

*Entrenamiento aeróbico en depleción de  
glucógeno: Revisión sistematizada*

**GRADO EN  
CIENCIAS DE LA ACTIVIDAD FÍSICA Y EL DEPORTE**

**UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ**



**CURSO ACADÉMICO 2024**

**Alumno: Paulino Alacid Lifante**

**Tutor académico: Néstor Vicente Salar**

## ÍNDICE

<b>1. RESUMEN .....</b>	<b>3</b>
<b>1.1 Antecedentes .....</b>	<b>3</b>
<b>1.2 Objetivos .....</b>	<b>3</b>
<b>1.3 Fuente de los datos .....</b>	<b>3</b>
<b>1.4 Criterios de elegibilidad de los estudios .....</b>	<b>3</b>
<b>1.5 Participantes e intervenciones .....</b>	<b>3</b>
<b>1.6 Evaluación de los estudios, métodos y síntesis .....</b>	<b>3</b>
<b>1.7 Limitaciones.....</b>	<b>4</b>
<b>1.8 Conclusiones, hallazgos principales .....</b>	<b>4</b>
<b>2. CONTEXTUALIZACIÓN .....</b>	<b>4</b>
<b>2.1 Justificación de la revisión.....</b>	<b>4</b>
<b>2.2 Objetivos, preguntas, intervenciones, comparaciones.....</b>	<b>5</b>
<b>3. PROCEDIMIENTO DE REVISIÓN (METODOLOGÍA).....</b>	<b>5</b>
<b>3.1 Protocolo y registro.....</b>	<b>5</b>
<b>3.2 Criterios de elegibilidad .....</b>	<b>5</b>
<b>3.3 Fuentes de información .....</b>	<b>5</b>
<b>4. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA (DESARROLLO).....</b>	<b>6</b>
<b>5. DISCUSIÓN .....</b>	<b>13</b>
<b>6. PROPUESTA DE INTERVENCIÓN.....</b>	<b>15</b>
<b>7. BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>16</b>
<b>8. ANEXOS .....</b>	<b>18</b>

# 1. RESUMEN

## 1.1 Antecedentes

El entrenamiento de carácter aeróbico ha sido ampliamente estudiado como herramienta para la mejora de la condición física, el mantenimiento de un estilo de vida saludable y el rendimiento deportivo. En unión a este tipo de entrenamiento, se utilizan diversos abordajes nutricionales para conseguir los mayores beneficios posibles incidiendo en la eficiencia deportiva, en la reducción del porcentaje de masa grasa y mejorando así la composición corporal. Uno de dichos abordajes, concretamente el entrenamiento aeróbico en estado de depleción de glucógeno, es en el que está centrado la presente revisión.

La depleción de glucógeno (llamado entrenamiento en ayunas) es el estado fisiológico donde los depósitos de este sustrato energético, principalmente en la musculatura y el hígado, se encuentran “vacíos”. Esta estrategia nutricional es utilizada con la intencionalidad de mejorar la flexibilidad metabólica, mejorando la capacidad de utilizar otras fuentes de energía, como las grasas, durante un ejercicio de carácter cíclico prolongado en el tiempo. Esto podría suponer una mejora tanto en el rendimiento como en la composición corporal. Para comprobarlo, se miden diversas variables fisiológicas como el  $VO_{2max}$ , siendo la cantidad de oxígeno que el organismo puede absorber, transportar y consumir en un tiempo determinado, o el (RER), que se entiende como la relación entre la cantidad de dióxido de carbono producida y la de oxígeno consumida durante la respiración y que varía dependiendo del sustrato energético utilizado, entre otras.

## 1.2 Objetivos

Los objetivos del presente trabajo son comprobar si la utilización del protocolo de entrenamiento en depleción de glucógeno mejora la eficiencia en la utilización de la vía energética de las grasas respecto a la vía glucolítica, como una mejora de la composición corporal y aumento de la flexibilidad metabólica, y así como dilucidar posibles recomendaciones prácticas para la implementación de dicho protocolo de actuación.

## 1.3 Fuente de los datos

Para llevar a cabo el trabajo propuesto se realizará una revisión sistematizada siguiendo los criterios PRISMA donde la búsqueda de información se realizó en la base de datos especializada en ciencias de la salud, de acceso libre Medline (PubMed).

## 1.4 Criterios de elegibilidad de los estudios

Con el fin de optimizar la búsqueda de los datos necesarios se establecieron criterios de elegibilidad. Esta búsqueda se centró en población sana de ambos sexos, excluyendo a personas con patologías o requerimientos específicos para poder llevar a cabo la actividad física, así como población clínica.

## 1.5 Participantes e intervenciones

Los participantes que conformaron los diferentes estudios seleccionados fueron corredores a pie de media-larga distancia de ambos sexos (hombres = 74 y mujeres = 35).

## 1.6 Evaluación de los estudios, métodos y síntesis

Los estudios se dividieron en dos grupos para su análisis: protocolos agudos (hasta dos días en depleción de glucógeno/ayunas) y crónicos (desde 31 días hasta 8 semanas en depleción de glucógeno/ayunas). Se valoraron pruebas de esfuerzo en tapiz rodante para medir  $VO_{2max}$  como variables de rendimiento y parámetros circulantes para factores fisiológicos.

## 1.7 Limitaciones

Los protocolos de depleción glucogénica/ayuno fueron heterogéneos, por lo tanto, dificultó la comparación de resultados y llegar a conclusiones determinantes para su aplicación.

## 1.8 Conclusiones, hallazgos principales

A rasgos generales, parece que este tipo de protocolos muestra mayor utilización de las grasas como combustible, tanto en protocolos agudos como crónicos. Por el contrario, no se aprecian mejoras en el rendimiento ni en la disminución de masa grasa.

