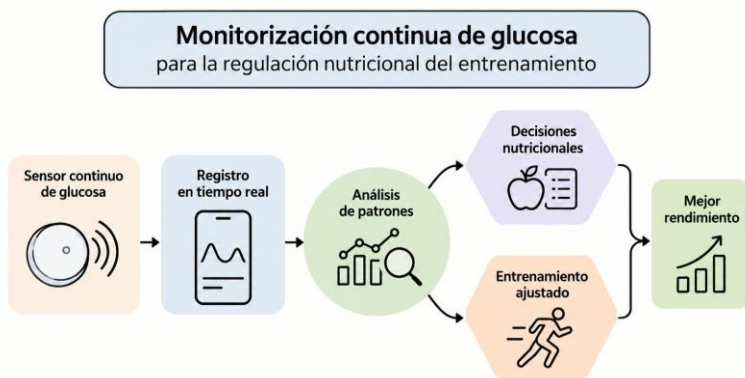
La regulación nutricional durante entrenamientos prolongados requiere valorar el consumo de carbohidratos según la duración y las características del esfuerzo. Los registros glucémicos pueden complementar dicha evaluación al mostrar variaciones temporales relacionadas con determinadas condiciones de alimentación. No obstante, carecen de capacidad para cuantificar directamente la oxidación de carbohidratos o las reservas musculares disponibles. Su interpretación debe relacionarse con las

demandas de cada sesión y con la respuesta funcional del deportista durante el trabajo físico realizado.

Otro aspecto relevante corresponde a las diferencias observadas entre deportistas sometidos a condiciones alimentarias semejantes. La sensibilidad a la insulina y las adaptaciones derivadas del entrenamiento pueden influir en las respuestas glucémicas individuales. También intervienen el descanso previo y las características de la actividad realizada. Tales variaciones dificultan establecer umbrales universales para orientar decisiones nutricionales. El seguimiento repetido permite reconocer patrones personales, aunque su estabilidad debe comprobarse antes de atribuirles significado fisiológico o utilidad práctica.

Figura 14

Monitorización glucémica y regulación nutricional



La interpretación de alertas glucémicas merece especial prudencia cuando los sensores se utilizan fuera del ámbito clínico. Determinadas lecturas bajas pueden reflejar diferencias entre compartimentos corporales o errores transitorios de medición. Mason et al. (2024) aportan un referente para discutir la validez de la monitorización en corredores sin diabetes. Ante registros inesperados, resulta necesario considerar síntomas y condiciones de medición antes de modificar la alimentación. Las decisiones

clínicas requieren procedimientos de confirmación apropiados y valoración profesional.

La utilización habitual de sensores también plantea interrogantes sobre la relación entre información digital y conducta alimentaria. La observación constante de fluctuaciones glucémicas puede favorecer interpretaciones excesivas de variaciones fisiológicas normales. En determinados deportistas, dicha vigilancia podría generar preocupación innecesaria respecto al consumo de carbohidratos. Por ello, la educación nutricional debe acompañar cualquier aplicación tecnológica. Los datos adquieren utilidad cuando responden a preguntas concretas y se interpretan sin convertir cada modificación numérica en una indicación alimentaria.

La monitorización continua de glucosa representa una herramienta complementaria cuyo valor deportivo depende de la precisión instrumental y de la pertinencia de las preguntas planteadas. Su aplicación requiere diferenciar las observaciones metabólicas de las decisiones nutricionales respaldadas por evidencia. Los registros pueden enriquecer el seguimiento individual cuando se relacionan con la alimentación y las características del entrenamiento. Persisten, sin embargo, interrogantes sobre sus beneficios prácticos en deportistas sin diabetes y sobre su contribución efectiva al rendimiento físico.

5.3. Inteligencia artificial y modelos predictivos aplicados a la planificación alimentaria y la recuperación deportiva

La inteligencia artificial introduce posibilidades para interpretar información deportiva y convertirla en decisiones alimentarias individualizadas. Su aplicación parte de modelos capaces de reconocer relaciones entre variables que cambian durante la preparación física. El interés reside en anticipar necesidades nutricionales y períodos de recuperación mediante

patrones observados previamente. Sin embargo, una predicción útil necesita datos representativos y objetivos bien definidos. El juicio profesional continúa siendo necesario para interpretar resultados y valorar su pertinencia en cada deportista.

En la planificación alimentaria, los algoritmos pueden relacionar cargas de entrenamiento con horarios de ingesta y estimaciones de requerimientos energéticos. Su capacidad de procesamiento facilita examinar combinaciones sin depender de cálculos manuales repetidos. Bedrač et al. (2024) describen oportunidades derivadas de integrar tecnologías portátiles y datos ómicos en la nutrición deportiva de precisión. Dichas fuentes ofrecen una base potencial para desarrollar modelos adaptativos, aunque su incorporación todavía requiere comprobar utilidad y fiabilidad en condiciones reales.

