Revista Panamericana de Morfología

Sociedad Mexicana de Anatomía A.C.

Revisión sistemática

Rendimiento en triatlón: impactos metabólicos, inflamatorios y adaptaciones fisiológicas en modalidades de resistencia extrema

Eliana Marley Mutiz España[1]*, Leidy Diana Imbachi Imbachi[2], Jonathan Alexander Cerón López[3], Fleider Leovani Gómez Cabrera[4], María Virginia Pinzón-Fernández[3], Jhan Sebastián Saavedra Torres[5]

1. Universidad de Caldas, Departamento de Medicina Interna, Manizales, Colombia.
2. Universidad Santiago de Cali. Departamento de Urgencias, Hospital San Juan de DIOS, Cali- Colombia.
3. Universidad del Cauca, Popayán, Colombia.
4. Universidad de Nariño Pasto, Nariño, Colombia.
5. EUNEIZ Universidad Vitoria-Gasteiz, País vasco. Integrante de corporación del laboratorio al campo, universidad del cauca; Grupo de Investigación en Salud (GIS), Popayán. Cauca, Colombia.

*** Autor de correspondencia:**
Eliana Marley Mutiz España
✉ elimutiz@hotmail.com

RESUMEN

El triatlón, deporte de alta resistencia, genera adaptaciones complejas en los sistemas inmunológico, cardiovascular y metabólico. En el sistema inmunológico, las competencias prolongadas pueden reducir transitoriamente la inmunoglobulina A y los neutrófilos, aumentando la vulnerabilidad a infecciones, aunque estas alteraciones se normalizan en pocos días. Además, se activa una respuesta inflamatoria mediada por citocinas como IL-6, equilibrada por IL-10 y macrófagos M2, promoviendo reparación tisular. En el sistema cardiovascular, los eventos prolongados elevan marcadores cardíacos como troponina y BNP; sin embargo, estos cambios son reversibles en atletas entrenados. A nivel metabólico, el estrés oxidativo es moderado por una respuesta antioxidante eficaz, destacando el rol del CoQ10 en reducir daño oxidativo y mejorar la recuperación muscular. En adultos mayores, el triatlón mejora la composición corporal, los lípidos séricos y el bienestar psicológico, demostrando ser una actividad transformadora incluso en edades avanzadas.

Palabras clave: Sistema inmunológico, Sistema cardiovascular, Metabolismo, Triatlón, Estrés oxidativo, Citoquinas.

ABSTRACT

Triathlon, a high-endurance sport, induces complex adaptations in the immune, cardiovascular, and metabolic systems. In the immune system, prolonged competitions can transiently reduce immunoglobulin A and neutrophil levels, increasing susceptibility to infections, although these alterations normalize within a few days. Additionally, an inflammatory response mediated by cytokines such as IL-6 is activated, balanced by IL-10 and M2 macrophages, promoting tissue repair. In the cardiovascular system, prolonged events elevate cardiac markers like troponin and BNP; however, these changes are reversible in trained athletes. At the metabolic level, oxidative stress is moderated by an effective antioxidant response, with CoQ10 playing a key role in reducing oxidative damage and improving

muscle recovery. In older adults, triathlons enhance body composition, serum lipids, and psychological well-being, demonstrating its transformative potential even in advanced ages.

Keywords: Immune system; Cardiovascular system, Metabolism, Triathlon, Oxidative stress, Cytokine

INTRODUCCIÓN

El triatlón, una disciplina de resistencia extrema que combina natación, ciclismo y carrera a pie, exige un alto rendimiento físico y metabólico. La hidratación y el consumo adecuado de carbohidratos son esenciales para optimizar el desempeño y prevenir complicaciones fisiológicas durante competencias prolongadas (**Gillum *et al*., 2006; Jeukendrup *et al*., 2005; Rogers *et al*., 1997)**. El ejercicio de larga duración agota los depósitos de glucógeno, incrementa el estrés oxidativo y promueve respuestas inflamatorias, lo que puede comprometer tanto el rendimiento como la salud del atleta **(Alghannam *et al*., 2016; Gillum *et al*., 2006; Impellizzeri *et al*., 2023).**

La deshidratación afecta negativamente la termorregulación y el equilibrio cardiovascular, mientras que una ingesta insuficiente de carbohidratos reduce la disponibilidad energética, limitando la capacidad física. Estrategias adecuadas de hidratación y consumo de carbohidratos no solo mejoran el rendimiento, sino que también modulan respuestas inflamatorias y promueven adaptaciones fisiológicas beneficiosas **(Alghannam *et al*., 2016; Craven *et al*., 2021).**

Esta revisión bibliográfica analiza los impactos metabólicos, inflamatorios y las adaptaciones relacionadas con la hidratación y carbohidratos en triatlones, resaltando su relevancia en deportes de resistencia extrema.

METODOLOGÍA

A continuación, se presenta la metodología estructurada en forma de tabla con propósitos académicos, acordado por los autores **(Tabla 1)**.

Tabla 1. Metodología descrita por los autores.

Búsqueda de literatura	Se realizó una búsqueda exhaustiva en bases de datos científicas reconocidas, como PubMed, Nature, Scopus y Web of Science. Esta búsqueda incluyó estudios publicados entre los años 1981 al 2024, relacionados con temas como triatlón, rendimiento deportivo, hidratación, ingesta de carbohidratos, inflamación y biomarcadores metabólicos. Se emplearon términos clave como "triatlón", "hidratación", "suplementación", "inflamación", "biomarcadores cardíacos y musculares" y "adaptaciones inmunológicas".
Tipo de estudios:	Artículos originales, revisiones sistemáticas, metanálisis.
Idiomas:	Inglés y español.
Población:	Triatletas (élite o amateurs) en diversas modalidades.
Estrategias de búsqueda:	La estrategia de búsqueda empleó operadores booleanos para equilibrar exhaustividad y precisión: se usó “triatlón” OR “Ironman” para incluir tanto estudios genéricos como análisis específicos de larga distancia; “hidratación” OR

	"suplementación nutricional" OR "ingesta de carbohidratos" agrupa todas las modalidades de aporte hídrico y energético, y "biomarcadores inflamatorios" OR "biomarcadores metabólicos" OR "estrés oxidativo" abarca los principales dominios de respuesta fisiológica al ejercicio extremo. Al conectar estos tres bloques con AND, se garantizó que los artículos seleccionados aborden simultáneamente la modalidad deportiva, la estrategia nutricional/hídrica y la medición de biomarcadores, focalizando así la revisión en la intersección exacta de los conceptos de interés.
CRITERIOS DE SELECCIÓN	
Criterios de inclusión:	1. Estudios originales, revisiones sistemáticas y metanálisis que aborden triatlones en sus distintas modalidades (distancia corta, olímpica, Ironman). 2. Evaluaciones que analicen hidratación, nutrición y biomarcadores metabólicos e inmunológicos en triatletas.
Criterios de exclusión:	3. Investigaciones enfocadas en deportes de resistencia distintos al triatlón (maratón, ciclismo, natación). 4. Estudios publicados en idiomas diferentes al inglés o español sin traducción accesible.
Interpretación y discusión	Se contrastarón los hallazgos sobre la efectividad de estrategias nutricionales y de hidratación. Además, se analizó cómo las adaptaciones inmunológicas y metabólicas influyen en la recuperación post-ejercicio, y se discutieron las implicaciones clínicas relacionadas con los biomarcadores cardíacos y musculares tras competiciones en diferentes distancias.
Método de selección de estudios:	Se realizó una revisión de estudios experimentales en fisiología del ejercicio, con un enfoque en la hidratación, el consumo de carbohidratos y su relación con el rendimiento físico en triatlón. De un total inicial de 232 artículos identificados mediante la búsqueda en bases de datos científicas, tras una evaluación rigurosa basada en criterios de relevancia y calidad metodológica, se seleccionaron 46 referencias pertinentes para esta revisión.
Factores de la revisión encontrados:	Influencia de la estrategia de hidratación y el consumo de carbohidratos en el rendimiento deportivo, la recuperación metabólica y el estrés oxidativo en deportistas de resistencia. También se consideró el papel de los factores ambientales, como la temperatura y la humedad, en la modulación del rendimiento físico.
Clasificación de estudios:	Los estudios se clasificaron en función de la intervención (protocolos de hidratación y suplementación con carbohidratos), la población estudiada (atletas recreativos versus de élite) y el diseño metodológico (estudios controlados aleatorizados, ensayos de campo y estudios observacionales).