## 2. CONTEXTUALIZACIÓN

### 2.1 Justificación de la revisión

Se entiende el ejercicio de carácter aeróbico como cualquier actividad física, de forma continua y moderada, realizada en torno al 70-75%  $VO_{2max}$  (Shaw DM et al., 2021), en la que la predominancia de obtención de energía proviene de los procesos de respiración celular dependiente del oxígeno. Esta revisión se centra en la modalidad cíclica de carrera a pie por las características propias del deporte, ya que el patrón motor del gesto técnico conlleva un gasto energético determinado que lo diferencia de otras modalidades (Maunder et al., 2021). Con esta modalidad deportiva se incide en parámetros fisiológicos como la frecuencia cardíaca y el consumo máximo de oxígeno, entre otros. Cabe destacar la utilización de los miembros inferiores frente al tren superior en la realización de la marcha y las acciones repetidas de impacto en el suelo, estas y otras características dotan a la carrera a pie notables diferencias frente a otros deportes aeróbico como la natación o el ciclismo. Dada la importancia que tiene la eficiencia en la utilización de las vías metabólicas para la obtención de energía en el rendimiento deportivo, en concreto de la modalidad de carrera a pie, cobra gran interés el estudio de las estrategias nutricionales que aporten mayores beneficios tanto para el rendimiento como para la salud en general.

El enfoque nutricional del entrenamiento de carrera a pie en “depleción de glucógeno” es una herramienta que cada vez cobra más relevancia. Cabe mencionar que los primeros estudios de dichas adaptaciones nutricionales, ya no solo a nivel de rendimiento, si no también condicionadas por los aspectos socioculturales, fueron con el periodo del Ramadán en la cultura musulmana. Este hecho ha aportado información sobre este protocolo nutricional de entrenamiento en estado de ayuno o depleción de glucógeno, ya que esta población se encuentra en este estado de ayuno al menos un mes al año (Ziaee V, et al., 2006). Por lo tanto, el análisis sobre el impacto que puede tener dicho ayuno sobre el rendimiento en esta población es de gran importancia. Su objetivo es mejorar la eficiencia en la utilización de las vías energéticas, produciendo diversas adaptaciones metabólicas y fisiológicas, como el aumento de la expresión de PGC-1 alfa, que puede inducir a adaptaciones de carácter aeróbico, como el incremento de los transportadores de GLUT4, la concentración de glucógeno y la biogénesis mitocondrial, entre otros (Broome SC, et al., 2022). Esto puede facilitar la utilización de las reservas de grasa en el deporte de larga distancia (Guillen JB et al., 2019), y, además, conllevaría a un retraso de la fatiga y, por ende, a una mejora en la percepción subjetiva ante el esfuerzo (Prins Pj et al., 2019). Por lo tanto, es importante que los/as responsables en la prescripción de protocolos de entrenamiento y nutricionales de los/as deportistas de esta modalidad conozcan estas herramientas para optimizar el rendimiento de sus atletas, aumentar la eficacia de entrenamiento y reducir el riesgo de posibles lesiones.

## 2.2 Objetivos, preguntas, intervenciones, comparaciones.

El objetivo principal de la presente revisión sistematizada es comprobar los efectos sobre deportistas de carrera a pie, tanto mujeres como hombres, bajo diferentes protocolos nutricionales, todos ellos con el fin de reducir o eliminar los hidratos de carbono previamente a un protocolo de ejercicio aeróbico, y compararlos con protocolos donde el consumo de hidratos es mayor. Para tal fin, se utilizaron diversos sistemas de entrenamiento de carrera a pie con protocolos nutricionales específicos.

Los datos arrojados por esta revisión podrían facilitar posibles herramientas interesantes para aplicar en las planificaciones de los/as deportistas en las diferentes etapas de su temporada, bien sea para mejorar la flexibilidad metabólica en pretemporada o realizar etapas de recuperación tras la competición. Dichas estrategias nutricionales podrían mejorar la eficiencia en la utilización de recursos energéticos, mejorando el rendimiento y retrasando la aparición de fatiga por la posible depleción de sustratos.

## 3. PROCEDIMIENTO DE REVISIÓN (METODOLOGÍA).

### 3.1 Protocolo y registro

En cuanto al procedimiento de búsqueda de información se han seleccionado aquellos estudios publicados dentro del rango temporal desde 1990 hasta la actualidad. Además, se buscan publicaciones sobre deportistas de carrera a pie sin patologías que pudieran afectar al desarrollo de los protocolos propuestos en cada uno de ellos. Las palabras de búsqueda están relacionadas con el tema a tratar, se han dividido en dos secciones principales bien diferenciadas, una para el aspecto nutricional y la otra para el deportivo. Una vez establecidas las secciones se exponen las palabras de búsqueda en cada una de ellas y se combinan para completar la misma (Tabla 1).

<u>Alimentación</u>		<u>Ejercicio</u>
Fasting		Endurance, Physical
Diet, carbohydrate restricted	<b>AND</b>	Running
Diet, Ketogenic		