Los modelos predictivos necesitan distinguir entre información utilizada para aprender y datos destinados a evaluar su desempeño. Cuando ambas muestras presentan demasiadas semejanzas, las estimaciones pueden parecer precisas sin funcionar ante situaciones nuevas. En nutrición deportiva, dicho problema adquiere relevancia por la variabilidad entre disciplinas y períodos de preparación. Una herramienta entrenada con corredores recreativos podría responder de manera diferente en atletas profesionales. La validación externa permite reconocer tales límites antes de incorporar recomendaciones automatizadas.

La recuperación deportiva plantea una dificultad particular: sus manifestaciones no avanzan siempre al mismo ritmo. La percepción de fatiga puede mejorar mientras determinados indicadores fisiológicos permanecen alterados. Los sistemas predictivos pueden analizar series temporales para estimar necesidades de descanso y alimentación posteriores al esfuerzo. No obstante, la recuperación comprende procesos diversos que ninguna variable aislada representa completamente. Por ello,

conviene definir con precisión qué resultado pretende anticipar cada modelo y durante qué intervalo temporal previsto.

La disponibilidad de información biológica amplía las posibilidades analíticas, pero también incrementa la complejidad del diseño predictivo. Bedrač et al. (2024) examinan el interés de las aproximaciones ómicas y los dispositivos portátiles para avanzar hacia estrategias nutricionales individualizadas. A partir de dichas fuentes pueden investigarse asociaciones entre perfiles metabólicos y respuestas al ejercicio. Convertirlas en recomendaciones exige demostrar que realmente aportan información adicional respecto de procedimientos convencionales y que sus resultados mantienen estabilidad suficiente.

La personalización algorítmica también depende de registrar adecuadamente los cambios que experimenta un deportista durante la temporada. Las necesidades alimentarias pueden variar por modificaciones del volumen de trabajo y de la disponibilidad de tiempo para comer. Un sistema que conserve parámetros fijos corre el riesgo de perder pertinencia. Los modelos actualizables permiten revisar estimaciones con nuevos registros, siempre que exista supervisión periódica sobre la calidad de las entradas y sobre posibles desviaciones acumuladas individuales.

En el trabajo cotidiano, la utilidad de una predicción se aprecia cuando permite organizar decisiones viables. Una propuesta alimentaria puede resultar matemáticamente adecuada y ser impracticable por horarios de viaje o dificultades de acceso a determinados alimentos. Incorporar restricciones personales y logísticas mejora la pertinencia de los planes generados. También importa explicar al deportista por qué se recomienda una modificación. La transparencia facilita valorar alternativas y evita que una puntuación automática sustituya la deliberación profesional.

La interpretación de resultados exige prestar atención a los errores predictivos y a sus consecuencias prácticas. Subestimar necesidades energéticas durante cargas elevadas puede afectar la suficiencia alimentaria, mientras una recomendación excesiva podría resultar innecesaria. Bedrač et al. (2024) presentan un panorama tecnológico prometedor, aunque la investigación disponible no permite asumir que toda integración digital mejore los resultados deportivos. La evaluación debe considerar beneficios medibles y posibles perjuicios antes de trasladar modelos experimentales a decisiones habituales.

El uso de inteligencia artificial plantea además responsabilidades relacionadas con privacidad y equidad. Los registros alimentarios y fisiológicos contienen información personal cuyo tratamiento requiere autorización y medidas de protección. Los modelos desarrollados con poblaciones poco diversas pueden producir estimaciones menos fiables en grupos insuficientemente representados. Resulta necesario documentar el origen de los datos y revisar periódicamente los resultados. La participación efectiva del deportista en dichas decisiones contribuye a mantener un uso responsable de la tecnología.

La incorporación de modelos predictivos a la nutrición y recuperación deportiva requiere una relación equilibrada entre capacidad computacional y conocimiento aplicado. Su aportación más relevante consiste en formular estimaciones revisables que ayuden a organizar intervenciones individualizadas. Para alcanzar utilidad práctica, cada herramienta debe demostrar precisión y resultados pertinentes en poblaciones comparables. La supervisión interdisciplinaria permite interpretar incertidumbres y ajustar decisiones cuando cambian las condiciones del entrenamiento, sin atribuir nunca al algoritmo una autoridad incuestionable.

