RGe ISSN: 2177-3246

EL ROL DEL GLUCÓGENO MUSCULAR EN CONDICIONES DE BAJA DISPONIBILIDAD ENERGÉTICA Y SU IMPACTO EN EL RENDIMIENTO EN DEPORTES FUNCIONALES: UNA REVISIÓN SISTEMÁTICA

O PAPEL DO GLICOGÊNIO MUSCULAR EM CONDIÇÕES DE BAIXA DISPONIBILIDADE ENERGÉTICA E SEU IMPACTO NO DESEMPENHO EM ESPORTES FUNCIONAIS: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA

THE ROLE OF MUSCLE GLYCOGEN UNDER LOW ENERGY AVAILABILITY AND ITS IMPACT ON PERFORMANCE IN FUNCTIONAL SPORTS: A SYSTEMATIC REVIEW

10.56238/revgeov17n4-214

Jackson Gervasio Pires[1], Lucrecia Natalí Moyano[2]

RESUMEN

Introducción: La baja disponibilidad energética (LEA) y la reducción del glucógeno muscular se reconocen como factores determinantes del rendimiento y la salud en atletas que practican deportes funcionales, caracterizados por una elevada densidad de entrenamiento y demandas metabólicas mixtas. El objetivo de esta revisión sistemática fue sintetizar la evidencia disponible sobre la relación entre LEA, el estado del glucógeno muscular y el rendimiento físico en deportes funcionales.

Métodos: Se realizó una revisión sistemática siguiendo las directrices PRISMA 2020. Se efectuó una búsqueda en PubMed/MEDLINE, Scopus y Web of Science (enero de 2015–octubre de 2025). Se incluyeron doce estudios en adultos entrenados. La extracción de datos y la evaluación del riesgo de sesgo fueron realizadas por un único revisor. Debido a la heterogeneidad metodológica, se efectuó una síntesis cuantitativa descriptiva.

Resultados: Cuatro estudios (33%) evaluaron el glucógeno muscular de forma directa, observándose que una depleción del 30-40% se asoció con reducciones del 8-15% en el rendimiento de alta intensidad. Cinco estudios (42%) identificaron LEA asociada con disminuciones de leptina y triyodotironina y aumentos de cortisol. Las demandas fisiológicas en deportes funcionales incluyeron consumos de oxígeno del 85-92% del VO2máx y concentraciones de lactato superiores a 10-12 mmol/L.

Conclusiones: La evidencia indica que la LEA y la reducción del glucógeno muscular comprometen de manera consistente el rendimiento y la recuperación en deportes funcionales, destacando la necesidad de diferenciar entre disponibilidad energética total y disponibilidad de carbohidratos en la planificación nutricional.

[1] Especialista en Nutrición con énfasis en obesidad y pérdida de peso, y Nutrición clínica en endocrinología y metabolismo. Universidad Europea de Madrid.
[2] 2Nutrición y Dietética. Universidad Europea de Madrid.

Palabras clave: Disponibilidad Energética. Rendimiento Deportivo. Nutrición.

RESUMO

Introdução: A baixa disponibilidade energética (LEA) e a redução do glicogênio muscular são reconhecidas como fatores determinantes do desempenho e da saúde em atletas que praticam esportes funcionais, caracterizados por elevada densidade de treinamento e demandas metabólicas mistas. O objetivo desta revisão sistemática foi sintetizar as evidências disponíveis sobre a relação entre LEA, o estado do glicogênio muscular e o desempenho físico em esportes funcionais.

Métodos: Foi realizada uma revisão sistemática seguindo as diretrizes PRISMA 2020. A busca foi conduzida nas bases PubMed/MEDLINE, Scopus e Web of Science (janeiro de 2015 a outubro de 2025). Foram incluídos doze estudos com adultos treinados. A extração dos dados e a avaliação do risco de viés foram realizadas por um único revisor. Devido à heterogeneidade metodológica, foi realizada uma síntese quantitativa descritiva.

Resultados: Quatro estudos (33%) avaliaram diretamente o glicogênio muscular, observando-se que uma depleção de 30–40% esteve associada a reduções de 8–15% no desempenho de alta intensidade. Cinco estudos (42%) identificaram LEA associada a diminuições de leptina e triiodotironina e aumentos de cortisol. As demandas fisiológicas em esportes funcionais incluíram consumos de oxigênio de 85–92% do VO_2máx e concentrações de lactato superiores a 10–12 mmol/L.

Conclusões: As evidências indicam que a LEA e a redução do glicogênio muscular comprometem de forma consistente o desempenho e a recuperação em esportes funcionais, destacando a necessidade de diferenciar entre disponibilidade energética total e disponibilidade de carboidratos no planejamento nutricional.

Palavras-chave: Disponibilidade Energética. Desempenho Esportivo. Nutrição.

ABSTRACT

Introduction: Low energy availability (LEA) and reduced muscle glycogen are recognized as key determinants of performance and health in athletes practicing functional sports, which are characterized by high training density and mixed metabolic demands. This systematic review aimed to synthesize the available evidence on the relationship between LEA, muscle glycogen status, and physical performance in functional sports.