**Tabla 1.** Términos Mesh combinados utilizados para la búsqueda de artículos en la base de datos.

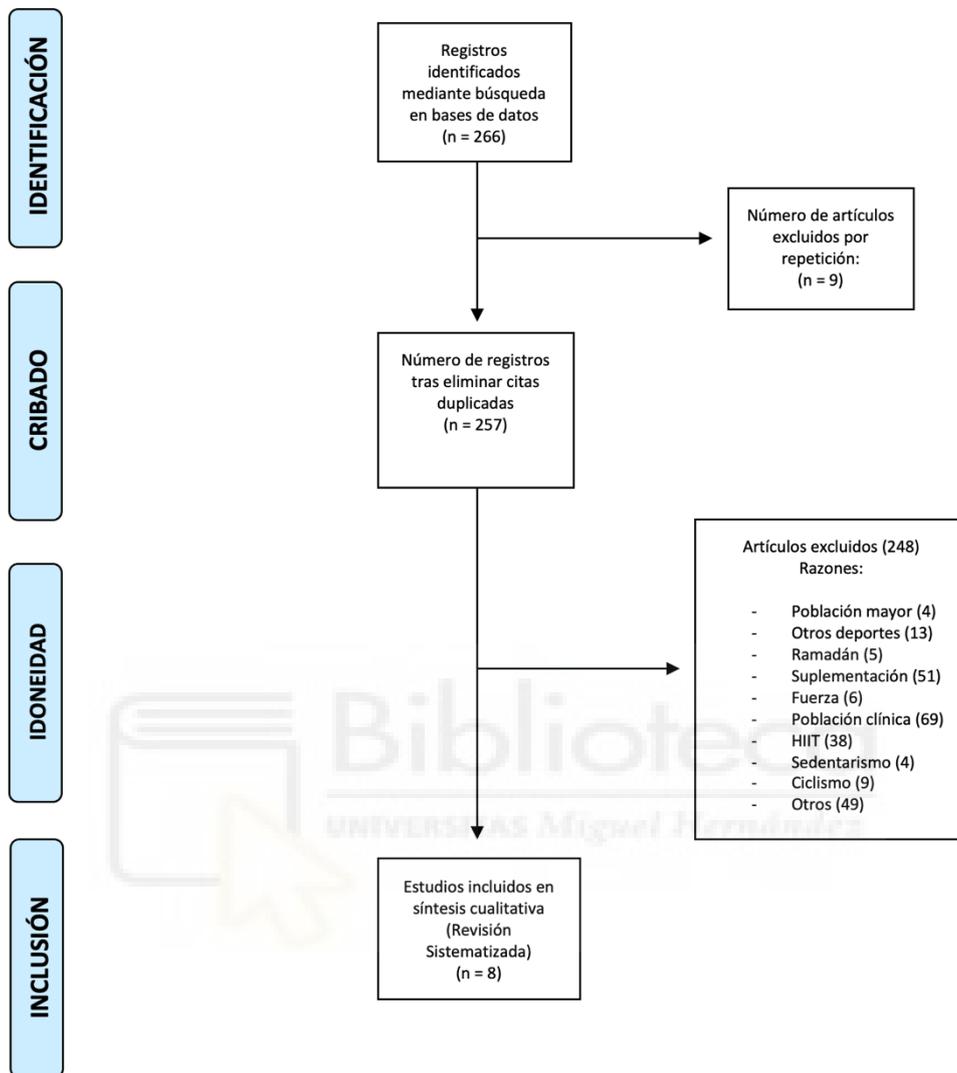
### 3.2 Criterios de elegibilidad

Han sido descartados los estudios que incluían criterios que no cumplían con los objetivos de esta revisión: a) estudios sobre deportes con patrones motores diferentes a la carrera a pie; b) población clínica o con patologías; c) población mayor; d) utilización de suplementos y e) deportes de alta intensidad o HIIT. Por lo tanto, se escogieron publicaciones basadas en el deporte de carrera a pie en deportistas sanos/as que utilizaran los protocolos de actuación nutricional relacionados con la depleción de glucógeno.

### 3.3 Fuentes de información

Esta revisión sistematizada ha seguido las pautas del marco PRISMA y toda la información de esta revisión sistemática ha sido recogida desde la base de datos especializada en ciencias de

la salud, de acceso libre Medline (PubMed). Tras el procedimiento de exclusión de artículos, se seleccionaron 8 estudios de los 266 encontrados.



#### 4. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA (DESARROLLO)

En cuanto a protocolos agudos con exposición de entrenamiento aeróbico en estado de depleción de glucógeno (dos días de intervención), se utilizaron estrategias de vaciamiento glucogénico mediante HIIT (Gillen JB, et al., 2019), o bien, entrenamiento en ayunas a primera hora de la mañana (Kang J et al., 2019). Con estos protocolos se observó una mayor utilización de las grasas como recurso energético ( $0.99 \pm 0.34 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$  en el grupo LOW frente a  $0.60 \pm 0.26 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$  del grupo HIGH), y menor oxidación de hidratos de carbono durante el entrenamiento ( $1.4 \pm 0.54 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$  del grupo LOW frente a  $2.2 \pm 0.55 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$  del grupo HIGH) (Gillen JB, et al., 2019; Kang J et al., 2019) (Tabla 2). Por otro lado, se observó un aumento de los requerimientos proteicos con un protocolo de carrera a pie de 10k al 80%  $FC_{\text{máx}}$  en estado de depleción glucogénica/ayuno, debido al aumento significativo de la oxidación de la fenilalanina en

condiciones de depleción glucogénica (Gillen JB et al., 2019). Además, en ensayos más prolongados, se observaron diferencias significativas en cuanto a mejoras en la sensibilidad a la insulina y la tolerancia a la glucosa realizando dos sesiones de ejercicio aeróbico semanales en depleción de glucógeno/ayunas al 70-75%  $VO_{2max}$  durante 6 semanas de intervención (Van Proeyen K, et al., 2010).

De forma crónica (4-6 semanas), los protocolos de depleción glucogénica/ayuno utilizados fueron muy heterogéneos; desde simples ayunos (Van Proeyen K, et al., 2010), pasando por ayunos intermitentes (Brady Aj et al., 2021), como dietas bajas en hidratos de carbono y altas en grasas (Prins Pj et al., 2019) hasta dietas cetogénicas (Shaw Dm et al., 2021). En ninguno de ellos se observó una mejora significativa en cuanto al rendimiento tomando como referencia mejoras del  $VO_{2max}$ , (Van Proeyen K, et al., 2010; Prins Pj et al., 2019; Brady Aj et al., 2021; Shaw Dm et al., 2021). Pero en cuanto al RER, tanto de forma aguda como crónica, se observó valores más bajos (0.81 - 0.88) respecto al grupo control (0.88 – 0.97) (Gillen JB, et al., 2019; Prins Pj et al., 2019; Kang J et al., 2019).