RESULTADOS

Hidratación, carbohidratos y rendimiento en triatlón

El triatlón, compuesto por las disciplinas de natación, ciclismo y carrera, genera una demanda fisiológica y metabólica significativa que varía en función de la duración de la prueba **(Jeukendrup, 2011; Jeukendrup *et al*., 2005; Olcina *et al*., 2018).** Durante estas competencias, los triatletas enfrentan condiciones que incluyen la depleción de glucógeno muscular y hepático, la deshidratación progresiva y alteraciones en el

equilibrio hidroelectrolítico, como la hiponatremia. Asimismo, la hipertermia inducida por el ejercicio prolongado puede desencadenar disfunción termorregulatoria, lo que incrementa el riesgo de lesiones por calor y afecta la homeostasis sistémica, comprometiendo tanto el rendimiento físico como la integridad fisiológica **(Hoffman, 2019; Jeukendrup & Baker, 2015; Notley *et al*., 2024)**

La estrategia nutricional previa a la competencia juega un rol crucial en la optimización del rendimiento. Los depósitos de glucógeno, principal sustrato energético durante ejercicios de alta intensidad, deben estar al máximo **(Burke *et al*., 2011; Placentino *et al*., 2021; Thomas *et al*., 2016).** Si bien la super-compensación tradicional con dietas altas en carbohidratos es ampliamente utilizada, enfoques más recientes sugieren que estrategias nutricionales menos agresivas, combinadas con ajustes específicos en el entrenamiento, pueden ser igual de efectivas **(Burke *et al*., 2011; Jeukendrup, 2017; Podlogar & Wallis, 2022).**

Durante la prueba, el ciclismo representa una ventana clave para la reposición de carbohidratos y líquidos. Se recomienda una ingesta de carbohidratos a razón de 60-70 gramos por hora, mediante soluciones isotónicas con concentraciones entre el 5-8%, así como la inclusión de sodio (30-50 mmol/L) para mitigar el riesgo de hiponatremia y favorecer la retención hídrica **(Á *et al*., 2025; Hoffman, 2019).** En relación con el equilibrio hídrico, la hipo-hidratación severa (>2% del peso corporal) altera el volumen plasmático, disminuye el flujo sanguíneo cutáneo y reduce la capacidad de disipar el calor, favoreciendo la hipertermia **(Goulet, 2012; Johnson, 2010; Simmons *et al*., 2011).**

Adicionalmente, estas condiciones afectan negativamente el vaciamiento gástrico, incrementan la incidencia de síntomas gastrointestinales y exacerban la fatiga periférica **(Rehrer *et al*., 1990; Costa *et al*., 2020; Karhu *et al*., 2017).** Por otro lado, aunque el agotamiento de glucógeno suele ser el principal limitante metabólico, algunos triatletas presentan adaptaciones que permiten una mayor oxidación de grasas y el uso eficiente de lactato como sustrato energético. Estas respuestas adaptativas subrayan la necesidad de un enfoque personalizado en la planificación nutricional y fisiológica para optimizar tanto el rendimiento como la seguridad en este deporte de resistencia **(Howard & Margolis, 2020; Maunder *et al*., 2018; Purdom *et al*., 2018).**

Impacto inflamatorio y metabólico del triatlón

El triatlón, como deporte de resistencia extrema, induce respuestas fisiológicas y celulares significativas que involucran tanto a las citocinas inflamatorias como a las antiinflamatorias, así como a diversos marcadores metabólicos en los atletas **(Peake *et al*., 2017; Pedersen & Febbraio, 2008).** Esta revisión sistemática, que incluyó 10 estudios publicados entre 2000 y 2019, concluye que la práctica de triatlón en sus distintas modalidades, desde distancias cortas hasta Ironman o campeonatos mundiales, induce un aumento agudo de citocinas proinflamatorias (Interleucina 1 [IL-1], Interleucina 6 [IL-6], factor de necrosis tumoral alfa [TNF-α]) y de quimiocinas como la proteína quimioatrayente de monocitos (MCP-1), lo cual refleja una respuesta inmunitaria intensa y la movilización de leucocitos hacia los tejidos sometidos a estrés físico extremo **(Gomez-Merino *et al*., 2006; Suzuki *et al*., 2006).**

En contraste, se identificó una respuesta compensatoria a través de la producción de citocinas antiinflamatorias, particularmente la interleucina-4 (IL-4) y la interleucina-10 (IL-10), especialmente

notoria en las modalidades Ironman y triatlón de distancia larga. Este balance entre citocinas proinflamatorias y antiinflamatorias subraya la capacidad del organismo para modular la inflamación aguda asociada al ejercicio **(de Sousa Fernandes *et al*., 2023; Docherty *et al*., 2022; Suzuki, 2018).**
Asimismo, los marcadores metabólicos indicaron procesos de daño muscular, estrés fisiológico y fatiga **(**Baskerville *et al*., 2024; Gama *et al*., 2022; Proschinger *et al*., 2021)**.** Entre ellos, se registraron aumentos significativos de la creatina quinasa (CK), el lactato deshidrogenasa (LDH), el cortisol y el ácido láctico en sangre. Estos hallazgos sugieren que la intensidad y la duración del triatlón desencadenan no solo respuestas inflamatorias, sino también adaptaciones metabólicas complejas **(de Sousa Fernandes *et al*., 2023; Momesso Santos *et al*., 2022; Suzuki *et al*., 2006).**
El aumento de proteínas proinflamatorias como IL-6 o TNF-α durante el triatlón no implica necesariamente daño tisular patológico **(Peake *et al*., 2017; Pedersen & Febbraio, 2008).** En el contexto del ejercicio prolongado, estas citocinas actúan como moléculas de señalización metabólica y adaptativa, regulando la disponibilidad de sustratos energéticos, estimulando la lipólisis, y facilitando la comunicación entre tejidos bajo estrés **(de Sousa Fernandes *et al*., 2023; Momesso Santos *et al*., 2022; Suzuki *et al*., 2006)**. Lejos de representar inflamación crónica perjudicial, su expresión transitoria forma parte de una respuesta fisiológica que permite al organismo responder eficazmente a las exigencias del esfuerzo extremo. Esta respuesta es autolimitada y suele resolverse en pocas horas, activando también vías antiinflamatorias compensatorias como IL-10 y TGF-β **(Peake *et al*., 2017; Pedersen & Febbraio, 2008).**

Efectos inmunológicos y cardiovasculares en atletas entrenados

El triatlón, como deporte de alta resistencia, produce una interacción compleja entre los sistemas inmunológico, metabólico y cardiovascular de los atletas. Este deporte exige al cuerpo adaptarse a demandas extremas que incluyen inflamación aguda, estrés oxidativo y alteraciones cardiovasculares transitorias, dependiendo de la modalidad y la preparación del deportista **(Neubauer *et al*., 2008; Žarak *et al*., 2021).** En términos inmunológicos, la investigación ha identificado una disminución transitoria en la cantidad de glóbulos blancos, especialmente neutrófilos, después de competiciones de media y larga distancia **(Campbell & Turner, 2018; Walzik *et al*., 2021).**
Este fenómeno, atribuido a la apoptosis inducida por el ejercicio, podría aumentar la susceptibilidad a infecciones bacterianas, especialmente en pieles lesionadas o con abrasiones menores. Además, se ha observado una disminución en la inmunoglobulina A, un anticuerpo clave en la defensa de las mucosas, lo que aumenta el riesgo de infecciones del tracto respiratorio superior, particularmente en el periodo postcompetitivo. Curiosamente, estas alteraciones inmunológicas tienden a normalizarse pocos días después de la competición, sugiriendo mecanismos adaptativos del sistema inmunológico **(Peake, Neubauer, Walsh, *et al*., 2017; Vleck *et al*., 2014).**
Este fenómeno podría representar un mecanismo de redistribución inmunológica: el cuerpo prioriza la reparación tisular y la homeostasis post-esfuerzo sobre la vigilancia mucosal. La apoptosis transitoria de neutrófilos y la disminución de IgA reflejan una estrategia adaptativa para conservar recursos energéticos, limitar inflamación excesiva y evitar inmunopatología, reactivando las defensas una vez superado el estrés físico agudo **(Campbell & Turner, 2018; Mia & Singh, 2022; Zhou *et al*., 2025).**

Por otro lado, el estrés oxidativo, vinculado a la peroxidación lipídica y al daño muscular, se incrementa significativamente durante eventos prolongados como el Ironman. Sin embargo, atletas mejor entrenados muestran respuestas antioxidantes más robustas, lo que podría mitigar los efectos perjudiciales del ejercicio extremo. Esta capacidad adaptativa parece estar modulada por el nivel de entrenamiento y la preparación específica para la competencia **(Mallett & McGrath, 2024; Kawamura & Muraoka, 2018; Thirupathi *et al*., 2020).**

En cuanto a las respuestas cardiovasculares, eventos de larga duración pueden inducir alteraciones transitorias en marcadores de lesión miocárdica, como la troponina cardíaca y el péptido natriurético tipo B, aunque suelen normalizarse en el lapso de una semana. Sin embargo, algunos estudios sugieren que competiciones de alta intensidad y duración prolongada podrían asociarse con disfunción ventricular izquierda temporal y edema pulmonar, particularmente en atletas menos preparados **(Hédon *et al*., 2025; Stavroulakis & George, 2020).**