Methods: A systematic review was conducted following PRISMA 2020 guidelines. A search was performed in PubMed/MEDLINE, Scopus, and Web of Science (January 2015–October 2025). Twelve studies involving trained adults were included. Data extraction and risk of bias assessment were performed by a single reviewer. Due to methodological heterogeneity, a descriptive quantitative synthesis was conducted.

Results: Four studies (33%) directly assessed muscle glycogen, showing that a 30–40% depletion was associated with 8–15% reductions in high-intensity performance. Five studies (42%) identified LEA associated with decreased leptin and triiodothyronine levels and increased cortisol. Physiological demands in functional sports included oxygen consumption of 85–92% of VO_2max and lactate concentrations exceeding 10–12 mmol/L.

Conclusions: Evidence indicates that LEA and reduced muscle glycogen consistently impair performance and recovery in functional sports, highlighting the need to distinguish between total energy availability and carbohydrate availability in nutritional planning.

ISSN: 2177-3246

Keywords: Energy Availability. Athletic Performance. Nutrition.

1 INTRODUCCIÓN

La disponibilidad energética se conceptualiza como la energía incorporada menos el costo energético asociado al ejercicio, ajustada según masa libre de grasa, así constituyendo un factor determinante de la funcionalidad fisiológica en deportistas. En casos en que tal relación da lugar a insuficiencias sostenidas temporalmente, tiene lugar la baja disponibilidad energética (LEA), relacionada con un desajuste energético global que conlleva el compromiso de la energía que se requiere para los procesos de metabolismo basal, así como para la homeostasis sistémica (1). La LEA es factor estructurante fisiopatológico del Síndrome de Deficiencia Energética Relativa en el Deporte (RED-S), asociado a alteraciones sistémicas, sean endocrinas, metabólicas, inmunológicas, óseas y cardiovasculares, así afectando directamente la salud y el rendimiento (1,2). Resulta de gran importancia diferencias este concepto de la disponibilidad de carbohidratos (CHO), que se asocia con la provisión de glúcidos para el ejercicio y la recuperación, así como de las dietas bajas en CHO o cetogénicas, estas últimas siendo estrategias nutricionales orientadas a restringir tal ingesta. Debe enfatizarse en que tales términos no son equivalentes, dado que si bien la LEA implica un déficit energético total, la reducida disponibilidad de CHO es potencial incluso con una adecuada ingesta calórica, siempre dependiente del contexto y objetivo fisiológico (8,9).

En mujeres deportistas, la LEA es especialmente relevante por su asociación con la Tríada de la Mujer Deportista, dada por LEA, disfunción menstrual y reducción de la densidad mineral ósea (3). Específicamente, la LEA sostenida conlleva alteraciones en la secreción pulsátil de GnRH, disminuye las concentraciones de la hormona luteinizante (LH) y la hormona foliculoestimulante (FSH), y afecta la función ovárica, todo ello en conjunto con reducciones de leptina y triyodotironina (T3), e incrementos de cortisol (estado catabólico adaptativo) (1,3). Pese a que estas reacciones se orientan a la preservación de la supervivencia energética, su presencia sostenida conlleva compromiso sobre la salud ósea, la función reproductiva, la recuperación posejercicio y, además, la homeostasis inmunitaria y el riesgo de lesiones y afectaciones psicológicas (2,4). Estas repercusiones derivan del déficit global propio de la LEA, no individualmente de la restricción de CHO, así hallándose una diferenciación mecanicista entre los constructos en cuestión.

Desde una perspectiva de rendimiento, la disponibilidad de CHO posee una función central en tanto la determinación del contenido y la localización del glucógeno a nivel muscular; es decir, del componente energético más importante en ejercicios de elevada intensidad: resíntesis de adenosín trifosfato (ATP) (glucogenólisis), regulación de la contracción muscular, liberación de calcio, señalización metabólica (5-7). Estudios afirman

que la depleción de glucógeno, en cualquier nivel, es susceptible de disminuir la generación de fuerza, así como producir la aceleración de la fatiga, ello de manera independiente del agotamiento total de reservas (6,7). De esta manera, la baja disponibilidad de CHO altera el rendimiento agudo; por su parte, la LEA incrementa tal efecto mediante la limitación de la resíntesis de glucógeno y el favorecimiento de un medio hormonal catabólico (menor insulina y leptina, mayor cortisol) (1,2,8).

En correspondencia la temática del presente estudio, tales interacciones son de gran relevancia en pautas funcionales e híbridas como CrossFit, Hyrox e instancias concurrentes de fuerza y resistencia (densidad de trabajo y requerimientos glucolíticos elevados, y recuperación con limitaciones). Sea en CrossFit (rendimiento asociado con reservas anteriores de glucógeno y capacidad de reposición intersesiones consecutivas) (6,10), o en Hyrox (necesidad de disponibilidad sostenida de glucógeno hacia el sostenimiento de la intensidad) (11), la superposición entre LEA y baja disponibilidad de CHO es determinantemente perjudicial, dado que el déficit global de energía afecta la capacidad de adaptación crónica y la salud, sumado a que la restricción de CHO delimita el rendimiento a corto plazo, así como la capacidad de trabajo. En este sentido, deben diferenciarse los niveles energético y de sustratos en la planificación nutricional, así como justificar toda modalidad de restricción de CHO en correspondencia con el mecanismo fisiológico y el objetivo del entrenamiento, hacia la evitación de déficits temporalmente sostenidos de energía susceptibles de incrementar el riesgo de RED-S y deterioro del rendimiento (8,9).

