

# EFFECTOS DE LOS PATRONES DE PISADA EN LA BIOMECAÁNICA DE LAS CARRERAS DE MONTAÑA: UNA REVISIÓN SISTEMÁTICA



**Facultad de  
Ciencias Humanas y de  
la Educación - Huesca**  
**Universidad Zaragoza**



*Imagen recuperada de <https://www.dynafit.com/fr-ch/qu-est-ce-que-le-trail>*

**AUTOR: DANIEL IZQUIERDO ALONSO**

**PROMOCIÓN: CCAFD 2018-2022**

**DIRECCIÓN TRABAJO FIN DE GRADO: MARINA GIL CALVO Y SUSANA LAPETRA**

**FECHA DE PRESENTACIÓN: 15-16/12/2022**

## Indice

<b>Resumen .....</b>	<b>2</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>3</b>
<b>1. Contextualización y marco teórico .....</b>	<b>4</b>
1.1. Breve Historia del trail-running.....	4
1.2. Regulación del trail-running.....	5
1.3. Factores de rendimiento en el trail-running .....	6
<b>2. Objetivos.....</b>	<b>11</b>
<b>3. Metodología.....</b>	<b>12</b>
3.1. Criterios de elegibilidad.....	12
3.2. Fuentes utilizadas .....	13
3.3. Estrategia de búsqueda.....	13
3.4. Selección de artículos para su análisis.....	14
<b>4. Resultados.....</b>	<b>16</b>
4.1. Resultados de la búsqueda .....	16
4.1.1. Diagrama de flujo .....	16
4.1.2. Tabla de resultados .....	19
<b>5. Discusión.....</b>	<b>24</b>
5.1. Limitaciones de la revisión y futuras líneas de trabajo .....	28
<b>8. Conclusiones.....</b>	<b>29</b>
<b>9. Bibliografía .....</b>	<b>31</b>
<b>Anexos .....</b>	<b>40</b>

## **Resumen**

El trail running es un deporte que está en pleno aumento estos últimos años. Se caracteriza por tener tramos de subida y bajada en los que el impacto de la pisada es muy variable. Los patrones de pisada adoptados son determinantes para el rendimiento debido a que influyen en la fatiga. El objetivo principal de la presente revisión fue conocer, estudiar y analizar cuáles son los patrones de movimiento ideales a nivel biomecánico para la economía de carrera en montaña. La presente revisión se realizó siguiendo la metodología PRISMA y por medio de la pregunta PICOS se establecieron los criterios de elegibilidad de los artículos. Se consultaron tres bases de datos: Pubmed, Scopus y Web of science (WOS) y se utilizó Mendeley para la criba a través de título y resumen y duplicados. Tras introducir la estrategia de búsqueda se obtuvieron 84 registros, de los cuales fueron 22 duplicados y 54 cribados por título y resumen. Tras el cribado 7 artículos fueron analizados profundamente. Se realizó un análisis exhaustivo de la muestra final de artículos examinando los diferentes patrones de pisada y cómo afectan al rendimiento en carreras de montaña, los diferentes parámetros utilizados para medirlos, el efecto de la fatiga en este tipo de pruebas deportivas, y cómo el material deportivo puede afectar a la biomecánica durante su transcurso. Como conclusiones principales, se observó que no hay una técnica idónea para terrenos de montaña, pero sí que se recomienda alternar entre los patrones de pisada para reducir la fatiga. Con esta revisión bibliográfica se demuestra que la biomecánica asociada al trail-running resulta esencial para obtener resultados óptimos respecto al rendimiento y también para evitar lesiones, normalmente relacionadas con la fatiga. Hacen falta más estudios de la biomecánica en terreno natural para tener conclusiones más claras.

## **Abstract**

Trail running is a sport that has been on the rise in recent years. It is characterised by uphill and downhill sections in which the impact of the foot strike is highly variable. The foot strike patterns adopted are determinant for performance because they influence fatigue. The main objective of the present review was to know, study and analyse which are the ideal movement patterns at a biomechanical level for running economy in the mountains. The present review was carried out following the PRISMA methodology and by means of the PICOS question the eligibility criteria of the articles were established. Three databases were consulted: Pubmed, Scopus and Web of science (WOS) and Mendeley was used for screening through title and abstract and duplicates. After entering the search strategy 84 records were obtained, of which 22 were duplicates and 54 were screened by title and abstract. After screening 7 articles were analysed in depth. An exhaustive analysis of the final sample of articles was carried out examining the different stride patterns and how they affect performance in mountain running, the different parameters used to measure them, the effect of fatigue in this type of sporting event, and how sports equipment can affect biomechanics during the course of the event. As main conclusions, it was observed that there is no ideal technique for mountain terrain, but it is recommended to alternate between footprint patterns to reduce fatigue. This literature review demonstrates that the biomechanics associated with trail-running are essential for optimal performance results and also to avoid injuries, usually related to fatigue. Further studies of biomechanics in natural terrain are needed to reach clearer conclusions.