5.4. Metabolómica, proteómica y lipidómica en la identificación de perfiles de adaptación al ejercicio

La adaptación al ejercicio comprende modificaciones moleculares que no siempre resultan visibles mediante indicadores funcionales convencionales. La metabolómica, la proteómica y la lipidómica permiten estudiar componentes de dichas respuestas mediante el análisis de muestras biológicas. Cada aproximación examina una dimensión del funcionamiento celular y ofrece información sobre procesos asociados con el esfuerzo. Su interpretación conjunta puede contribuir a reconocer perfiles individuales de adaptación, aunque requiere distinguir las respuestas transitorias de los cambios persistentes del entrenamiento.

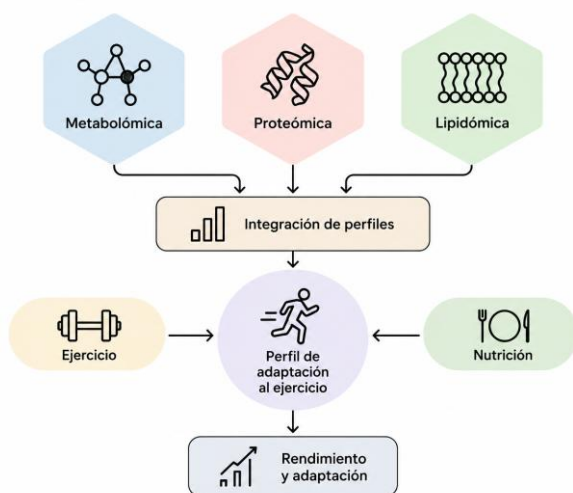
La metabolómica estudia conjuntos de moléculas presentes en tejidos y fluidos corporales. Sus concentraciones pueden variar con la intensidad del ejercicio, la disponibilidad de nutrientes y el tiempo transcurrido desde la sesión. El interés científico reside en identificar patrones que reflejen modificaciones del metabolismo energético. Sin embargo, una diferencia entre muestras no demuestra por sí misma una adaptación favorable. Para atribuir significado fisiológico a los hallazgos resulta indispensable conocer las condiciones de obtención y comparación.

En condiciones de hipoxia, la menor disponibilidad de oxígeno introduce exigencias metabólicas durante la actividad física. Malsagova et al. (2024) examinaron perfiles metabolómicos y proteómicos de deportistas sometidos a ejercicio bajo dichas condiciones. Su trabajo ofrece un referente para estudiar respuestas moleculares vinculadas con el esfuerzo en ambientes de oxígeno reducido. La interpretación de tales resultados requiere considerar la exposición a la altitud y las características del ejercicio, pues ambas pueden modificar las respuestas observadas.

La proteómica permite examinar proteínas relacionadas con el transporte de sustancias, la señalización celular y la reparación de tejidos. A diferencia de una medición funcional puntual, los perfiles proteicos pueden aportar indicios sobre procesos biológicos activados durante la recuperación. No obstante, la abundancia de una proteína no equivale necesariamente a su actividad. También importa reconocer que los cambios observados dependen del tejido estudiado y del momento de muestreo posterior al esfuerzo físico intenso realizado.

Figura 15

Perfiles moleculares de adaptación al ejercicio



La lipidómica concentra su atención en especies lipídicas que participan en funciones energéticas y estructurales del organismo. Algunas intervienen en la composición de membranas y otras actúan como mediadoras de señales celulares. Su estudio puede ampliar la comprensión de las respuestas al entrenamiento y a la alimentación. Sin embargo, los perfiles lipídicos son sensibles a factores dietéticos y metabólicos. Por ello, su interpretación exige cautela antes de relacionar determinadas variaciones con mejoras del rendimiento deportivo.

El análisis conjunto de metabolitos y proteínas permite investigar relaciones que permanecen poco claras cuando cada grupo molecular se examina por separado. Malsagova et al. (2024) abordaron ambas dimensiones en deportistas que realizaron actividad física bajo hipoxia. Dicho enfoque resulta pertinente para comprender la complejidad de las respuestas ante condiciones ambientales exigentes. Aun cuando aparecen asociaciones consistentes, identificar mecanismos causales requiere diseños experimentales adicionales y mediciones repetidas que permitan diferenciar efectos agudos y adaptaciones duraderas.

La identificación de perfiles individuales exige establecer referencias temporales apropiadas. Una muestra obtenida inmediatamente después del ejercicio puede reflejar procesos distintos de otra recogida tras una jornada de descanso. La hidratación y la alimentación previa también pueden alterar las concentraciones medidas. Comparar registros sin controlar dichas condiciones introduce variabilidad difícil de interpretar. Los protocolos de muestreo deben mantener criterios uniformes para que las diferencias observadas respondan principalmente a los fenómenos fisiológicos investigados en cada deportista.

