|  |
| --- |
| Viabilidad de las dietas cetogénicas para el rendimiento en deportes de resistencia: revisión sistemática |
| *Trabajo Final de Máster Universitario en Alimentación en la Actividad Física y el Deporte* |
| Autor /a: Adrián Moreno Villanueva  Director/a: Judit Bonet Garreta |

19 de junio de 2020

[Llicència de Creative Commons](http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/es/)

Esta obra está bajo una licencia de Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/es/deed.es>)

**Índice**

[Resumen 3](#_Toc526788444)

[Abstract 4](#_Toc526788445)

[1. Introducción 5](#_Toc526788446)

[2. Objetivos 9](#_Toc526788447)

[3. Metodología 10](#_Toc526788448)

[4. Resultados 12](#_Toc526788449)

[5. Discusión 22](#_Toc526788450)

[6. Aplicabilidad y nuevas líneas de investigación 25](#_Toc526788451)

[7. Conclusiones 27](#_Toc526788452)

[8. Bibliografía 28](#_Toc526788453)

**Resumen**

La implementación de dietas cetogénicas (DC) para optimizar el rendimiento en deportistas de resistencia es un debate de interés en la actualidad. Pese a esto, las conclusiones extraídas acerca de sus efectos en el rendimiento deportivo no gozan del rigor ni del consenso necesario para conocer el impacto real de este tipo de dietas.

El principal objetivo de este trabajo fue revisar las investigaciones más recientes que trataron los efectos de las DC sobre el rendimiento en deportes de resistencia, atendiendo a parámetros antropométricos, de adaptación metabólica y a nivel de capacidades físicas en sujetos con normopeso, incluidos atletas.

Para ello, se realizó una revisión sistemática de toda la literatura científica disponible mediante bases de datos como PubMed, EBSCOhost y ResearchGate. De todas las investigaciones encontradas, sólo 13 se ajustaron a nuestros criterios de selección. Concretamente, analizaron aspectos como la composición corporal, adaptaciones metabólicas y hormonales, repercusiones sobre la disponibilidad de sustrato, así como los efectos sobre los umbrales ventilatorios.

Los resultados reflejaron que la implementación de DC en deportistas de resistencia puede ayudar a reducir el peso corporal y el % de masa grasa, pudiendo tener un impacto potencial en el mantenimiento de la masa libre de grasa. Dichas estrategias dietéticas crean adaptaciones metabólicas que favorecen la optimización de los depósitos de glucógeno y la movilización de grasas. No parecieron encontrarse consecuencias positivas ni negativas en términos de rendimiento físico. Sin embargo, se precisa de más investigaciones y con mayor estandarización en sus diseños para poder extraer conclusiones consensuadas.

***Palabras clave***

Revisión, dietas cetogénicas, cetoadaptación, rendimiento, resistencia, deportes

**Abstract**

The implementation of ketogenic diets (DC) to optimize performance in endurance athletes is currently an interesting debate. Despite this, the conclusions drawn about its effects on sports performance do not enjoy the rigor or consensus necessary to know the real impact of this type of diet.

The main objective of this work was to review the most recent investigations that addressed the effects of KD on performance in endurance sports, taking into account anthropometric parameters, metabolic adaptation and physical capacity level in subjects with normal weight, including athletes.

To do this, a systematic review of all available scientific literature was carried out using databases such as PubMed, EBSCOhost and ResearchGate. Of all the investigations found, only 13 met our selection criteria. Specifically, they analyzed aspects such as body composition, metabolic and hormonal adaptations, repercussions on substrate availability, as well as effects on ventilatory thresholds.

The results reflected that the implementation of KD in endurance athletes can help reduce body weight and% fat mass, and may have a potential impact on maintaining fat-free mass. These dietary strategies create metabolic adaptations that favor the optimization of glycogen stores and the mobilization of fats. No positive or negative consequences seemed to be found in terms of physical performance. However, more research and more standardization in their designs are required in order to draw consensus conclusions.

***Key words***

Review, ketogenic diets, ketoadaptation, performance, resistance, sports

1. **Introducción**

Las dietas cetogénicas ofrecen un enfoque nutricional basado en el consumo de un elevado contenido lipídico (priorizando ácidos grasos monoinsaturados y algunos saturados recomendados) y moderado consumo proteico, restringiendo fundamentalmente la ingesta de carbohidratos1,2.

La dieta cetogenica clásica ofrece una proporción de 4:1 entre lípidos:no lípidos, respectivamente1. Las consecuentes programaciones dietéticas basadas en el consumo principal de grasas se han centrado en modificar esta proporción, a la par que desestimaban o ignoraban en algunos casos el control sobre la ingesta calórica total diaria de este tipo de dietas1. Con los primeros estudios sobre el ayuno de Cahill a finales de la década de los 60, se refleja la adaptación metabólica del organismo a esta situación de déficit energético y nutricional, provocando un estado de cetosis inducida por el hambre3,4. Después de tres semanas de inanición o un déficit energético crítico, las reservas glucogénicas musculares y hepáticas se reducen significativamente, forzando al organismo a buscar otra alternativa que le permita mantener con garantías las principales funciones biológicas1,3. Es entonces cuando se produce un aumento en la síntesis de cetonas hepáticas, lo cual alarga la supervivencia metabólica por diversas razones5. Por un lado, los cuerpos cetónicos ofrecen una fuente de carbono oxidable, permitiendo la fosforilación oxidativa al mismo tiempo que se conservan en la medida de lo posible las reservas de glucógeno ya existentes4-6. Por otra parte, consciente de la importancia metabólica y fisiológica de la glucosa (única fuente energética empleada por el cerebro), el organismo busca alternativas para la obtención de la misma, y esto lo hace amplificando el funcionamiento de la gluconeogénesis2, una ruta anabólica que permite obtener glucosa a través de elementos no glucídicos, como por ejemplo los ácidos grasos de cadena impar6. Esta respuesta de adaptación metabólica convierte a los ácidos grasos en la fuente energética primaria del organismo5, en detrimento de la glucosa y, de prolongarse en el tiempo, conduce a un afianzamiento de estos nuevos roles nutricionales y metabólicos, a través de un proceso de cetoadaptación7. Esto es posible gracias a un aumento de los cuerpos cetónicos9, concretamente el D b-hidroxibutirato (D-bHB) y acetoacetato (AcAc)8 hasta el punto de alcanzar cetosis nutricional, los cuales permiten mayor facilidad oxidativa por casi la totalidad de tejidos, y mayor energía libre conservada en ATP3,4. Este aumento en las tasas de oxidación de cetonas permite al organismo optimizar reservas endógenas de hidratos de carbono (HC)11 y mitigar incluso evitar el catabolismo muscular10. Además, como respuesta a la menor utilización de la glucosa como fuente de energía, los niveles de insulina y glucagón se reducen. Este es uno de los factores por los cuáles podría explicarse la asociación entre las dietas cetogénicas y la pérdida de peso corporal, pues la disminución de las citadas hormonas permite amplificar la movilización y oxidación lipídica12. Igualmente, se ha descubierto que los cuerpos cetónicos también tienen un papel regulador, pues determinan el uso preferencial (o no) de un determinado tipo de sustrato energético acorde a las necesidades fisiológicas del momento4,9.

Esta capacidad de supervivencia metabólica en parte, puede suponer un legado de adaptación genética promovida por los largos periodos de ayuno a los que se ha visto expuesto el hombre primitivo, tanto por su modo de vida como por el factor estacional (menor disponibilidad de comida en estaciones frías)5. Sea como fuere, lo cierto es que esta forma de optimizar el aprovechamiento de energía, a través de la regulación de las distintas opciones metabólicas de que dispone el organismo, guiándose por la interpretación de los estímulos intrínsecos y extrínsecos que lo rodean, nos abre un nuevo abanico de posibilidades de estudio orientadas a mejorar la eficiencia de nuestro organismo, tanto en términos antropométricos, de prevención y/o tratamiento, así como del rendimiento físico.

En este último aspecto, pese a los prometedores hallazgos desarrollados en las últimas décadas, relativas a dietas cetogénicas y su influencia sobre el rendimiento físico ya vaticinaban algunas posibles ventajas u oportunidades intrínsecas en el desarrollo de este tipo de dietas, éstos se vieron eclipsados por una gruesa capa de estudios centrados en el potencial del consumo de los carbohidratos sobre el rendimiento físico7,13. Todas estas investigaciones, nacidas a raíz de que se descubriera la estrecha relación entre el déficit de glucógeno muscular y la aparición de fatiga, se han centrado primeramente en evitar la aparición prematura de dicho parámetro limitante, y subsecuentemente, a desarrollar estrategias nutricionales orientadas a retrasar lo máximo posible la fatiga, así como a minimizar sus efectos de cara a posteriores esfuerzos.