# **1. Contextualización y marco teórico**

## **1.1. Breve Historia del trail-running**

El inicio de las carreras por montaña se podría situar cuando la humanidad empezó a desplazarse de forma pedestre por el medio natural. La primera carrera documentada se realizó en el año 1064, en Escocia, donde tuvo lugar una carrera en una colina llamada Creag Choinnich (Chase y Hobbs, 2010; Entry Central, 2018). Sin embargo, hasta la mitad del siglo XIX, en Gran Bretaña, no se comienza a realizar esta actividad como práctica deportiva. A partir del 1900, la celebración de este tipo de carreras se expande por el resto del mundo a través de diversas competiciones (ARRS, 2018; Chase y Hobbs, 2010). Por ejemplo, en los Estados Unidos se puede destacar la Mount Marathon Race (1915), el Trofeo du Grand Vignemale (1904) en Francia o la Siete Picos de Cercedilla (1916) en España. Más tarde en el resto del mundo se dan ejemplos como la Mount Fuji Race (1947) en Japón o la Harrismith Mountain Race (1922) en Sudáfrica (Babí-Lladós, J.; Soler-Prat, S.; Inglés-Yuba, E.; Labrador-Roca, V.; 2021).

En los últimos años, el trail-running ha visto su popularidad crecer de manera exponencial, dándose un aumento sustancial del número de adeptos a esta modalidad deportiva así como del número de carreras y eventos de este tipo celebradas (Ng, Leung, Cheung, y Fang, 2018; Hoffman, Ong, y Wang, 2010; The Outdoor Foundation, 2010). Específicamente en España, debido al fuerte incremento de participantes y de organización de eventos deportivos alrededor de esta modalidad, hay autores que han definido a este hecho como “boom del trail running” (Seguí Urbaneja, J. & Inés Farias, E. (2018). Específicamente en

España, debido al fuerte incremento de participantes y de organización de eventos deportivos alrededor de esta modalidad, hay autores que han definido a este hecho como “boom del trail running” (Seguí Urbaneja, J. & Inés Fariás, E. (2018)

## **1.2. Regulación del trail-running**

Una vez conocida la historia de esta modalidad deportiva es importante destacar la regulación y el ordenamiento de este tipo de carreras. Desde su inicio, tanto expertos, corredores y diferentes artículos en prensa califican la gestión de este tipo de carreras como deficiente, apuntando al gran número de actores involucrados, incluyendo federaciones y asociaciones. “Esta complejidad se refleja en el hecho de que son varias las federaciones y asociaciones encargadas de regular su gestión, sin haber una clara división competencial entre ellas” (Chase y Hobbs, 2010).

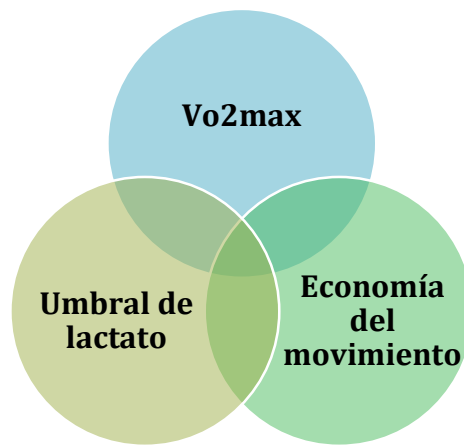
Actualmente y de manera general, la responsabilidad de las carreras de montaña recae sobre las federaciones de atletismo y las de deportes de montaña. La regulación de las disciplinas relacionadas con el atletismo pasa por la World Athletics (WA), también conocida como International Association of Athletics Federations (IAAF; <https://worldathletics.org/>). Por otro lado, el mayor órgano de los deportes de montaña es la International Climbing and Mountaineering Federation (Union Internationale des Associations d’Alpinism UIAA), que regula las carreras de la International Skyrunning Federation (ISF 2020). En el ámbito nacional, la federación dependiente de la UIAA es la Federación Española de deportes de Montaña y Escalada (FEDME) que cuenta con reglamento específico para carreras por montaña (Babí-Lladós, J.; Soler-Prat, S.; Inglés-Yuba, E.; Labrador-Roca, V.; 2021)

