

Daño muscular, neuromuscular y cardíaco en el trail running: una revisión sistemática

Muscle, neuromuscular, and cardiac damage in trail running: a systematic review

Autora:

Isabel García Valiente

Tutor:

Francisco Pradas de la Fuente

Departamento de Expresión Musical, Plástica y Corporal



Facultad de
Ciencias de la Salud
y del Deporte - Huesca
Universidad Zaragoza

Resumen

El trail running es una disciplina de carrera que ha experimentado un notable crecimiento en los últimos años. Su práctica implica afrontar largas distancias combinadas con terrenos irregulares, importantes desniveles positivos y negativos, y condiciones ambientales cambiantes, aspectos que incrementan el riesgo de padecer algún tipo de lesión o alteración muscular. El objetivo de esta revisión sistemática fue analizar las lesiones de carácter muscular, neuromuscular y cardíaco en el trail running. La metodología PRISMA 2020 fue seleccionada para realizar la revisión sistemática. Cinco bases de datos (Pubmed, ScienceDirect, Scopus, Sport Discus y Web of Science) fueron utilizadas durante el proceso de búsqueda. Tras aplicar todos los criterios de elegibilidad se identificaron seis estudios que cumplían los criterios de inclusión, con un total de 73 participantes, todos hombres, y con carreras de distinta duración y dificultad. Los resultados muestran un aumento significativo de biomarcadores de daño muscular como la creatina quinasa (CK) y la alanina aminotransferasa (ALT) tras la competición, especialmente en pruebas con gran componente excéntrico, y alteraciones neuromusculares postcarrera, como disminución del salto en contramovimiento (SJ) y la contracción voluntaria máxima isométrica (MVIC), que pueden prolongarse varios días. También se observaron aumentos transitorios de biomarcadores cardíacos, como la isoenzima de la creatina quinasa (CK-MB) y la troponina I (cTnI), interpretados como respuesta metabólica sin implicaciones estructurales permanentes. Las principales limitaciones fueron la heterogeneidad de las muestras, la falta de representación femenina y las diferencias metodológicas entre estudios. Los hallazgos obtenidos en esta revisión sistemática permiten conocer datos fisiológicos y metabólicos muy útiles para optimizar la prevención de lesiones, la carga de entrenamiento y la recuperación en corredores de montaña.

Abstract

Trail running is a running discipline that has experienced remarkable growth in recent years. This sport involves covering long distances over uneven terrain, facing considerable positive and negative elevation changes, and dealing with variable environmental conditions, all of which increase the likelihood of suffering injuries or muscular impairments. The purpose of this systematic review was to analyze muscular, neuromuscular, and cardiac injuries associated with trail running. The PRISMA 2020 guidelines were followed to conduct the systematic review. Five databases (PubMed, ScienceDirect, Scopus, Sport Discus, and Web of Science) were searched. After applying the eligibility criteria, six studies were included, comprising a total of 73 participants, all male, who competed in races of varying length and difficulty. The findings revealed a significant rise in muscle damage biomarkers, such as creatine kinase (CK) and alanine aminotransferase (ALT), following competition particularly in events with a strong eccentric component as well as post-race neuromuscular impairments, including reductions in countermovement jump (SJ) and maximal voluntary isometric contraction (MVIC), which may persist for several days. Temporary elevations in cardiac biomarkers, such as creatine kinase-MB (CK-MB) and troponin I (cTnI), were also observed, interpreted as a physiological response rather than structural cardiac damage. The main limitations identified were sample heterogeneity, absence of female participants, and methodological differences between studies. Overall, the results of this review provide valuable physiological and metabolic insights that may help optimize injury prevention, training load management, and recovery strategies in trail runners.

Índice

1. Introducción.....	6
2. Marco Teórico.....	8
El trail running: evolución y características específicas.....	8
2.1. Exigencias fisiológicas del trail running.....	9
2.2. Lesiones en el trail running: incidencia y localización.....	9
2.3. Daño muscular inducido por el ejercicio	10
2.4. Función neuromuscular y su relación con el daño muscular	10
2.5. Daño cardíaco transitorio: implicaciones en deporte de resistencia.....	11
3. Objetivos.....	11
3.1. Objetivo General	11
3.2. Objetivos Específicos	11
4. Materiales y métodos	12
4.1. Diseño del estudio.....	12
4.2. Criterios de elegibilidad para la selección de los estudios.....	12
4.3. Identificación y selección de estudios.....	13
4.4. Calidad general de los estudios incluidos.....	14
5. Resultados	16
5.1. Población estudiada	18
5.2. Tipo de Carrera	18
5.3. Variables fisiológicas y metabólicas evaluadas.....	19
6. Discusión.....	21
6.1. Comparación de estudios.....	21
6.2. Limitaciones, fortalezas y aplicaciones prácticas.....	23
7. Conclusiones	24
8. Referencias bibliográficas.....	25

Índice de tablas

<i>Tabla 1 Criterios de inclusión y exclusión de la revisión sistemática</i>	<i>13</i>
<i>Tabla 2 Resultados de la calidad de los estudios (NHLBI)</i>	<i>16</i>
<i>Tabla 3 Tipo de población</i>	<i>18</i>
<i>Tabla 4 Tipo de prueba</i>	<i>19</i>
<i>Tabla 5 Variables fisiológicas y metabólicas</i>	<i>20</i>

1. Introducción

El trail running es una disciplina de carrera que ha experimentado un notable crecimiento en los últimos años, evidenciado por el aumento exponencial que ha sufrido su práctica tanto a nivel recreativo como competitivo (Babí et al., 2021). Esta modalidad deportiva atrae un amplio rango poblacional, desde jóvenes hasta personas de edad avanzada, resultando de interés su práctica en ambos sexos (Jakob, 2022).

A diferencia de la carrera por asfalto, el trail running implica afrontar terrenos irregulares, desniveles y condiciones ambientales cambiantes, todos ellos factores que aumentan considerablemente el posible riesgo de padecer algún tipo de lesión (Hamill et al., 2022; Sanchez-Garcia et al., 2022). Las lesiones más comunes en este deporte afectan a las extremidades inferiores, con una alta incidencia a padecer esguinces de tobillo, tendinopatías y diferentes tipos de sobrecargas musculares (Goodrum et al., 2025).