Sin embargo, una vez alcanzado el clímax conceptual y procedimental en el estudio de los hidratos de carbono (HC) en relación con el rendimiento físico, ha parecido despertarse de nuevo el interés en investigar el potencial de las dietas cetógenicas en deportistas8,14. Este reflorecimiento se ha visto potenciado, entre otros factores, porque se ha llegado a un “techo” en el cual ya no existe una mejora sustancial y previsible, proveniente de un cambio metodológico en la utilización de los HC como sustrato energético principal respecto a lo que ya sabemos.

Por ende, en la última década han acrecentado los estudios focalizados en descubrir las potencialidades fisiológicas de las dietas cetogénicas2, en pos de un óptimo rendimiento deportivo, sobre todo en deportes de resistencia15, dada su facilidad (dentro de la complejidad misma) de estandarizar procedimientos de estudio e interpretación de resultados en el grupo control.

Todos estos factores han dado pie al desarrollo de algunos trabajos enfocados a investigar la eficacia de dietas LCHF (Low Carb, High Fat, bajas en carbohidratos, alta en grasas) en deportes de resistencia15. Algunos estudios han demostrado que la aplicación de una dieta cetogénica a lo largo del tiempo promueve la disminución de masa grasa, un factor relevante en deportes de resistencia de larga, incluso de media duración2, 5, 16, 17. Por otro lado, están emergiendo investigaciones que corroboran la capacidad de las dietas LCHF de mejorar la capacidad de rendimiento en deportes de resistencia2, 14, destronando la antigua creencia de que la velocidad en la tasa de oxidación de grasas no podría gestionar de manera eficaz los requerimientos fisiológicos propios de esta modalidad18. Atendiendo a las capacitaciones metabólicas que posibilita la cetoadaptación y con la teoría sobre la mesa, la implementación de dietas cetogénicas en deportes de resistencia de larga duración y ultra-resistencia podrían suponer una ventaja sustancial sobre el rendimiento en términos de disponibilidad energética14, 19, teniendo en cuenta los limitados depósitos de glucógeno de los que disponemos, frente a la mayor cantidad y densidad energética presente en nuestros depósitos lipídicos20. No obstante, también existen autores21,22 que dudan del potencial de este tipo de dietas en el rendimiento físico en deportes de resistencia, mencionando que la oxidación de grasas requiere mayor consumo de oxígeno. Por otra parte, algunos estudios han barajado la hipótesis de que las dietas cetogénicas pueden tener efectos anabólicos10, 23, 24, siempre y cuando no exista déficit de ingesta proteica en los participantes y se garantice el suficiente contenido calórico para tal fin. La idea de que las dietas con alta restricción de HC, desarrolladas ad libidum, no supongan ningún factor de riesgo a la hora de intentar bajar peso corporal es más contrastada que las hipótesis anteriores14, alegando al poder saciante propio de las grasas como uno de los principales factores que permiten esta laxitud en el control sobre las calorías ingeridas25, 26. Sin embargo la mayoría de investigaciones, tanto antiguas como emergentes, poseen limitaciones de peso en aspectos procedimentales que las hacen carecer de un consenso amplio y sólido entre la comunidad científica, tales como grupos control demasiado pequeños y/o heterogéneos, duración del seguimiento evolutivo limitada (a veces no permite llegar a una cetoadaptación completa) o falta de rigor en los mecanismos de actuación, control e interpretación de datos14, 19.

Dado el creciente interés por el estudio de las dietas cetogénicas y sus efectos en el rendimiento deportivo, el presente trabajo tratará de aunar los artículos emergentes más recientes en este ámbito, en deportes de resistencia. Así mismo, se buscará justificar el grado de viabilidad que supone desarrollar una dieta LCHF, analizando sus repercusiones sobre parámetros antropométricos, adaptaciones metabólicas y hormonales, así como a los cambios que produce en capacidades físicas clave en estas modalidades deportivas. Finalmente se propondrán algunas recomendaciones o posibles campos de estudio de cara a futuras investigaciones, que permitan consensuar o rebatir con mayor rigor los actuales hallazgos, o bien descubrir nuevas potencialidades de este tipo de estrategias dietéticas.

1. **Objetivos**

El principal objetivo del presente trabajo será determinar de manera objetiva el grado de viabilidad que posee el desarrollo de dietas cetogénicas para optimizar el rendimiento en deportes de resistencia, teniendo en cuenta los estudios de los que disponemos en la actualidad.

Para la consecución de dicho objetivo, a continuación se presentan unos objetivos complementarios:

* Exponer los pilares nutricionales básicos que caracterizan a las dietas cetogénicas.
* Conocer las adaptaciones metabólicas, físicas y fisiológicas que trae consigo la aplicación práctica de este tipo de dietas a medio y largo plazo.
* Valorar cómo estas adaptaciones pueden influir en las capacidades físicas relevantes en el desempeño de modalidades de resistencia.

Así mismo, de cara a complementar los objetivos previamente citados, podemos formular algunas preguntas investigables que trataremos de dar respuesta a lo largo de la investigación, como serán:

¿Cuál debe ser el porcentaje de ingesta calórica en términos diarios que deben constituir los carbohidratos para permitir el mecanismo de cetoadaptación?

¿Cómo influye la implementación de estrategias dietéticas de LCHF en la composición corporal y en el funcionamiento de las diferentes vías metabólicas? ¿Cuál será su repercusión sobre la capacidad aeróbica, la potencia y la fuerza?

¿Puede la aplicación de dietas cetogénicas, estructuradas y desarrolladas adecuadamente, ayudar al rendimiento deportivo en deportistas de resistencia amateur y de alto nivel?

1. **Metodología**

Para la elaboración del presente trabajo, se realizó una búsqueda sistemática de estudios y revisiones científicas a través de bases de datos de carácter electrónico que incluyen PubMed, EBSCOhost y ResearchGate. No se hizo ninguna preferencia ni exclusión por el idioma de publicación de los estudios encontrados y recuperados. Debido a los principios básicos sobre los que se asienta nuestra revisión sistemática, la búsqueda quedó restringida a publicaciones contrastadas científicamente que informaron hallazgos en población humana deportista y sana, desarrolladas durante los últimos 5 años.

Así mismo, los términos de búsqueda introducidos en las bases de datos anteriormente mencionadas fueron “ketogenic”, “ketone”, “ketone body”, “keto-adapted”, “fat max”, “ketosis”, “high fat”, “fat”, “low-carbohydrate”, “performance”, “body composition”, “endurance training”, “athletes”, “endurance athlete”, “resistance training”, y el conector utilizado fue “AND”. Dichos términos se combinaron de varias formas para expandir todo lo posible la búsqueda.

También se recuperaron estudios procedentes de las referencias de algunos documentos encontrados mediante los términos de búsqueda anteriores, así como de revisiones y meta-análisis actualizadas sobre dietas cetogénicas que correlacionaban estrategias nutricionales con parámetros del rendimiento deportivo. Esta pauta de actuación atiende a necesidades mayoritariamente conceptuales, pues ayudarán a justificar objetivamente con mayor solidez a lo largo del trabajo.

Para la selección de estudios se aplicaron las indicaciones PRISMA, y se establecieron una serie de criterios de inclusión:

1. El seguimiento y aplicación de estrategias dietéticas en el estudio duraron 3 semanas o más.
2. La estrategia nutricional LCHF debería componerse por < 25% HC y de un consumo lipídico > 50% de kcal diarias.
3. Estudios enfocados a un grupo de deportistas entrenados o amateur.
4. Los grupos de estudio presentan un IMC normal (18,5 -24,9 kg/m2).
5. Variables dependientes en relación con el estudio de vías energéticas preferentes, composición corporal, parámetros cardiorrespiratorios y parámetros de entrenamiento.

Aunque el criterio nº2 de estrategia nutricional no sigue estrictamente la estructuración de una dieta cetogénica (el consumo de HC debería suponer alrededor del 5%)19, se ha considerado útil ampliar esta restricción, ya que puede darnos una mayor comprensión etiológica de la cetoadaptación.

En cuanto a los criterios de exclusión que se han tenido en cuenta para el desarrollo de este estudio, se destacan los siguientes:

* Artículos de investigación previos al año 2015.
* Participantes de más de 50 años de edad.
* Participantes con IMC < 18,5 kg/m2 o > 24,9 kg/m2.
* Atletas de resistencia recreativamente activos con VO2máx < 50.0 mL/kg/min.
* Dietas bajas en HC, pero con ingestas > 25% de dicho macronutriente.

La información recabada de los estudios seleccionados atiende a aspectos como:

* Características del estudio: Procedimiento y metodología, así como la justificación de ambos.
* Características del grupo control: Datos antropométricos y fisiológicos de rendimiento.
* Resultados obtenidos en términos de composición corporal, adaptaciones fisiológicas y metabólicas.
* Conclusiones dotadas de rigor científico y objetividad, procurando analizar la casuística de los datos obtenidos.