En conjunto, la evidencia sugiere que el glucógeno muscular constituye un determinante central del rendimiento en deportes funcionales, y que la LEA, al limitar su disponibilidad, establece un escenario de vulnerabilidad fisiológica que compromete la potencia, la resistencia y la capacidad de recuperación. Comprender cómo se interrelacionan estos factores es esencial para diseñar estrategias nutricionales y de entrenamiento que optimicen la adaptación y minimicen los efectos adversos de la deficiencia energética. Por ello, el presente estudio se propone analizar el papel del glucógeno en el contexto de la baja disponibilidad energética y su impacto en el rendimiento y la salud de atletas de disciplinas funcionales, mediante una revisión sistemática fundamentada en PRISMA 2020 (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta- Analyses) (12).

2 METODOLOGÍA DISEÑO DEL ESTUDIO

Se realizó una revisión sistemática de la literatura de acuerdo con las directrices establecidas por la guía PRISMA 2020 (12). El objetivo fue sintetizar la evidencia actual

sobre la relación entre la LEA, el estado de glucógeno muscular y los resultados relacionados con el rendimiento en deportes funcionales.

2.1 FUENTES DE INFORMACIÓN Y ESTRATEGIA DE BÚSQUEDA

La búsqueda se realizó en las bases de datos PubMed/ MEDLINE, Scopus y Web of Science, justificándose por su tratamiento de estudios de ciencias del deporte, fisiología del ejercicio y nutrición deportiva.

Las búsquedas en sí se efectuaron en septiembre-octubre de 2025, incluyendo estudios publicados en el período enero de 2015-octubre de 2025, independientemente del contexto geográfico. Se consideraron investigaciones publicadas tanto en inglés como en español.

La estrategia de relevamiento incluyó la combinación de términos controlados (MeSH) y palabras clave libres, implicando la utilización de operadores booleanos AND y OR, discriminadas según base de datos. Así, para PubMed/ MEDLINE, se utilizaron términos MeSH y texto libre en campos Title/Abstract: ("Low Energy Availability"[Title/Abstract] OR "energy availability"[Title/Abstract] OR "relative energy deficiency in sport"[Title/Abstract] OR RED-S[Title/Abstract] OR "Energy Metabolism"[Mesh]) AND ("Muscle Glycogen"[Mesh] OR "muscle glycogen"[Title/Abstract] OR "glycogen depletion"[Title/Abstract] OR "glycogen resynthesis"[Title/Abstract]) AND ("Athletes"[Mesh] OR athlete*[Title/Abstract] OR "trained individuals"[Title/Abstract] OR "high-intensity functional training"[Title/Abstract] OR "functional training"[Title/Abstract] OR CrossFit[Title/Abstract] OR Hyrox[Title/Abstract] OR "high-intensity interval exercise"[Title/Abstract]) AND ("Sports Performance"[Mesh] OR performance[Title/Abstract] OR fatigue[Title/Abstract] OR recovery[Title/Abstract]).

En Scopus, se utilizó búsqueda en TITLE-ABS-KEY: (TITLE-ABS-KEY("low energy availability" OR "energy availability" OR "relative energy deficiency in sport" OR "RED-S")) AND (TITLE-ABS-KEY("muscle glycogen" OR "glycogen depletion"Or "glycogeresynthesis"))

AND (TITLE-ABS-KEY("functional training" OR "high intensity functional training" OR "high intensity interval exercise" OR CrossFit OR Hyrox OR athlete* OR "trained individuals")) AND (TITLE-ABS-KEY(performanceORfatigueOR recovery OR"exercise performance")).

Finalmente, en Web of Science, se utilizó búsqueda en Topic (TS): TS=("low energy availability" OR "energy availability" OR "relative energy deficiency in sport" OR RED-S) AND TS=("muscle glycogen" OR "glycogen depletion" OR "glycogen resynthesis") AND TS=("functional training" OR "high intensity functional training" OR CrossFit OR Hyrox OR athlete* OR "trained individuals") AND TS=(performance OR fatigue OR recovery OR "exercise performance").

2.2 CRITERIOS DE ELEGIBILIDAD

Se consideraron los siguientes criterios de inclusión: estudios efectuados en humanos adultos (≥ 18 años), atletas o físicamente entrenados; estudios que evaluaron directa o indirectamente el glucógeno muscular a través de técnicas validadas; estudios que evaluaron la disponibilidad energética, LEA y/o intervenciones nutricionales para la modificación de la infesta energética o de CHO; estudios con resultados asociados al rendimiento físico, la fatiga, la capacidad de trabajo, la recuperación y/o respuestas fisiológicas adyacentes; diseños experimentales, cuasi-experimentales, observacionales o revisiones sistemáticas con metodología explícita.

Por su parte, se excluyeron: estudios efectuados en animales y/o modelos celulares; estudios efectuados en poblaciones pediátricas; estudios de caso, editoriales, cartas al editor y/o revisiones narrativas; estudios realizados sin revisión por pares; estudios con insuficiente información metodológica para la extracción de datos cuantitativos o la evaluación del riesgo de sesgo.