**Tabla 2.**

Estudio	Muestra (H-M)	Edad (años)	Duración	Protocolo nutricional	Método	Protocolo ejercicio físico	Medidas realizadas	Resultados
Van Proeyen K et al., 2010	28 (H)	21,2 ± 0,3	6 semanas	<p>- Grupo (CON):</p> <p>3081 kcal 36% grasas 51% HC 13% Proteínas</p> <p>- Grupo (F):</p> <p>2911 kcal 36% Grasas 49% HC 15% Proteínas</p> <p>- Grupo (CHO):</p> <p>3012 kcal 34% Grasas 52% HC 14% Proteínas</p>	<p>Grupo (CHO) recibe desayuno (675 kcal, 70 % carbohidratos, 15 % grasas, 15 % proteínas) aproximadamente 90 minutos antes de cada sesión de entrenamiento más 1g/kg de maltodextrina con 500ml de agua intra entreno</p> <p>Grupo (F) realiza las sesiones en ayunas, recibe el mismo "desayuno" tras el entrenamiento</p> <p>Grupo (CON) Misma dieta hipercalórica, rica en grasas, en ausencia de entrenamiento</p>	<p>Realizan 2 sesiones de 60' y 2 de 90' por semana</p> <p>Combinación de ejercicio en bicicleta (70-75% Vo<sub>2</sub>máx) y carrera (85% FCmax)</p>	<p>Antropometría</p> <p>Test de tolerancia a la glucosa</p> <p>Prueba incremental VO<sub>2</sub>máx</p> <p>Análisis de parámetros circulantes</p> <p>Registro dietético</p> <p>Biopsias musculares</p>	<p>↔Peso corporal</p> <p>↔% de masa grasa</p> <p>↑Tolerancia a la glucosa</p> <p>↔Insulina sérica basal</p> <p>↑ Sensibilidad a la insulina</p> <p>↑ Proteína AMPKa</p> <p>↑ Glucógeno muscular</p> <p>↓ Expresión génica PDK4</p> <p>↔Vo<sub>2</sub>máx</p> <p>↑ Fat<sub>tMáx</sub></p>

Gillen JB et al., 2019	8 (H)	27 ± 4	2 días	<p>Día 1 (HIIT) descarga de glucógeno:</p> <p>Grupo (LOW): -Día 1: 5,8 g/kg HC -Previo HIIT: 2 g/kg HC -Post HIIT: 0,2 g/kg HC</p> <p>Grupo (HIGH): -Día 1: 1 g/kg HC -Previo HIIT: 2 g/kg HC -Post HIIT: 5 g/kg HC</p> <p>Ambos grupos, 24h antes de los 10km: 1 kcal·kg<sup>-1</sup>·km<sup>-1</sup> -3.574 ± 453 kcal</p> <p>8 g de CHO · kg<sup>-1</sup> -1,4 g de proteína · kg<sup>-1</sup></p> <p>Resto de energía en grasa (1,15 ± 0,22 g·kg<sup>-1</sup>)</p>	<p>El día 1 se realiza un entrenamiento HIIT para vaciar las reservas de glucógeno y al día siguiente se realiza la prueba de 10k.</p> <p>Para la prueba de 10 k, el grupo (LOW) la realiza en ayuno y el grupo (HIGH) toma 1,2 g/kg de HC.</p>	<p>Día 2 (10 Km)</p> <p>Entreno en la mañana</p> <p>80% FC<sub>máx</sub></p>	<p>Flujo oxidación fenilalanina</p> <p>Composición corporal (Plestimografía)</p> <p>Calorimetría indirecta</p> <p>Prueba incremental VO<sub>2máx</sub></p>	<p>↓ (RER)</p> <p>↑ Oxidación grasas ↓ Oxidación CHO ↑ Oxidación fenilalanina</p>
------------------------	-------	--------	--------	--	---	--	--	---

Prins Pj et al., 2019	7 (H)	35,6 ± 8,4 años	6 semanas	<p>Grupo (LCHF): CHO: &lt;50g/día</p> <p>Grasas: 75-80%</p> <p>Proteínas: 15-20%</p> <p>Grupo (HCLF): -CHO: 60-65% -Grasas: 20% -Proteínas: 15-20%</p> <p>Ambos grupos ad libitum</p>	<p>Grupo (LCHF): Carnes altas en grasa</p> <p>Grupo (HCLF): Alimentos ricos en HC</p> <p>Ambos grupos <i>ad libitum</i></p>	<p>Dos pruebas de esfuerzo, &gt;80% Vo2máx (días 1 y 19) en ayuno</p> <p>Cuatro pruebas de 5k (días 4, 14, 28 y 42) en ayuno</p>	<p>Masa corporal (Kg)</p> <p>Composición corporal (BIA)</p> <p>Prueba incremental VO<sub>2</sub>máx</p> <p>FC</p> <p>RPE</p> <p>Análisis de parámetros circulantes</p>	<p>↔ Masa corporal ↔ Masa grasa ↔ Masa magra ↔ Rendimiento 5k ↔ RPE ↔ TTE ↓ Oxidación CH ↑ Oxidación Grasas ↔ Lactato ↔ Glucosa ↑ βHB ↑ Cetonas en sangre ↔ FC media ↔ Vo2máx ↓ (RER)</p>
Kang J et al., 2019	7 (H) 7 (M)	(H): 20,14 ± 0,99  (M): 19,43 ± 0,90	2 días	<p>Todos los grupos: 2026 ± 495 y 2575 ± 624 kcal el día 1</p>	<p>Grupo (NE): Sin ejercicio</p> <p>Grupo (EO): Sólo ejercicio</p> <p>Grupo (ER): Ejercicio Reemplazo energético</p> <p>Consume post entreno de 500 kcal:</p>	<p>Correr en tapiz rodante al 85% FCmáx, durante un gasto de 500 kcal (50-70')</p> <p>Se realiza el protocolo en ayunas</p>	<p>Prueba incremental VO<sub>2</sub>máx</p>	<p>↑ FOX (EO) ↓ COX (ER) ↔ Vo2máx ↔ FC ↓ (RER)</p>