1. **Resultados**

Inicialmente, la búsqueda realizada a través de las citadas bases de datos y otras fuentes identificó 71 posibles artículos a tratar. Sin embargo, una vez aplicados los criterios de inclusión y exclusión propuestos para esta revisión, únicamente se incluyeron a objeto de estudio 13 artículos (ver [Figura 1](#Figura1)).

Artículos identificados a través de bases de datos (n = 55)

Artículos identificados a través de otras fuentes (n = 16)

**Identificación**

Artículos excluidos (n = 17)

• Revisiones (n = 11) • Columnas de opinión (n = 2) • Columnas de revista breves (n = 4)

Artículos combinados y seleccionados después de eliminar duplicados (n = 71)

**Cribaje**

Artículos excluidos por diversos motivos (n = 41):

* Realizados antes del 2015 (n = 29)
* Participantes > 50 años (n = 3)
* Participantes con IMC > 24,9 (n = 6)
* Participantes con VO2máx < 50.0 mL/kg/min (n=1)
* Dietas con %HC > 25% (n = 3)

**Elegibilidad**

Artículos originales resultantes (n = 54)

Artículos originales definitivos (n = 13)

**Incluidos**

Figura 1: Proceso de selección de artículos, siguiendo la declaración PRISMA, presentado mediante un diagrama de flujo

Los estudios escogidos manifestaban un gran abanico de investigaciones que trataban de indagar en los efectos producidos por la implementación de dietas cetogénicas en sujetos con normopeso y una práctica regular de ejercicio físico. Concretamente, estas investigaciones abordaban aspectos relacionados con la composición corporal, adaptaciones metabólicas y hormonales, así como al rendimiento deportivo.

Específicamente, trataron de investigar estos efectos a través de parámetros antropométricos, disponibilidad y empleo de sustratos energéticos a nivel muscular y sanguíneo, además de resultados obtenidos en el rendimiento físico a través de los efectos en la capacidad aeróbica. Entre los estudios seleccionados, se incluyeron trabajos que se centraron sobre todo en el estudio de la capacidad anaeróbica, la fuerza y/o la potencia, pero además también examinaron respuestas metabólicas y fisiológicas.

De manera global, podemos observar que 12 de los 13 trabajos seleccionados (representando el 92% del total) desarrollaron estrategias de intervención basadas en dos grupos, un grupo que practicó una dieta LCHF y un grupo control al que se implementó una dieta mixta ([Tabla 1](#Tabla1)). Estas investigaciones siguieron dos vertientes procedimentales, una basada en medidas repetidas con disposición cruzada27-29, y la que siguió gran parte de ellas, consistente en analizar efectos del grupo tratado respecto al grupo control22, 23, 30-36. El artículo restante optó por un diseño basado en un único grupo de estudio que se limitó a analizar resultados pre y post-dieta17.

**Tabla 1:** Características del diseño de estudio, peso corporal de los sujetos y estrategias dietéticas de los 13 artículos revisados.

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Estudio** | **Diseño de estudio (tamaño muestra)** | **Peso corporal (kg)** | **Duración** | **Calorías (kcal)** | **HC (%)** | **Grasas (%)** | **Proteínas (%)** |
| Burke et al.22 | 2 grupos  (DC: n= 10 / GC: n=9) | DC: 64 ± 9  GC: 67 ± 7 | 3 semanas | DC: 3559  GC: 3556 | DC: 4  GC: 60 | DC: 78  GC: 20 | DC: 17  GC: 16 |
| Cipryan et al.30 | 2 grupos  (DC: n=9 / GC n=8) | DC: 83±17  GC: 83 ± 9 | 4 semanas | Sin control calórico | DC: 8  GC: 48 | DC: 63  GC: 35 | DC: 29  GC: 17 |
| Dostal et al.31 | 2 grupos  (DC: n=12 / GC n=12) | DC: 66 ± 10  GC: 72 ± 15 | 12 semanas | DC: 1798  GC: 1968 | DC: 8  GC: 46 | DC: 69  GC: 35 | DC: 23  GC: 19 |
| Durkalec-Michalski  et al.27 | Medida repetida  (n=22) | DC: 71 ± 13  GC: 71 ± 13 | 4 semanas | DC: 2807  GC: 2565 | DC: 5  GC: 45 | DC: 78  GC: 37 | DC: 17  GC: 18 |
| Heatherly et al.28 | Medida repetida  (n=8) | DC: 80 ± 6  GC: 82 ± 7 | 3 semanas | DC: 1886  GC: 2820 | DC: 7  GC: 43 | DC: 64  GC: 38 | DC: 29  GC: 17 |
| Kephart et al.32 | 2 grupos  (DC: n= 7/GC: n=5) | DC: 83 ± 8  GC: 77 ± 6 | 12 semanas | DC: 1948  GC: Sin control | DC: 3  GC: Sin control | DC: 78  GC: Sin control | DC: 18  GC: Sin control |
| McSwiney et al.33 | 2 grupos  (DC: n=9 / GC: n=11) | DC: 86 ± 14  GC: 77 ± 10 | 12 semanas | DC: 3022  GC: 2643 | DC: 5  GC: 61 | DC:77  GC: 19 | DC: 17  GC: 14 |
| Shaw et al.29 | Medida repetida  Transversal (n=8) | 73 ± 7 | 31 días | DC: 3279  GC: 3122 | DC: 4  GC: 43 | DC: 78  GC: 38 | DC: 18  De GC: 19 |
| Urbain et al.17 | Grupo único  (n = 42) | 70 ± 11 | 6 semanas | DC: 2321 | DC: 8 | DC: 72 | DC: 21 |
| Vargas et al.34 | 2 grupos  (DC: n=9 / GC: n=10) | DC: 79 ± 8  GC: 75 ± 5 | 8 semanas | DC: 3073  GC: 2909 | DC: 10  GC: 55 | DC: 70  GC: 25 | DC: 20  GC: 20 |
| Volek et al.35 | 2 grupos (transversal)  (DC: n=10 / GC: n=10) | DC: 69 ± 8  GC: 67 ± 7 | > 9 meses | DC: 2884  GC: 3174 | DC: 10  GC: 59 | DC: 70  GC: 25 | DC: 19  GC: 15 |
| Webster et al.36 | 2 grupos (transversal)  (DC: n=7 / GC: n=7) | DC: 78 ± 9  GC: 74 ± 8 | > 8 meses | DC: 2884  GC: 3174 | DC: 7  GC: 51 | DC: 72  GC: 33 | DC: 21  GC: 16 |
| Wilson et al.23 | 2 grupos  (DC: n=12 / GC: n=13) | DC: 80 ± 15  GC: 78 ± 10 | 10 semanas | DC: 2631  GC: 2539 | DC: 5  GC: 55 | DC: 75  GC: 25 | DC: 20  GC: 20 |

DC: Dieta cetogénica ; GC: Grupo control ; HC: Hidratos de carbono

Adaptado de Kang et al. (2020) ; Cipryan et al. (2018) ; Dostal et al. (2019)

Sin embargo, en cuanto a estrategia dietética del grupo LCHF, sólo en 6 del conjunto total de trabajos se establecieron estrategias nutricionales basadas en dietas cetogénicas (HC ≤ 5%) 22, 23, 27, 29, 32, 33. Únicamente en dos investigaciones respecto al cómputo global de trabajos no se tuvo control calórico total por parte de los grupos de estudio30, 32.

Todos los trabajos menos tres son de carácter longitudinal. En estos últimos se estableció una metodología transversal, en la que se limitaron a comparar entre el grupo LCHF y el respectivo a la dieta mixta29, 35, 36. Todos los parámetros relacionados con el diseño de intervención de cada estudio, el peso corporal inicial de la población de estudio y las estrategias nutricionales de las investigaciones a revisar, se encuentran disponibles en la [Tabla 1](#Tabla1).

En lo que respecta a los antecedentes deportivos o de práctica de actividad física en los sujetos objeto de análisis por parte de las diferentes investigaciones, se encontró cierta homogenización en la muestra, influida también por los estrictos criterios de selección de estudios. Por orden de relevancia, se identificaron 8 estudios compuestos por atletas de resistencia22, 28-31, 33, 35, 36, seguidos por trabajos conformados por individuos que presentaban antecedentes de entrenamiento regular de resistencia23, 34 y aquellos constituidos por deportistas de crossfit27, 32, así como un estudio enfocado hacia adultos sanos con normopeso que practicaban actividad física de manera regular17. En el cómputo global de las investigaciones a revisar, participaron 250 individuos, de entre 16 y 50 años de edad, y el 91% de los cuáles eran varones. Independientemente del diseño y características de cada uno de los estudios, todos ellos siguieron una planificación de ejercicio físico idénticas entre los dos grupos que los constituían.