Así, la revisión incluyó estudios con distintos diseños metodológicos (experimentales, observacionales y revisiones sistemáticas) dada la necesidad de abarcar de manera más completa la evidencia relacionada con la problemática, en tanto, en este campo de investigación, los datos científicos generados proceden de aproximaciones metodológicas diversas. En otras palabras, se considera que la restricción a una única variante de diseño hubiese conllevado limitaciones sobre la comprensión integral de la problemática abordada.

2.3 PROCESO DE SELECCIÓN

Las investigaciones identificadas se importaron a un gestor bibliográfico, los duplicados siendo eliminados tanto de forma manual como automática.

La selección de los estudios se efectuó en las cuatro fases dadas por PRISMA 2020 (12), en tanto identificación, cribado por título y resumen, evaluación de elegibilidad por texto completo e inclusión final.

La totalidad del proceso de selección fue realizada por un único revisor, conforme los criterios presentados. Ante la finalidad de reducir el riesgo de sesgo de selección, la aplicación de los criterios fue sistemática y consistente en las etapas del proceso en cuestión. Los estudios incluidos y excluidos por fase se documentaron a partir de un diagrama de flujo PRISMA 2020.

2.4 EXTRACCIÓN DE DATOS

La extracción de los datos fue efectuada por un único revisor a partir de una planilla estandarizada, extrayendo: autor y año de publicación; tamaño muestral y características de la población; diseño del estudio; método de evaluación del glucógeno muscular y/o disponibilidad energética; resultados cuantitativos reportados (medias, desviaciones estándar, porcentajes y valores p, cuando estuvieron disponibles); limitaciones.

Análisis estadístico y síntesis de los resultados

Se efectuó una síntesis cuantitativa descriptiva de los datos relevados, en tanto la extracción de cambios porcentuales, diferencias absolutas y significación estadística cuando (cuando estuvieron disponibles).

Considerando que las investigaciones incluidas se correspondieron con una heterogeneidad significativa en cuanto a diseño, técnicas de cuantificación del glucógeno, análisis de la disponibilidad energética, población y variables de resultado, no se efectuó un metaanálisis estadístico.

La síntesis cuantitativa descriptiva se fundamentó en la identificación de patrones consistentes respecto de la relación entre la disminución de la disponibilidad energética, aquella del glucógeno muscular y el detrimento del rendimiento en deportes funcionales, omitiendo inferencias estadísticas agregadas.

2.5 EVALUACIÓN DE LA CALIDAD METODOLÓGICA Y RIESGO DE SESGO

Estos análisis fueron efectuados por un único revisor, siempre en función del diseño de cada uno de los estudios incluidos. Así, los ensayos experimentales fueron evaluados mediante la escala PEDro, mientras que las investigaciones observacionales a través de ROBINS-I y las revisiones sistemáticas mediante ROBIS.

Es importante aclarar que, si bien los análisis no se efectuaron de manera independiente por diversos revisores, la implementación de técnicas validadas derivó en valoraciones estructuradas y transparentes del riesgo de sesgo.

Por su parte, la certeza global de la evidencia se analizó de manera cualitativa a partir del enfoque GRADE, en función al riesgo de sesgo, consistencia, precisión y aplicabilidad a deportes funcionales.

Considerando que la presente revisión se efectuó a partir de estudios con diferentes diseños metodológicos, la evaluación GRADE se implementó cualitativamente a nivel de síntesis narrativa, incorporando el conjunto de la evidencia disponible sobre la relación entre disponibilidad energética, glucógeno muscular y rendimiento en deportes funcionales. Así, los estudios experimentales se interpretaron como evidencia de mayor nivel, mientras que

los observacionales, como evidencia de nivel moderado a bajo, aunque pudiéndose ajustar en correspondencia con los dominios evaluados.

La valoración final de la certeza de la evidencia se consideró en cuatro niveles o categorías: alta, moderada, baja o muy baja. En el marco de desarrollo de la presente revisión, la certeza global se consideró moderada, dado que, aunque los resultados mostraron una consistencia direccional clara respecto al efecto de la baja disponibilidad energética y la depleción de glucógeno sobre el rendimiento, se hallaron limitaciones sobre la precisión y la generalización de los hallazgos en tanto heterogeneidad metodológica, tamaños muestrales reducidos y variabilidad metódica de evaluación del glucógeno.