Uno de los aspectos más relevantes en el análisis de las lesiones en el trail running es el daño muscular inducido por su práctica, especialmente durante la fase excéntrica de la contracción muscular que sucede durante los descensos. En este tipo de contracción el músculo se alarga mientras genera tensión, lo que produce micro lesiones estructurales, inflamación y una liberación de diferentes marcadores de daño muscular, como por ejemplo la creatina quinasa (CK) y la mioglobina (Coratella et al., 2024). Este proceso derivado del impacto muscular sufrido en la fase excéntrica de la práctica del trail running no solo compromete la integridad del tejido muscular, sino que también afecta a la función neuromuscular, reduciendo la fuerza máxima voluntaria, alterando la coordinación motora y aumentando la fatiga periférica y central (Ehrström et al., 2018).

La fatiga neuromuscular, entendida como una disminución transitoria de la capacidad del sistema neuromuscular para generar fuerza, tiene una estrecha relación con el daño muscular, ya que ambas se retroalimentan mutuamente. Un músculo dañado presenta menor eficiencia contráctil, lo que puede aumentar la carga sobre otras estructuras y

desencadenar compensaciones que incrementan el riesgo de lesión. Además, la disminución del control motor puede favorecer errores técnicos, contribuyendo al desarrollo de lesiones musculoesqueléticas (Schwiete et al., 2025).

Además de las lesiones musculoesqueléticas, los corredores de trail también se enfrentan a riesgos sistémicos específicos, como son el daño renal agudo, desequilibrios electrolíticos y daño cardíaco transitorio. En algunos estudios se han observado elevaciones de biomarcadores cardíacos como la troponina (Tn), sin que impliquen necesariamente una lesión miocárdica permanente (Jouffroy et al., 2019; Miguel Lecina et al., 2021; Rojas-Valverde et al., 2020). Sin embargo, cabe destacar que estos elementos mencionados pueden verse agravados de una manera importante además por factores diversos, siendo los más importantes, entre otros, la deshidratación y la fatiga (Minshull & James, 2013).

La literatura de referencia sugiere que hay múltiples factores de riesgo que influyen en la aparición de lesiones, incluyendo el nivel de experiencia, el tipo de terreno, el uso de calzado adecuado y las características individuales de los corredores (Viljoen et al., n.d.). Aunque existen propuestas de prevención como el entrenamiento de fuerza, la mejora de la técnica de descenso o el trabajo propioceptivo, la evidencia sobre su eficacia aún es limitada, especialmente en poblaciones como mujeres o corredores no profesionales (Boshielo et al., 2025).

Teniendo en consideración los antecedentes expuestos, resulta evidente destacar que se hace necesaria llevar a cabo una revisión sistemática centrada en el análisis del daño muscular como eje central de las lesiones en el trail running, considerando su interacción con la función neuromuscular y su posible relación con otros indicadores del daño sistémico, como puede ser el daño cardíaco. En este sentido, el presente trabajo tiene como objetivo realizar una revisión sistemática de la literatura científica existente en la actualidad sobre el trail running, centrada en identificar los principales mecanismos de daño muscular, sus marcadores fisiológicos y las consecuencias sobre el rendimiento

2. Marco Teórico

El trail running: evolución y características específicas

El trail running es una disciplina que combina la carrera a pie con el desafío de recorrer entornos naturales, montañosos y de más o menos dificultad técnica. A diferencia de correr sobre superficies lisas, esta modalidad expone al deportista a desniveles, terrenos irregulares, condiciones climatológicas variables y obstáculos en el camino (Hamill et al., 2022). Este entorno cambiante e impredecible obliga a un esfuerzo físico y mental mayor, no solo por la necesidad de adaptación, sino también por el riesgo incrementado de poder sufrir accidentes y/o lesiones.

Según Lladós (2021), el trail running ha experimentado un crecimiento exponencial en la última década, reflejado por el aumento de competiciones oficiales y de corredores. Aunque originariamente su práctica se remontaba a competiciones como las “Fell Races” británicas realizadas en el siglo XIX, el deporte del trail running moderno se ha consolidado como una disciplina con identidad propia.

El perfil del corredor de trail es diverso, abarcando desde jóvenes deportistas hasta personas adultas de ambos sexos que encuentran en este deporte una vía de ocio saludable. Esta situación está provocando en la actualidad una incertidumbre importante, ya que los factores de riesgo pueden variar considerablemente según la edad, el sexo, la experiencia previa y el nivel de entrenamiento (Viljoen et al., 2021).

2.1. Exigencias fisiológicas del trail running

La práctica del Trail running implica una serie de exigencias físicas por encima de otras modalidades deportivas. La irregularidad del terreno demanda una activación constante de la musculatura estabilizadora, mientras que los cambios de pendiente implican variaciones continuas entre trabajo muscular concéntrico y excéntrico (Coratella et al., 2024).

Durante la fase de ascenso de las pendientes la carga cardiovascular y el consumo de oxígeno aumentan significativamente, mientras que en la fase de descenso predomina un patrón de contracción excéntrica que genera un importante impacto mecánico sobre las fibras musculares (Bontemps et al., 2020).

Desde un punto de vista metabólico, el trail running exige una eficiencia energética sostenida, así como una óptima regulación de la hidratación y los electrolitos. Los desequilibrios hidroelectrolíticos son frecuentes en eventos de larga duración y pueden desencadenar complicaciones como la hiponatremia o el daño renal agudo (Miguel Lecina et al., 2022; Rojas-Valverde et al., 2019).

2.2. Lesiones en el trail running: incidencia y localización

Multitud de estudios han documentado que las extremidades inferiores son las regiones anatómicas más afectadas por las lesiones en el trail running, particularmente el tobillo, la rodilla y el pie (Goodrum et al., 2025; Sanchez-Garcia et al., 2022). Entre las lesiones más reportadas se encuentran los esguinces de tobillo, las tendinopatías aquélicas y rotulianas, y las fracturas por estrés.

La incidencia de lesiones es mayor durante competiciones que durante entrenamientos, especialmente en eventos de ultra distancia. Asimismo, las diferencias en la distribución de las lesiones varían en función del tipo de evento: en competiciones de múltiples etapas predominan las lesiones en las rodillas, mientras que en eventos continuos largos se observan mayores tasas de lesiones en el pie y tobillo (Scheer et al., 2021).