Por otro lado, con el fin de precisar más en la posterior discusión de resultados e identificar posibles vías de investigación, se decidió categorizar los datos extraídos en tres dimensiones de estudio, tales como:

1. Parámetros antropométricos.
2. Adaptaciones metabólicas y hormonales, así como su repercusión en la disponibilidad de sustrato en sangre.
3. Cambios en el rendimiento deportivo.

Por ende, para mayor capacidad crítica, analítica e interpretativa de cada uno de los parámetros englobados en estas dimensiones, se desarrollaron 3 tablas en base a los datos recogidos por las investigaciones objeto de revisión, que atienden a las dimensiones que acabamos de exponer.

1. **Parámetros antropométricos.**

Del total de estudios revisados, 10 han recopilado resultados acerca de parámetros antropométricos en el grupo que siguió una dieta cetogénica, uno de ellos con un diseño transversal29. Todos los datos recogidos en estas investigaciones están disponibles en la [Tabla 2](#Tabla2).

En 8 de los trabajos expuestos se identificó una disminución significativa del peso corporal17, 22, 28-33, alcanzando una reducción media de -3,3% respecto al peso corporal con la que iniciaron las intervenciones. En los dos trabajos restantes no se observó ningún efecto significativo sobre dicho parámetro de los grupos de estudio23, 34.

**Tabla 2**: Evolución de parámetros antropométricos en el grupo DC.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **Estudio** | **Peso corporal (%)** | **% Grasa (Diferencia)** | **Masa grasa (kg)** | **Masa libre de grasa (%)** |
| **Burke et al**.22 | ↓ 2,71 | - | - | - |
| **Cipryan et al**.30 | ↓ 5,65 | - 3,2 % | - 3,16 | - |
| **Dostal et al**.31 | ↓ 5,4 | - 3,2 % | - 2,9 | - |
| **Heatherly et al**.28 | ↓ 2,58 | - 1,7 % | - | Sin efecto |
| **Kephart et al.**32 | ↓ 3,63 | - 2,5 % | - | Sin efecto |
| **McSwiney et al**.33 | ↓ 6,84 | - 5,2 % | - | Sin efecto |
| **Shaw et al**.29 | ↓ 3,53 | - 5,2 mm media de pliegue cutáneo visceral | - | - |
| **Urbain et al**.17 | ↓ 2,71 | - 1,37 % | - 1,5 | Sin efecto |
| **Vargas et al**.34 | Sin efecto | No significativo | - 1,1 | Sin efecto |
| **Wilson et al**.23 | Sin efecto | - | - 2,2 | ↑ 2,4% |

Adaptado de Kang et al. (2020) ; Cipryan et al. (2018) ; Dostal et al. (2019)

En lo concerniente al % de grasa, todos los estudios menos dos22, 23 abarcaron un control sobre dicho parámetro, identificando una reducción media en el porcentaje de masa grasa de – 2,86% en el grupo que siguió una dieta cetogénica. Estos trabajos emplearon para la medición del % de grasa métodos como la absorciometría dual de rayos X23, 32-34 o el análisis de bioimpedancia17, 28. Únicamente en un trabajo se optó por controlar de forma aislada el pliegue cutáneo visceral, sobre el cual se experimentó una disminución de 5,2 mm29. Paralelamente a estos valores de % de grasa, cinco de los estudios que conforman la [Tabla 2](#Tabla2) examinaron la masa grasa en términos no porcentuales, verificando así la consonancia de estos valores con los datos porcentuales extraídos anteriormente17, 30, 31, 34, o bien para complementar la ausencia de datos en el % de grasa23.

Por último, mencionar que en 9 de los estudios que analizaron parámetros antropométricos no se controló la masa libre de grasa (MLG)22, 29, 30, 31, o no se observaron efectos significativos en dicho factor17, 28, 32-34. Por tanto, solamente un estudio identificó un aumento significativo (+2,4%) de la MLG23.

1. **Adaptaciones metabólicas, hormonales, y su repercusión en los sustratos en sangre.**

En esta nueva dimensión, sólo un trabajo34 permaneció ajeno al estudio de parámetros relacionados con las adaptaciones metabólicas, hormonales y/o de disponibilidad de sustrato sanguíneo inducidas por la aplicación de una dieta cetogénica. Todos los datos recopilados en la dimensión que nos atañe por parte de las investigaciones que mencionaremos a continuación, se encuentran disponibles en la [Tabla 3](#Tabla3).

En lo que respecta a la naturaleza de las pruebas físicas diseñadas para la medición y análisis de estos factores, podemos determinar que como es de esperar, estas van alineadas a los objetivos que pretendía examinar cada uno de los estudios, y a su vez a las características de los grupos que los conforman. Así pues, se identificaron un total de 9 investigaciones con grupos compuestos por deportistas de resistencia de diversas modalidades, en las que se diseñaron pruebas físicas de intensidad moderada27, 29, 33, 35, 36 o elevada28, programas de entrenamiento17, 23, así como pruebas de intensidad gradual22. En cuanto a estas últimas, formaron la tónica procedimental habitual en aquellos estudios con grupos de deportistas de crossfit32 y de HIIT30, 31, estos últimos en combinación con test de carácter interválico.

Respecto al análisis de las adaptaciones metabólicas acaecidas en los grupos de dietas cetogénicas, existe unanimidad estadística en los parámetros respiratorios, tomados en base a indicadores de intercambio de gases22, 27-29, 33 o bien a través de técnicas de etiquetado isotópico35, 36. Así pues, se observa una disminución considerable en la oxidación de HC, en pos de un aumento de la oxidación lipídica.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Estudio** | **Prueba** | **Ox HC** | **Ox G** | **CR** | **Glucógeno muscular (GM)** | **Glucosa en sangre** | **b-HB**  (mmol / l) | **Lactato en sangre** | **Respuestas hormonales** |
| **Burke et al.**22 | ↑ Intensidad gradual en carrera, bici y natación | ↓ | ↑ | - | s/d | ↓ En reposo y durante ejercicio | s/d | Sin efecto durante ejercicio | s/d |
| **Cipryan et al.**30 | Pruebas de intensidad gradual + Sesión HIIT | s/d | ↑ | ↓ | s/d | s/d | s/d | Sin efecto durante ejercicio | s/d |
| **Dostal et al.**31 | Pruebas de intensidad gradual + Test interválico 30-15 | - | - | ↓ | s/d | s/d | s/d | ↓Durante ejercicio | s/d |
| **Durkalec-Michalski et al.** 27 | Valores en > 65% VO2máx | ↓ | ↑ | - | s/d | s/d | s/d | s/d | s/d |
| **Heatherly et al.**28 | Carrera 50´ a > 80% VO2máx | ↓ | ↑ | - | s/d | s/d | s/d | s/d | s/d |
| **Kephart et al.**32 | Rutina de Crossfit | s/d | s/d | s/d | s/d | Sin efecto en reposo | s/d | s/d | s/d |
| **McSwiney et al.**33 | Contrarreloj 100km ciclismo | - | - | ↓ | s/d | s/d | < 0,5 | s/d | s/d |
| **Shaw et al.**29 | Carrera hasta agotamiento a 70% VO2máx | ↓ | ↑ | - | s/d | Sin efecto durante ejercicio | s/d | Sin efecto durante ejercicio | s/d |
| **Urbain et al.**17 | Clases personalizadas | s/d | s/d | s/d | s/d | ↓ Glucosa en reposo | s/d | s/d | ↓ Insulina en reposo  ↓ IGF-1 en reposo |
| **Volek et al.**35 | Carrera 3h al 64% VO2máx | ↓ | ↑ | - | Sin efecto en su utilización durante ejercicio | Sin efecto en reposo ni durante ejercicio | < 0,5 | Sin efecto en reposo  ↑ Durante ejercicio | Sin efecto en insulina en reposo ni durante ejercicio |
| **Webster et al.**36 | Ciclismo 2h al 72% VO2máx | ↓ | ↑ | - | ↓ GM al inicio  ↓ Utilización GM durante ejercicio | Sin efecto durante ejercicio | s/d | Sin efecto durante ejercicio | ↓ Insulina durante ejercicio  Sin efecto en el glucagón durante ejercicio |
| **Wilson et al.**23 | Programa de entrenamiento de resistencia | s/d | s/d | s/d | s/d | Sin efecto en glucosa basal | s/d | s/d | Sin efecto en insulina en reposo  ↑ Testosterona en reposo, la semana posterior a reintroducir HC |

Tabla 3: Adaptaciones metabólicas, hormonales y su repercusión en los sustratos en sangre.