2.6 LIMITACIONES METODOLÓGICAS

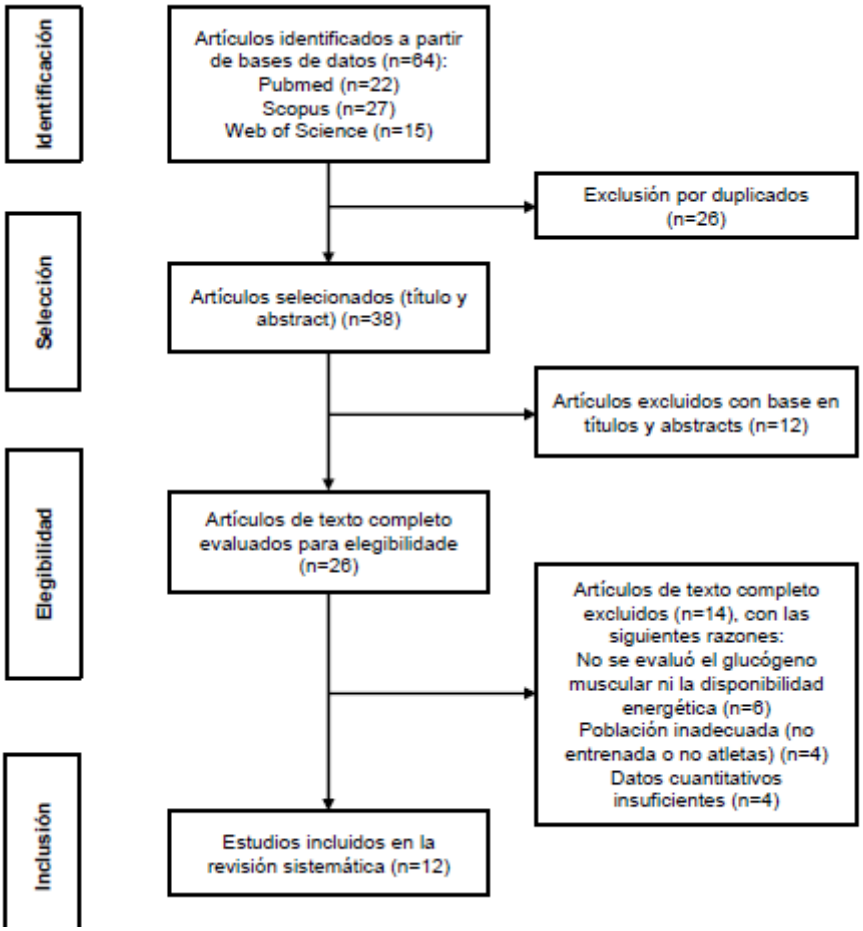
Los procedimientos de selección de estudios, extracción de datos y evaluación del riesgo de sesgo fueron realizados por un único revisor, como se mencionó oportunamente. Ello se correspondió con el hecho que la revisión fue efectuada en el marco de un proyecto académico con recursos limitados. En relación directa con esto último, a fin de minimizar los potenciales sesgos, se implementaron estrategias metodológicas con la finalidad de garantizar la consistencia y la transparencia procedural: definición a priori de los criterios de selección y su aplicación sistemática en todas las fases del proceso de selección, según la guía PRISMA 2020 (12); reducción del riesgo de omisión de estudios relevantes al realizar la identificación y el cribado de los estudios mediante una estrategia de búsqueda estructurada y reproducible en diversas bases de datos. El protocolo del presente estudio no fue registrado prospectivamente en plataformas internacionales como PROSPERO, decisión que se correspondió con la realización de la revisión dentro de un marco de proyecto académico con alcance exploratorio. No obstante esto último, la garantía de la transparencia y reproducibilidad metodológica derivó de la definición a priori y reporte detallado según la guía PRISMA 2020 (12) de los criterios de elegibilidad, las estrategias de búsqueda, el proceso de selección de estudios y los métodos de síntesis, así procurando mantener estándares metodológicos comparables en lo que respecta a la trazabilidad y la claridad del proceso de revisión.

3 RESULTADOS

En la Figura 1, se representa el proceso de flujo derivado de la aplicación de los criterios PRISMA 2020 (12) que resultaron en la inclusión de 12 estudios.

Figura 1

Diagrama de flujo del proceso de selección y número de artículos incluidos.



Fuente: Elaboración propia.

Las características y los principales hallazgos de los estudios incluidos se resumen en la Tabla 1. Los estudios incluidos comprendían investigaciones experimentales, revisiones sistemáticas y estudios fisiológicos aplicados con poblaciones adultas entrenadas o deportistas.

Tabla 1

Resultados de la revisión sistemática según criterios PRISMA 2020

Primer autor/ Año	Población	Diseño de estudio	Método de glucógeno/ Valoración LEA	Principales hallazgos	Limitaciones
Vigh-Larsen 2022	Atletas entrenados (n=18)	Experimental, crossover	Biopsia muscular (localización subcelular)	Depleción intrafibrilar ~40 % → ↓ rendimiento HI (≈8-12%)	n pequeño

Hokken 2021	Atletas élite (n=10)	Experimental	Biopsia subcelular	↓ fuerza neuromuscular con depleción local sin agotamiento total	No evalúa LEA
Rountree 2017	Atletas entrenados (n=19)	Ensayo controlado	Rendimiento + ingesta CHO	Ingesta CHO ↑ trabajo total 6- 12%	Corto plazo
Wroble 2019	Atletas entrenados	Observacional	Ingesta en ergética estimada	Déficit energético crónico asociado a ↓ rendimiento repetido	LEA indirecta
Sultan 2025	Atletas funcionales	Observacional	Biomarcadores + rendimiento	LEA asociada a ↑ fatiga y ↓ potencia final	Diseño transversal
Margolis 2021	Deportistas entrenados	Experimental	Glucógeno muscular indirecto	Baja CHO → ↓ resíntesis glucógeno post-ejercicio	No mide EA total

Fuente: Elaboración propia.