Los perfiles moleculares adquieren interés nutricional cuando permiten formular hipótesis sobre la respuesta a determinadas estrategias alimentarias. Las variaciones de metabolitos relacionados con rutas energéticas pueden orientar investigaciones sobre disponibilidad de sustratos y recuperación. Sin embargo, todavía resulta prematuro convertir cualquier marcador diferencial en una recomendación dietética individual. La utilidad clínica y deportiva depende de demostrar asociaciones reproducibles con resultados más relevantes. También requiere determinar si la información obtenida mejora realmente las decisiones profesionales habituales.

El tratamiento estadístico representa otra dificultad importante debido al elevado número de moléculas examinadas

simultáneamente. Cuantas más comparaciones se realizan, mayor es el riesgo de identificar asociaciones casuales. Los procedimientos de corrección estadística y la validación en muestras independientes ayudan a limitar interpretaciones equivocadas. Además, la composición de los grupos estudiados influye en la generalización de resultados. Las diferencias de preparación física y exposición ambiental específicas deben documentarse para valorar adecuadamente cada hallazgo obtenido.

La caracterización molecular de la adaptación deportiva requiere integrar evidencia experimental con criterios fisiológicos y nutricionales. Metabolómica, proteómica y lipidómica ofrecen perspectivas complementarias, pero ninguna proporciona por separado una medida completa del estado adaptativo. Los hallazgos obtenidos bajo hipoxia ilustran el interés de investigar respuestas biológicas en condiciones específicas de esfuerzo. Su aplicación responsable depende de protocolos reproducibles y de una interpretación que reconozca adecuadamente posibles incertidumbres antes de orientar intervenciones sobre alimentación y recuperación.

5.5. Sensores portátiles y análisis longitudinal de indicadores de fatiga, hidratación y recuperación fisiológica

Los sensores portátiles permiten observar variaciones fisiológicas durante la preparación deportiva sin interrumpir necesariamente las actividades habituales. Su interés reside en registrar tendencias de fatiga, hidratación y recuperación a lo largo del tiempo. Una lectura aislada ofrece información limitada, pues numerosos indicadores cambian según el esfuerzo reciente y las condiciones ambientales. El seguimiento longitudinal ayuda a reconocer patrones personales y episodios atípicos. Para interpretarlos correctamente resulta indispensable conocer las circunstancias de cada medición y sus errores potenciales.

La frecuencia cardíaca y su variabilidad figuran entre los indicadores utilizados para observar respuestas al entrenamiento. Sus registros pueden mostrar cambios asociados con el esfuerzo acumulado y la regulación autonómica. Bedrač et al. (2024) examinan el potencial de los dispositivos portátiles dentro de la nutrición deportiva de precisión para atletas de resistencia. Sin embargo, las variaciones de dichos indicadores también responden al sueño y factores cotidianos. Ningún valor aislado permite diagnosticar fatiga o recuperación insuficiente.

El seguimiento de la fatiga requiere diferenciar las demandas externas del entrenamiento y las respuestas internas del organismo. Los acelerómetros permiten describir movimientos y estimar determinadas cargas mecánicas, mientras otros sensores registran señales cardiovasculares. La comparación temporal puede revelar cambios durante semanas de entrenamiento intenso. Aun con registros abundantes, interpretar una disminución del rendimiento exige considerar enfermedades intercurrentes y alteraciones del descanso. La percepción subjetiva del deportista continúa aportando información que los dispositivos no capturan.

La hidratación plantea dificultades particulares porque la pérdida de agua corporal depende del ambiente y de las características del ejercicio. Algunos dispositivos estiman variables relacionadas con la sudoración, aunque sus resultados no equivalen automáticamente al balance hídrico total. Las diferencias individuales en producción y composición del sudor complican las comparaciones. Conviene contrastar las estimaciones tecnológicas con mediciones prácticas realizadas bajo condiciones controladas. Una recomendación de líquidos necesita considerar también tolerancia digestiva y oportunidades de consumo.

Durante sesiones prolongadas, los cambios de temperatura cutánea y frecuencia cardíaca pueden acompañar modificaciones del estado fisiológico. No obstante, ambos indicadores responden también a la intensidad del trabajo y al ambiente. La interpretación

requiere observar su evolución conjunta sin atribuir automáticamente cada cambio a deshidratación. Los registros de ingesta de líquidos y variaciones de masa corporal aportan referencias adicionales. Su combinación permite formular evaluaciones prudentes, especialmente cuando las condiciones de entrenamiento cambian entre jornadas consecutivas.

La recuperación nocturna ofrece una ventana de observación mediante registros de sueño y señales cardiovasculares. Los dispositivos de muñeca estiman duración y continuidad del descanso, pero presentan limitaciones para identificar con precisión sus diferentes fases. Bedrač et al. (2024) reconocen oportunidades para aprovechar tecnologías portátiles en el seguimiento individual de deportistas de resistencia. Su utilidad depende de evaluar tendencias persistentes y evitar conclusiones apresuradas ante una noche irregular o una modificación transitoria de las mediciones.