2.3. Daño muscular inducido por el ejercicio

El daño muscular es una de las manifestaciones más características del trail running, especialmente durante el descenso. Durante esta fase los músculos se alargan mientras controlan el movimiento, soportando cargas superiores a las de las fases concéntricas o isométricas (Coratella et al., 2024). Este tipo de contracción induce un daño estructural en las fibras musculares, caracterizado por alteraciones en los sarcómeros, disrupción de la membrana celular y liberación de marcadores de daño muscular como la CK. La magnitud del daño excéntrico depende de múltiples factores, como la inclinación del terreno, la duración del descenso y el nivel de adaptación del corredor. (Proske & Morgan, 2001)

2.4. Función neuromuscular y su relación con el daño muscular

La función neuromuscular es la capacidad del sistema nervioso y los músculos para trabajar de forma coordinada y eficiente durante el movimiento. En el contexto del trail running esta función se ve afectada debido a la irregularidad del terreno, los continuos cambios de ritmo y las pendientes prolongadas.

Cuando se produce daño muscular, como ocurre tras esfuerzos excéntricos prolongados en los descensos, la función neuromuscular puede verse comprometida. Este fenómeno, conocido como fatiga neuromuscular, implica una disminución temporal en la capacidad de generar fuerza (Ehrström et al., 2018),

Estudios realizados en corredores de montaña han mostrado que, tras una carrera con gran componente excéntrico, se reduce significativamente la fuerza máxima voluntaria, especialmente en el cuádriceps, y que esta disminución puede mantenerse incluso varios días después del esfuerzo. Estos cambios neuromusculares están directamente relacionados con el grado de daño muscular, y su recuperación depende del nivel de adaptación y del manejo post-esfuerzo. Por lo tanto, se puede decir que existe una relación bidireccional entre el daño muscular y la función neuromuscular (Howatson & van Someren, 2008).

2.5. Daño cardiaco transitorio: implicaciones en deporte de resistencia

En el trail running se han observado alteraciones sistémicas que afectan a diferentes órganos incluido el corazón. En eventos de larga duración algunos corredores presentan aumentos transitorios de los biomarcadores cardiacos conocidos como Tn, lo que ha sido representado como daño miocárdico funcional sin repercusiones estructurales permanentes (Jouffroy et al., 2019; Miguel Lecina et al., 2022). Esta respuesta cardiaca puede considerarse parte del conjunto de adaptaciones fisiológicas al estrés extremo que también incluye diferentes episodios de daño muscular y renal (Hoppel et al., 2019; Tidmas et al., 2022).

3. Objetivos

3.1. Objetivo General

El objetivo de esta revisión sistemática es recopilar, analizar y sintetizar la evidencia científica disponible sobre las lesiones derivadas del daño muscular, neuromuscular y cardiaco producido durante la práctica del trail running.

3.2. Objetivos Específicos

- Identificar los principales biomarcadores de daño muscular en corredores de trail running.
- Examinar la relación entre el daño muscular y la función neuromuscular postcompetición, así como el tiempo de recuperación asociado.
- Analizar la presencia y evolución de biomarcadores cardiacos tras competiciones de trail running.
- Comparar los hallazgos en función de variables como el tipo de prueba, el nivel de entrenamiento y la experiencia de los corredores.

4. Materiales y métodos

4.1. Diseño del estudio

El presente trabajo de Fin de Grado consiste en la realización de una revisión sistemática de la literatura científica siguiendo las recomendaciones establecidas por la declaración PRISMA 2020 (Moher et al., 2009) y registrada atendiendo las indicaciones del National Institute for Health and Care Research (NIHR) según la International Prospective Register of Systematic Reviews (PROSPERO), siéndole asignando el código CRD420251135043 y encontrándose accesible a través del siguiente enlace: <https://www.crd.york.ac.uk/PROSPERO/view/CRD420251135043>

4.2. Criterios de elegibilidad para la selección de los estudios

El diseño de esta revisión sistemática siguió el modelo guía establecido como pregunta PICO (Población, Intervención, Comparación, Resultado) para dar respuesta a los objetivos de este estudio (Eldawlatly et al., 2018; Frandsen et al., 2020). Para garantizar la calidad metodológica de los estudios incluidos en esta revisión, se establecieron los criterios de inclusión y exclusión indicados en la Tabla 1.

Tabla 1 Criterios de inclusión y exclusión de la revisión sistemática

Nº	Criterio	Inclusión	Exclusión
1	Población	Corredores de trail running adultos de ambos sexos	Otro tipo de carreras y población joven
2	Diseño del estudio	Estudios de casos, estudios observacionales, estudios longitudinales o prospectivos	Estudios anteriores al año 2010
3	Resultado	Lesión muscular, neuromuscular y daño cardíaco	Otras lesiones
4	Otros	Artículos redactados en lengua inglesa o española	Otros idiomas

4.3. Identificación y selección de estudios

Una vez realizada y aplicada la estrategia de búsqueda de las cinco bases de datos seleccionadas para esta revisión sistemática y consideradas como las más relevantes en el ámbito de la actividad física y del deporte (PubMed, Web of Science, Scopus, Sport Discus, Science Direct), se registraron los resultados de la búsqueda utilizando el gestor bibliográfico Mendeley para identificar los duplicados y poder organizar los estudios.

Las cinco bases de datos fueron analizadas con fecha límite de 15 de agosto 2025. La estrategia de búsqueda en cada base de datos se realizó utilizando las ecuaciones con los términos derivados MeSH y tesauros que se relacionan a continuación:

- PubMed
- Web of Science
- Scopus
- Sport Discus
- Science Direct

("Trail Running" OR "trail running" OR "ultra-trail" OR "mountain running") AND ("Muscle Damage" OR "muscle injury" OR "exercise-induced muscle damage") AND ("Neuromuscular Fatigue" OR "neuromuscular function" OR "neuromuscular fatigue") OR ("Cardiac Biomarkers" OR "troponin" OR "CK-MB") AND ("Prevention" OR "performance" OR "recovery")

Un total de 408 artículo fueron encontrados para su revisión. Durante este proceso se evaluaron los títulos y resúmenes de los artículos que cumplían los criterios de elegibilidad según los criterios de inclusión/exclusión establecidos (Tabla 1). Dos revisores independientes (I.G.) y (F.P.) seleccionaron los artículos incluidos según los criterios establecidos. Se utilizó Mendeley Desktop® v.2112.0 (Elsevier, Ámsterdam, Países Bajos), para eliminar artículos duplicados y analizar títulos y resúmenes. Cuando fue necesario, se realizó un análisis completo del texto. Ambos revisores siempre aprobaron las decisiones. El proceso de investigación y análisis duró un total de tres semanas.