					45% HC 30% Grasas 25% Proteínas			
Brady AJ et al., 2021	28 (M) Runners de media-larga distancia	36,4 ± 7,4	8 semanas	CON (n = 11): grupo que seguía alimentación habitual  TRE (n = 12): grupo que utilizaba restricción calórica (16:8): 8h de alimentación <i>ad libitum</i> y 16 horas de ayuno	Test incremental en tapiz rodante	1 sesión semanal durante 8 semanas:  Vel. Inicial de 9km/h, inclinación 1%, incremento de 1km/h por "escalón"	Antropometría  Índice de desarrollo de resistencia  Economía de carrera	↓ Masa corporal ↔ Masa grasa ↔ MLG ↔ Rendimiento en resistencia ↔ Glucosa ↔ Triglicéridos ↔ Insulina ↔ Lactato ↔ Consumo de O <sub>2</sub> ↔ Economía de carrera ↓ Ingesta energética promedio
Maunderr E et al., 2021	8 (H)	29,6 ± 5,1	31 días	Intervención (KD): <50 g/d de CHO  15-20% proteínas  Resto de grasas  Intervención (HD):  Dieta habitual	31 días de dieta habitual (HD)  31 días de dieta cetogénica (KD)	Los días 2 y 29 de cada intervención se realiza una prueba incremental en cinta en ayunas  Los días 0 y 31 de cada intervención se realiza una prueba incremental en cinta más dieta de recuperación de carrera	Prueba incremental VO <sub>2</sub> máx FC VFC RPE TRIMP REST-Q rMSSD	↓ rMSSD ↓ Adherencia a la dieta en ↔ RPE ↔ TRIMP ↔ Recuperación ↑ VFC reposo

						El resto de días, entrenamiento de carrera habitual		
Shaw DM et al., 2021	8 (H)	29,6 ± 5,1	31 días	Intervención (KD): <50 g/d de CHO  15-20% proteínas  Resto de grasas  Intervención (HD):  Dieta habitual	31 días de dieta habitual (HD)  31 días de dieta cetogénica (KD)	El día 31 se realiza una prueba de carrera hasta el agotamiento al 70% Vo2max  El resto de días, entrenamiento de carrera habitual	Prueba incremental VO <sub>2</sub> máx TRIMP RPE Muestras de sangre RT-PCR	↔ Vo2máx ↔ Duración promedio carrera ↑ Expresión Gen IFN-γ ↑ Producción citoquina anti-inflamatoria IL-10 ↓ Producción citoquina pro-inflamatoria IL-1B, IL- 2, IL-8 y IFN-Y
Shaw DM et al., 2022	8 (H)	29,6 ± 5,1	31 días	Intervención (KD): <50 g/d de CHO  15-20% proteínas  Resto de grasas  Intervención (HD):  Dieta habitual	31 días de dieta habitual (HD)  31 días de dieta cetogénica (KD)	El día 31 se realiza una prueba de carrera hasta el agotamiento al 70% Vo2max  El resto de días, entrenamiento de carrera habitual	Prueba incremental VO <sub>2</sub> máx  Análisis de sangre  Cultivo de sangre total para estimulación con multi-antígenos	↑ Recuento de NK ↔ % de linfocitos ↔ Expresión celular ante antígenos ↑ Contribución de la grasa como sustrato ↑ Cuerpos cetónicos ↑ Cortisol en sangre ↔ Glucosa en sangre

Tabla 2. BHB (βHB): Beta-hidroxibutirato, BIA: Analizador de impedancia bioeléctrica, CON: Grupo control con Hidratos sin entrenamiento, COX: Oxidación de hidratos, CHO: Grupo con restricción calórica, EO: Grupo sólo ejercicio, ER: Grupo ejercicio con remplazo de energía, F: Grupo de entrenamiento en ayunas, FC: Frecuencia cardíaca, FOX: Oxidación de grasas, H: Hombres, HC: Hidratos de Carbono, HCLF: Dieta alta en hidratos, HD: Dieta habitual, HIGH: Grupo alto en hidratos, IFN-γ: Gen interferón Gamma, KD: Dieta cetogénica, LCHF: Dieta baja en hidratos, LOW: Grupo bajo en hidratos, M: Mujeres, MLG: Masa libre de grasa, NE: Grupo sin ejercicio, NK: Células Natural Killer, PDK4: Piruvato deshidrogenasa quinasa 4, RER: Cociente respiratorio, (O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>), REST-Q: Cuestionario de recuperación para deportistas, rMSSD: Variabilidad de la FC, RPE: Percepción subjetiva de esfuerzo, RT-PCR: Cuantificación relativa de la expresión génica mediante reacción en cadena de la polimerasa, TRE: Grupo con restricción calórica, TRIMP: Carga de entrenamiento, TTE: Tiempo hasta el agotamiento, VFC: Variabilidad de la Frecuencia Cardíaca.

Respecto a la composición corporal y el porcentaje de masa grasa, no se encontraron diferencias significativas entre la condición de depleción glucogénica/ayuno y el grupo control mediante la exposición al ejercicio aeróbico entre el 70-80% del  $VO_{2m\acute{a}x}$  durante 8-6 semanas de intervención (Van Proeyen K, et al., 2010; Prins Pj et al., 2019; Brady Aj et al., 2021). Tampoco se encontraron diferencias en parámetros como la economía de carrera, percepción del esfuerzo y rendimiento en un test de 5 Km (Brady Aj et al., 2021). Por otra parte, se observó una menor adherencia a la dieta y menor ingesta energética global durante el protocolo de depleción de glucógeno en el grupo (KD) (Maunder E et al., 2021).

En relación a parámetros circulantes, se observaron mayores niveles de cuerpos cetónicos y cortisol en sangre mediante prueba incremental en tapiz rodante al 70% del  $VO_{2m\acute{a}x}$  en el grupo (KD) tras 31 días de intervención (Shaw Dm et al., 2022). Además, también aumentó la producción de citoquinas anti-inflamatorias y disminuyeron las pro-inflamatorias en el grupo (KD) (Shaw Dm et al., 2022; Shaw Dm et al., 2021), acompañado de un mayor recuento de células NK, aunque no aumentaron su actividad ante la exposición de diferentes antígenos *in vitro* (Shaw Dm et al., 2021), y mayores niveles de expresión de interferón gamma post-ejercicio, participando en la respuesta inmunitaria frente a patógenos intracelulares en el grupo (KD) ( $4.00 \pm 4.07$  frente a  $3.14 \pm 3.72$  del grupo HD). En cuanto al porcentaje de linfocitos, glucosa en sangre y la expresión celular ante diferentes antígenos, no hubo diferencias en su recuento tras el test incremental en el grupo (KD) frente al grupo control, así como tampoco en la duración promedio de carrera (Shaw Dm et al., 2021).