El análisis longitudinal requiere establecer períodos de referencia representativos de la rutina del deportista. Los valores iniciales pueden cambiar conforme avanza la temporada y se modifican las cargas físicas. Por ello, los intervalos personales necesitan revisiones periódicas sin perder comparabilidad histórica. También importa registrar fallos de uso y períodos sin mediciones. Una serie incompleta puede producir tendencias engañosas cuando las ausencias coinciden con entrenamientos exigentes o episodios de malestar que merecen atención profesional específica continuada.

La integración de registros exige examinar la calidad técnica antes de interpretar patrones fisiológicos. El movimiento del sensor y las diferencias de ajuste pueden alterar determinadas señales. Los algoritmos procesan datos mediante procedimientos que no siempre resultan transparentes. Bedrač et al. (2024) presentan las tecnologías portátiles como un campo de interés para la nutrición personalizada, aunque su aprovechamiento requiere

evaluar sus limitaciones. La consistencia entre dispositivos y condiciones de uso resulta importante para comparaciones prolongadas.

La información acumulada adquiere sentido cuando contribuye a decisiones concretas sobre entrenamiento y recuperación. Un patrón persistente de alteraciones puede justificar una revisión profesional de la carga y de las prácticas alimentarias. Sin embargo, modificar intervenciones por alertas automáticas puede generar respuestas innecesarias. Los resultados deben contrastarse con síntomas y observaciones del deportista. La interpretación compartida favorece decisiones proporcionadas y evita convertir las fluctuaciones fisiológicas habituales en motivos permanentes de preocupación durante la preparación deportiva.

El seguimiento mediante sensores requiere criterios claros para proteger la información. Los registros continuos pueden revelar hábitos de descanso y características de la vida cotidiana ajenas al rendimiento. Su acceso debe limitarse a quienes participan en la atención deportiva. Desde una perspectiva aplicada, la utilidad de cada dispositivo depende de su precisión y de las decisiones que permite mejorar. Mantener una vigilancia ayuda a preservar la autonomía del deportista y la calidad del acompañamiento profesional.

5.6. Modelos integrados de nutrición personalizada, periodización del entrenamiento y evaluación multidimensional del rendimiento

La integración de nutrición personalizada y periodización del entrenamiento requiere reconocer que las necesidades alimentarias cambian durante la preparación deportiva. Cada fase plantea demandas particulares de energía y nutrientes, vinculadas con sus objetivos y cargas de trabajo. Un modelo integrado organiza dichas relaciones mediante criterios que pueden revisarse conforme evoluciona el deportista. Su utilidad depende de

mantener correspondencia entre las decisiones alimentarias, las respuestas observadas y las exigencias reales de cada período competitivo y sus particularidades.

La planificación comienza con la definición de objetivos funcionales para cada etapa. Durante bloques de mayor volumen, la disponibilidad de carbohidratos puede adquirir especial relevancia para sostener las sesiones previstas. En períodos de menor carga, las necesidades deben reevaluarse sin comprometer la suficiencia nutricional. La periodización alimentaria exige atender también a los intervalos entre entrenamientos. Una misma distribución diaria puede resultar adecuada en una jornada y poco práctica en otra con horarios diferentes y demandas específicas.

Los modelos integrados pueden incorporar registros de actividad y medidas biológicas para revisar decisiones previamente establecidas. Bedrač et al. (2024) describen el interés de combinar tecnologías portátiles y aproximaciones ómicas en la nutrición de precisión para deportistas de resistencia. Esa perspectiva amplía las posibilidades de caracterización individual, aunque todavía exige demostrar beneficios aplicados. La disponibilidad de múltiples indicadores no garantiza por sí misma que una intervención resulte más eficaz que una planificación profesional convencional previamente establecida.

La evaluación multidimensional del rendimiento debe distinguir entre resultados competitivos y procesos que permiten alcanzarlos. La velocidad o la potencia expresan capacidades observables, pero su evolución también depende de factores técnicos y psicológicos. Los indicadores nutricionales aportan otra perspectiva sobre la preparación. Relacionar dichas dimensiones evita atribuir cambios del desempeño a una causa aislada. Además, facilita reconocer situaciones donde una mejora funcional convive con señales que requieren una revisión del programa alimentario y sus objetivos específicos.

La organización temporal del modelo merece especial atención cuando coinciden sesiones de distinta naturaleza. El entrenamiento de fuerza y el trabajo de resistencia pueden generar demandas alimentarias diferentes dentro de una misma semana. En lugar de aplicar pautas uniformes, conviene examinar la secuencia de esfuerzos y los tiempos disponibles para recuperarse. La planificación debe contemplar desplazamientos y acceso a alimentos, porque una recomendación nutricional pierde valor cuando resulta difícil llevarla a la práctica cotidiana del deportista.