4.4. Calidad general de los estudios incluidos

Los estudios incluidos en esta revisión fueron en su mayoría observacionales y con diseños descriptivos. Dado su diseño no experimental, no ha sido posible aplicar herramientas como la escala PEDro (Moseley et al., 2002), o la Cochrane Collaboration (Higgins et al., 2011), habitualmente empleadas en ensayos clínicos. En su lugar se han utilizado instrumentos adaptados a estudios observacionales con finalidad ilustrativa y cualitativa.

La calidad metodológica (Tabla 2) se ha evaluado mediante la herramienta del National Heart, Lung, and Blood Institute (NHLBI), disponible en <https://www.nhlbi.nih.gov/health-topics/study-quality-assessment-tools>.

Esta herramienta contiene 14 ítems valorados como “sí” (verde), “no” (rojo), “no reportado” (amarillo) o “no se puede determinar” (gris). Los estudios se clasificaron como buenos (>11 ítems), regular (7-10 “sí”) o pobres (<6 “sí”)

A continuación, se describen las preguntas adaptadas al español que guiaron la evaluación:

1. ¿El estudio presenta con claridad su pregunta o el objetivo principal de investigación?
2. ¿Se especifica y define de manera clara la población objeto del estudio?
3. ¿La proporción de participación de las personas elegibles fue igual o superior al 50%?
4. ¿Los sujetos fueron seleccionados de una misma población o de poblaciones similares?
5. ¿Se proporcionó una justificación del tamaño muestral?
6. ¿Las exposiciones de interés se midieron antes de que se evaluaran los resultados?
7. ¿El periodo de seguimiento fue lo suficientemente amplio como para poder observar una posible asociación entre exposición y resultado, si existiera?
8. ¿El estudio analizó diferentes niveles de exposición en relación con el resultado?
9. ¿Las variables de exposición estaban claramente definidas, eran válidas, confiables y se aplicaron en toda la muestra?
10. ¿La exposición fue medida en más de una ocasión a lo largo del estudio?
11. ¿Las variables de resultado estaban claramente definidas, eran válidas, confiables y se aplicaron en toda la muestra?
12. ¿Los evaluadores de los resultados desconocían el estado de exposición de los sujetos del estudio?
13. ¿La tasa de pérdida de seguimiento fue igual o inferior al 20% desde el inicio del estudio?
14. ¿Se midieron y ajustaron estadísticamente las principales variables de confusión para evaluar su influencia en la relación entre la exposición y los resultados?

Tabla 2 Resultados de la calidad de los estudios (NHLBI)

Autor	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	Resultado
Giovanelli et al. (2020)															Regular
Lecina et al. (2022)															Regular
Saugy et al. (2013)															Regular
Coratella et al. (2024)															Regular
Birat et al. (2020)															Regular
Pradas et al. (2021)															Regular

5. Resultados

Se identificaron inicialmente un total de 408 estudios potencialmente relevantes para esta revisión (Figura 1). Tras eliminar los duplicados el número de artículos se redujo a 137. Posteriormente, se aplicaron los criterios de inclusión y exclusión mediante la revisión de títulos y resúmenes, seleccionándose 80 estudios para una lectura más detallada. De estos, 57 fueron clasificados según su temática principal. 48 artículos fueron excluidos por no abordar el tema concreto de la revisión o no tratar específicamente de carreras de trail running. Finalmente, se incluyeron en esta revisión 6 estudios que fueron los seleccionados por abordar específicamente los efectos de las carreras de ultra trail sobre la función neuromuscular y/o el daño muscular o cardíaco.

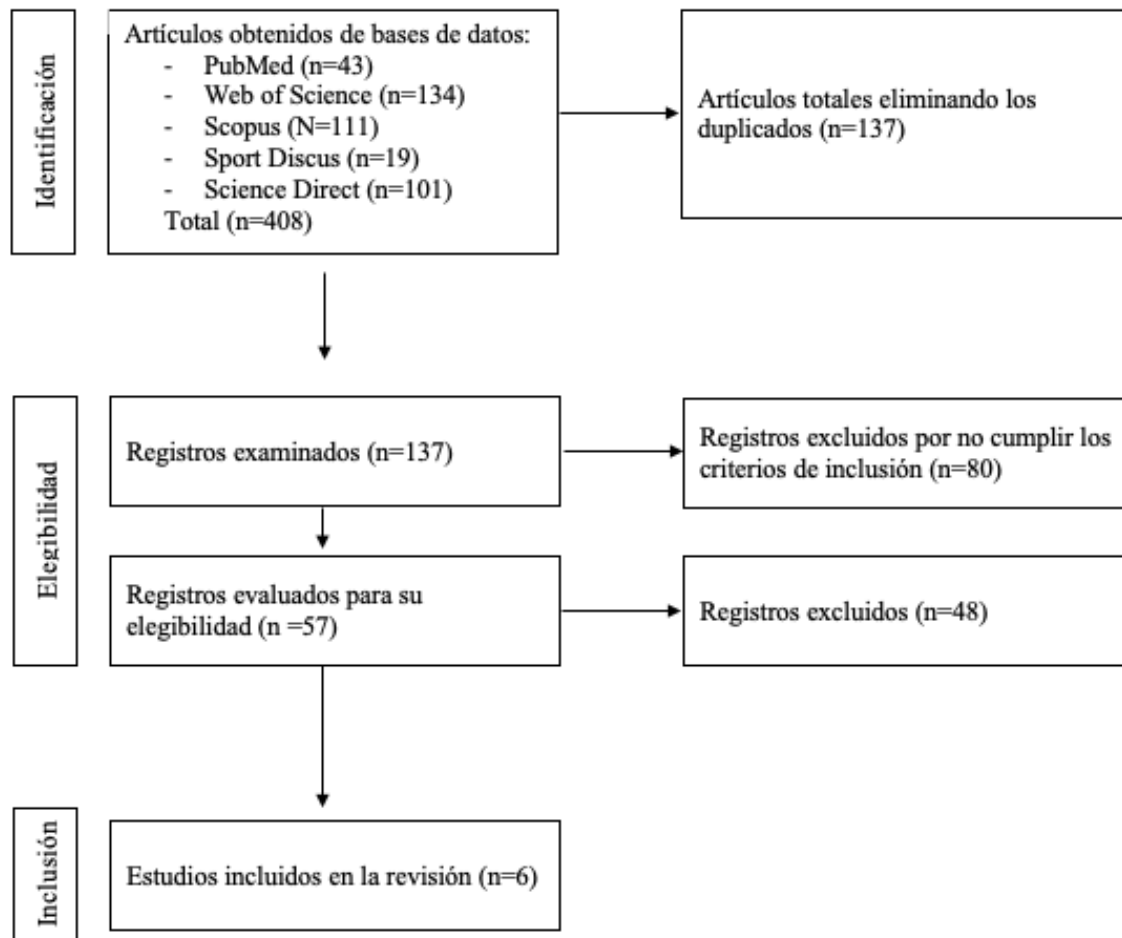


Figura 1. Diagrama de flujo que describe el proceso de selección de los estudios incluidos

Los 6 estudios incluidos abordan las temáticas de las lesiones relacionadas con la función neuromuscular y los biomarcadores de daño muscular y cardíaco tras la participación en carreras de trail running. Algunos trabajos analizaron ambos aspectos de forma conjunta. Los resultados encontrados en esta revisión se presentan organizados en diferentes apartados con sus correspondientes tablas atendiendo a la población (Tabla 3), el tipo de carrera (Tabla 4) y las variables fisiológicas y metabólicas evaluadas en pruebas de laboratorio (Tabla 5).