Respuestas de sustrato sanguíneo

Adaptaciones metabólicas

Características de la prueba

Ox HC: Oxidación de Hidratos de carbono ; Ox G: Oxidación de grasas ; CR: Cociente Respiratorio

b-HB: b-hidroxibutirato ; s/d: Sin datos ; **-** : Variación estadísticamente no significativa

Adaptado de Kang et al. (2020) ; Cipryan et al. (2018) ; Dostal et al. (2019)

Estos valores, sumados a los que ofrecen los estudios que trataron de analizar la velocidad de adaptación metabólica a través de las variaciones del cociente respiratorio (CR) a lo largo del tiempo30, 31 33, nos permite determinar el grado de eficiencia metabólica que supone la cetoadaptación para el desempeño de esfuerzos aeróbicos de diversa intensidad y duración. Por su parte, existen pocas referencias científicas en la presente revisión que indagasen en el análisis de la disponibilidad de glucógeno muscular endógeno35, 36. Sin embargo, merece la pena reseñar que tanto la investigación de Volek et al.35 como la correspondiente a Webster et al.36, se desarrollaron en atletas de resistencia de larga duración y con un seguimiento temporal de 9 y 8 meses, respectivamente (ver [Tabla 3](#Tabla3)). Pese a la trascendencia temporal que caracteriza a estas investigaciones, se observa disparidad en sus resultados, puesto que el primero no identificó ninguna variación significativa en la utilización de glucógeno muscular frente al grupo control, mientras que el segundo notificó una disminución en la utilización de dicho sustrato tanto antes como durante la realización del esfuerzo físico.

Respecto a la medición de sustratos en sangre, se examinaron los niveles de glucosa sanguínea pre-esfuerzo17, 23, 32, durante el esfuerzo físico29, 36 o en ambas situaciones22, 35 por parte de 7 artículos de investigación. Burke et al.22 identificó una disminución de la glucosa en sangre antes y durante el ejercicio en deportistas entrenados de resistencia, mientras que Urbain et al.17 también corroboró una disminución significativa de los niveles de glucosa plasmática en reposo, en adultos sanos que practicaban ejercicio de resistencia con regularidad. Los 5 trabajos restantes23, 29, 32, 35, 36, no manifestaron ninguna variación significativa de niveles de glucosa en sangre, ni en reposo ni durante el esfuerzo físico. Por otro lado, encontramos que solamente dos estudios mostraron valores de b-hidroxibutirato (b-HB) en sangre, y en ambos casos reflejaron unos niveles <0,5 mmol/l de dicho sustrato33, 35. En consideración a las concentraciones de lactato en sangre, se localizaron 6 trabajos que investigaron dicho indicador. En 4 de ellos no se observó una variación significativa en las concentraciones de lactato sanguíneo durante el esfuerzo en el grupo que realizó una estrategia cetogénica22, 29, 30, 34. Respecto a los 2 artículos restantes, Dostal et al.31 observó una disminución en los niveles de lactato sanguíneo en deportistas habituados a esfuerzos interválicos de alta intensidad, mientras que Volek et al35 obtuvo resultados completamente opuestos en su grupo de estudio, compuesto por corredores de ultra-resistencia. Solamente uno de los 6 artículos que investigó los niveles de lactato aludió a su medición en condiciones de reposo, en el cual no se reportó ningún efecto significativo al respecto35 (ver [Tabla 3](#Tabla3)).

Únicamente 4 investigaciones mostraron interés en analizar las respuestas hormonales inducidas por la dieta cetogénica, así como por un determinado estímulo de ejercicio físico asociado a la misma17, 23, 35, 36. La totalidad de ellos escudriñaron en los niveles de insulina, algunos de ellos localizando disminuciones de los niveles en reposo17 y durante el ejercicio36, mientras que otros no reconocieron efectos sobre los niveles insulínicos antes23 ni durante35 el esfuerzo. También se investigó la variabilidad en los niveles de glucagón en sangre durante el ejercicio, sin detectar efectos a considerar36. A través del estudio de Wilson et al.23 se observó un aumento a tener en cuenta en los niveles de testosterona en el grupo que siguió una DC, tras experimentar una semana de reintroducción de HC en la planificación dietética. Por último, de la mano de Urbain et al.17 se descubrió una disminución en reposo de los niveles de factor de crecimiento insulínico tipo I (IGF-1 por sus siglas en inglés), una hormona polipeptídica que posee efectos hipoglucemiantes y anabolizantes (ver [Tabla 3](#Tabla3)).

1. **Cambios en el rendimiento deportivo.**

En esta dimensión se englobaron todos aquellos estudios que trataron indicadores del rendimiento de una o varias capacidades físicas. De este modo y en consonancia con las bases sobre las que se asienta esta revisión, todos los estudios a excepción de uno23 giraron en torno al examen de la capacidad aeróbica, ya fuera en términos absolutos (VO2 máx en l/min)17, 22, 35, relativos (VO2 máx en ml/kg/min)17, 29-33, 35 y/o en base a los cambios en el rendimiento de las pruebas asignadas a la propia investigación22, 28-31, 33. Por otro lado, hubo 3 trabajos que debido a la naturaleza del grupo de estudio y la finalidad de la investigación misma, trataron de observar parámetros asociados a otras capacidades físicas como la fuerza23, 32, la potencia 23, 30, 33 o la capacidad anaeróbica32. Toda la información asociada a los resultados en estos parámetros se encuentra disponible en la [Tabla 4](#Tabla4).

De los 9 estudios que cuantificaron los posibles cambios en la capacidad aeróbica, 4 de ellos no determinaron efectos significativos sobre la capacidad aeróbica en términos relativos29, 32, 33, 35 o absolutos35, dos estudios con test físicos de carácter interválico30, 31 informaron sobre un aumento en los valores de ml/kg/min, mientras que uno identificó aumentos en valores de ml/kg/min22, y otro una disminución en este último indicador17. De manera complementaria a los datos reseñados, se reconocieron 6 estudios que se guiaron por tiempos de desempeño de la prueba que correspondiera, ya fuera con un tiempo limitado por el recorrido de una distancia concreta22, 28, 33, o bien por el desempeño de la prueba hasta la extenuación29-31. En ninguno de los 3 estudios correspondientes a este primer subgrupo se identificaron efectos sobre la mejora o reducción del rendimiento, mientras que de los 3 estudios restantes, 2 de ellos30, 31 ambos de carácter interválico, reportaron un aumento del to de desempeño hasta la extenuación. Del mismo modo, el trabajo restante no asoció ningún efecto sobre el rendimiento de la prueba29.

Tabla 4: Cambios en indicadores de rendimiento deportivo.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **Estudio** | **Capacidad aeróbica** | **Fuerza** | **Potencia** | **Capacidad anaeróbica** |
| **Burke et al**.22 | ↑ VO2max en l/min  Sin efectos en tº de carrera de 10 km | s/d | s/d | s/d |
| **Cipryan et al.**30 | ↑ VO2 máx en ml/kg/min  ↑ To hasta extenuación | s/d | Sin efecto significativo | s/d |
| **Dostal et al.**31 | ↑ VO2 máx en ml/kg/min  ↑ To hasta extenuación | s/d | s/d | s/d |
| **Heatherly et al**.28 | Sin efectos en la prueba de 5 km | s/d | s/d | s/d |
| **Kephart et al**.32 | Sin efectos en VO2máx en ml/kg/min | Sin efecto en 1RM back squat | s/d | Sin efecto en tº carrera 400m |
| **McSwiney et al.**33 | Sin efectos en VO2máx en ml/kg/min  Sin efectos en to de prueba de 100km | s/d | ↑ Pico de potencia en W/kg  Sin efecto en potencia media en W/kg | s/d |
| **Shaw et al**.29 | Sin efectos en VO2máx en ml/kg/min  Sin efectos en carrera a 70%VO2máx hasta la extenuación | s/d | s/d | s/d |
| **Urbain et al**.17 | ↓ VO2máx en l/min  Sin efecto en VO2máx en ml/kg/min | s/d | s/d | s/d |
| **Volek et al**.35 | Sin efectos en VO2máx en l/min ni en ml/kg/min | s/d | s/d | s/d |
| **Wilson et al**.23 | s/d | ↑ 1RM back squat y press banca | ↑ Pico de potencia en W | s/d |

Adaptado de Kang et al. (2020) ; Cipryan et al. (2018) ; Dostal et al. (2019)

VO2máx: Volumen de Oxígeno Máximo RM: Repetición Máxima ; W: Watios ; s/d: Sin datos

Debido a las grandes restricciones impuestas en los criterios de selección de estudios a revisar, solamente en los trabajos de Kephart et al.32 y Wilson et al.23 se compararon efectos sobre el rendimiento basado en una batería de pruebas de fuerza. Mientras que en el primero32, desarrollado con deportistas de crossfit no identificó efectos significativos sobre el rendimiento en el test de sentadillas de 1 Repetición Máxima (1RM), Wilson et al.23 sí que notificó una mejora en esta misma tipología de prueba y también en la realización de 1RM en press banca en deportistas entrenados de resistencia.