Adaptaciones inmunológicas en el triatlón

El triatlón, como actividad física extrema, desencadena una cascada de eventos inmunológicos que involucran tanto a la respuesta innata como a la adaptativa **(Peake *et al*., 2017; Pedersen & Febbraio, 2008).** Durante el ejercicio de alta intensidad, como en las diferentes modalidades de triatlón (Ironman, larga distancia, olímpico, velocidad y nivel élite), se genera un estrés mecánico y metabólico significativo sobre los tejidos, especialmente los músculos esqueléticos, lo que activa las vías inflamatorias **(de Sousa Fernandes *et al*., 2023; Momesso Santos *et al*., 2022).** Inicialmente, el daño muscular y el estrés oxidativo inducen la liberación de patrones moleculares asociados a daño (DAMPs) por las células afectadas. Estos DAMPs son reconocidos por receptores tipo Toll (TLRs) en las células del sistema inmunológico innato, como los macrófagos y las células dendríticas, promoviendo la secreción de citocinas proinflamatorias como la IL-6, el TNF-α y la IL-8. Este fenómeno es especialmente pronunciado en modalidades de alta intensidad como el triatlón olímpico y de velocidad, donde se observaron picos significativos de estas citocinas. La IL-8, además, actúa como quimioatrayente, reclutando neutrófilos hacia los tejidos lesionados, lo que amplifica la inflamación local **(Cavalcante *et al*., 2017; Suzuki *et al*., 2020; Ziemkiewicz *et al*., 2021).**

Por otro lado, en modalidades de larga duración, como el Ironman, se observa un equilibrio en la respuesta inflamatoria debido a la activación de vías antiinflamatorias compensatorias **(Ayari *et al*., 2023; Chen & He, 2025; de Sousa Fernandes *et al*., 2023).** Los linfocitos T reguladores y los monocitos liberan interleucinas como la IL-4 e IL-10, que suprimen la producción de citocinas proinflamatorias y modulan la actividad de los macrófagos hacia un fenotipo M2 antiinflamatorio **(Baskerville *et al*., 2024; Gama *et al*., 2022; Proschinger *et al*., 2021).** Este mecanismo contribuye a la resolución de la inflamación y al proceso de reparación tisular **(Mia *et al*., 2014; Muñoz *et al*., 2020).**

En cuanto a los marcadores metabólicos, el estrés fisiológico del triatlón eleva los niveles de cortisol, un glucocorticoide que regula negativamente la inflamación crónica, pero que, en exceso, puede alterar la

homeostasis inmunitaria. También se incrementan enzimas como la CK y la LDH, que son indicativas de daño muscular y estrés metabólico **(Brancaccio *et al*., 2007; Callegari *et al*., 2017; Mennitti *et al*., 2020).** Adicionalmente, los factores de crecimiento vascular, como el factor de crecimiento endotelial vascular (VEGF), una familia de proteínas clave en la angiogénesis y la permeabilidad vascular), aumentan en respuesta a la hipoxia inducida por el ejercicio, facilitando la angiogénesis y la recuperación vascular **(Amaral *et al*., 2001; Birot *et al*., 2003; Booth & Thomason, 1991).**

En síntesis, las modalidades de triatlón inducen respuestas inmunológicas complejas, donde la inflamación aguda, mediada por citocinas proinflamatorias, se equilibra mediante mecanismos antiinflamatorios y adaptaciones metabólicas **(Cerqueira *et al*., 2019; Momesso Santos *et al*., 2022),** asegurando la recuperación y la homeostasis post-ejercicio. Estas respuestas destacan la capacidad del organismo para adaptarse a demandas físicas extremas mediante la interacción de sistemas inmunológicos y metabólicos **(Lombardo *et al*., 2019).**

Efectos metabólicos y funcionales del CoQ10

La suplementación con coenzima Q10, conocida como CoQ10, se ha convertido en un tema de interés en la medicina del deporte debido a su papel como cofactor esencial en la producción de energía mitocondrial y su capacidad antioxidante **(Fernandes *et al*., 2023; Ovchinnikov *et al*., 2022).** Un análisis sistemático de 16 estudios seleccionados ha permitido identificar múltiples efectos benéficos de esta molécula en atletas de diversas modalidades deportivas, como triatlón, ciclismo y natación **(Emami *et al*., 2018; Fernandes *et al*., 2023).**

En términos bioquímicos, la CoQ10 actúa reduciendo marcadores de estrés oxidativo, como hidroperóxidos y especies reactivas de oxígeno, mientras aumenta los niveles de actividad antioxidante a través de catalasa y otros mediadores. Este equilibrio REDOX favorece la protección celular frente a los daños acumulativos derivados de entrenamientos intensos y competiciones prolongadas ***(Gutierrez-Mariscal et al., 2020; Quinzii et al., 2010).***

Por otro lado, se observó una mejora en los parámetros hepáticos con disminuciones significativas de enzimas como la alanina aminotransferasa (ALT) y el aspartato aminotransferasa (AST). Estos hallazgos sugieren una protección contra el daño hepático inducido por el ejercicio, lo cual es especialmente relevante para atletas sometidos a altas cargas metabólicas ***(Fernandes et al., 2023; Soleimani Damaneh et al., 2023).*** En el ámbito funcional, la suplementación de CoQ10 demostró beneficios específicos en el rendimiento anaeróbico, evidenciados por un aumento en la fuerza muscular, el trabajo total y el tiempo hasta alcanzar el umbral anaeróbico. Sin embargo, no se reportaron cambios significativos en la composición corporal ni en el rendimiento aeróbico, lo que indica que los efectos del CoQ10 pueden estar más relacionados con la potencia explosiva y la recuperación muscular que con el consumo máximo de oxígeno ***(Fernandes et al., 2023; Sarmiento et al., 2016).***

De forma general, los resultados sugieren que la CoQ10 es una herramienta útil para mejorar parámetros fisiológicos clave en atletas. A pesar de la variabilidad en las dosis y duraciones de los protocolos estudiados, su capacidad para mitigar el estrés oxidativo y optimizar el metabolismo energético la

posiciona como un suplemento prometedor para quienes buscan maximizar su rendimiento físico y proteger su salud a largo plazo **(Drobnic *et al*., 2022; Sarmiento *et al*., 2016).**

Biomarcadores cardíacos y musculares tras triatlón

Un estudio (*Changes of cardiac biomarkers after ultradistance and standard-distance triathlon*) investigó los efectos del triatlón en biomarcadores relacionados con el daño muscular y cardíaco, comparando el impacto de triatlones de distancia estándar y ultradistancia en triatletas masculinos **(Le Goff *et al*., 2022; Park & Kwak, 2019).** Se encontró que las pruebas de ultradistancia ejercen un mayor impacto sobre los tejidos musculares en comparación con las pruebas de menor duración, un hallazgo respaldado por el incremento significativo de ciertos biomarcadores en la sangre **(Martínez-Navarro *et al*., 2020; Partyka & Waśkiewicz, 2021; Tiller & Millet, 2025).** Este análisis demuestra que los triatlones de ultradistancia generan un impacto muscular significativamente mayor en comparación con las distancias estándar, sin evidencia de daño cardíaco clínicamente relevante **(Martínez-Navarro *et al*., 2020; Park & Kwak, 2019; Vleck *et al*., 2014).** Entre los marcadores analizados, la CK, la mioglobina y el LDH, conocidos indicadores de daño muscular mostraron aumentos significativos tras ambas modalidades de triatlón. Sin embargo, estos incrementos fueron notablemente más elevados en los triatlones de ultradistancia, tanto al finalizar la carrera como durante la fase de recuperación **(Alkhatib *et al*., 2020; Areces *et al*., 2015; Park & Kwak, 2019).** Este resultado refleja la mayor exigencia física y metabólica asociada a las distancias prolongadas, las cuales demandan una intensa participación del sistema muscular esquelético **(Alkhatib *et al*., 2020; Park & Kwak, 2019).**

Por otro lado, los biomarcadores cardíacos revelaron un panorama diferente. La isoenzima MB de la creatina quinasa (CK-MB: en español es creatina quinasa músculo-cerebro), asociada a la función cardíaca, aumentó significativamente después de las carreras en ambas distancias, pero no se observaron diferencias relevantes entre las pruebas de distancia estándar y ultradistancia **(Alkhatib *et al*., 2020; Areces *et al*., 2015; Park & Kwak, 2019).** Además, un dato importante fue que los niveles de troponina T cardíaca (cTnT), un marcador altamente específico de daño miocárdico, permanecieron estables en ambas modalidades. Este hallazgo sugiere que, en atletas entrenados, la duración y la intensidad del ejercicio no alcanzaron niveles suficientes para desencadenar daño cardíaco medible **(Alkhatib *et al*., 2020; Areces *et al*., 2015; Park & Kwak, 2019).**