5.1. Población estudiada

En la tabla 3 se indican el número de estudios analizados considerando la variable de la población estudiada. Se incluyeron un total de 6 estudios con una muestra total de 73 deportistas, todos ellos exclusivamente del sexo masculino. En relación con la edad, en la tabla se indica la media con la desviación típica, encontrándose artículos con edades comprendidas entre los 30-40 años, pero también de edades entre 15-20 años. Cabe destacar también que en tan solo uno de los 6 estudios se hace una distinción entre los corredores amateur y los entrenados o alto nivel.

Tabla 3 Tipo de población

Autor	n	Edad (años)	Nivel
Giovanelli et al. (2020)	10	$38,2 \pm 12,4$	-
Lecina et al. (2022)	4	$38 \pm 4,11$	-
Saugy et al. (2013)	9	$41,6 \pm 13,1$	-
	8 GC	$29,3 \pm 8,1$	-
Coratella et al. (2024)	10	22 ± 3	-
Birat et al. (2020)	12	24,40	-
Pradas et al. (2021)	20	$43,3 \pm 4,52$	10 Amateur
			10 Alto Nivel

n= número; GC= grupo control

5.2. Tipo de Carrera

La tabla 4 presenta las características principales de las pruebas analizadas en los estudios incluidos en esta revisión sistemática. Se detallan el tipo de carrera realizada (trail running, ultratrail o protocolos en cinta de correr), la distancia total recorrida, el número de etapas de cada evento y el desnivel acumulado en aquellas competiciones de montaña en las que se especifica

Tabla 4 Tipo de prueba

Autor	Carrera	Longitud	Etapas	Elevación
Giovanelli et al. (2020)	Trail running	22,48 y 40 km	3 etapas	-
Lecina et al. (2022)	Ultra	768 Km	11 etapas	46865 m+
Saugy et al. (2013)	Ultra	330 Km	1	24000 m+
Coratella et al. (2024)	Cinta de correr	30 Km a 10 Km/h	1	-20%
Birat et al. (2020)	Ultra	48,2 Km y 66 Km	2	-
Pradas et al. (2021)	Ultra	108 Km	1	5800 m+

Km= Kilómetros; m+= Desnivel de la prueba

5.3. Variables fisiológicas y metabólicas evaluadas

La tabla 5 recoge de manera comparativa los principales hallazgos de los estudios incluidos en esta revisión sistemática en relación con el daño muscular, la función neuromuscular y el daño cardíaco en el trail running. Se presentan los valores pre y post carrera de diferentes biomarcadores de daño muscular, como la creatina quinasa (CK) y la alanina aminotransferasa (ALT), así como los resultados de pruebas funcionales como el salto con contramovimiento (SJ) y la contracción voluntaria máxima isométrica del cuádriceps (KE MVIC). Asimismo, algunos estudios reportan la respuesta de biomarcadores cardíacos (CK-MB y cTnI) tras la competición. La tabla 5 incluye tanto muestras de corredores amateurs como de alto nivel, así como grupos control en algunos diseños experimentales, lo que permite observar diferencias en las respuestas fisiológicas según la población estudiada y el tipo de prueba realizada.

Tabla 5 Variables fisiológicas y metabólicas

Autor	Daño muscular		Función neuromuscular		Daño cardiaco	
Giovanelli et al. (2020)	CK (UI/L) Pre 211,7 ± 164,95 Post 3637.6 ± 2754.8 ALT (UI/L) Pre-21.6 ± 5.7 Post 42.8 ± 14.74		-		CK-MB (ug/L) Pre-4,42±3,96 Post 50,56±35,99 cTnI (ng/mL) Pre-0,01 ± 0,00 Post 0,02 ±0,00	
Lecina et al. (2022)	CK (UI/L) Pre- 98.51 ± 24.53 Post 974.00 ± 402.66 ALT (UI/L) Pre- 17.25 ± 3.59 Post- 44.75 ± 12.44		SJ (Cm) Pre-30.68 ± 2.46 Post- 22.05 ± 8.59		-	
Saugy et al. (2013)	Grupo CK (UI/L) Pre-112 ± 33 Post 3719 ± 3045	Grupo Control CK (UI/L) Pre-122.5 ±41.1 Post 147.7 ± 32.6	Grupo KE MVIC Pre-400 N Post -300 N	Grupo Control KE MVIC Pre- 360 N Post – 320 N	-	
Coratella et al. (2024)	CK Pre- 32.923 ± 23,874 pg mL-1 Post 147.273 ± 55.447 pg mL-1		KE MVIC Pre 608 ± 156 N Post 500 ± 109 N		-	
Birat et al. (2020)	-		1 día KE MVIC Pre- 208.1 ±49.2 Post 194.9±44.4 SJ (Cm) Pre- 29.5 ± 4.7 Post 26.7 ±4.5	2 días KE MVIC Pre- 239.0 ± 51.1 Post 227.8 ±56.4 SJ (Cm) Pre-30.3 ±5.1 Post 29.7 ±2.7	1 día CK-MB (ug/L) Pre-4.04 Post 20.30 cTnI. (ng/mL) Pre-0.004 Post 0.143	2 días CK-MB (ug/L) Pre-3.51 Post 11.98 cTnI (ng/mL) Pre-0.003 Post 0.037
Pradas et al. (2021)	Amateur CK (UI/L) Pre-164.30 ±69.39 Post 3251.60 ±1011.89 ALT (UI/L) Pre-18.60 ± 2.50 Post 31.70 ± 9.67	Alto Nivel CK(UI/L) Pre-193.60 ±42.11 Post 4261.50 ±1469.60 ALT (UI/L) Pre-23.50 ± 3.92 Post 37.10 ± 7.46	Amateur SJ (Cm) Pre- 25.5 ± 4.38 Post 16.74 ± 3.91	Alto nivel SJ(Cm) Pre-27.12 ±5.29 Post- 19.87 ± 4.31	-	