Por otro lado, se han recogido datos asociados al rendimiento de la potencia en 3 estudios (ver [Tabla 4](#Tabla4)). En uno de ellos no se informó de ningún efecto significativo30, mientras que en los dos restantes se observaron mejoras en el pico de potencia relativa (en W/kg)33 y en el pico de potencia en términos absolutos (en W)23, mediante pruebas que se realizaron en atletas de resistencia en ambos casos. De manera anecdótica, únicamente un estudio trató de medir la capacidad anaeróbica a través de la comparación del to de carrera de 400m propia del estudio, sin reportar mejoras sobre la marca personal de los deportistas.

1. **Discusión**

El hecho de que el 81,7% de los estudios identificados no cumplieran los requisitos de selección planteados para su revisión (ver [Figura 1](#Figura1)) puede indicarnos en parte, que no parece apreciarse un consenso claro entre la comunidad científica acerca del enfoque global a desarrollar en este tipo de trabajos. Este factor se hace palpable en cuanto profundizamos en el análisis de las estrategias procedimentales y de control propuestas en cada una de las investigaciones (ver [Tabla 1](#Tabla1)), observando ciertas disparidades o deficiencias, como por ejemplo:

* Estrategias dietéticas isocalóricas o basadas en la restricción calórica, pero sin ningún control de su correcta aplicación.
* Restricción de HC insuficiente para provocar un estado de cetosis óptimo.
* Escasa duración de las estrategias de intervención, impidiendo una cetoadaptación plena y de calidad.

Las consideraciones mencionadas pueden servirnos de antesala para comprender la variedad de resultados obtenidos y que se interpretarán a continuación.

1. **Parámetros antropométricos.**

La disminución significativa del peso corporal en términos porcentuales se dio en todos los estudios que trataron con deportistas de resistencia17, 22, 28-31, 33, por lo que la combinación de estrategias dietéticas LCHF junto con el entrenamiento regular de resistencia puede ayudar a bajar peso corporal con las mismas garantías que cualquier otra planificación nutricional contrastada, alineándonos con las mismas conclusiones extraídas de estudios previos2,37 (ver [Tabla 2](#Tabla2)). Las bajadas de peso corporal que se experimentaron de forma más discreta, pueden explicarse por la aplicación de estrategias dietéticas ad libidum17, 28, o bien porque se desarrolló en deportistas de resistencia de élite22, en los que una ligera bajada de peso por ínfima que sea, puede conllevar mejoras sustanciales en el rendimiento35.

En aquellos estudios que controlaron el porcentaje de masa grasa17, 28, 30, 31-33, observamos que las disminuciones en dicho parámetro armonizan con la tasa de pérdida de peso corporal, mientras que la MLG no aumentó, pero tampoco disminuyó. Por tanto, una DC con los mecanismos de planificación y control adecuados, puede favorecer una optimización de la economía de carrera en deportes de resistencia38, 39, cuanto menos a nivel biomecánico.

Visto desde otra perspectiva, en el estudio de Shaw et al.29 se descubrió una bajada significativa de grasa en el pliegue de la región abdominal (-5,2mm), una ubicación bien conocida por su baja vascularización40. Dicha reducción puede haberse visto facilitada por una mayor capacidad oxidativa de las grasas, inducidas por las adaptaciones metabólicas que suponen la restricción de HC en la dieta cetogénica35.

Por último, aunque el estudio de Wilson et al.23 notificó un aumento significativo (+2,3%) de la MLG en deportistas de resistencia (ver [Tabla 2](#Tabla2)), este resultado pudo deberse a la reintroducción de HC en el grupo objeto de análisis. En consecuencia, los efectos anabólicos de las DC por sí solas y a día de hoy, carecen de rigor conceptual.

1. **Adaptaciones metabólicas, hormonales, y su repercusión en los sustratos en sangre.**

Tal y como atestiguan de forma unánime los estudios tratados22, 27-31, 33, 35, 36, el estado de cetosis nutricional trae consigo una serie de adaptaciones metabólicas, reduciendo la tasa de oxidación de HC en pos de un aumento de oxidación lipídica (ver [Tabla 3](#Tabla3)). Por ende, los ácidos grasos circulantes y las cetonas en sangre se postulan como la principal opción metabólica6,41. Sin embargo, la mayor densidad de las grasas hace que el CR se vea reducido21, 42, lo cual entraña dificultades a la hora de rendir a intensidades cercanas al umbral anaeróbico en comparación con la oxidación de HC38, 43. Así mismo, la gran variabilidad entre los niveles de los deportistas complica más aún el establecimiento de un consenso claro al respecto, dado que la intensidad máxima a la que es capaz de oxidar grasas es directamente proporcional al nivel de rendimiento22, 44. Tampoco se sabe con certeza si el factor del nivel de rendimiento puede influir en la rapidez con que se produce la cetoadaptación. Además, sólo los estudios de McSwiney33 y Volek35 midieron los niveles de b-HB en sangre, y en ambos casos se identificaron unos niveles de cetosis insuficientes3,8 para que desembocara en una cetoadaptación de calidad (ver [Tabla 3](#Tabla3)). Esta ausencia de parámetros de control del estado de cetosis, junto con la restricción insuficiente de HC17, 30, 31, 34, 35 (ver [Tabla 1](#Tabla1)), puede haber provocado conclusiones confusas en algunas investigaciones.

Como parece lógico deducir, los niveles endógenos de glucosa sanguínea no sufrieron variaciones significativas, actuando de forma sincronizada a su nuevo rol secundario en el metabolismo23, 29, 32, 35, 36. Frente a la disparidad en los dos estudios35,36 que analizaron el glucógeno muscular, nos decantamos por dar mayor veracidad a aquel con mayor restricción en la ingesta de HC (ver [Tabla 1](#Tabla1)). De este modo, Webster et al.36 identificó una disminución en la disponibilidad de glucógeno muscular (ver [Tabla 3](#Tabla3)), reflejando la capacidad de las DC para optimizar las reservas de glucógeno25, 45.

La tónica global de los estudios analizados parece concretar que la implementación de una DC no repercute de manera significativa en los niveles de lactato sanguíneo. Pese a que Dostal et al.31 dejaron entrever una mejora en la tolerancia de lactato (ver [Tabla 3](#Tabla3)), la naturaleza de las pruebas de monitorización y la estrategia dietética del mismo (ver [Tabla 1](#Tabla1)) no clarifica que esta mejora se haya producido únicamente por una DC.

Por último, las pocas investigaciones que analizan las respuestas hormonales inducidas por DC, han centrado su interés en el estudio de las hormonas anabólicas, ofreciendo conclusiones equívocas. Mientras los estudios que midieron los niveles de insulina en reposo y/o durante el ejercicio reportaron disminuciones17, 36 o ausencia de modificaciones23, 35 en estos parámetros, así como en los niveles de IGF-117, Wilson et al.23 apreciaron un aumento de la testosterona en reposo, aunque este hecho surgió tras reintroducir los HC (ver [Tabla 3](#Tabla3)). Esto no clarifica el potencial anabólico de las DC.

1. **Cambios en el rendimiento deportivo.**

Como hemos podido comprobar anteriormente, el patrón de la mayoría de estudios sobre deportistas de resistencia no hallaron cambios significativos en la capacidad aeróbica, por lo que el hecho de desarrollar una DC no actúa en detrimento de dicho parámetro2,15, 46. Por contra, Burke et al.22 y Vargas et al.17 informaron de un aumento y una disminución en el VO2máx en l/min respectivamente, en ambos trabajos se explicó bajo una disminución del peso corporal, en el primer caso unido al alto nivel de rendimiento de los deportistas, y en el segundo, a una economía mecánica.

Donde sí se observó cierta solidez estadística fue en el ámbito de HIIT30, 31, notificando un aumento en el VO2máx en ml/kg/min (ver [Tabla 4](#Tabla4)), con su consiguiente optimización en la economía del esfuerzo, aunque se desconocen cuáles han sido los principales mecanismos que han posibilitado dicha mejora. Por ende, se precisan más estudios para clarificar el rol de las DC en la capacidad aeróbica en función del estímulo físico, lo cual sería de interés para la periodización de la pretemporada47,48.

Por último, son escasos los estudios centrados en los efectos de las DC sobre la fuerza y la potencia. Pese al alto componente anaeróbico de estas capacidades, se han notificado aumentos en la potencia en términos relativos (W/kg)33 y absolutos (W)23 (ver [Tabla 4](#Tabla4)), pudiéndose explicar por el efecto que han mostrado las DC sobre el mantenimiento de la MLG.

1. **Aplicabilidad y nuevas líneas de investigación**

Conforme desgranábamos las investigaciones revisadas, más evidente se hacía la disparidad en sus diseños y mecanismos de control, tanto en el plano dietético como en las pruebas físicas desarrolladas. Por tanto, resulta necesario por una parte, la realización de más estudios que permitan clarificar los resultados obtenidos por investigaciones previas, y por otro lado, estandarizar criterios de estudio y control que permitan dar mayor rigor a las conclusiones que se extraigan de las mismas. A continuación se expondrán algunas consideraciones que podrían ayudar en esta labor.