El seguimiento periódico permite contrastar los objetivos iniciales con la respuesta efectiva del deportista. Las variaciones de composición corporal pueden aportar información, aunque requieren interpretación junto con indicadores funcionales y de bienestar. Bedrač et al. (2024) identifican oportunidades para ampliar la evaluación individual mediante herramientas biológicas y digitales. Su incorporación debe responder a preguntas concretas. Acumular mediciones sin una finalidad definida incrementa la complejidad y puede distraer de decisiones alimentarias más relevantes para el rendimiento deportivo.

Un modelo útil necesita reglas explícitas para modificar las pautas nutricionales cuando cambian las condiciones de entrenamiento. Dichas reglas pueden apoyarse en tendencias de rendimiento y registros de ingesta, siempre bajo valoración profesional. Conviene evitar ajustes automáticos basados en fluctuaciones breves. Las decisiones también deben considerar molestias digestivas y preferencias alimentarias. La personalización adquiere sentido cuando las modificaciones son comprensibles para el deportista y pueden sostenerse durante períodos exigentes de preparación física y competición deportiva.

La evaluación de resultados requiere seleccionar indicadores acordes con los objetivos de cada fase. Un programa orientado a mejorar la resistencia necesita criterios diferentes de otro centrado en fuerza máxima. También importa establecer

momentos comparables para las mediciones y documentar posibles interferencias. Los cambios observados después de una intervención nutricional no prueban necesariamente una relación causal. El entrenamiento concurrente y la recuperación pueden explicar parte de la variación, por lo que conviene interpretar los hallazgos.

La coordinación entre profesionales favorece una lectura compartida de los resultados y reduce decisiones contradictorias. El nutricionista puede ajustar la estrategia alimentaria mientras el entrenador revisa las cargas previstas. La participación médica adquiere importancia cuando aparecen indicadores clínicos que requieren evaluación. Bedrač et al. (2024) sitúan la integración de datos entre las líneas de desarrollo de la nutrición deportiva de precisión. Sin embargo, la utilidad práctica depende también de acuerdos claros sobre responsabilidades y seguimiento.

La consolidación de modelos integrados exige valorar su efectividad mediante resultados observables y procedimientos reproducibles. Una planificación personalizada debe poder modificarse sin perder coherencia con los objetivos deportivos y las necesidades de salud. La tecnología puede apoyar dicho proceso cuando aporta información fiable y pertinente. Permanecen interrogantes sobre el beneficio adicional de ciertos indicadores avanzados. Por ello, la evaluación multidimensional requiere prudencia metodológica y decisiones compartidas que respeten la singularidad de cada trayectoria deportiva individual.

Tabla 5

Aplicaciones de la nutrición de precisión y las tecnologías digitales en la evaluación y gestión del rendimiento deportivo

Componente de análisis	Aplicación en la nutrición y el rendimiento deportivo
Integración de datos fisiológicos, nutricionales y biomecánicos	Relaciona las respuestas metabólicas con los hábitos alimentarios y las demandas del movimiento para caracterizar las necesidades individuales del deportista.
Monitorización continua de glucosa	Permite observar variaciones glucémicas durante el entrenamiento y evaluar su posible utilidad para orientar decisiones nutricionales considerando las limitaciones de precisión de los sensores.
Inteligencia artificial y modelos predictivos	Facilita el análisis de múltiples variables para estimar necesidades alimentarias y apoyar la planificación de la recuperación mediante modelos sujetos a validación científica.
Metabolómica, proteómica y lipidómica	Examina perfiles moleculares asociados con las respuestas al ejercicio y contribuye a investigar mecanismos metabólicos relacionados con la adaptación fisiológica.
Sensores portátiles y seguimiento longitudinal	Registra tendencias de indicadores vinculados con fatiga y recuperación. Complementa la evaluación de hidratación mediante mediciones periódicas y referencias individuales.
Nutrición personalizada y periodización del entrenamiento	Articula las estrategias alimentarias con las cargas de trabajo y los objetivos deportivos. Favorece ajustes fundamentados en evaluaciones multidimensionales del rendimiento.

Nota. Elaboración propia a partir de Bedrač et al. (2024), Mason et al. (2024) y Malsagova et al. (2024). Las aplicaciones descritas presentan diferentes niveles de validación científica y requieren interpretación profesional antes de orientar decisiones individuales.