CK= Creatina Kinasa; ALT= Alanina Aminotransferasa; SJ= Salto con contramovimiento; KE MVIC= Contracción voluntaria máxima isométrica extensores de rodilla; CK-MB= isoenzima de la Creatina Kinasa; cTnI= Troponina cardiaca

6. Discusión

6.1. Comparación de estudios

Los resultados obtenidos en esta revisión sistemática muestran de forma consistente que las carreras de trail, especialmente las de larga distancia y alto desnivel, inducen un daño muscular significativo, acompañado de una alteración transitoria de la función neuromuscular, acompañado de una alteración neuromuscular y, en algunos casos, de un incremento de biomarcadores relacionados con el estrés cardíacos. Estos hallazgos refuerzan la idea del trail running representa un desafío fisiológico complejo, donde convergen factores mecánicos, metabólicos y neuromuscular.

- Biomarcadores de daño muscular

Todos los estudios incluidos observaron un aumento significativo en los valores de CK tras la participación en carreras de trail running o protocolos simulados (Coratella et al., 2024). Estos resultados son consistentes con la literatura que vincula el trabajo excéntrico en descensos prolongados con daño muscular estructural (Coratella et al., 2024). En este sentido, Giovanelli et al. (2020) y Saugy et al. (2013) mostraron incrementos drásticos en los niveles de CK, superando en algunos casos las 3000 U/L postcarrera, lo que indica un daño muscular importante pero transitorio.

Cabe destacar que los valores de ALT, otro marcador relacionado con daño muscular y hepático, también se incrementaron de forma significativa en estudios como el de Lecina et al. (2022) y Pradas et al. (2021), reforzando la idea de que el esfuerzo extremo induce una respuesta inflamatoria sistémica. No obstante, las unidades de medición utilizadas varían entre los estudios, lo que limita una comparación directa.

Otro aspecto relevante es la diferencia según los niveles de entrenamiento. Pradas et al. (2021), identificaron valores de CK postcompetición más elevados en corredores de alto nivel en comparación con atletas amateur, lo que podría relacionarse con una mayor intensidad del esfuerzo y/o con adaptaciones fisiológicas previas que permiten tolerar mayores cargas sin sintomatología clínica.

- **Función neuromuscular**

En relación con la función neuromuscular, todos los estudios que evaluaron esta variable detectaron una disminución significativa de la capacidad de producción de fuerza tras las carreras. (Birat et al., 2020; Coratella et al., 2024; M. Lecina et al., 2022; Pradas et al., 2021; Saugy et al., 2013). El test de salto squat jump (SJ) y la contracción voluntaria máxima isométrica del cuádriceps (MVIC) son los instrumentos utilizados para medir esta alteración.

Coratella et al. (2024) encontraron una reducción media del 18% en la MVIC en el post, mientras que Birat et al. (2020) observaron que los valores de SJ disminuyeron incluso 48 horas después de la competición, indicando que la recuperación neuromuscular puede extenderse más allá del día siguiente al esfuerzo.

Estos hallazgos coinciden con los resultados de Millet et al. (2003), quienes ya advertían que el impacto del trabajo excéntrico sobre la fatiga neuromuscular en carreras de montaña es superior al de otras modalidades en llano. Además. Se ha documentado que esta fatiga no solo afecta a la musculatura de las extremidades inferiores, sino también a los patrones de control motor, aumentando el riesgo de caídas y lesiones secundarias durante la carrera. (Istvan et al., 2019)

- **Biomarcadores de daño cardíaco**

Otro hallazgo relevante ha sido la elevación de biomarcadores cardíacos tras las pruebas, especialmente la isoenzima de la creatina quinasa (CK-MB) y la troponina I (cTnI), tal y como describen Birat et al. (2020) y Lecina et al. (2022). Estos valores aumentaron de forma aguda tras el esfuerzo, pero retornaron a niveles basales en los días posteriores, lo que se ha interpretado como un “daño funcional” sin implicaciones estructurales permanentes.

Este fenómeno ya ha sido descrito en múltiples disciplinas de resistencia, como el triatlón y el ultra maratón, donde el estrés cardiovascular puede inducir una liberación de troponinas, sin evidencia de lesión miocárdica real (Shave et al., 2007). Sin embargo, el número de estudios que abordan esta cuestión en trail running es escaso, y la mayoría se basan en estudios de caso o muestras muy reducidas.

6.2. Limitaciones, fortalezas y aplicaciones prácticas

Una de las principales limitaciones de esta revisión ha sido la diferencia de las muestras en los respectivos estudios, con diferencias entre el tipo de prueba, la experiencia deportiva, el nivel de entrenamiento de los participantes, edad de los deportistas y sobre todo, los parámetros analizados en cada estudio y las diferentes unidades de medición. Por otro lado, otra importante limitación han sido los nulos estudios existentes para el sexo femenino.

Esta revisión aporta valores fisiológicos de referencia, así como las posibles adaptaciones que se producen en las carreras de trail y ultra trail, datos que pueden ser de especial interés para los entrenadores, ya que permite conocer la respuesta del organismo frente a carreras y planificar la carga atendiendo a los marcadores de daño muscular y cardíaco. Bien es cierto que es necesaria la realización de nuevos estudios, más homogéneos en condiciones de competición y entrenamiento que confirmen los hallazgos obtenidos en esta revisión, haciendo hincapié también en el sexo femenino.

7. Conclusiones

Los resultados hallados en los estudios analizados confirman que las carreras de trail, especialmente en formato ultra y con alto componente de desnivel negativo, inducen un daño muscular considerable reflejado en incrementos agudos de biomarcadores como la CK y ALT, siendo estos aumentos superiores en corredores de mayor nivel competitivo.

En relación con la función neuromuscular, se evidencian descensos postcompetición tanto en el salto en contramovimiento como en la fuerza isométrica máxima, siendo esta afectación más elevada cuanto mayor es la duración e intensidad del evento. Esta pérdida de capacidad neuromuscular puede mantenerse durante varios días, condicionando la recuperación y el rendimiento del deportista.