1. **Diseño y tipo de estudio e intervención.**

Como hemos podido comprobar previamente, los tiempos de seguimiento y estudio de los participantes en ocasiones pueden haber sido insuficientes para conseguir interpretar de manera fehaciente los resultados, sobre todo a la hora de discernir si en estos se ha llegado a producir la fase de cetoadaptación. Por tanto, consideramos recomendable que el periodo de aplicación experimental esté supeditado a dicho periodo, de tal forma que el estudio no concluya antes de que se haya producido. Además, se aconseja extender el seguimiento de los participantes una vez alcanzada la adaptación metabólica, a fin de comprobar la extensión temporal a partir de la cual se comienzan a estabilizar los factores de rendimiento, obteniendo una visión global sobre los efectos de las DC a medio y largo plazo en deportes de resistencia.

Así mismo, sería importante someter las estrategias dietéticas a un seguimiento rígido, por lo menos en el grupo de estudio que vaya a desarrollar una dieta cetogénica. Por tanto, convendría estandarizar las cantidades a ingerir de HC, verificando que en ningún momento se sobrepasa el 7% de las kcal totales diarias en el grupo que siga una dieta cetogénica36, garantizando que se alcanza un estado de cetosis óptima3,8. En este aspecto, la monitorización de los niveles de b-HB en sangre se postula como uno de los principales mecanismos de control9.

1. **Sistema de recogida de datos.**

En cuanto a los métodos de recogida de datos, resulta conveniente realizar controles periódicos tanto en la vertiente nutricional como en la de rendimiento físico.

En lo que respecta a la vertiente nutricional, debería cumplir dos funciones que eviten contaminación en los resultados. Por un lado, controlar los hábitos nutricionales de los integrantes del estudio, ya sea a través de sistemas de registro alimentario, administrando dietas entre los participantes o ambas. Por otra parte, reforzar estos mecanismos por previo apoyo de asesoramiento y educación nutricional.

En cuanto al ámbito del rendimiento físico, es de vital importancia examinar las capacidades de rendimiento de los participantes, a fin de homogeneizar los grupos de estudio. Esto puede llevarse a cabo a través de análisis espirométricos, o bien mediante el control de lactato sanguíneo. Obviamente, no es factible realizar estas pruebas con asiduidad, por lo que es fundamental la elaboración de programas de entrenamiento individualizados. Además, es recomendable dotarles de los conocimientos necesarios, que les permita asociar unas sensaciones físicas a un determinado estado fisiológico, optimizando el número de intervenciones de estudio.

1. **Variables de estudio.**

Dada la heterogeneidad procedimental y de resultados de los estudios revisados, se puede deducir que el campo de investigación sobre las DC y sus efectos sobre el rendimiento físico todavía es muy amplio a la par que desconocido. Por tanto, a continuación se exponen algunas de las variables que pueden resultar de interés de cara a nuevas investigaciones:

* La mayoría de estudios publicados no encontraron efectos significativos en la MLG17, 28, 32-34 (ver [Tabla 2](#Tabla2)). Sin embargo, ninguna de ellas siguió un protocolo de aumento en la ingesta de proteínas. Por tanto, el incremento controlado de la ingesta proteica dentro de las DC de carácter hipercalórico o incluso isocalórico, podría ser un factor revelador sobre su potencial o no a la hora de promover la hipertrofia muscular o mejorar la MLG, respectivamente, independientemente de la reintroducción de HC después de la cetoadaptación.
* Algunos estudios previos han determinado que los atletas de resistencia cetoadaptados ven limitada su capacidad de rendimiento a partir de las 3 horas de esfuerzo36. Sin embargo, todavía no se ha explorado cómo reaccionaría el organismo si a partir de ese periodo “limitante” se comienzan a ingerir HC.
* La implementación de DC no resulta un impedimento a la hora de realizar HIIT, incluso puede tener cierto potencial para mejorar las capacidades físicas asociadas a estos esfuerzos30-32. No obstante, sería muy interesante descubrir si hacer coincidir el periodo sensible de cetoadaptación junto con esfuerzos físicos de esta naturaleza en la pretemporada de deportes de resistencia, puede ayudar a optimizar todavía más los depósitos de glucógeno muscular en el periodo competitivo.

1. **Conclusiones**

A lo largo de esta revisión, hemos podido determinar que el desarrollo de dietas cetogénicas, correctamente planificadas en el marco nutricional a través de una ingesta de HC <7% de las calorías diarias36, y en un marco temporal que permita una correcta cetoadaptación, puede promover una disminución considerable del peso corporal y el % de masa grasa en atletas de resistencia, a la par que se mantiene la MLG de los mismos17, 22, 28-31, 33, por lo que puede ayudar en la mejora del rendimiento deportivo a través de la economía de carrera en términos biomecánicos. En cuanto a la cetoadaptación producida por la implementación de dietas cetogénicas, ésta promueve un aumento en las tasas de oxidación de grasas en pos de una disminución de la tasa de oxidación de HC22, 27-31, 33, 35, 36, amplificando la movilización de ácidos grasos circulantes y cetonas6, 41, al tiempo que optimiza los depósitos de glucógeno11.

Sin embargo, al extrapolar estos resultados a las diferentes modalidades deportivas de resistencia, todavía existe controversia al intentar determinar si el desarrollo de este tipo de estrategias dietéticas lleva de manera inherente a una mejora en el VO2máx, o si estos progresos son la consecuencia de una mejora en los parámetros de composición corporal38,39. Lo que sí podemos decir con cierta solidez al respecto, es que los atletas de resistencia de élite que desarrollaron una dieta cetogénica parecen tener una ventaja metabólica respecto a sus iguales de nivel amateur. Esto se debe principalmente al hecho de que los primeros son capaces de oxidar grasas a niveles de intensidad más elevados22.

Por otro lado, dado que las adaptaciones metabólicas propias de las DC requieren de un adecuado estado de cetosis8,20,33, y que no en todos los estudios revisados en este trabajo se han localizado parámetros de verificación para garantizar dicha adaptación metabólica, en investigaciones posteriores se requiere impetuosamente el establecimiento de mecanismos de control que permitan alcanzar dicho estado con objetividad, y en la medida de lo posible prever el momento en que se producirá.

Para concluir, se precisa de la realización de un mayor número de investigaciones, con mecanismos de control y diseños más estandarizados, que permitan asentar conclusiones de base sobre los potenciales efectos físicos y fisiológicos que puedan tener las DC sobre el rendimiento en deportistas de resistencia.