### **1.3. Factores de rendimiento en el trail-running**

Para el estudio de la biomecánica del trail-running, resulta esencial analizar los factores de rendimiento de esta modalidad deportiva. Son muchos los autores que realizan este análisis, pero la inmensa mayoría se centra en la carrera a pie y no específicamente en la modalidad de trail. House, S., Johnston, S., & Jornet, K. (2019) definen tres factores que determinan el rendimiento en cualquier esfuerzo de resistencia aeróbica: el consumo máximo de oxígeno ( $\text{Vo}_{2\text{max}}$ ), el umbral de lactato, y la economía del movimiento

- **El  $\text{Vo}_{2\text{max}}$**  es el máximo volumen de oxígeno que el organismo es capaz de absorber, transportar y consumir por unidad de tiempo. Resulta determinante para mantener ejercicio de alta intensidad durante un tiempo prolongado House, S., Johnston, S., & Jornet, K. (2019)
- El **umbral de lactato** (lactate threshold) es el punto o zona en la que se puede mantener la mayor intensidad de ejercicio durante un tiempo prolongado sin que el lactato se acumule en la sangre y aparezca en consecuencia la fatiga. En otras palabras, se refiere a la cantidad máxima de ejercicio que se puede realizar durante mucho tiempo seguido, es decir, sin producir tanto lactato para tener que detener la actividad. House, S., Johnston, S., & Jornet, K. (2019)
- Por último, la **economía del movimiento** (movement economy) tiene dos puntos de vista, una metabólica y otra mecánica. La metabólica hace referencia al uso de nutrientes por nuestros músculos dependiendo de la intensidad del ejercicio, mientras que la mecánica se mide a través de cómo de eficiente es el cuerpo en los movimientos a realizar en una

modalidad deportiva determinada. House, S., Johnston, S., & Jornet, K. (2019)



*Figura 1. Factores del rendimiento. Elaboración propia a partir de House, S., Johnston, S., & Jornet, K. (2019)*

Por otro lado, otro estudio defiende que los factores fisiológicos clásicos explican el 50% de la variabilidad del rendimiento, siendo la resistencia a la fuerza de los miembros inferiores el 50%, el VO<sub>2</sub>max el 20%, y la economía de carrera evaluada el 4,5% los principales factores del rendimiento (Olmedillas, H. 2018).

El presente estudio se **centra en la economía del movimiento o técnica deportiva**. El concepto de técnica deportiva resulta complejo en cuanto a contenidos y aplicación. Según Bermejo Frutos (2013) se podría definir como “un movimiento ideal relativo al deporte y al deportista (adaptabilidad), que se ejecuta siguiendo una secuencia o patrón lógico establecido en función de las reglas internas y externas al deporte y en función de los conocimientos previos en mecánica y las experiencias prácticas (racionalidad), y se realiza para lograr el objetivo deportivo (eficacia) con el menor gasto energético posible (eficiencia)”.

Más específicamente, en la especialidad de ultra maratones (distancias que superan los 42.195m de un maratón clásico), autores como Garbisu-Hualde A,