## 5. DISCUSIÓN

El entrenamiento de carácter aeróbico, en concreto de carrea a pie, es uno de los deportes más practicados y, por ende, de mayor interés de estudio. En el aspecto nutricional, el entrenamiento en depleción de glucógeno es una estrategia a considerar para optimizar las adaptaciones fisiológicas en esta disciplina. Además, este protocolo comúnmente se ha utilizado con el objetivo de conseguir mayor pérdida de grasa y mejorar la composición corporal.

En relación a las adaptaciones agudas (2 días) en ejercicios de carrera a pie de baja intensidad, se observa una mayor oxidación de las grasas en contraposición a los carbohidratos, pudiendo ser debido a una optimización del consumo de grasas durante el ejercicio debido a la escasez de reservas de carbohidratos (glucógeno). Además, los resultados muestran valores más bajos de RER lo que refuerza un mayor uso de las grasas como principal recurso energético frente a los carbohidratos (Guillen JB et al., 2019; Prins Pj et al., 2019; Kang J et al., 2019). Todo ello se acompaña de un aumento de la oxidación de la fenilalanina, aminoácido esencial para la producción de melanina y síntesis proteica, posiblemente debido a mayor estrés fisiológico y fatiga central (Chang C, K, et al., 2017; Paoli A, et al., 2015). Estos resultados coinciden con lo observado también en ejercicios de fuerza, donde el entrenamiento en ayunas también muestra un RER menor que el entrenamiento en estado postprandial (Frawley K, et al., 2018). En cuanto a mejoras del rendimiento, parece no haber diferencias significativas entre la condición de depleción de glucógeno y el grupo control cuando se comparan valores de  $VO_{2m\acute{a}x}$  (Kang J, et al., 2019).

En cuanto a los efectos crónicos del ejercicio aeróbico de baja intensidad en depleción glucogénica (4-8 semanas), también parece aumentar el consumo de grasas como combustible

y disminuir la oxidación de hidratos de carbono a largo plazo. Todo ello acompañado de un ahorro de las reservas de glucógeno, y por tanto aumentándolas, así como un aumento de *FatMax*, donde la oxidación de grasas es mayor (Prins P, J, et al., 2019; Shaw D, M, et al., 2022; Van Proeyen K, et al., 2010). Este hecho se relaciona también con el aumento de los niveles circulantes de la proteína AMPKa, pudiendo incidir en el balance energético celular, en el ahorro energético y biogénesis mitocondrial (Van Proeyen K, et al., 2010; Paoli A, et al., 2019; Mihaylova MM, et al., 2011). Debido al aumento en la oxidación de las grasas como adaptación, esto podría suponer una mejora en la flexibilidad metabólica y un posible retraso de la fatiga durante el ejercicio de larga duración (Guillen JB et al., 2019; Prins Pj et al., 2019; Kang J et al., 2019).

Otra de las adaptaciones observadas durante los protocolos a largo plazo es el aumento de cuerpos cetónicos en sangre, posiblemente debido a un mayor consumo de grasas como combustible (Prins P, J, et al., 2019; Shaw D, M, et al., 2022), pudiendo proporcionar la energía necesaria para suplir el déficit de glucógeno (Harvey K, L, et al., 2019). Si comparamos este aumento de cuerpos cetónicos en sangre con condiciones de ayuno en reposo, sus niveles también aumentan, posiblemente debido al aporte energético de las cetonas al cerebro con el fin de mantener la función cerebral ante la disminución de glucosa en sangre (Fortier M, et al., 2021).

En relación a la tolerancia a la glucosa durante el ejercicio aeróbico con protocolos de baja disponibilidad de glucógeno debido a una dieta alta en grasas, se muestra una mejora de la misma, así como mayor sensibilidad a la insulina (Van Proeyen K, et al., 2010). Esto puede ser debido a una mejor regulación de los niveles de glucosa al encontrarse a bajos niveles en sangre que en una dieta convencional. Además, se ha observado que la combinación de ejercicio físico y ayuno podría presentar mayores beneficios que solo el ejercicio físico en cuanto a la tolerancia a la glucosa en población con pre-diabetes (Hrubeniuk TJ, et al., 2020).

En cuanto al rendimiento, tomando como referencia el consumo máximo de oxígeno ( $VO_{2m\acute{a}x}$ ), el entrenamiento aeróbico en condiciones de baja disponibilidad de glucógeno a largo plazo no incidió en diferencias entre el grupo en depleción glucogénica y el control, así como tampoco se mejoró la economía de carrera ni la duración promedio de carrera (Shaw D M, et al., 2021). Esto puede ser debido a que posiblemente son parámetros dependientes de otras variables como la técnica de carrera, el descanso o el entrenamiento de fuerza, entre otros (Van Proeyen K, et al., 2010; Prins Pj et al., 2019; Kang J et al., Shaw DM et al., 2021). Además, para mejorar estas variables de rendimiento se debería incidir en otros aspectos como, una correcta periodización del entrenamiento de resistencia, mejora de la fuerza específica y optimización del gesto técnico, así como la realización de entrenamientos de umbral anaeróbico, circunstancia que no se puede entrenar con estos protocolos por su gran dependencia glucolítica (Prieto-González P, et al., 2022).