Conclusiones

La nutrición deportiva constituye un componente determinante en la regulación de los procesos fisiológicos vinculados con el ejercicio y la adaptación al entrenamiento. Su influencia comprende la disponibilidad energética y la conservación de las funciones metabólicas necesarias para sostener el esfuerzo físico. El análisis desarrollado permite reconocer que las respuestas nutricionales dependen de las características individuales y las exigencias de cada disciplina. Una planificación alimentaria científicamente fundamentada favorece la integración entre preparación física y recuperación funcional del organismo.

La regulación metabólica representa un proceso dinámico condicionado por la intensidad del ejercicio y la disponibilidad de nutrientes. La utilización de carbohidratos y lípidos responde a mecanismos fisiológicos que permiten mantener el suministro energético durante diferentes modalidades deportivas. Comprender tales relaciones contribuye a establecer estrategias alimentarias acordes con las demandas del entrenamiento. La periodización nutricional adquiere relevancia al vincular la ingesta de nutrientes con los objetivos de adaptación física y las necesidades de recuperación del deportista durante su preparación.

La distribución temporal de nutrientes interviene en los procesos de recuperación energética y adaptación muscular posteriores al esfuerzo. La ingesta adecuada de proteínas contribuye al mantenimiento y reparación de los tejidos sometidos a cargas físicas. Los carbohidratos participan en la restauración de las reservas de glucógeno utilizadas durante el ejercicio. Sin embargo, la eficacia de las intervenciones depende de múltiples variables fisiológicas. La planificación nutricional requiere considerar la duración del esfuerzo y las características particulares de cada periodo de entrenamiento deportivo.

La recuperación deportiva comprende mecanismos biológicos que exceden la reposición inmediata de nutrientes después del ejercicio. La reparación muscular y la regulación de las respuestas inflamatorias participan en la restauración progresiva de la capacidad funcional. El descanso nocturno también interviene en los procesos adaptativos relacionados con el entrenamiento. La interacción entre alimentación y sueño demuestra la necesidad de abordar la recuperación mediante criterios fisiológicos integrados que permitan valorar las respuestas individuales y prevenir alteraciones asociadas con cargas físicas excesivas.

La disponibilidad energética adecuada constituye una condición necesaria para preservar la salud y favorecer las adaptaciones al entrenamiento. Las restricciones alimentarias prolongadas pueden comprometer la regulación endocrina y alterar procesos fisiológicos relacionados con la recuperación. Por ello, las estrategias nutricionales deben responder a las necesidades metabólicas del deportista y evitar intervenciones incompatibles con sus demandas energéticas. La valoración periódica del estado nutricional permite identificar desequilibrios y orientar decisiones destinadas a mantener la capacidad funcional durante la práctica deportiva.

La microbiota intestinal representa una dimensión relevante para comprender las relaciones entre alimentación y funcionamiento fisiológico en deportistas. Su participación en el metabolismo de nutrientes y la regulación inmunológica amplía las perspectivas de investigación nutricional. Sin embargo, las respuestas individuales a las intervenciones dirigidas a modificar su composición presentan variaciones importantes. La evidencia disponible requiere interpretaciones prudentes. Su aplicación profesional demanda considerar la tolerancia gastrointestinal y las características alimentarias del deportista antes de establecer recomendaciones específicas.

La suplementación nutricional debe evaluarse mediante criterios de eficacia y seguridad respaldados por investigaciones científicas. Determinados compuestos pueden contribuir al rendimiento físico bajo condiciones específicas de utilización. No obstante, sus efectos dependen de la dosis y las características fisiológicas individuales. La administración de suplementos requiere una valoración previa de las necesidades alimentarias y los objetivos deportivos. Una intervención responsable prioriza la alimentación habitual y considera los productos ergogénicos como recursos complementarios sujetos a evaluación profesional y seguimiento continuo.

La nutrición de precisión amplía las posibilidades de individualizar las intervenciones alimentarias mediante el análisis de indicadores metabólicos y fisiológicos. Las tecnologías portátiles permiten registrar determinadas respuestas del organismo durante el entrenamiento y la recuperación. Por su parte, las ciencias ómicas aportan información sobre procesos biológicos relacionados con la adaptación al ejercicio. Sin embargo, la interpretación de tales datos exige validación científica. Su incorporación debe responder a necesidades concretas y considerar las limitaciones metodológicas de cada herramienta de evaluación.

La integración de conocimientos nutricionales y fisiológicos permite responder a las preguntas que orientaron el desarrollo académico del libro. Los mecanismos metabólicos condicionan la utilización de energía durante el ejercicio. La distribución temporal de nutrientes puede favorecer determinados procesos de recuperación cuando responde a necesidades individuales. Asimismo, la personalización nutricional requiere evidencia suficiente para justificar cada intervención. Tales consideraciones permiten reconocer la importancia de relacionar los resultados científicos con las características del deportista y las exigencias de su preparación física.