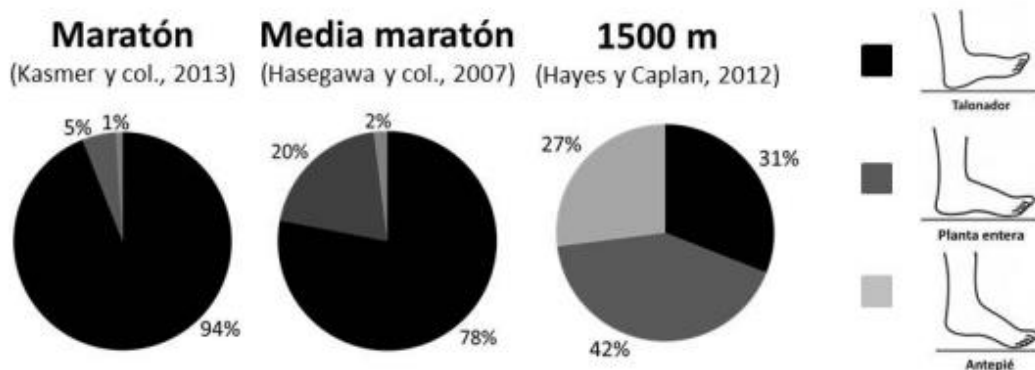


Santos-Concejero J. (2020) han observado que uno de los factores más importantes para el rendimiento en este tipo de carreras es la fatiga, un fenómeno multifuncional (fisiológico, neuromuscular, biomecánico y cognitivo). Igualmente, observan que la mejora en el rendimiento en este tipo de distancia parece estar relacionada con valores más alto de VO<sub>2</sub>max, menor coste de transporte de oxígeno (economía de carrera) y mayor experiencia en carreras. Cabe destacar que la técnica y la economía del esfuerzo son altamente mejorables por medio del entrenamiento, por lo que puede afectar de forma positiva en el rendimiento deportivo. Para esta mejora es indispensable mejorar la optimización del movimiento. Esta se puede mejorar a través del “análisis de tipo cualitativo y/o cuantitativo de la valoración formal o determinando errores a partir de la valoración real” (Bermejo Frutos J. 2013).

Diversos autores dan gran importancia a la biomecánica de carrera si hablamos de rendimiento deportivo en carreras de fondo (Kyrolainen y col., 2001; Nummela, Keranen y Mikkelsen, 2007)., pero hay un gran desconocimiento de cómo afectan estos factores al rendimiento de un deportista debido a la dificultad de su registro y su compleja interrelación entre ellos (Ogueta Alday, A. García López, J., 2016).

Dentro de los factores biomecánicos encontramos una gran influencia del patrón de pisada y el calzado. Respecto al patrón de pisada o, dicho de otra forma, la forma en la que el pie del corredor toma contacto con el suelo, podemos destacar las diferentes posiciones. De forma tradicional se identifican 3 patrones: 1-Talonador (rearfoot RFS), el primer contacto del pie en el suelo es el talón o parte posterior del pie, 2-Planta entera (midfoot MFS), el talón y la parte anterior del pie contactan con el suelo al mismo tiempo y 3-Antepié (forefoot FFS), donde la

parte anterior del pie realiza el contacto inicial con el suelo. (Hasegawa, Yamauchi y Kramer, 2007)



*Figura 2. Porcentaje de corredores talonadores, planta entera y antepié en carreras de diferentes distancias.*

Cabe destacar que hay controversia respecto a cuál es la idónea para una adecuada economía de carrera. Mientras que algunos autores describen que es mejor los patrones de planta entera y antepié para un mejor aprovechamiento de la energía elástica (Perl, Daoud y Lieberman, 2012), otros por el contrario demuestran que no hay un efecto agudo en la economía de carrera (Perl y col., 2012; Cunningham, Schilling, Anders y Carrier, 2010; Giandolini, M. 2015)

Esto también tiene una relación con los tipos de calzados, ya que según Lieberman y col. (2010) anteriormente la pisada natural ha sido entera o antepié y ha sido el calzado deportivo (gran amortiguación y con elevación en la zona del talón “drop”) lo que han hecho al ser humano tener una pisada más talonadora. A parte de esto, el tipo del calzado influye en el rendimiento. Un mayor peso debido al calzado ha demostrado tener un deterioro de la economía de carrera entre 2-6% al utilizar calzado respecto a correr descalzo a una intensidad del 70% del VO2Max (Hanson, Berg, Deka, Meendering y Ryan, 2011). Esto cobra todavía más importancia si nos centramos en la modalidad

deportiva del trail running ya que, al no ser un terreno estable, la elección del tipo de calzado será determinante del rendimiento.

Cómo bien se ha demostrado en diferentes estudios, la economía y técnica de carrera es fundamental para la física del movimiento y por lo tanto para el rendimiento en este tipo de modalidad deportiva. Según Millet (2011); Morin, Tomazin, Edouard, & Millet, (2011) los cambios en los patrones de carrera debidos a la fatiga pueden explicar, al menos en parte, la alteración de la economía de carrera, mientras que alteraciones neuromusculares pueden tener consecuencias en el patrón de carrera.

La economía de carrera es un aspecto altamente mejorable (House, S., Johnston, S., & Jornet, K. (2019) por lo que a los atletas les interesa trabajarla e intentar ser lo más efectivos posibles.