1. **Bibliografía**
2. Paoli A, Bianco A, Grimaldi K. The ketogenic diet and sport: A possible marriage? Exerc. Sport Sci. Rev. 2015; 43(3): 153-162.
3. Kang J, Ratamess N, Faigenbaum A, Bush J. Ergogenic properties of ketogenic diets in normal-weight individuals: A systematic review. Journal of the American College of Nutrition. 2020; 1-11
4. Miller V, Villamena F, Volek J. Nutritional ketosis and mitohormesis: Potential implications for mitochondrial function and human health. J Nutr Metab. 2018; 1–27.
5. Cox P, Kirk T, Ashmore T, Veech R, Griffin J, Clarke K. Nutritional ketosis alters fuel preference and thereby endurance performance in athletes. Cell Metabolism. 2016; 24: 256–268
6. Phinney S, Bistrian B, Wolfe R, Blackburn G. The human metabolic response to chronic ketosis without caloric restriction: physical and biochemical adaptation. Metabolism. 1983; 32(8): 757–68.
7. Glew R. You can get there from here: acetone, anionic ketones and even-carbon fatty acids can provide substrates for gluconeogenesis. Niger J Physiol Sci. 2010; 25: 2–4.
8. Pinckaers P, Churchward-Venne T, Bailey D, van Loon L. Ketone bodies and exercise performance: The next magic bullet or merely hype? Sports Med. 2017; 47: 383–391.
9. Evans M, Cogan K, Egan B. Metabolism of ketone bodies during exercise and training: physiological basis for exogenous supplementation. J Physiol. 2017; 595(9): 2857–2871
10. Thomsen H, Rittig N, Johannsen M, Møller A, Jørgensen J,Jessen N, Møller N. Effects of 3-hydroxybutyrate and free fatty acids on muscle protein kinetics and signaling during LPS-induced inflammation in humans: anticatabolic impact of ketone bodies. Am J Clin Nutr. 2018; 108: 857–867.
11. Koutnik A, D'Agostino D, Egan B. Anticatabolic Effects of Ketone Bodies in Skeletal Muscle. Trends Endocrinol Metab. 2019; 30(4): 227-229.
12. Howarth K, Phillips S, MacDonald M, Richards D, Moreau N, Gibala M. Effect of glycogen availability on human skeletal muscle protein turnover during exercise and recovery. J Appl Physiol. 2010; 109(2): 431–438.
13. Rittig N, Bach E, Thomsen H, Pedersen S, Nielsen T, Jørgensen J, Jessen N, Møller N. Regulation of lipolysis and adipose tissue signaling during acute endotoxin-induced inflammation: a human randomized crossover trial. Plos One. 2016; 11(9).
14. Jeukendrup A. Periodized nutrition for athletes. Sports Med. 2017; 47(S1): 51–63.
15. Noakes T, Windt J. Evidence that supports the prescription of low-carbohydrate high-fat diets: a narrative review. Br J Sports Med. 2017; 51(2):133–139.
16. Mc Swiney F, Doyle L, Plews D, Zinn C. Impact of ketogenic diet on athletes: Current insights. Open Access Journal of Sports Medicine. 2019; 10: 171–183
17. Gudzune K, Doshi R, Mehta A, Chaudhry Z, Jacobs D, Vakil R, Lee CJ, Bleich S, Clark J. Efficacy of commercial weight-loss programs: an updated systematic review. Ann Intern Med. 2015; 162: 501-512.
18. Vargas S, Romance R, Petro J, Bonilla D, Galancho I, Espinar S, Kreider R, Benítez-Porres J. Efficacy of ketogenic diet on body composition during resistance training in trained men: a randomized controlled trial. Journal of the International Society of Sports Nutrition. 2018; 15: 31.
19. Chang C, Borer K, Lin P. Low‐carbohydrate‐high‐fat diet: Can it help exercise performance? Journal of Human Kinetics volumen. 2017; 56: 81-92
20. Burke L. Re-examining high-fat diets for sports performance: Did we call the ‘nail in the coffin’ too soon? Sports Med. 2015; 45 (S1): 33–49.
21. Ma S, Suzuki K. Keto-Adaptation and Endurance Exercise Capacity, Fatigue Recovery, and Exercise-Induced Muscle and Organ Damage Prevention: A Narrative Review. Sports (Basel). 2019; 7(2): 1-10.
22. Romijn J, Coyle E, Sidossis L, Gastaldelli A, Horowitz J, Endert E, and Wolfe R. Regulation of endogenous fat and carbohydrate metabolism in relation to exercise intensity and duration. Am J Physiol Endocrinol Metab. 1993; 265(3)
23. Burke L, Ross M, Garvican-Lewis L, Welvaert M, Heikura I, Forbes S, Mirtschin J, Cato L, Strobel N, Sharma A, Hawley J. Low carbohydrate, high fat diet impairs exercise economy and negates the performance benefit from intensified training in elite race walkers. J Physiol. 2017; 595(9): 2785–2807
24. Wilson J, Lowery R, Roberts M, Sharp M, Joy J, Shields K, Partl J, Volek J, D’Agostino D. The effects of ketogenic dieting on body composition, strength, power, and hormonal profiles in resistance training males. J Strength Cond Res. 2017.
25. Zajac A, Poprzecki S, Maszczyk A, Czuba M, Michalczyk M, Zydek G. The effects of a ketogenic diet on exercise metabolism and physical performance in off-road cyclists. Nutrients. 2014; 6(7): 2493–2508.
26. Paoli A, Bosco G, Camporesi E, Mangar D. Ketosis, ketogenic diet and food intake control: a complex relationship. Front Psychol. 2015; 6(27): 1-9.
27. Lecube A, Monereo S, Rubio MA, Martínez-de-Icaya P, Martí A, Salvador J, Masmiquel L, Goday A, Bellido D, Lurbe E, García-Almeida JM, Tinahones FJ, García-Luna PP, Palacios E, Gargallo M, Breton I, Caixàs A, Menéndez E, PuigDomingo M, Casanueva FF. Prevencion, diagnóstico y tratamiento de la obesidad. Posicionamiento SEEDO 2016.SEEDO. 2016
28. Durkalec-Michalski K, Nowaczyk P, Siedzik K. Effect of a four-week ketogenic diet on exercise metabolism in CrossFittrained athletes. J Int Soc Sports Nutr. 2019; 16(1): 1-15.
29. Heatherly A, Killen L, Smith A, Waldman H, Seltmann C, Hollingsworth A, O’Neal E. Effects of ad libitum low carbohydrate high-fat dieting in middle-age male runners. Med Sci Sports Exerc. 2018; 50(3): 570–579.
30. Shaw D, Merien F, Braakhuis A, Maunder E, Dulson D. Effect of a ketogenic diet on submaximal exercise capacity and efficiency in runners. Med Sci Sports Exerc. 2019; 51(10): 2135–2146.
31. Cipryan L, Plews D, Ferretti A, Maffetone P, Laursen P. Effects of a 4-week very low-carbohydrate diet on high-intensity interval training responses. J Sports Sci Med. 2018; 17(2): 259–267.
32. Dostal T, Plews D, Hofmann P, Laursen P, Cipryan L. Effects of a 12-week very-low carbohydrate high-fat diet on maximal aerobic capacity, high-intensity intermittent exercise, and cardiac autonomic regulation: non-randomized parallel-group study. Front Physiol. 2019; 10(912): 1-12.
33. Kephart W, Pledge C, Roberson P, Mumford P, Romero M, Mobley C, Martin J, Young K, Lowery R, Wilson J, Huggins K, Roberts M. The three-month effects of a ketogenic diet on body composition, blood parameters, and performance metrics in crossfit trainees: A pilot study. Sports (Basel). 2018; 6(1): 1-11.
34. McSwiney F, Wardrop B, Hyde P, Lafountain R, Volek J, Doyle L. Keto-adaptation enhances exercise performance and body composition responses to training in endurance athletes. Metabolism. 2018; 81: 25–34.
35. Urbain P, Strom L, Morawski L, Wehrle A, Deibert P, Bertz H. Impact of a 6-week non-energy-restricted ketogenic diet on physical fitness, body composition and biochemical parameters in healthy adults. Nutr Metab. 2017; 14(1): 17.
36. Volek J, Freidenreich D, Saenz C, Kunces L, Creighton B, Bartley J, Davitt PM, Munoz C, Anderson J, Maresh C, Lee E, Schuenke M, Aerni G, Kraemer W, Phinney S. Metabolic characteristics of ketoadapted ultra-endurance runners. Metabolism. 2016; 65(3): 100–110.
37. Webster C, Noakes T, Chacko S, Swart J, Kohn T, Smith J. Gluconeogenesis during endurance exercise in cyclists habituated to a long-term low carbohydrate high-fat diet. Physiol. 2016; 594 (15): 4389–4405
38. Bueno N, de Melo I, de Oliveira S, da Rocha Ataide T. Very-low carbohydrate ketogenic diet vs Low-fat diet for long-term weight loss: a meta-analysis of randomised controlled trials. Br J Nutr. 2013; 110: 1178–87
39. Kang J. Nutrition and metabolism in sports, exercise, and health. 2nd ed. New York (NY): Routledge; 2018; 190–211.
40. Foster C, Lucia A. Strategies to improve running economy. Sports Med. 2007; 37(4–5): 316–319.
41. Ramírez-Vélez R, Argothy-Bucheli R , Sánchez-Puccini MB, Meneses-Echávez JF, López-Albán CA. Características antropométricas y funcionales de corredores colombianos de élite de larga distancia. 2015; 28(3): 240-7.
42. Helge J, Watt P, Richter E, Rennie M, Kiens B. Fat utilization during exercise: adaptation to a fat-rich diet increases utilization of plasma fatty acids and very low density lipoprotein- triacylglycerol in humans. J Physiol. 2001; 537(3):1009–1020.
43. Brooks G, Mercier J. Balance of carbohydrate and lipid utilization during exercise: the “crossover” concept. J Appl Physiol. 1994; 76: 2253-2261
44. Burke L, Hawley J, Wong S, Jeukendrup A. Carbohydrates for training and competition. J Sports Sci. 2011; 29 (S1): 17-27.
45. Ulloa D, Feriche B, Barboza P, Padial P. Estudio comparado de la intensidad de entrenamiento sobre la máxima tasa de oxidación de grasas. Nutr Hosp. 2015; 31(1): 421-429.
46. Puchalska P, Crawford P. Multi-dimensional roles of ketone bodies in fuel metabolism, signaling, and therapeutics. Cell Metab. 2017; 25: 262–84.
47. Harvey K, Holcomb L, Kolwicz S. Ketogenic Diets and Exercise Performance. Nutrients 2019; 11(2296): 1-16.
48. González-Mohíno F, Jiménez J, Juárez D, Barragán R, Yustres I, González-Ravé JM. Economía de carrera y rendimiento. Esfuerzos de alta y baja intensidad en el entrenamiento y calentamiento. Revisión bibliográfica. Arch Med Deporte. 2018; 35(2): 108-116.
49. Pallarés, J; Morán-Navarro, R. Propuesta metodológica para el entrenamiento de la resistencia cardiorrespiratoria. Journal of Sport and Health Research. 2012; 4(2): 119-136.