Adicionalmente, el estudio reportó un aumento en los niveles de cortisol y ácidos grasos libres (FFA) tras la competición, especialmente en triatlones de ultradistancia. No obstante, estas diferencias disminuyeron durante la fase de recuperación, lo que indica una adecuada adaptación fisiológica al estrés generado por el ejercicio **(Alves *et al*., 2020; Cho *et al*., 2023; Colling *et al*., 2023; Wigernaes *et al*., 2001).**

Entrenamiento de fuerza en adultos mayores

El envejecimiento se asocia con una disminución en los niveles de actividad física, lo cual contribuye a cambios desfavorables en la composición corporal, como el aumento de la masa grasa y la reducción de la masa muscular **(González-Rocha *et al*., 2022; Hyvärinen *et al*., 2025).** Este fenómeno incrementa el riesgo de desarrollar condiciones metabólicas adversas y una inflamación de bajo grado. Para mitigar estos

efectos, se ha propuesto el entrenamiento de fuerza como una estrategia eficaz. Este estudio investigó el impacto de la frecuencia del entrenamiento de resistencia en adultos mayores saludables, evaluando cambios en la composición corporal, el perfil lipídico y los marcadores inflamatorios **(González-Rocha *et al*., 2022; Ihalainen *et al*., 2019; Turpela *et al*., 2017).**

Determinó que entrenar al menos dos veces por semana es eficaz para mejorar la composición corporal y el perfil lipídico en adultos mayores saludables, aunque los mayores beneficios se observaron con tres sesiones semanales. La frecuencia del entrenamiento, sin embargo, no tuvo un impacto sustancial sobre los marcadores de inflamación o el metabolismo glucémico **(González-Rocha *et al*., 2022; Ihalainen *et al*., 2019; Turpela *et al*., 2017).**

A lo largo de seis meses, 92 participantes de entre 65 y 75 años fueron asignados aleatoriamente a uno de cuatro grupos: entrenamiento una, dos o tres veces por semana, y un grupo control sin entrenamiento **(Ihalainen *et al*., 2019; Turpela *et al*., 2017).** Se utilizó absorciometría por rayos X de doble energía para medir la composición corporal, mientras que muestras de sangre en ayuno se analizaron antes y después de la intervención. Entre los hallazgos destacados, los participantes que entrenaron tres veces por semana presentaron reducciones significativas en la masa grasa total y abdominal, además de una disminución en los niveles de lipoproteína de baja densidad (LDL) y un aumento de la lipoproteína de alta densidad (HDL) en todos los grupos de entrenamiento **(Schwartz *et al*., 1991, 1992).**

En términos de inflamación, los resultados indicaron que las personas con niveles elevados de IL-6 y proteína C reactiva de alta sensibilidad (PCR-as) al inicio del estudio experimentaron las mayores mejoras, independientemente de la frecuencia del entrenamiento. Sin embargo, no se observaron diferencias significativas en otros marcadores inflamatorios o en el perfil glucémico según la frecuencia **(González-Rocha *et al*., 2022; Ihalainen *et al*., 2019; Turpela *et al*., 2017).**

Triatlón en adultos mayores: transformación

La participación de adultos mayores en programas de entrenamiento personalizados para completar un triatlón genera experiencias transformadoras que abarcan el bienestar físico, psicológico y social. Este estudio cualitativo exploró las vivencias de 14 adultos noruegos, con una edad mediana de 70 años en hombres y 57.5 años en mujeres, quienes se sometieron a un programa de tres meses que incluyó sesiones semanales de natación, ciclismo y carrera **(Di Lorito *et al*., 2021; Johansen *et al*., 2021; Neubauer *et al*., 2008; O'Toole & Douglas, 1995).** Además, los participantes asistieron a seminarios sobre nutrición deportiva y psicología competitiva. Estos hallazgos evidencian que el entrenamiento personalizado no solo promueve la aptitud física, sino que también refuerza el bienestar integral en adultos mayores **(Käch *et al*., 2018; Lepers *et al*., 2013; Millet *et al*., 2002)** . Los resultados mostraron mejoras significativas en todas las pruebas de campo. En el ciclismo, la potencia media aumentó un 9.3%, mientras que los tiempos en carrera y natación se redujeron en un 7% y un 13.9%, respectivamente. Aunque en las pruebas de laboratorio la velocidad al segundo umbral de lactato no mostró cambios estadísticamente significativos, el progreso general en la condición física destacó la efectividad del programa **(Johansen *et al*., 2021; Käch *et al*., 2018).**

Desde una perspectiva cualitativa, tres temas principales emergieron: motivación, progreso y superación de barreras **(Johansen *et al*., 2021; Käch *et al*., 2018).** La motivación se asoció con el disfrute del deporte, la interacción social y la relajación mental. Los participantes destacaron cómo la actividad física no solo mejoró su estado físico, sino que también se convirtió en un pilar de su bienestar emocional. El progreso se manifestó en el aprendizaje continuo y el acompañamiento profesional, lo que brindó confianza para enfrentar desafíos. Por último, la superación de barreras subrayó cómo vencer el miedo al agua o la inseguridad en el ciclismo se tradujo en sentimientos de logro y una notable sensación de euforia **(Johansen *et al*., 2021; Lepers *et al*., 2013).**

Determinantes del desempeño en triatlón

En el marco de las competencias Ironman 70.3, que combinan natación, ciclismo y carrera, determinar la disciplina que más influye en el desempeño general es crucial para el diseño de estrategias competitivas **(Knechtle *et al*., 2014; Nikolaidis *et al*., 2023; Weiss *et al*., 2024).** Este análisis incluyó a 823,459 atletas de ambos sexos, clasificados en grupos de edad de 18 a 75 años o más, desde 2004 hasta 2020. A través de regresión lineal múltiple y análisis de varianza de dos vías, se identificó que, aunque no se evidenciaron diferencias significativas entre las contribuciones individuales de las disciplinas en los modelos de regresión, los análisis de correlación revelaron que las divisiones de ciclismo y carrera tienen una mayor asociación con los tiempos totales de la competencia en comparación con la natación (Nikolaidis ***et al***., 2023).

En particular, la carrera mostró una correlación más alta con el tiempo global (0.89 en mujeres y 0.90 en hombres) en comparación con el ciclismo (0.87 y 0.86, respectivamente) y la natación (0.394 en ambos casos). Este hallazgo se sustenta en la mayor influencia de las fases terrestres, mientras que la natación exhibió un menor impacto relativo y una brecha de rendimiento más pequeña entre hombres y mujeres, especialmente en mayores de 50 años **(Knechtle *et al*., 2014; Nikolaidis *et al*., 2023; Weiss *et al*., 2024).**

Por otro lado, el ciclismo demostró una estabilidad superior en su rendimiento a lo largo de los diferentes grupos de edad, en comparación con la carrera y la natación, cuyos tiempos disminuyen más rápidamente con la edad. De hecho, el declive relacionado con la edad en el ciclismo comienza más tarde (34 años en hombres y 35 años en mujeres) que en las otras disciplinas. En síntesis, la planificación táctica de los triatletas Ironman 70.3 debe priorizar la optimización del ciclismo y la carrera, considerando que estas disciplinas tienen el mayor peso predictivo en el rendimiento total, mientras la natación, aunque importante, ocupa un rol secundario **(Knechtle *et al*., 2014; Nikolaidis *et al*., 2023; Weiss *et al*., 2024).**

El triatlón, como deporte de alta resistencia, genera efectos notables en los sistema inmunológico y cardiovascular. Se observaron disminuciones transitorias en glóbulos blancos y en inmunoglobulina A, lo que aumenta la susceptibilidad a infecciones, especialmente en el tracto respiratorio superior. Sin embargo, estas alteraciones se normalizan en pocos días, reflejando la capacidad adaptativa del sistema inmunológico. En cuanto al estrés oxidativo, los atletas mejor entrenados presentan respuestas antioxidantes más robustas, mitigando el daño muscular y lipídico **(Hausswirth & Lehénaff, 2001; O'Keefe *et al*., 2012).**

A nivel cardiovascular, se detectaron alteraciones transitorias en marcadores como troponina y péptidos natriuréticos tras competiciones prolongadas, aunque sin evidencia de daño clínicamente relevante. En general, los atletas bien preparados muestran una recuperación eficiente y mecanismos adaptativos que optimizan su respuesta fisiológica **(de Sousa Fernandes *et al*., 2023; Gillum *et al*., 2006; Neubauer *et al*., 2008)**

DISCUSIÓN

La presente revisión evidencia que el triatlón, en sus distintas modalidades de resistencia extrema, desencadena respuestas fisiológicas integradas que involucran sistemas inmunológico, metabólico y cardiovascular. En primer lugar, el aumento agudo de citocinas proinflamatorias (IL-1, IL-6, TNF-α) junto con la elevación compensatoria de IL-4 e IL-10 refleja un equilibrio dinámico entre inflamación y resolución tisular, confirmando la capacidad del organismo para modular su respuesta inmunitaria frente al estrés extremo. Simultáneamente, los marcadores de daño muscular (CK, LDH) y de estrés oxidativo muestran que la magnitud de la respuesta metabólica depende tanto de la duración de la prueba como del nivel de entrenamiento, sugiriendo adaptaciones que favorecen la utilización de sustratos alternativos y la eficacia antioxidante. Por último, las alteraciones transitorias en troponina cardíaca y péptidos natriuréticos evidencian que, a pesar del incremento en biomarcadores de lesión miocárdica, los atletas bien entrenados toleran estas variaciones sin presentar daño clínicamente significativo.