Con esta revisión bibliográfica, se pretende demostrar que un entendimiento de la biomecánica asociada al trail-running resulta esencial para obtener resultados óptimos respecto al rendimiento y también para evitar lesiones debidas a este suceso. Como fin último se pretende no solo dar visibilidad a esta modalidad deportiva, sino allanar el camino para que esta revisión sirva como punto de partida para futuras líneas de investigación.

## **2. Objetivos**

La finalidad de este trabajo de fin de grado se puede resumir en un objetivo general y cuatro objetivos específicos que servirán para desarrollar y dar respuesta al objetivo general:

**Objetivo General:** Conocer, estudiar y analizar cuáles son los patrones de movimiento ideales a nivel biomecánico para la economía de carrera en montaña.

**Objetivos Específicos:**

- **Objetivo específico 1:** Analizar el efecto del equipamiento deportivo en biomecánica y economía de carrera.
- **Objetivo específico 2:** Estudiar el efecto de la fatiga en aspectos biomecánicos y económicos en carreras de montaña
- **Objetivo específico 3:** Determinar si existen diferencias en la técnica de carrera en subida comparado con la técnica en superficie plana o bajada.
- **Objetivo específico 4:** Identificar nichos de conocimiento para futuras investigaciones en el campo del trail-running y cómo la biomecánica del corredor afecta a esta modalidad deportiva.

### **3. Metodología**

Esta revisión sistemática ha sido creada partir de “Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA) Page MJ, McKenzie JE, Bossuyt PM, Boutron I, Hoffmann TC, Mulrow CD, et al. (2021)

#### **3.1. Criterios de elegibilidad**

La elegibilidad de los estudios y la selección está basada en la pregunta PICOS (Participantes (1), Intervención (2), Comparación (3), Resultados – Outcomes (4) y Diseño de estudios respectivamente (5)).

Los estudios fueron incluidos en la revisión siguiendo los siguientes criterios: 1) Corredores de trail-running mayores de 18 años de cualquier nivel de entrenamiento, desde aficionados a nivel de alto rendimiento. 2) Artículos que analicen la biomecánica en carreras por montaña. 3) estudios que comparen las carreras de trail running con otro tipo de carreras como de asfalto o estudios descriptivos de la biomecánica de carreras de trail running. 4) Artículos que analicen parámetros biomecánicos y de economía del movimiento. 5) Todo tipo de estudios, tanto comparativos como descriptivos.

Ciertos estudios fueron excluidos en la revisión siguiendo los siguientes criterios:

1) Artículos en los que se analicen datos de pista o asfalto únicamente (si se comparan con trail running o carreras de montaña sería incluido). 2) Efecto de la biomecánica sobre las lesiones relacionadas con la carrera. 3) Sin exclusiones. 4) Todos los artículos que no analicen parámetros biomecánicos y de economía del movimiento. Artículos que solo se centren en la medición o comparación de sensores. 5) Sin exclusiones.

### 3.2. Fuentes utilizadas

La búsqueda de las referencias y su selección cobran una importancia vital para poder llegar a unas conclusiones informadas y lógicas. Para esta búsqueda, utilicé tres bases de datos científicas:

- (i) **PubMed**, base de datos científica con más de 34 millones de referencias biomédicas, incluyendo artículos y libros.
- (ii) **Scopus**, base de datos de citas y resúmenes de bibliografía revisada, incluyendo revistas científicas, libros y actas de conferencias.
- (iii) **Web Of Science (WOS)**, base de datos científica con referencias bibliográficas y citas de publicaciones periódicas.

### 3.3. Estrategia de búsqueda

En cuanto a los términos de búsqueda he definido 4 categorías: la primera relacionada con el sector de población con el que quiero sacar información ("trail run"), la segunda más relacionada con la intervención en los diferentes tipos de estudios ("foot strike"), la tercera y la cuarta más orientadas hacia los resultados o conclusiones ("biomech" y "techni").

La estrategia de búsqueda completa varía en función de la base de datos que he utilizado, pero junto con los operadores booleanos utilicé el siguiente comando de búsqueda:

*"trail-run\*" AND "foot strike" OR "biomech\*" OR "techni\*"*

- Para Pubmed he realizado la búsqueda de: ("trail run\*" AND ("foot strike" OR "Biomech\*" OR "techni\*"))

Filtros aplicados: Humans, Adult: 19+ years

- Para Scopus he realizado la búsqueda de: (TITLE-ABS-KEY ("trail run\*") AND TITLE-ABS-KEY ("foot strike") OR TITLE-ABS-KEY ("biomech\*") OR TITLE-ABS-KEY ("techni\*"))

No he utilizado filtros añadidos.