En relación a la mejora de la composición corporal, no parece ser un protocolo útil para tal fin, ya que no se mostraron diferencias en cuanto a la disminución de peso o el porcentaje de masa libre de grasa medidos por antropometría en los diferentes estudios. Estos resultados corroboran lo observado en protocolos de ayuno sin realizar ejercicio donde no hay diferencias en cuanto a pérdida de grasa (Templeman J, et al., 2021). Además, en los estudios analizados, no se controló de forma precisa la ingesta energética de los grupos experimentales y control. Por lo tanto, no se descarta que ambos grupos se encontraran con un balance energético diferente o que ninguno de ellos tuviera un déficit energético (Van Proeyen K, et al., 2010; Prins Pj et al., 2019; Brady Aj et al., 2021). Solo un estudio, donde no se controlaron las ingestas, ya que la alimentación era *ad libitum* siguiendo el patrón de ayuno intermitente, mostró una

disminución significativa de masa corporal en el grupo experimental, aunque no hubo diferencias significativas en la masa libre de grasa o de grasa corporal en ambos grupos (Brady AJ et al., 2021). Esto puede ser debido a la tendencia de disminuir la masa libre de grasa en el grupo experimental, sin llegar a ser significativa por el tamaño de la muestra, además acompañado de la limitación de medir la composición corporal por BIA, ya que sobreestima la masa libre de grasa (Brady AJ et al., 2021). Si comparamos estos resultados con deportes de perfil intermitente de alta intensidad (Alejandro, MR, et al., 2021), se pueden observar diferencias en cuanto a la mejora del porcentaje de masa grasa en el grupo que entrenó en ayunas y realizó una sesión de HIIT frente al grupo que solo realizó dicha sesión. Esta diferencia, frente a ejercicios de carácter aeróbico de baja intensidad, posiblemente esté relacionada con el propio ejercicio intermitente, ya que el entrenamiento interválico de alta intensidad (HIIT), parece más eficiente para la pérdida de masa grasa que el entrenamiento de carácter aeróbico de media intensidad (70-85%  $VO_{2m\acute{a}x}$ ) (Gripp F, et al., 2021).

La utilización de este protocolo nutricional a largo plazo, también puede afectar a los aspectos cognitivos, como por ejemplo una menor adherencia a la dieta en el grupo que se expuso a una dieta cetogénica, con lo cual entrenaba en depleción glucogénica (Maunder, E, et al., 2021). Este hecho posiblemente es debido al aumento de factores de estrés como el cortisol (Shaw DM, et al., 2022).

Finalmente, a nivel inmunitario, durante 31 días de ejercicio aeróbico en depleción de glucógeno, se muestra un aumento de las células NK, aunque no parece que aumente la expresión del receptor de membrana CD69, considerado como marcador de activación ante antígenos, así como tampoco el porcentaje de linfocitos total (Shaw DM, et al., 2022). Por el contrario, sí se observa un aumento en la expresión del gen IFN- $\gamma$ , así como la citoquina antiinflamatoria IL-10 y disminución de citoquinas proinflamatorias (Shaw DM, et al., 2021), pudiendo suponer una mejora en la respuesta inmune tanto innata como adaptativa. Sin embargo, la utilización de este protocolo nutricional, parece tener poco efecto sobre el sistema inmunitario en atletas entrenados.

## 6. PROPUESTA DE INTERVENCIÓN.

Los efectos más notables del entrenamiento en depleción de glucógeno, son sin duda la flexibilidad metabólica. El aumento en la utilización de las grasas como recurso energético pone en manifiesto este protocolo para diferentes momentos de la temporada, en concreto, podría ser interesante para etapas preparatorias, previas a los picos de competición de media-larga distancia ya que, en momentos competitivos, sería más interesante aumentar las reservas de glucógeno al ser esta una disciplina de carácter más glucolítico.

Sin embargo, sería más adecuado su uso en disciplinas de mayor distancia como maratones y ultra distancia, ya que la vía lipolítica posee mayor relevancia que en las carreras de menor duración. No obstante, también habría que tener en cuenta el momento de la temporada y ajustar un correcto balance entre los diferentes macronutrientes según los requerimientos.

En cuanto a la mejora de la composición corporal y el porcentaje de masa libre de grasa, no parece que existan mejoras con este protocolo (Templeman J, et al., 2021). Para mejorar estas características sería más interesante utilizar métodos de entrenamiento más demandantes metabólicamente, como el HIIT (Alejandro, MR, et al., 2021). Además, nutricionalmente se

podría aplicar una restricción calórica, independientemente del protocolo a realizar, así como la combinación de restricción calórica y HIIT, para maximizar los resultados.

En relación al rendimiento, los protocolos de depleción de glucógeno/ayuno parecen no tener beneficios cuando se valoran variables como el  $VO_{2\text{máx}}$ . A pesar de ello, se deberían realizar más ensayos donde se valorara otras variables como la frecuencia cardíaca o ritmos de carrera.

Finalmente, es importante en futuros ensayos la homogenización de los protocolos para alcanzar la depleción glucogénica, tanto agudas como crónicas, para realizar comparativas fiables y optimizar su aplicación.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

Shaw, D. M., Merien, F., Braakhuis, A., Keaney, L., & Dulson, D. K. (2021). Adaptation to a ketogenic diet modulates adaptive and mucosal immune markers in trained male endurance athletes. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, 31(1), 140–152. <https://doi.org/10.1111/sms.13833>

Ziaee, V., Razaeei, M., Ahmadinejad, Z., Shaikh, H., Yousefi, R., Yarmohammadi, L., Bozorgi, F., & Behjati, M. J. (2006). The changes of metabolic profile and weight during Ramadan fasting. *Singapore medical journal*, 47(5), 409–414.

Gillen, J. B., West, D. W. D., Williamson, E. P., Fung, H. J. W., & Moore, D. R. (2019). Low-Carbohydrate Training Increases Protein Requirements of Endurance Athletes. *Medicine and science in sports and exercise*, 51(11), 2294–2301. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000002036>

Broome, S. C., Pham, T., Braakhuis, A. J., Narang, R., Wang, H. W., Hickey, A. J. R., Mitchell, C. J., & Merry, T. L. (2022). MitoQ supplementation augments acute exercise-induced increases in muscle PGC1 $\alpha$  mRNA and improves training-induced increases in peak power independent of mitochondrial content and function in untrained middle-aged men. *Redox biology*, 53, 102341. <https://doi.org/10.1016/j.redox.2022.102341>

Prins, P. J., Noakes, T. D., Welton, G. L., Haley, S. J., Esbenschade, N. J., Atwell, A. D., Scott, K. E., Abraham, J., Raabe, A. S., Buxton, J. D., & Ault, D. L. (2019). High Rates of Fat Oxidation Induced by a Low-Carbohydrate, High-Fat Diet, Do Not Impair 5-km Running Performance in Competitive Recreational Athletes. *Journal of sports science & medicine*, 18(4), 738–750.