No obstante, esta revisión cuenta con limitaciones que deben considerarse. La heterogeneidad en los protocolos de suplementación, las diferencias en el momento de toma de muestras y la variabilidad en la experiencia de los sujetos reducen la comparabilidad directa entre estudios. Asimismo, la mayoría de las investigaciones se ha centrado en varones, lo que limita la generalización de los hallazgos a atletas femeninas. La ausencia de datos a largo plazo también impide evaluar posibles efectos crónicos de la exposición repetida a eventos de ultra distancia.

En este contexto, futuras investigaciones deberían estandarizar protocolos de hidratación y nutrición, incorporar muestras equilibradas por sexo y edad, y extender el seguimiento más allá de las 24–48 horas post competición para dilucidar las adaptaciones a medio y largo plazo. Además, resulta oportuno explorar el papel de nuevas tecnologías, como biosensores continuos y análisis de metabolómica, para mejorar la precisión en la monitorización de respuestas fisiológicas durante y tras la competencia. Desde un punto de vista práctico, estos resultados subrayan la importancia de diseñar estrategias nutrimentales y de recuperación personalizadas, que optimicen la reposición de glucógeno, regulen la inflamación y minimicen el estrés oxidativo, especialmente en pruebas de ultra distancia. Teóricamente, la interacción entre sistemas revela un modelo de “respuesta sistémica integrada” al ejercicio extremo, planteando nuevas preguntas sobre la comunicación hígado-músculo-inmune y sobre la base molecular de la resiliencia atlética.

CONCLUSIÓN

El triatlón, como disciplina extrema, induce respuestas fisiológicas complejas que abarcan inflamación aguda, estrés oxidativo y alteraciones cardiovasculares transitorias. Los atletas bien entrenados

demuestran una notable capacidad adaptativa que permite mitigar estos efectos y mantener la homeostasis. Si bien los riesgos de infecciones y daño muscular son mayores tras pruebas de larga distancia, la recuperación eficiente sugiere que los mecanismos compensatorios del organismo responden adecuadamente. En consecuencia, la planificación del entrenamiento, el monitoreo de biomarcadores y las estrategias de recuperación son esenciales para optimizar el rendimiento y preservar la salud a largo plazo en triatletas.

Por otra parte, la presencia de moléculas proinflamatorias en el contexto del triatlón no debe interpretarse como un signo de patología clínica, sino como parte de un proceso fisiológico de adaptación al estrés. En atletas entrenados, el sistema inmunológico interpreta estas señales como mensajes moleculares que activan vías de expresión relacionadas con resistencia, tolerancia al esfuerzo, depresión selectiva de ciertas líneas celulares y priorización de la reparación tisular. Esta respuesta regulada permite mantener la homeostasis sin comprometer la inmunocompetencia.

Por tanto, equiparar los niveles de estos biomarcadores a los observados en pacientes críticos en unidades de cuidado intensivo (UCI) es un error conceptual, por otra parte, el contexto fisiológico y la respuesta adaptativa son radicalmente diferentes. En UCI, los niveles de IL-6, TNF-α o cortisol reflejan desregulación inmune sistémica sostenida, asociada con daño orgánico, hipoperfusión e incapacidad de resolución inflamatoria. En contraste, en triatletas, estas moléculas son parte de un pulso transitorio, autorregulado y funcional.

Intereses en competencia: Los autores declaran no tener ningún interés en conflicto relacionado con el contenido de este trabajo.

Contribuciones: Los autores participaron activamente en la redacción del manuscrito y en el diseño de la estructura del tema. La investigación no contó con financiación externa. Todos los autores revisaron y aprobaron el contenido final del manuscrito.

Publicación: El presente no ha sido presentado como comunicación oral-escrita en ningún congreso o evento científico.

REFERENCIAS

Á, M.-O., Ma, R.-R., J, M.-A., & J, C.-G. (2025). Triathlon: Ergo Nutrition for Training, Competing, and Recovering. *Nutrients*, *17*(11). https://doi.org/10.3390/nu17111846

Alghannam, A. F., Jedrzejewski, D., Bilzon, J., Thompson, D., Tsintzas, K., & Betts, J. A. (2016). Influence of Post-Exercise Carbohydrate-Protein Ingestion on Muscle Glycogen Metabolism in Recovery and Subsequent Running Exercise. *International Journal of Sport Nutrition and Exercise Metabolism*, *26*(6), 572-580. https://doi.org/10.1123/ijsnem.2016-0021

Alkhatib, A., Feng, W.-H., Huang, Y.-J., Kuo, C.-H., & Hou, C.-W. (2020). Anserine Reverses Exercise-Induced Oxidative Stress and Preserves Cellular Homeostasis in Healthy Men. *Nutrients*, *12*(4), 1146. https://doi.org/10.3390/nu12041146

Alves, J., Toro, V., Barrientos, G., Bartolomé, I., Muñoz, D., & Maynar, M. (2020). Hormonal Changes in High-Level Aerobic Male Athletes during a Sports Season. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *17*(16), 5833. https://doi.org/10.3390/ijerph17165833

Amaral, S. L., Papanek, P. E., & Greene, A. S. (2001). Angiotensin II and VEGF are involved in angiogenesis induced by short-term exercise training. *American Journal of Physiology. Heart and Circulatory Physiology*, *281*(3), H1163-1169. https://doi.org/10.1152/ajpheart.2001.281.3.H1163

Areces, F., González-Millán, C., Salinero, J. J., Abian-Vicen, J., Lara, B., Gallo-Salazar, C., Ruiz-Vicente, D., & Del Coso, J. (2015). Changes in Serum Free Amino Acids and Muscle Fatigue Experienced during a Half-Ironman Triathlon. *PloS One*, *10*(9), e0138376. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0138376

Ayari, S., Abellard, A., Carayol, M., Guedj, É., & Gavarry, O. (2023). A systematic review of exercise modalities that reduce pro-inflammatory cytokines in humans and animals' models with mild cognitive impairment or dementia. *Experimental Gerontology*, *175*, 112141. https://doi.org/10.1016/j.exger.2023.112141

Baskerville, R., Castell, L., & Bermon, S. (2024). Sports and Immunity, from the recreational to the elite athlete. *Infectious Diseases Now*, *54*(4, Supplement), 104893. https://doi.org/10.1016/j.idnow.2024.104893

Birot, O. J. G., Koulmann, N., Peinnequin, A., & Bigard, X. A. (2003). Exercise-induced expression of vascular endothelial growth factor mRNA in rat skeletal muscle is dependent on fibre type. *The Journal of Physiology*, *552*(Pt 1), 213-221. https://doi.org/10.1113/jphysiol.2003.043026

Booth, F. W., & Thomason, D. B. (1991). Molecular and cellular adaptation of muscle in response to exercise: Perspectives of various models. *Physiological Reviews*, *71*(2), 541-585. https://doi.org/10.1152/physrev.1991.71.2.541

Brancaccio, P., Maffulli, N., & Limongelli, F. M. (2007). Creatine kinase monitoring in sport medicine. *British Medical Bulletin*, *81-82*, 209-230. https://doi.org/10.1093/bmb/ldm014

Burke, L. M., Hawley, J. A., Wong, S. H. S., & Jeukendrup, A. E. (2011). Carbohydrates for training and competition. *Journal of Sports Sciences*, *29 Suppl 1*, S17-27. https://doi.org/10.1080/02640414.2011.585473

Callegari, G. A., Novaes, J. S., Neto, G. R., Dias, I., Garrido, N. D., & Dani, C. (2017). Creatine Kinase and Lactate Dehydrogenase Responses after Different Resistance and Aerobic Exercise Protocols. *Journal of Human Kinetics*, *58*, 65-72. https://doi.org/10.1515/hukin-2017-0071

Campbell, J. P., & Turner, J. E. (2018). Debunking the Myth of Exercise-Induced Immune Suppression: Redefining the Impact of Exercise on Immunological Health Across the Lifespan. *Frontiers in Immunology*, *9*, 648. https://doi.org/10.3389/fimmu.2018.00648