La síntesis cuantitativa descriptiva evidenció una disponibilidad heterogénea de datos sobre glucógeno muscular y LEA, lo que impidió la realización de un meta- análisis formal conforme a los criterios de PRISMA 2020 (12). Cuatro estudios (33%) evaluaron el glucógeno muscular de manera directa, mediante biopsias musculares o análisis de su localización subcelular, demostrando que una depleción glucogénica del orden del 30-40% se asocia con una disminución significativa del rendimiento en ejercicios de alta intensidad, con reducciones estimadas entre 8-15% en la capacidad de trabajo total y en la producción de fuerza máxima (13,14,19,20). Estos efectos se observaron incluso en ausencia de agotamiento completo del glucógeno total, lo que subraya la relevancia funcional de la depleción selectiva intrafibrilar.

Cinco estudios (42%) abordaron la disponibilidad energética total o su estimación indirecta, identificando que valores compatibles con LEA, definidos operacionalmente como una ingesta energética insuficiente en relación con el gasto del entrenamiento, se asociaron con alteraciones hormonales consistentes, incluyendo reducciones de leptina y T3, junto con incrementos en cortisol, configurando un entorno metabólico catabólico (2,15,16,17,18). En estos estudios, la presencia de LEA se vinculó además con un deterioro de la capacidad para sostener esfuerzos repetidos de alta intensidad y con un aumento de la percepción de fatiga, aun en ausencia de cambios significativos en la masa corporal.

Asimismo, los estudios que analizaron demandas fisiológicas propias de deportes funcionales reportaron consumos de oxígeno sostenidos cercanos al 85-92% del VO2máx y concentraciones de lactato sanguíneo superiores a 10-12 mmol/L durante la competición o el entrenamiento, lo que pone de manifiesto una elevada dependencia del metabolismo glucolítico y, por ende, de reservas adecuadas de glucógeno muscular (10,11). En conjunto, estos hallazgos cuantitativos indican que tanto la reducción del glucógeno muscular como la presencia de LEA comprometen de manera consistente el rendimiento físico y la capacidad de recuperación en contextos de alta densidad de trabajo, aunque la heterogeneidad metodológica entre estudios limitó la posibilidad de integrar los resultados mediante análisis estadísticos combinados.

En cuanto a la evaluación de la calidad metodológica y del riesgo de sesgo de los estudios incluidos, en términos generales, siete de los doce estudios presentaron un riesgo de sesgo bajo a moderado, mientras que los cinco restantes fueron clasificados con riesgo de sesgo moderado, sin identificarse estudios con riesgo crítico de sesgo.

Las principales limitaciones metodológicas detectadas en los estudios experimentales incluyeron tamaños muestrales reducidos, ausencia de cegamiento de participantes e investigadores y seguimiento de corta duración, factores que pueden influir en la precisión de los efectos observados sobre el glucógeno muscular y el rendimiento físico (13,14,19). En los estudios observacionales, el riesgo de sesgo estuvo principalmente relacionado con la medición indirecta de la disponibilidad energética, la dependencia de autorreportes dietarios y el diseño transversal, que impide establecer relaciones causales entre LEA y las variables fisiológicas evaluadas (2,15-18).

Por su parte, las revisiones incluidas mostraron un riesgo de sesgo bajo a moderado, condicionado por la heterogeneidad de los estudios primarios y por la ausencia de análisis cuantitativos combinados en algunos casos (8,20). En conjunto, la calidad global de la evidencia se consideró moderada, con una consistencia direccional clara en los efectos de la LEA y de la depleción de glucógeno sobre el rendimiento en deportes funcionales, aunque con limitaciones en la precisión y en la generalización de los resultados debido a la variabilidad metodológica entre los estudios incluidos.

4 DISCUSIÓN

La evidencia reunida en esta revisión sistemática muestra que la disponibilidad energética y el estado del glucógeno muscular constituyen factores determinantes en el rendimiento y la adaptación fisiológica en los deportes funcionales contemporáneos, tales como CrossFit, Hyrox y los entrenamientos híbridos. A lo largo de los estudios analizados,

se observa que tanto la depleción de glucógeno como la LEA ejercen efectos adversos que se manifiestan en la capacidad de mantener la potencia, la recuperación posejercicio y la señalización anabólica asociada a la síntesis proteica.

En los estudios fisiológicos más recientes, como el de Vigh-Larsen et al. (13), se confirma que la distribución subcelular del glucógeno dentro de la fibra muscular tiene un papel crucial en la fatiga. La reducción de hasta un 70% del glucógeno intrafibrilar en las fibras tipo II durante ejercicios intermitentes intensos se relaciona directamente con la pérdida de fuerza y la disminución del rendimiento.

Este hallazgo explica por qué, en modalidades como CrossFit o Hyrox, incluso reducciones parciales de las reservas locales de glucógeno pueden comprometer la capacidad de sostener esfuerzos repetidos de alta intensidad. La fatiga neuromuscular observada en estas disciplinas no solo depende del agotamiento global del glucógeno, sino también de la depleción localizada en compartimentos críticos para la contracción muscular rápida.

Por su parte, los estudios que exploraron estrategias nutricionales de bajo contenido en carbohidratos o dietas cetogénicas (15,16) mostraron resultados contradictorios, pero la tendencia general apunta a una reducción del rendimiento anaeróbico y de la potencia máxima, especialmente en actividades dependientes de la glucólisis. Si bien la adaptación prolongada a dietas muy bajas en CHO puede aumentar la oxidación de grasas, los resultados sugieren que estas estrategias comprometen la capacidad de producir energía rápida, esencial en entrenamientos de carácter funcional o competitivo. En este sentido, la periodización de carbohidratos (entrenar con disponibilidad baja en sesiones de baja intensidad y competir con reservas altas) emerge como una herramienta útil, siempre que sea cuidadosamente planificada para evitar episodios prolongados de LEA.