- Para Web of Science he realizado la búsqueda de: "trail run\*" (All Fields) AND "foot strike" (All Fields)

No he utilizado filtros añadidos.

### **3.4. Selección de artículos para su análisis**

Para la selección de una muestra asequible de artículos entre todos los resultados de la búsqueda, se utiliza el sistema de revisión científica PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic review and Meta-Analyses).

Decidí elegir este método porque, como describen Matthew Page, J., Joanne McKenzie, E., & Patrick Bossuyt, M.(2021), presenta múltiples ventajas respecto a otros métodos, como por ejemplo QUOROM. Entre ellas, cabe destacar que PRISMA facilita una lista de 7 dominios con 27 secciones (ítems) para seguir paso a paso la creación de la revisión. En cada apartado hay una breve justificación y explicación de la sección, y está muy actualizado ya que presenta aspectos conceptuales y metodológicos novedosos relacionados con la metodología. Además, PRISMA recomienda la generación de un diagrama de flujo que permite cribar entre varios elementos de acuerdo con un criterio específico. Decidí utilizar este diagrama para limitar la muestra de artículos a analizar en mayor profundidad. El diagrama de flujo aplicado a este estudio se muestra en la figura 3 (apartado de resultados).

En primer lugar, se recuperaron todos los registros de las cuatro bases de datos y se introdujeron en el gestor bibliográfico "Mendeley versión 1.19.3" para eliminar las publicaciones duplicadas. Después se realizó una primera criba de los artículos y se seleccionaron los que cumplían los criterios de inclusión en cuanto a la información disponible en el título y el resumen. El proceso pasó a una segunda fase de cribado, en la que se leyeron a texto completo los estudios que superaron la fase anterior, y se seleccionaron los que cumplían todos los criterios de inclusión.

El análisis de los artículos seleccionados comenzó con una lectura comprensiva en profundidad, tras la que se concluyeron áreas comunes que se tratan en los artículos, así como áreas que son específicas para cada uno de ellos. Para un mejor análisis de los artículos cribados se crea una tabla de resultados a través de la cual se obtuvo una visión más clara y global de los aspectos que nos interesan para la revisión sistemática (Figura 4).

Tras el análisis de los artículos, se compararon, analizaron en profundidad y se redactó un conjunto de discusiones hablando de los temas más relevantes y que tengan sentido con los objetivos de la revisión en cuestión. Una vez realizado esto se extrajeron conclusiones lógicas sobre los principales y específicos objetivos, y, que, a su vez, dejan preguntas sin contestar que podrían servir para basar futuras líneas de investigación.



## 4. Resultados

### 4.1. Resultados de la búsqueda

Tras esta búsqueda obtuve 16 artículos en Pubmed (N1), 61 en Scopus (N2), y 9 en WOS (N3).