La comprensión integral de la nutrición y la recuperación deportiva exige mantener una relación permanente entre investigación científica y práctica profesional. Los conocimientos disponibles permiten orientar decisiones alimentarias fundamentadas y reconocer áreas que requieren mayor investigación. La diversidad de respuestas fisiológicas impide establecer recomendaciones universales aplicables a todas las disciplinas. En consecuencia, el desarrollo de intervenciones nutricionales debe preservar criterios de individualización y evaluación continua. La responsabilidad académica reside en promover prácticas que favorezcan el rendimiento sin comprometer la salud del deportista.

Referencias Bibliográficas

- Barclay, R., Coad, J., Schraders, K., & Barnes, M. J. (2024). Comparing the effects of collagen hydrolysate and dairy protein on recovery from eccentric exercise: A double blind, placebo-controlled study. *Nutrients*. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/39771010/>
- Bedrač, L., Deutsch, L., Terzić, S., Červek, M., Šelb, J., Ašič, U., Verstraeten, L. M. G., Kuščer, E., & Cvetko, F. (2024). Towards precision sports nutrition for endurance athletes: A scoping review of application of omics and wearables technologies. *Nutrients*. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/39599728/>
- Doherty, R., Madigan, S., Warrington, G., & Ellis, J. (2024). Sleep and nutrition for athletes. *Proceedings of the Nutrition Society*. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/39556011/>
- Gejl, K. D., & Nybo, L. (2021). Performance effects of periodized carbohydrate restriction in endurance trained athletes: A systematic review and meta-analysis. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34001184/>
- Gonzalez, D. E., Dickerson, B. L., Roberts, B. M., Kurtz, J. A., Waldman, H. S., Gonzalez, A. M., McAllister, M. J., Heilesen, J. L., Bloomer, R. J., Arent, S. M., Candow, D. G., Stout, J. R., Hecht, K. A., Campbell, B., Kerksick, C. M., Kalman, D., & Antonio, J. (2026). International Society of Sports Nutrition position stand: Effects of dietary antioxidants on exercise and sports performance. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*, 23(1), Article 2629828. <https://doi.org/10.1080/15502783.2026.2629828>
- Guest, N. S., VanDusseldorp, T. A., Nelson, M. T., Grgic, J., Schoenfeld, B. J., Jenkins, N. D. M., Arent, S. M., Antonio, J., Stout, J. R., Trexler, E. T., Smith-Ryan, A. E., Goldstein, E. R., Kalman, D. S., & Campbell, B. I. (2021). International society of sports nutrition position stand: Caffeine and exercise performance. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33388079/>
- Impey, S. G., Hearn, M. A., Hammond, K. M., Bartlett, J. D., Louis, J., Close, G. L., & Morton, J. P. (2018). Fuel for the work required: A theoretical framework for carbohydrate periodization and the glycogen threshold hypothesis. *Sports Medicine*, 48(5), 1031–1048. <https://doi.org/10.1007/s40279-018-0867-7>

- Jäger, R., et al. (2017). International Society of Sports Nutrition position stand: Protein and exercise. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28642676/>
- Kearns, R. P., Dooley, J. S. G., Matthews, M., & McNeilly, A. M. (2024). Do probiotics mitigate GI-induced inflammation and perceived fatigue in athletes? A systematic review. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/39193818/>
- Kerksick, C. M., et al. (2017). International Society of Sports Nutrition position stand: Nutrient timing. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*. <https://doi.org/10.1186/s12970-017-0189-4>
- Kreider, R. B., et al. (2017). International Society of Sports Nutrition position stand: Safety and efficacy of creatine supplementation in exercise, sport, and medicine. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28615996/>
- Malsagova, K. A., et al. (2024). Metabolomic and proteomic profiling of athletes performing physical activity under hypoxic conditions. *Sports*. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/38535735/>
- Mason, L. J., Hartwig, T., & Greene, D. (2024). Validating the use of continuous glucose monitors with nondiabetic recreational runners. *International Journal of Sports Physiology and Performance*. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/39251197/>
- Mountjoy, M., et al. (2023). 2023 International Olympic Committee's (IOC) consensus statement on relative energy deficiency in sport (REDs). *British Journal of Sports Medicine*. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2023-106994>
- Pérez-Castillo, Í. M., Sabag-Daigle, A., López-Chicharro, J., Mihic, N., Rueda, R., & Bouzamondo, H. (2024). The athlete gut microbiota: State of the art and practical guidance. *Beneficial Microbes*. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/38659188/>
- Smith, H. A., & Betts, J. A. (2022). Nutrient timing and metabolic regulation. *The Journal of Physiology*, 600(6), 1299–1312. <https://doi.org/10.1113/JP280756>