Los valores de biomarcadores cardíacos como CK-MB y cTnI también se ven alterados tras la participación en eventos de trail, especialmente de larga duración, aunque en ningún caso se ha asociado a daño estructural del miocardio. Esta respuesta parece formar parte del conjunto de adaptaciones transitorias al esfuerzo extremo en deportes de resistencia.

Se ha observado que los niveles de daño muscular y neuromuscular son generalmente mayores en los estudios que incluyen pruebas con fuerte componente excéntrico, aunque el grado de alteración fisiológica también depende del nivel de entrenamiento del deportista. Asimismo, la comparación entre grupos de distinto nivel competitivo sugiere que, mientras los corredores de élite presentan mayores incrementos en biomarcadores como la CK, los atletas amateurs tienden a mostrar una mayor afectación neuromuscular y tiempos de recuperación más prolongados, lo que refleja la influencia del nivel de entrenamiento y la experiencia en la respuesta fisiológica al trail running.

8. Referencias bibliográficas

- A. Jens Jakob. (2022, 10. December). *The State of Trail Running 2022*. 2022.
<https://runrepeat.com/the-state-of-trail-running-2022>
- Babí Lladón, J. P., Soler Prat, Susanna., Inglés Yuba, Eduard. & Labrador Roca, V. (2021). Historia y proceso de ordenación de las carreras en la montaña en España. *RICYDE: Revista Internacional de Ciencias Del Deporte*, 11(41), 140–159.
<https://doi.org/10.5232/ricyde>
- Birat, A., Bourdier, P., Dodu, A., Grossoeuvre, C., Blazeovich, A. J., Amiot, V., Dupont, A.-C., Nottin, S. & Ratel, S. (2020). Effect of Long-Duration Adventure Races on Cardiac Damage Biomarker Release and Muscular Function in Young Athletes. *Frontiers in Physiology*, 11. <https://doi.org/10.3389/fphys.2020.00010>
- Bontemps, B., Vercruyssen, F., Gruet, M. & Louis, J. (2020). Downhill Running: What Are The Effects and How Can We Adapt? A Narrative Review. *Sports Medicine*, 50(12), 2083–2110. <https://doi.org/10.1007/s40279-020-01355-z>
- Boshielo, P. M. (Matshepo), van Rensburg, A. J., Viljoen, C., Botha, T., de Villiers, C. E. (Elizabeth), Ramagole, D., Seyani, L. & van Rensburg, D. C. (Christa) J. (2025). Illness is more prevalent than injury in trail runners participating in a mountainous ultra trail race. *PHYSICIAN AND SPORTSMEDICINE*, 53(1), 27–35.
<https://doi.org/10.1080/00913847.2024.2367401>
- Coratella, G., Varesco, G., Rozand, V., Cuinet, B., Sansoni, V., Lombardi, G., Vernillo, G. & Mourot, L. (2024). Downhill running increases markers of muscle damage and impairs the maximal voluntary force production as well as the late phase of the rate of voluntary force development. *EUROPEAN JOURNAL OF APPLIED PHYSIOLOGY*, 124(6), 1875–1883. <https://doi.org/10.1007/s00421-023-05412-z>
- Eldawlatly A, Alshehri H, Alqahtani A, Ahmad A, Al-Dammas F, Marzouk A. Appearance of Population, Intervention, Comparison, and Outcome as research question in the title of articles of three different anesthesia journals: A pilot study. Vol. 12, Saudi Journal of Anaesthesia. Wolters Kluwer Medknow Publications; 2018. p. 283–6.
- Ehrström, S., Gruet, M., Giandolini, M., Chapuis, S., Morin, J.-B. & Vercruyssen, F. (2018a). Acute and Delayed Neuromuscular Alterations Induced by Downhill Running in Trained Trail Runners: Beneficial Effects of High-Pressure Compression Garments. *Frontiers in Physiology*, 9. <https://doi.org/10.3389/fphys.2018.01627>

- Ehrström, S., Gruet, M., Giandolini, M., Chapuis, S., Morin, J.-B. & Vercruyssen, F. (2018b). Acute and Delayed Neuromuscular Alterations Induced by Downhill Running in Trained Trail Runners: Beneficial Effects of High-Pressure Compression Garments. *Frontiers in Physiology*, 9. <https://doi.org/10.3389/fphys.2018.01627>
- Frandsen TF, Bruun Nielsen MF, Lindhardt CL, Eriksen MB. Using the full PICO model as a search tool for systematic reviews resulted in lower recall for some PICO elements. *J Clin Epidemiol*. 2020 Nov 1;127:69–75.
- Giovanelli, N., Lazzer, S. & Cauci, S. (2020). Muscle damage and inflammatory status biomarkers after a 3-stage trail running race. *Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 60(11), 1486–1492. <https://doi.org/10.23736/S0022-4707.20.10997-6>
- Goodrum, M., Viljoen, C. & Kaulback, K. (2025). Incidence, severity, and risk factors for injuries in female trail runners - A retrospective cross-sectional study. *PHYSICAL THERAPY IN SPORT*, 71, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.ptsp.2024.11.004>
- Hamill, J., Hercksen, J., Salzano, M., Udofa, A. & Trudeau, M. B. (2022). The prevalence of injuries in trail running: influence of trails, terrains and footwear. *FOOTWEAR SCIENCE*, 14(2), 113–121. <https://doi.org/10.1080/19424280.2022.2048901>
- Higgins JPT, Altman DG, Gøtzsche PC, Jüni P, Moher D, Oxman AD, et al. The Cochrane Collaboration's tool for assessing risk of bias in randomised trials. *BMJ* (Online). 2011;343(7829):1–9.
- Hoppel, F., Calabria, E., Pesta, D., Kantner-Rumplmair, W., Gnaiger, E. & Bartscher, M. (2019). Physiological and Pathophysiological Responses to Ultramarathon Running in Non-elite Runners. *Frontiers in Physiology*, 10. <https://doi.org/10.3389/fphys.2019.01300>
- Howatson, G. & van Someren, K. A. (2008). The Prevention and Treatment of Exercise-Induced Muscle Damage. *Sports Medicine*, 38(6), 483–503. <https://doi.org/10.2165/00007256-200838060-00004>
- Istvan, A. O., Yvonne, P., Terry, J. E., Marco, B., Timothy, B. Q., Henriëtte, V. H. & Gert, L. S. (2019). Common ultramarathon trail running injuries and illnesses: A review (2007-2016). *International Journal of Medicine and Medical Sciences*, 11(4), 36–42. <https://doi.org/10.5897/IJMMS2018.1386>
- Jouffroy, R., Jouffroy, R., Lebreton, X., Lebreton, X., Mansencal, N., Mansencal, N., Anglicheau, D. & Anglicheau, D. (2019). Acute kidney injury during an ultra-

distance race. *PloS One*, 14(9), e0222544.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0222544> [doi]