#### 4.1.1. Diagrama de flujo

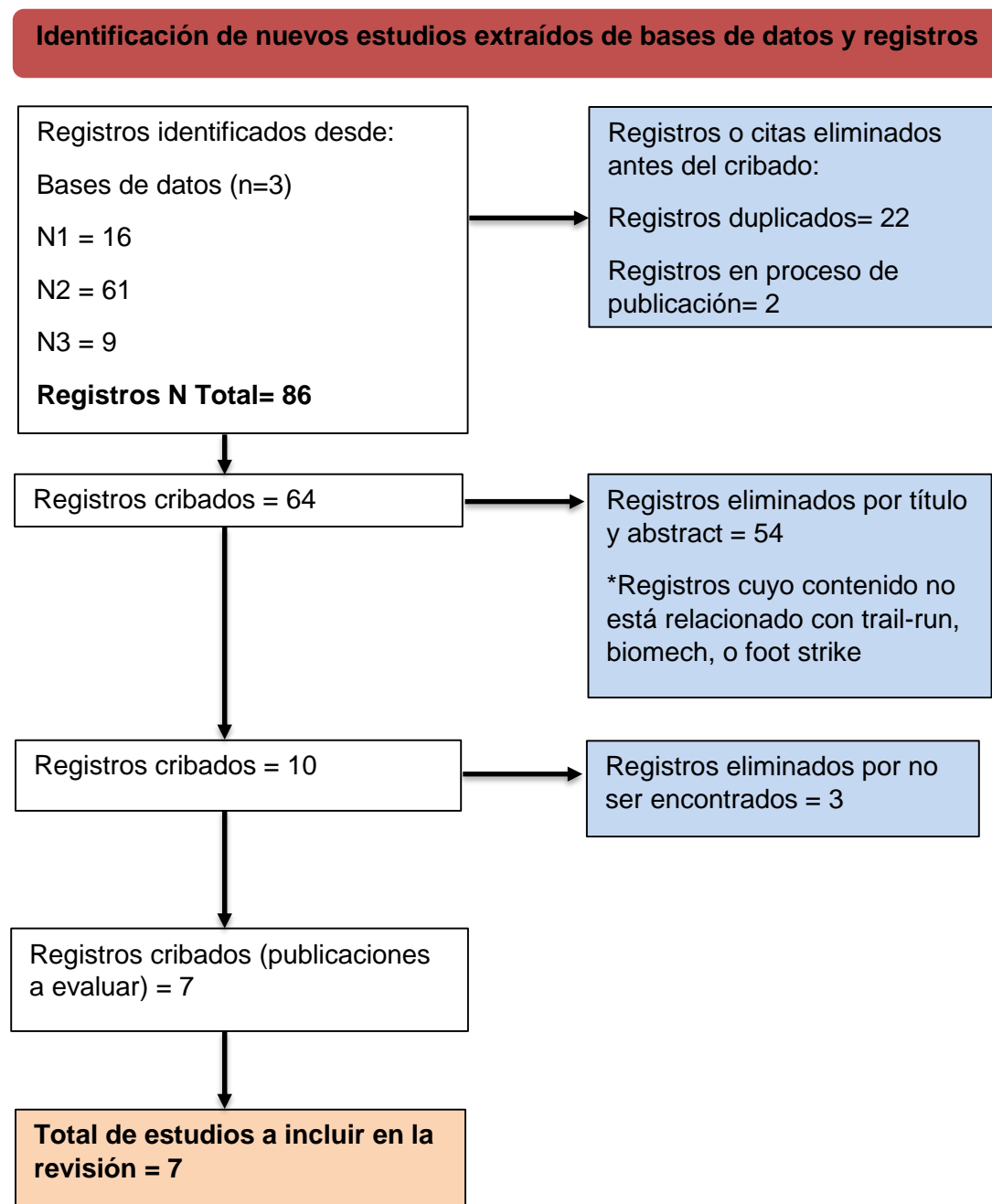


Figura 3. Diagrama de flujo (PRISMA)

Para esta revisión sistemática se parte de una muestra de 86 registros, extraídos de las tres bases de datos PubMed (16 registros), Scopus (61 registros) y WOS (9 registros). De estos 86 registros se excluyen 22 que aparecen duplicados. Este proceso de eliminación de duplicados se ha llevado a cabo a través de la aplicación Mendeley.

En las bases de datos hay 2 en proceso de publicación por lo que los extraigo de la selección (Effect of ground technicity on cardio-respiratory and biomechanical parameters in uphill trail running / Does neuromuscular fatigue generated by trail running modify foot-ground impact and soft tissue vibrations?) Sobre estos 64 aplico una primera criba, revisándolos con una primera lectura del título y el resumen, seleccionando únicamente los que tienen que ver con la temática de la revisión bibliográfica.

Cabe destacar que en algunos artículos se procede a una lectura más exhaustiva para determinar si realmente están relacionados con el tema que nos ocupa. Una vez realiza esta gran criba nos quedan 10 registros.

Finalmente, 3 de estos 10 artículos son únicamente accesibles bajo suscripción de pago, por lo que se selecciona una muestra final de 7 artículos.

### **Referencias de los 3 artículos no encontrados:**

Lemire, M., Remetter, R., Hureau, T. J., Geny, B., Lonsdorfer, E., Favret, F., & Dufour, S. P. (2022). Energy Cost of Running in Well-Trained Athletes: Toward Slope-Dependent Factors. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 17(3), 423–431. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2021-0047>

VERMAND, S., FERRARI, F.-J., CHERDO, F., GARSON, C., LAVENANT, M., ALEX, M.-C., ... GARCIN, O. (2022). Running biomechanics alterations

during a 40 km mountain race. The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness. <https://doi.org/10.23736/s0022-4707.22.13049-5>

Nicot, F., Sabater-Pastor, F., Samozino, P., Millet, G. Y., & Rupp, T. (2021). Effect of ground technicity on cardio-respiratory and biomechanical parameters in uphill trail running. European Journal of Sport Science. <https://doi.org/10.1080/17461391.2021.1995507>