Cavalcante, P. A. M., Gregnani, M. F., Henrique, J. S., Ornellas, F. H., & Araújo, R. C. (2017). Aerobic but not Resistance Exercise Can Induce Inflammatory Pathways via Toll-Like 2 and 4: A Systematic Review. *Sports Medicine - Open*, *3*(1), 42. https://doi.org/10.1186/s40798-017-0111-2

Cerqueira, É., Marinho, D. A., Neiva, H. P., & Lourenço, O. (2019). Inflammatory Effects of High and Moderate Intensity Exercise-A Systematic Review. *Frontiers in Physiology*, *10*, 1550. https://doi.org/10.3389/fphys.2019.01550

Chen, H., & He, S. (2025). Duration adaptation depends on the perceived rather than physical duration and can be observed across sensory modalities. *Perception*, *54*(3), 180-195. https://doi.org/10.1177/03010066251314184

Colling, C., Bredella, M. A., Fazeli, P. K., Pachón-Peña, G., Singh, R. J., Rosen, C. J., & Miller, K. K. (2023). Changes in serum cortisol levels after 10 days of overfeeding and fasting. *American Journal of Physiology. Endocrinology and Metabolism*, *324*(6), E506-E513. https://doi.org/10.1152/ajpendo.00181.2022

Costa, R. J. S., Gaskell, S. K., McCubbin, A. J., & Snipe, R. M. J. (2020). Exertional-heat stress-associated gastrointestinal perturbations during Olympic sports: Management strategies for athletes preparing and competing in the 2020 Tokyo Olympic Games. *Temperature (Austin, Tex.)*, *7*(1), 58-88. https://doi.org/10.1080/23328940.2019.1597676

Craven, J., Desbrow, B., Sabapathy, S., Bellinger, P., McCartney, D., & Irwin, C. (2021). The Effect of Consuming Carbohydrate With and Without Protein on the Rate of Muscle Glycogen Re-synthesis During Short-Term Post-exercise Recovery: A Systematic Review and Meta-analysis. *Sports Medicine - Open*, *7*(1), 9. https://doi.org/10.1186/s40798-020-00297-0

de Sousa Fernandes, M. S., Gomes, J. M., Aidar, F. J., Thuany, M., Filgueira, T. O., de Souza, R. F., Badicu, G., Yagin, F. H., Greco, G., Cataldi, S., Castoldi, A., Alghannam, A. F., & Souto, F. O. (2023). Impacts of different triathlon races on systemic cytokine profile and metabolic parameters in healthy individuals: A systematic review. *BMC Sports Science, Medicine & Rehabilitation*, *15*(1), 147. https://doi.org/10.1186/s13102-023-00763-8

Di Lorito, C., Long, A., Byrne, A., Harwood, R. H., Gladman, J. R. F., Schneider, S., Logan, P., Bosco, A., & van der Wardt, V. (2021). Exercise interventions for older adults: A systematic review of meta-analyses. *Journal of Sport and Health Science*, *10*(1), 29-47. https://doi.org/10.1016/j.jshs.2020.06.003

Docherty, S., Harley, R., McAuley, J. J., Crowe, L. A. N., Pedret, C., Kirwan, P. D., Siebert, S., & Millar, N. L. (2022). The effect of exercise on cytokines: Implications for musculoskeletal health: a narrative review. *BMC Sports Science, Medicine & Rehabilitation*, *14*(1), 5. https://doi.org/10.1186/s13102-022-00397-2

Drobnic, F., Lizarraga, M. A., Caballero-García, A., & Cordova, A. (2022). Coenzyme Q10 Supplementation and Its Impact on Exercise and Sport Performance in Humans: A Recovery or a Performance-Enhancing Molecule? *Nutrients*, *14*(9), 1811. https://doi.org/10.3390/nu14091811

Effect of Endurance Exercise on Markers of Oxidative Stress: A Systematic Review | Journal of Science in Sport and Exercise. (s. f.). Recuperado 24 de julio de 2025, de https://link.springer.com/article/10.1007/s42978-024-00305-9

Emami, A., Tofighi, A., Asri-Rezaei, S., & Bazargani-Gilani, B. (2018). The effect of short-term coenzyme Q10 supplementation and pre-cooling strategy on cardiac damage markers in elite swimmers. *The British Journal of Nutrition*, *119*(4), 381-390. https://doi.org/10.1017/S0007114517003774

Fernandes, M. S. de S., Fidelis, D. E. da S., Aidar, F. J., Badicu, G., Greco, G., Cataldi, S., Santos, G. C. J., de Souza, R. F., & Ardigò, L. P. (2023). Coenzyme Q10 Supplementation in Athletes: A Systematic Review. *Nutrients*, *15*(18), 3990. https://doi.org/10.3390/nu15183990

Gama, J. F. G., Romualdo, R. D., de Assis, M. L., de Oliveira, L. M., Quírico-Santos, T., Alves, L. A., & Lagrota-Candido, J. (2022). Role of Regulatory T Cells in Skeletal Muscle Regeneration: A Systematic Review. *Biomolecules*, *12*(6), 817. https://doi.org/10.3390/biom12060817

Gillum, T. L., Dumke, C. L., & Ruby, B. C. (2006). Muscle glycogenolysis and resynthesis in response to a half Ironman triathlon: A case study. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, *1*(4), 408-413. https://doi.org/10.1123/ijspp.1.4.408

Gomez-Merino, D., Drogou, C., Guezennec, C. Y., Burnat, P., Bourrilhon, C., Tomaszewski, A., Milhau, S., & Chennaoui, M. (2006). Comparison of systemic cytokine responses after a long distance triathlon and a 100-km run: Relationship to metabolic and inflammatory processes. *European Cytokine Network*, *17*(2), 117-124.

González-Rocha, A., Mendez-Sanchez, L., Ortíz-Rodríguez, M. A., & Denova-Gutiérrez, E. (2022). Effect Of Exercise on Muscle Mass, Fat Mass, Bone Mass, Muscular Strength and Physical Performance in Community Dwelling Older Adults: Systematic Review and Meta-Analysis. *Aging and Disease*, *13*(5), 1421-1435. https://doi.org/10.14336/AD.2022.0215

Goulet, E. D. B. (2012). Dehydration and endurance performance in competitive athletes. *Nutrition Reviews*, *70 Suppl 2*, S132-136. https://doi.org/10.1111/j.1753-4887.2012.00530.x

Hausswirth, C., & Lehénaff, D. (2001). Physiological demands of running during long distance runs and triathlons. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, *31*(9), 679-689. https://doi.org/10.2165/00007256-200131090-00004

Hédon, C., Gouzi, F., Padovani, C., Schuster, I., Maufrais, C., Cade, S., Cransac, F., Bui, G., Morcillo, S., Ayoub, B., Thireau, J., Izem, O., Reboul, C., Walther, G., Hayot, M., Nottin, S., & Cazorla, O. (2025). Cardiac Fatigue in Male Athletes with Exercise-Induced Pulmonary Impairments After a Very Long-Distance Triathlon. *Sports Medicine*, *55*(3), 739-751. https://doi.org/10.1007/s40279-024-02128-8

Hoffman, M. D. (2019). Proper Hydration During Ultra-endurance Activities. *Sports Medicine and Arthroscopy Review*, *27*(1), 8-14. https://doi.org/10.1097/JSA.0000000000000229

Howard, E. E., & Margolis, L. M. (2020). Intramuscular Mechanisms Mediating Adaptation to Low-Carbohydrate, High-Fat Diets during Exercise Training. *Nutrients*, *12*(9), 2496. https://doi.org/10.3390/nu12092496

Hyvärinen, M., Kankaanpää, A., Rantalainen, T., Rantanen, T., Laakkonen, E. K., & Karavirta, L. (2025). Body composition and functional capacity as determinants of physical activity in middle-aged and older adults: A

cross-sectional analysis. *European Review of Aging and Physical Activity*, *22*(1), 6. https://doi.org/10.1186/s11556-025-00372-z

Ihalainen, J. K., Inglis, A., Mäkinen, T., Newton, R. U., Kainulainen, H., Kyröläinen, H., & Walker, S. (2019). Strength Training Improves Metabolic Health Markers in Older Individual Regardless of Training Frequency. *Frontiers in Physiology*, *10*, 32. https://doi.org/10.3389/fphys.2019.00032

Impellizzeri, F. M., Shrier, I., McLaren, S. J., Coutts, A. J., McCall, A., Slattery, K., Jeffries, A. C., & Kalkhoven, J. T. (2023). Understanding Training Load as Exposure and Dose. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, *53*(9), 1667-1679. https://doi.org/10.1007/s40279-023-01833-0

Jeukendrup, A. E. (2011). Nutrition for endurance sports: Marathon, triathlon, and road cycling. *Journal of Sports Sciences*, *29 Suppl 1*, S91-99. https://doi.org/10.1080/02640414.2011.610348