Kang, J., Hasan, S. B., Ellis, N. A., Vought, I. T., Ratamess, N. A., Bush, J. A., & Faigenbaum, A. D. (2020). Effects of Exercise With and Without Energy Replacement on Substrate Utilization in the Fasting State. *Journal of the American College of Nutrition*, 39(1), 39–46. <https://doi.org/10.1080/07315724.2019.1605549>

Van Proeyen, K., Szlufcik, K., Nielens, H., Pelgrim, K., Deldicque, L., Hesselink, M., Van Veldhoven, P. P., & Hespel, P. (2010). Training in the fasted state improves glucose tolerance during fat-rich diet. *The Journal of physiology*, 588(Pt 21), 4289–4302. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2010.196493>

Brady, A. J., Langton, H. M., Mulligan, M., & Egan, B. (2021). Effects of 8 wk of 16:8 Time-restricted Eating in Male Middle- and Long-Distance Runners. *Medicine and science in sports and exercise*, 53(3), 633–642. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000002488>

- Maunder, E., Dulson, D. K., & Shaw, D. M. (2021). Autonomic and Perceptual Responses to Induction of a Ketogenic Diet in Free-Living Endurance Athletes: A Randomized, Crossover Trial. *International journal of sports physiology and performance*, *16*(11), 1603–1609. <https://doi.org/10.1123/ijspp.2020-0814>
- Shaw, D. M., Keane, L., Maunder, E., & Dulson, D. K. (2023). Natural killer cell subset count and antigen-stimulated activation in response to exhaustive running following adaptation to a ketogenic diet. *Experimental physiology*, *108*(5), 706–714. <https://doi.org/10.1113/EP090729>
- Chang, C. K., Borer, K., & Lin, P. J. (2017). Low-Carbohydrate-High-Fat Diet: Can it Help Exercise Performance?. *Journal of human kinetics*, *56*, 81–92. <https://doi.org/10.1515/hukin-2017-0025>
- Paoli, A., Bianco, A., & Grimaldi, K. A. (2015). The Ketogenic Diet and Sport: A Possible Marriage?. *Exercise and sport sciences reviews*, *43*(3), 153–162. <https://doi.org/10.1249/JES.0000000000000050>
- Frawley, K., Greenwald, G., Rogers, R. R., Petrella, J. K., & Marshall, M. R. (2018). Effects of Prior Fasting on Fat Oxidation during Resistance Exercise. *International journal of exercise science*, *11*(2), 827–833.
- Paoli, A., Tinsley, G., Bianco, A., & Moro, T. (2019). The Influence of Meal Frequency and Timing on Health in Humans: The Role of Fasting. *Nutrients*, *11*(4), 719. <https://doi.org/10.3390/nu11040719>
- Mihaylova, M. M., & Shaw, R. J. (2011). The AMPK signalling pathway coordinates cell growth, autophagy and metabolism. *Nature cell biology*, *13*(9), 1016–1023. <https://doi.org/10.1038/ncb2329>
- Harvey, K. L., Holcomb, L. E., & Kolwicz, S. C., Jr (2019). Ketogenic Diets and Exercise Performance. *Nutrients*, *11*(10), 2296. <https://doi.org/10.3390/nu11102296>
- Fortier, M., Castellano, C. A., St-Pierre, V., Myette-Côté, É., Langlois, F., Roy, M., Morin, M. C., Bocti, C., Fulop, T., Godin, J. P., Delannoy, C., Cuenoud, B., & Cunnane, S. C. (2021). A ketogenic drink improves cognition in mild cognitive impairment: Results of a 6-month RCT. *Alzheimer's & dementia : the journal of the Alzheimer's Association*, *17*(3), 543–552. <https://doi.org/10.1002/alz.12206>
- Hrubeniuk, T. J., Bouchard, D. R., Goulet, E. D. B., Gurd, B., & Sénéchal, M. (2020). The ability of exercise to meaningfully improve glucose tolerance in people living with prediabetes: A meta-analysis. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, *30*(2), 209–216. <https://doi.org/10.1111/sms.13567>
- Prieto-González, P., & Sedlacek, J. (2022). Effects of Running-Specific Strength Training, Endurance Training, and Concurrent Training on Recreational Endurance Athletes' Performance and Selected Anthropometric Parameters. *International journal of environmental research and public health*, *19*(17), 10773. <https://doi.org/10.3390/ijerph191710773>
- Templeman, I., Smith, H. A., Chowdhury, E., Chen, Y. C., Carroll, H., Johnson-Bonson, D., Hengist, A., Smith, R., Creighton, J., Clayton, D., Varley, I., Karagounis, L. G., Wilhelmsen, A., Tsintzas, K., Reeves, S., Walhin, J. P., Gonzalez, J. T., Thompson, D., & Betts, J. A. (2021). A randomized controlled trial to isolate the effects of fasting and energy restriction on weight loss and metabolic health in lean adults. *Science translational medicine*, *13*(598), eabd8034. <https://doi.org/10.1126/scitranslmed.abd8034>

Martínez-Rodríguez, A., Rubio-Arias, J. A., García-De Frutos, J. M., Vicente-Martínez, M., & Gunnarsson, T. P. (2021). Effect of High-Intensity Interval Training and Intermittent Fasting on Body Composition and Physical Performance in Active Women. *International journal of environmental research and public health*, 18(12), 6431. <https://doi.org/10.3390/ijerph18126431>

Gripp, F., Nava, R. C., Cassilhas, R. C., Esteves, E. A., Magalhães, C. O. D., Dias-Peixoto, M. F., de Castro Magalhães, F., & Amorim, F. T. (2021). HIIT is superior than MICT on cardiometabolic health during training and detraining. *European journal of applied physiology*, 121(1), 159–172. <https://doi.org/10.1007/s00421-020-04502-6>

## 8. ANEXOS