La evidencia sobre la señalización anabólica y la recuperación refuerza la importancia de mantener un adecuado estado de glucógeno. Margolis et al. (17) demostraron que iniciar el ejercicio con glucógeno bajo atenúa la activación de la vía mTORC1 y reduce la expresión de marcadores miogénicos como PAX7 y MYOGENIN. Estos hallazgos son relevantes en el contexto de los deportes funcionales, en los cuales la frecuencia de entrenamiento y la alta carga de trabajo semanal requieren una óptima recuperación. La LEA prolongada y la persistente escasez de glucógeno limitan la capacidad de adaptación al entrenamiento, con un impacto negativo tanto en la fuerza como en la síntesis proteica y la composición corporal.

En cuanto al eje fisiológico, los estudios revisados (2,19) establecen una relación clara entre LEA, depleción de glucógeno y alteraciones hormonales. En condiciones de baja disponibilidad energética, se observa una disminución significativa de leptina e insulina,

acompañada de un aumento de cortisol, lo cual favorece un entorno catabólico y reduce la capacidad de resíntesis de glucógeno. En mujeres, estos efectos son más marcados y pueden derivar en disfunciones menstruales y alteraciones tiroideas, sumándose al impacto en la densidad ósea y el rendimiento. La relación entre LEA y glucógeno muscular, por tanto, trasciende el aspecto energético y se convierte en un eje central para comprender las adaptaciones metabólicas, hormonales y musculares de las atletas funcionales.

Finalmente, la literatura práctica (8,11,20) aporta directrices concretas para optimizar la ingesta y el timing de carbohidratos en deportes de alta densidad de trabajo. Las estrategias de “fuel for the work required” se ajustan especialmente bien a la lógica del entrenamiento funcional, donde las demandas varían por sesión. Ingerir entre 1,0-1,2 g/kg.h de CHO en las primeras horas de recuperación, junto con proteína y fluidos, se asocia con una resíntesis óptima de glucógeno y una mejora en la disponibilidad energética para sesiones consecutivas. El estudio de Brandt et al. (11) aporta evidencia reciente sobre Hyrox, mostrando que la prueba impone una demanda energética mixta con elevada dependencia del glucógeno; por ello, la recarga adecuada entre rondas de entrenamiento resulta crítica.

En conjunto, los resultados de esta revisión confirman que el mantenimiento de un balance energético adecuado y de reservas óptimas de glucógeno es esencial no solo para el rendimiento agudo, sino también para la adaptación crónica al entrenamiento funcional. La LEA sostenida puede actuar como un modulador negativo del rendimiento y de la salud, particularmente en mujeres, y debería ser considerada un factor de riesgo metabólico y endocrino en el ámbito deportivo.

5 CONCLUSIONES

Los resultados sugieren que la preservación de reservas adecuadas de glucógeno es un factor determinante para el rendimiento y la salud metabólica del atleta. Además, se propone que la evaluación de LEA en estos contextos debería incorporar marcadores indirectos de disponibilidad de glucógeno, tales como indicadores de fatiga, disminución de rendimiento, lentitud en la recuperación o sensación de agotamiento muscular persistente.

Desde una perspectiva aplicada, este trabajo reafirma la importancia de actualizar las recomendaciones nutricionales de CrossFit Inc. y de promover una educación nutricional basada en evidencia científica, tanto entre atletas como entrenadores. La falta de protocolos específicos sobre ingesta y temporización de carbohidratos en CrossFit y modalidades híbridas representa una brecha que debe ser abordada mediante guías actualizadas, con especial énfasis en la prevención de LEA en mujeres.

Como limitaciones, se reconoce la escasez de estudios que incluyan atletas femeninas de CrossFit o Hyrox, el uso predominante de muestras masculinas y la heterogeneidad metodológica en la evaluación del glucógeno (biopsia, RMN, estimaciones indirectas). No obstante, los hallazgos son consistentes en señalar la necesidad de mantener un adecuado balance energético y una ingesta suficiente de carbohidratos para sostener las adaptaciones al entrenamiento funcional. Por su parte, una limitación metodológica de esta revisión sistemática es que el proceso de selección de estudios, extracción de datos y evaluación del riesgo de sesgo fue realizado por un único revisor, lo que podría incrementar el riesgo de sesgo de selección y de interpretación. Sin embargo, este riesgo se mitigó mediante la aplicación de criterios definidos a priori y el uso de herramientas de evaluación validadas.