Lecina, M., Castellar, C., Pradas, F. & López-Laval, I. (2022). 768-km Multi-Stage Ultra-Trail Case Study-Muscle Damage, Biochemical Alterations and Strength Loss on Lower Limbs. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(2). <https://doi.org/10.3390/ijerph19020876>

Lecina, Miguel, Castellar-Otin, C., Lopez-Laval, I., Carrasco Paez, L. & Pradas, F. (2022). Acute Kidney Injury and Hyponatremia in Ultra-Trail Racing: A Systematic Review. *MEDICINA-LITHUANIA*, 58(5).
<https://doi.org/10.3390/medicina58050569>

Lecina, Miguel, Lopez, I., Castellar, C. & Pradas, F. (2021). Extreme Ultra-Trail Race Induces Muscular Damage, Risk for Acute Kidney Injury and Hyponatremia: A Case Report. *INTERNATIONAL JOURNAL OF ENVIRONMENTAL RESEARCH AND PUBLIC HEALTH*, 18(21). <https://doi.org/10.3390/ijerph182111323>

Millet, G. Y., Martin, V., Lattier, G. & Ballay, Y. (2003). Mechanisms contributing to knee extensor strength loss after prolonged running exercise. *J Appl Physiol*, 94, 193–198. <https://doi.org/10.1152/japplphysiol.00600.2002>.-The

Minshull, C. & James, L. (2013). The effects of hypohydration and fatigue on neuromuscular activation performance. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, 38(1), 21–26. <https://doi.org/10.1139/apnm-2012-0189>

Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J. & Altman, D. G. (2009). Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses: The PRISMA Statement. *Journal of Clinical Epidemiology*, 62(10), 1006–1012.
<https://doi.org/10.1016/j.jclinepi.2009.06.005>

Moseley AM, Herbert RD, Sherrington C, Maher CG. Evidence for physiotherapy practice: A survey of the Physiotherapy Evidence Database (PEDro). *Australian Journal of Physiotherapy* [Internet]. 2002;48(1):43–9. Available from:
[http://dx.doi.org/10.1016/S0004-9514\(14\)60281-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0004-9514(14)60281-6)

Pradas, F., Falcon, D., Penarrubia-Lozano, C., Toro-Roman, V., Carrasco, L. & Castellar, C. (2021). Effects of Ultratrail Running on Neuromuscular Function, Muscle Damage and Hydration Status. Differences According to Training Level. *INTERNATIONAL JOURNAL OF ENVIRONMENTAL RESEARCH AND PUBLIC HEALTH*, 18(10). <https://doi.org/10.3390/ijerph18105119>

- Proske, U. & Morgan, D. L. (2001). Muscle damage from eccentric exercise: mechanism, mechanical signs, adaptation and clinical applications. *The Journal of Physiology*, 537(2), 333–345. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7793.2001.00333.x>
- Rojas-Valverde, D., Olcina, G., Sanchez-Urena, B., Pino-Ortega, J., Martinez-Guardado, I. & Timon, R. (2020). Proteinuria and Bilirubinuria as Potential Risk Indicators of Acute Kidney Injury during Running in Outpatient Settings. *MEDICINA-LITHUANIA*, 56(11). <https://doi.org/10.3390/medicina56110562>
- Rojas-Valverde, D., Sanchez-Urena, B., Pino-Ortega, J., Gomez-Carmona, C., Gutierrez-Vargas, R., Timon, R. & Olcina, G. (2019). External Workload Indicators of Muscle and Kidney Mechanical Injury in Endurance Trail Running. *INTERNATIONAL JOURNAL OF ENVIRONMENTAL RESEARCH AND PUBLIC HEALTH*, 16(20). <https://doi.org/10.3390/ijerph16203909>
- Sanchez-Garcia, L. F., Penichet-Tomas, A., Pueo, B. & Jimenez-Olmedo, J. M. (2022). Injury Incidence and Pattern in Elite Young Male and Female Trail Runners. *APPLIED SCIENCES-BASEL*, 12(3). <https://doi.org/10.3390/app12031155>
- Saugy, J., Place, N., Millet, G. Y., Degache, F., Schena, F. & Millet, G. P. (2013). Alterations of Neuromuscular Function after the World's Most Challenging Mountain Ultra-Marathon. *PLoS ONE*, 8(6). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0065596>
- Scheer, V., Scheer, V., Krabak, B. J. & Krabak, B. J. (2021). Musculoskeletal Injuries in Ultra-Endurance Running: A Scoping Review. *Frontiers in Physiology*, 12, 664071. <https://doi.org/10.3389/fphys.2021.664071> [doi]
- Schwiete, C., Roth, C., Mester, J., Broich, H. & Behringer, M. (2025). Overlaps of Skeletal Muscle Fatigue and Skeletal Muscle Damage: The Muscle Injury Continuum. *Sports Medicine - Open*, 11(1), 73. <https://doi.org/10.1186/s40798-025-00876-z>
- Shave, R., George, K. P., Atkinson, G., Hart, E., Middleton, N., Whyte, G., Gaze, D. & Collinson, P. O. (2007). Exercise-induced cardiac troponin T release: A meta-analysis. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 39(12), 2099–2106. <https://doi.org/10.1249/mss.0b013e318153ff78>
- Tidmas, V., Brazier, J., Bottoms, L., Muniz, D., Desai, T., Hawkins, J., Sridharan, S. & Farrington, K. (2022). Ultra-Endurance Participation and Acute Kidney Injury: A Narrative Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(24), 16887. <https://doi.org/10.3390/ijerph192416887>

Viljoen, C. T., Janse van Rensburg, D. C., Verhagen, E., van Mechelen, W., Korkie, E. & Botha, T. (2021). Epidemiology, Clinical Characteristics, and Risk Factors for Running-Related Injuries among South African Trail Runners. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(23), 12620. <https://doi.org/10.3390/ijerph182312620>

Viljoen, C. T., Viljoen, C. T., Janse van Rensburg, D. C., C, J. van R. D., Verhagen, E., Verhagen, E., van Mechelen, W., W, van M., Korkie, E., Korkie, E., Botha, T. & Botha, T. (n.d.). Epidemiology, Clinical Characteristics, and Risk Factors for Running-Related. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(23). <https://doi.org/10.3390/ijerph182312620> [doi]