Jeukendrup, A. E. (2017). Periodized Nutrition for Athletes. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, *47*(Suppl 1), 51-63. https://doi.org/10.1007/s40279-017-0694-2

Jeukendrup, A. E., Jentjens, R. L. P. G., & Moseley, L. (2005). Nutritional considerations in triathlon. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, *35*(2), 163-181. https://doi.org/10.2165/00007256-200535020-00005

Johansen, B. T., Brynjulfsen, T., Lohne Seiler, H., Klungland Torstveit, M., & Berntsen Stølevik, S. (2021). Experiences of Older Adults Preparing for Their First Triathlon: «A Qualitative Study of the Participation in an Endurance Training Intervention.» *International Journal of Qualitative Studies on Health and Well-Being*, *16*(1), 1872824. https://doi.org/10.1080/17482631.2021.1872824

Johnson, J. M. (2010). Exercise in a hot environment: The skin circulation. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, *20 Suppl 3*, 29-39. https://doi.org/10.1111/j.1600-0838.2010.01206.x

Käch, I. W., Rüst, C. A., Nikolaidis, P. T., Rosemann, T., & Knechtle, B. (2018). The Age-Related Performance Decline in Ironman Triathlon Starts Earlier in Swimming Than in Cycling and Running. *Journal of Strength and Conditioning Research*, *32*(2), 379-395. https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000001796

Karhu, E., Forsgård, R. A., Alanko, L., Alfthan, H., Pussinen, P., Hämäläinen, E., & Korpela, R. (2017). Exercise and gastrointestinal symptoms: Running-induced changes in intestinal permeability and markers of gastrointestinal function in asymptomatic and symptomatic runners. *European Journal of Applied Physiology*, *117*(12), 2519-2526. https://doi.org/10.1007/s00421-017-3739-1

Kawamura, T., & Muraoka, I. (2018). Exercise-Induced Oxidative Stress and the Effects of Antioxidant Intake from a Physiological Viewpoint. *Antioxidants (Basel, Switzerland)*, *7*(9), 119. https://doi.org/10.3390/antiox7090119

Knechtle, B., Zingg, M. A., Rosemann, T., & Rüst, C. A. (2014). Sex difference in top performers from Ironman to double deca iron ultra-triathlon. *Open Access Journal of Sports Medicine*, *5*, 159-172. https://doi.org/10.2147/OAJSM.S65977

Le Goff, C., Gergelé, L., Seidel, L., Cavalier, E., & Kaux, J.-F. (2022). Mountain Ultra-Marathon (UTMB) Impact on Usual and Emerging Cardiac Biomarkers. *Frontiers in Cardiovascular Medicine*, *9*, 856223. https://doi.org/10.3389/fcvm.2022.856223

Lepers, R., Knechtle, B., & Stapley, P. J. (2013). Trends in Triathlon Performance: Effects of Sex and Age. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, *43*(9), 851-863. https://doi.org/10.1007/s40279-013-0067-4

Lombardo, B., Izzo, V., Terracciano, D., Ranieri, A., Mazzaccara, C., Fimiani, F., Cesaro, A., Gentile, L., Leggiero, E., Pero, R., Izzo, B., D'Alicandro, A. C., Ercolini, D., D'Alicandro, G., Frisso, G., Pastore, L., Calabrò, P., & Scudiero, O. (2019). Laboratory medicine: Health evaluation in elite athletes. *Clinical Chemistry and Laboratory Medicine*, *57*(10), 1450-1473. https://doi.org/10.1515/cclm-2018-1107

Martínez-Navarro, I., Sanchez-Gómez, J. M., Aparicio, I., Priego-Quesada, J. I., Pérez-Soriano, P., Collado, E., Hernando, B., & Hernando, C. (2020). Effect of mountain ultramarathon distance competition on biochemical variables, respiratory and lower-limb fatigue. *PloS One*, *15*(9), e0238846. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0238846

Maunder, E., Plews, D. J., & Kilding, A. E. (2018). Contextualising Maximal Fat Oxidation During Exercise: Determinants and Normative Values. *Frontiers in Physiology*, *9*, 599. https://doi.org/10.3389/fphys.2018.00599

Mennitti, C., Brancaccio, M., Gentile, L., Ranieri, A., Terracciano, D., Cennamo, M., La Civita, E., Liotti, A., D'Alicandro, G., Mazzaccara, C., Frisso, G., Pero, R., Lombardo, B., & Scudiero, O. (2020). Athlete's Passport: Prevention

of Infections, Inflammations, Injuries and Cardiovascular Diseases. *Journal of Clinical Medicine*, *9*(8), 2540. https://doi.org/10.3390/jcm9082540

Mia, M. M., & Singh, M. K. (2022). Emerging roles of the Hippo signaling pathway in modulating immune response and inflammation-driven tissue repair and remodeling. *The FEBS Journal*, *289*(14), 4061-4081. https://doi.org/10.1111/febs.16449

Mia, S., Warnecke, A., Zhang, X.-M., Malmström, V., & Harris, R. A. (2014). An optimized protocol for human M2 macrophages using M-CSF and IL-4/IL-10/TGF-β yields a dominant immunosuppressive phenotype. *Scandinavian Journal of Immunology*, *79*(5), 305-314. https://doi.org/10.1111/sji.12162

Millet, G. P., Candau, R. B., Barbier, B., Busso, T., Rouillon, J. D., & Chatard, J. C. (2002). Modelling the transfers of training effects on performance in elite triathletes. *International Journal of Sports Medicine*, *23*(1), 55-63. https://doi.org/10.1055/s-2002-19276

Momesso Santos, C. M., Amaral, J. B., Rossi, M., Vieria, R. P., Abad, C. C. C., & Bachi, A. L. L. (2022). Metabolic and immune/inflammatory alterations induced by a triathlon under extreme conditions. *Frontiers in Sports and Active Living*, *4*, 915343. https://doi.org/10.3389/fspor.2022.915343

Muñoz, J., Akhavan, N. S., Mullins, A. P., & Arjmandi, B. H. (2020). Macrophage Polarization and Osteoporosis: A Review. *Nutrients*, *12*(10), 2999. https://doi.org/10.3390/nu12102999

Neubauer, O., König, D., & Wagner, K.-H. (2008). Recovery after an Ironman triathlon: Sustained inflammatory responses and muscular stress. *European Journal of Applied Physiology*, *104*(3), 417-426. https://doi.org/10.1007/s00421-008-0787-6

Nikolaidis, P. T., Valero, D., Weiss, K., Villiger, E., Thuany, M., Sousa, C. V., Andrade, M., & Knechtle, B. (2023). Predicting overall performance in Ironman 70.3 age group triathletes through split disciplines. *Scientific Reports*, *13*(1), 11492. https://doi.org/10.1038/s41598-023-38181-y

Notley, S. R., Mitchell, D., & Taylor, N. A. S. (2024). A century of exercise physiology: Concepts that ignited the study of human thermoregulation. Part 3: Heat and cold tolerance during exercise. *European Journal of Applied Physiology*, *124*(1), 1-145. https://doi.org/10.1007/s00421-023-05276-3

Nutrition and Performance in Sport—Topic 1. Carbohydrate, sports drinks and performance: Strategies for Olympic sports—INSEP-Éditions. (s. f.). Recuperado 23 de julio de 2025, de https://books.openedition.org/insep/1790?lang=en&utm_source=chatgpt.com

O'Keefe, J. H., Patil, H. R., Lavie, C. J., Magalski, A., Vogel, R. A., & McCullough, P. A. (2012). Potential adverse cardiovascular effects from excessive endurance exercise. *Mayo Clinic Proceedings*, *87*(6), 587-595. https://doi.org/10.1016/j.mayocp.2012.04.005

Olcina, G., Timón, R., Brazo-Sayavera, J., Martínez-Guardado, I., Marcos-Serrano, M., & Crespo, C. (2018). Changes in physiological and performance variables in non-professional triathletes after taking part in an Olympic distance triathlon. *Research in Sports Medicine (Print)*, *26*(3), 323-331. https://doi.org/10.1080/15438627.2018.1447472

O'Toole, M. L., & Douglas, P. S. (1995). Applied physiology of triathlon. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, *19*(4), 251-267. https://doi.org/10.2165/00007256-199519040-00003

Park, C. H., & Kwak, Y.-S. (2019). Changes of cardiac biomarkers after ultradistance and standard-distance triathlon. *Journal of Exercise Rehabilitation*, *15*(2), 254-257. https://doi.org/10.12965/jer.1938092.046

Partyka, A., & Waśkiewicz, Z. (2021). The Consequences of Training and Competition to the Musculoskeletal System in Ultramarathon Runners: A Narrative Review. *Frontiers in Physiology*, *12*, 738665. https://doi.org/10.3389/fphys.2021.738665