REFERENCIAS

Mountjoy M, Sundgot-Borgen JK, Burke LM, Ackerman KE, Blauwet C, Constantini N, Lebrun C, Lundy B, Melin AK, Meyer NL, Sherman RT, Tenforde AS, Klungland Torstveit M, Budgett R. IOC consensus statement on relative energy deficiency in sport (RED-S): update. Br J Sports Med. ;():-97. doi: 10.1136/bjsports--099193

Suzuki D, Suzuki Y. Identifying and analyzing low energy availability in athletes: the role of biomarkers and red blood cell turnover. Nutrients. ;():. doi: 10.3390/nu

Nattiv A, Loucks AB, Manore MM, Sanborn CF, Sundgot-Borgen J, Warren MP; American College of Sports Medicine. American College of Sports Medicine position stand. The female athlete triad. Med Sci Sports Exerc. ;():-82. doi: 10.1249/mss.0b013e318149f111

Melin A, Tornberg ÅB, Skouby S, Møller SS, Sundgot-Borgen J, Faber J, Sidelmann JJ, Aziz M, Sjödin A. Energy availability and the female athlete triad in elite endurance athletes. Scand J Med Sci Sports. ;():-22. doi: 10.1111/sms.12261

Vigh-Larsen JF, Ørtenblad N, Spriet LL, Overgaard K, Mohr M. Muscle glycogen metabolism and high-intensity exercise performance: a narrative review. Sports Med. ;():-74. doi: 10.1007/s40279--01475-0

Vigh-Larsen JF, Ørtenblad N, Nielsen J, Emil Andersen O, Overgaard K, Mohr M. The role of muscle glycogen content and localization in high-intensity exercise performance: a placebo-controlled trial. Med Sci Sports Exerc. ;():-86. doi: 10.1249/MSS.0000000000003002

Ørtenblad N, Westerblad H, Nielsen J. Muscle glycogen stores and fatigue. J Physiol. ;():-13. doi: 10.1113/jphysiol.2013.251629

Impey SG, Hearris MA, Hammond KM, Bartlett JD, Louis J, Close GL, Morton JP. Fuel for the work required: a theoretical framework for carbohydrate periodization and the glycogen threshold hypothesis. Sports Med. ;():-48. doi: 10.1007/s40279--0867-7

Thomas DT, Erdman KA, Burke LM. Position of the Academy of Nutrition and Dietetics, Dietitians of Canada, and the American College of Sports Medicine: nutrition and athletic performance. J Acad Nutr Diet. ;():-28. doi: 10.1016/j.jand.2015.12.006

Rountree JA, Krings BM, Peterson TJ, Thigpen AG, McAllister MJ, Holmes ME, Smith JW. Efficacy of carbohydrate ingestion on CrossFit exercise performance. Sports (Basel). ;():. doi: 10.3390/sports5030061

Brandt T, Ebel C, Lebahn C, Schmidt A. Acute physiological responses and performance determinants in Hyrox© - a new running-focused high intensity functional fitness trend. Front Physiol. ;():. doi: 10.3389/fphys.2025.1519240

Page MJ, McKenzie JE, Bossuyt PM, Boutron I, Hoffmann TC, Mulrow CD, Shamseer L, Tetzlaff JM, Akl EA, Brennan SE, Chou R, Glanville J, Grimshaw JM, Hróbjartsson A, Lalu MM, Li T, Loder EW, Mayo-Wilson E, McDonald S, McGuinness LA, Stewart LA, Thomas J, Tricco AC, Welch VA, Whiting P, Moher D. The PRISMA statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. BMJ. ;:n. doi: 10.1136/bmj.n71

Vigh-Larsen JF, Ørtenblad N, Emil Andersen O, Thorsteinsson H, Kristiansen TH, Bilde S, Mikkelsen MS, Nielsen J, Mohr M, Overgaard K. Fibre type- and localisation-specific muscle glycogen utilisation during repeated high-intensity intermittent exercise. J Physiol. ;():-30. doi: 10.1113/JP283225

Hokken R, Laugesen S, Aagaard P, Suetta C, Frandsen U, Ørtenblad N, Nielsen J. Subcellular localization- and fibre type-dependent utilization of muscle glycogen during heavy resistance exercise in elite power and Olympic weightlifters. Acta Physiol (Oxf). ;():. doi: 10.1111/apha.13561

Wroble KA, Trott MN, Schweitzer GG, Rahman RS, Kelly PV, Weiss EP. Low-carbohydrate, ketogenic diet impairs anaerobic exercise performance in exercise-trained women and men: a randomized-sequence crossover trial. J Sports Med Phys Fitness. ;():-7. doi: 10.23736/S0022-4707.18.08318-4

Sultan ZH, Speelman D. A systematic review of the effects of low-carbohydrate diet on athletic physical performance parameters. Cureus. ;():. doi: 10.7759/cureus.79166

Margolis LM, Wilson MA, Whitney CC, Carrigan CT, Murphy NE, Hatch-McChesney A, Pasiakos SM. Initiating aerobic exercise with low glycogen content reduces markers of myogenesis but not mTORC1 signaling. J Int Soc Sports Nutr. ;():. doi: 10.1186/s12970--00455-z

Vandoorne T, De Smet S, Ramaekers M, Van Thienen R, De Bock K, Clarke K, Hespel P. Intake of a ketone ester drink during recovery from exercise promotes mTORC1 signaling but not glycogen resynthesis in human muscle. Front Physiol. ;():. doi: 10.3389/fphys.2017.00310

Areta JL, Hopkins WG. Skeletal muscle glycogen content at rest and during endurance exercise in humans: a meta-analysis. Sports Med. ;():-102. doi: 10.1007/s40279--0941-1

Burke LM, van Loon LJC, Hawley JA. Postexercise muscle glycogen resynthesis in humans. J Appl Physiol (). ;():-67. doi: 10.1152/japplphysiol.00860.2016