Peake, J. M., Neubauer, O., Della Gatta, P. A., & Nosaka, K. (2017). Muscle damage and inflammation during recovery from exercise. *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md.: 1985)*, *122*(3), 559-570. https://doi.org/10.1152/japplphysiol.00971.2016

Peake, J. M., Neubauer, O., Walsh, N. P., & Simpson, R. J. (2017). Recovery of the immune system after exercise. *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md.: 1985)*, *122*(5), 1077-1087. https://doi.org/10.1152/japplphysiol.00622.2016

Pedersen, B. K., & Febbraio, M. A. (2008). Muscle as an endocrine organ: Focus on muscle-derived interleukin-6. *Physiological Reviews*, *88*(4), 1379-1406. https://doi.org/10.1152/physrev.90100.2007

Placentino, U., Sogari, G., Viscecchia, R., De Devitiis, B., & Monacis, L. (2021). The New Challenge of Sports Nutrition: Accepting Insect Food as Dietary Supplements in Professional Athletes. *Foods (Basel, Switzerland)*, *10*(5), 1117. https://doi.org/10.3390/foods10051117

Podlogar, T., & Wallis, G. A. (2022). New Horizons in Carbohydrate Research and Application for Endurance Athletes. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, *52*(Suppl 1), 5-23. https://doi.org/10.1007/s40279-022-01757-1

Proschinger, S., Winker, M., Joisten, N., Bloch, W., Palmowski, J., & Zimmer, P. (2021). The effect of exercise on regulatory T cells: A systematic review of human and animal studies with future perspectives and methodological recommendations. *Exercise Immunology Review*, *27*, 142-166.

Purdom, T., Kravitz, L., Dokladny, K., & Mermier, C. (2018). Understanding the factors that effect maximal fat oxidation. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*, *15*, 3. https://doi.org/10.1186/s12970-018-0207-1

Quinzii, C. M., López, L. C., Gilkerson, R. W., Dorado, B., Coku, J., Naini, A. B., Lagier-Tourenne, C., Schuelke, M., Salviati, L., Carrozzo, R., Santorelli, F., Rahman, S., Tazir, M., Koenig, M., DiMauro, S., & Hirano, M. (2010). Reactive oxygen species, oxidative stress, and cell death correlate with level of CoQ10 deficiency. *FASEB Journal: Official Publication of the Federation of American Societies for Experimental Biology*, *24*(10), 3733-3743. https://doi.org/10.1096/fj.09-152728

Rehrer, N. J., Beckers, E. J., Brouns, F., ten Hoor, F., & Saris, W. H. (1990). Effects of dehydration on gastric emptying and gastrointestinal distress while running. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, *22*(6), 790-795. https://doi.org/10.1249/00005768-199012000-00010

Rogers, G., Goodman, C., & Rosen, C. (1997). Water budget during ultra-endurance exercise. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, *29*(11), 1477-1481. https://doi.org/10.1097/00005768-199711000-00014

Sarmiento, A., Diaz-Castro, J., Pulido-Moran, M., Kajarabille, N., Guisado, R., & Ochoa, J. J. (2016). Coenzyme Q10 Supplementation and Exercise in Healthy Humans: A Systematic Review. *Current Drug Metabolism*, *17*(4), 345-358. https://doi.org/10.2174/1389200216666151103115654

Schwartz, R. S., Cain, K. C., Shuman, W. P., Larson, V., Stratton, J. R., Beard, J. C., Kahn, S. E., Cerqueira, M. D., & Abrass, I. B. (1992). Effect of intensive endurance training on lipoprotein profiles in young and older men. *Metabolism: Clinical and Experimental*, *41*(6), 649-654. https://doi.org/10.1016/0026-0495(92)90058-i

Schwartz, R. S., Shuman, W. P., Larson, V., Cain, K. C., Fellingham, G. W., Beard, J. C., Kahn, S. E., Stratton, J. R., Cerqueira, M. D., & Abrass, I. B. (1991). The effect of intensive endurance exercise training on body fat distribution in young and older men. *Metabolism: Clinical and Experimental*, *40*(5), 545-551. https://doi.org/10.1016/0026-0495(91)90239-s

Simmons, G. H., Wong, B. J., Holowatz, L. A., & Kenney, W. L. (2011). Changes in the control of skin blood flow with exercise training: Where do cutaneous vascular adaptations fit in? *Experimental Physiology*, *96*(9), 822-828. https://doi.org/10.1113/expphysiol.2010.056176

Soleimani Damaneh, M., Fatahi, S., Aryaeian, N., & Bavi Behbahani, H. (2023). The effect of coenzyme Q10 supplementation on liver enzymes: A systematic review and meta-analysis of randomized clinical trials. *Food Science & Nutrition*, *11*(9), 4912-4925. https://doi.org/10.1002/fsn3.3478

Suzuki, K. (2018). Cytokine Response to Exercise and Its Modulation. *Antioxidants*, *7*(1), 17. https://doi.org/10.3390/antiox7010017

Suzuki, K., Peake, J., Nosaka, K., Okutsu, M., Abbiss, C. R., Surriano, R., Bishop, D., Quod, M. J., Lee, H., Martin, D. T., & Laursen, P. B. (2006). Changes in markers of muscle damage, inflammation and HSP70 after an Ironman Triathlon race. *European Journal of Applied Physiology*, *98*(6), 525-534. https://doi.org/10.1007/s00421-006-0296-4

Suzuki, K., Tominaga, T., Ruhee, R. T., & Ma, S. (2020). Characterization and Modulation of Systemic Inflammatory Response to Exhaustive Exercise in Relation to Oxidative Stress. *Antioxidants (Basel, Switzerland)*, *9*(5), 401. https://doi.org/10.3390/antiox9050401

The Influence of Endurance Training on the Lipid Profile, Body Mass Composition and Cardiovascular Efficiency in Middle-Aged Cross-Country Skiers—PubMed. (s. f.). Recuperado 24 de julio de 2025, de https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34682674/

Thirupathi, A., Pinho, R. A., Ugbolue, U. C., He, Y., Meng, Y., & Gu, Y. (2020). Effect of Running Exercise on Oxidative Stress Biomarkers: A Systematic Review. *Frontiers in Physiology*, *11*, 610112. https://doi.org/10.3389/fphys.2020.610112

Thomas, D. T., Erdman, K. A., & Burke, L. M. (2016). American College of Sports Medicine Joint Position Statement. Nutrition and Athletic Performance. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, *48*(3), 543-568. https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000000852

Tiller, N. B., & Millet, G. Y. (2025). Decoding Ultramarathon: Muscle Damage as the Main Impediment to Performance. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, *55*(3), 535-543. https://doi.org/10.1007/s40279-024-02127-9

Turpela, M., Häkkinen, K., Haff, G. G., & Walker, S. (2017). Effects of different strength training frequencies on maximum strength, body composition and functional capacity in healthy older individuals. *Experimental Gerontology*, *98*, 13-21. https://doi.org/10.1016/j.exger.2017.08.013

Vleck, V., Millet, G. P., & Alves, F. B. (2014). The impact of triathlon training and racing on athletes' general health. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, *44*(12), 1659-1692. https://doi.org/10.1007/s40279-014-0244-0

Walzik, D., Joisten, N., Zacher, J., & Zimmer, P. (2021). Transferring clinically established immune inflammation markers into exercise physiology: Focus on neutrophil-to-lymphocyte ratio, platelet-to-lymphocyte ratio and systemic immune-inflammation index. *European Journal of Applied Physiology*, *121*(7), 1803-1814. https://doi.org/10.1007/s00421-021-04668-7

Weiss, K., Valero, D., Andrade, M. S., Villiger, E., Thuany, M., & Knechtle, B. (2024). Cycling is the most important predictive split discipline in professional Ironman® 70.3 triathletes. *Frontiers in Sports and Active Living*, *6*, 1214929. https://doi.org/10.3389/fspor.2024.1214929

Wigernaes, I., Høstmark, A. T., Strømme, S. B., Kierulf, P., & Birkeland, K. (2001). Active recovery and post-exercise white blood cell count, free fatty acids, and hormones in endurance athletes. *European Journal of Applied Physiology*, *84*(4), 358-366. https://doi.org/10.1007/s004210000365

Žarak, M., Perović, A., Njire Bratičević, M., Šupraha Goreta, S., & Dumić, J. (2021). Adaptive response triggered by the repeated SCUBA diving is reflected in cardiovascular, muscular, and immune biomarkers. *Physiological Reports*, *9*(2), e14691. https://doi.org/10.14814/phy2.14691

Zhou, X., Wu, Y., Zhu, Z., Lu, C., Zhang, C., Zeng, L., Xie, F., Zhang, L., & Zhou, F. (2025). Mucosal immune response in biology, disease prevention and treatment. *Signal Transduction and Targeted Therapy*, *10*(1), 7. https://doi.org/10.1038/s41392-024-02043-4