### 4.1.2. Tabla de resultados

Tabla 1. Análisis de los resultados obtenidos en la revisión sistemática

Nº	Referencia	Características de la muestra	Protocolo del estudio	Objetivo del estudio	Criterios analizados	Resultados
1	Giandolini, M., et al., (2016).	23 corredores de trail hombres (edad: $39 \pm 11$ años, altura: $176 \pm 6$ cm, masa: $71,5 \pm 9,6$ kg, duración semanal de la carrera: $4,8 \pm 2,4$ horas semanales)  Todos, el mismo modelo de zapatilla (Salomon S-Lab Sense 3 Softground)	Plan de entrenamiento específico tres meses anteriores a la prueba  6,5 km DTR (-1264m) lo más rápido posible  4 acelerómetros: Talón, metatarsianos, tibia y sacro.  Medido en 6 secciones a través de 3D aceleradores	Examinar como el FSP influye en la intensidad del impacto y la atenuación en un descenso de trail running.	- Dos acelerómetros en la zapatilla izquierda (talón y metatarsos) para identificar el FSP durante la carrera  - Otros dos se fijaron en la cara anteriomedial de la tibia izquierda y al tubérculo de la cresta sacra mediana proximal. Estos cuantificaban las intensidades de choque axial, transversal y la atenuación del choque entre la tibia y el sacro.	- El impacto transversal no puede ser despreciado debido a que tiene valores similares al axial  - El patrón de pisada influye de forma diferente en la intensidad y la frecuencia de los impactos axiales y transversales.  - Un patrón de golpeo más anterior (FFP) produce más intensidad de choque en el axial y menos en el transversal (atenúa más el impacto)
2	Giandolini, M., et al., (2017).	23 corredores de trail hombres (edad: $39 \pm 11$ años, altura: $176 \pm 6$ cm, masa $71,5 \pm 9,6$ kg, volumen de carrera semanal: $4,8 \pm 2,4$ h)  Completar al menos una carrera de 45km y libre de lesiones por 6 meses.  Seleccionados en función de su técnica de pisada para tener una amplia variedad	6,5 km DTR (-1264m)  Medido en 6 secciones a través de 3D aceleradores  Aceleraciones del talón y del metatarso (acelerómetro inalámbrico tridimensional)  Misma zapatilla (Salomon S-Lab Sense 3 softground).  Electromiografía (VL, BF, GL y TA) *Solo se analizaron 15 sujetos	Investigar los efectos de la técnica de carrera y su variabilidad en 1. La actividad muscular de una bajada y 2. La fatiga neuromuscular inmediatamente después  Secundarios: evaluar si cambiar el patrón de pisada minimiza la fatiga del tren inferior	- Aceleraciones del talón y del metatarso de forma continua para analizar el patrón de pisada (método validado por Giandolini)  - Evalúa fatiga periférica y central KE y PF (EMG) antes, durante, inmediatamente después y 2 días después para analizar la fatiga neuromuscular.	*Patrón FFS produce un mayor aumento de GL y menor de TA y VL por lo que produce más demanda de la musculatura PF  *Patrón RFS aumenta la activación VL por lo que reduce el daño KE  - No existe una técnica ideal, se sugiere la alternancia de técnica durante los descensos para reducir la fatiga.
3	Vercruyssen, F. et al., (2016).	13 corredores hombres bien entrenados y competitivos trail run. (edad: $38,2 \pm 4,8$ años; estatura: $175,5 \pm 4,9$ cm; masa corporal: $68,2 \pm 6,0$ kg).	Test máximo en cinta para medir variantes (RE, VO <sub>2</sub> , Gasto energético)  Antes y después de 18,4 km (4 vueltas de 4,6 km) en corredores	Este estudio tiene como objetivo examinar los efectos del calzado y la fatiga neuromuscular	ANTES - Medir la economía de carrera, rigidez vertical y de piernas (Kvert y Kleg), el ángulo de impacto del pie.  - Máxima contracción voluntaria (MVC) a través de un dinamómetro	- Indicaron alteraciones específicas en la RE (running economy) y biomecánica a lo largo del tiempo durante las condiciones MS (minimalist shoes) y MSm (MS plus added mass) en comparación con la condición TS (tradicional shoes).

		<p>Media de 6,4 <math>\pm</math> 2,4 años de práctica y distancia entre 20 y 45km.</p> <p>Sin experiencia con zapatos minimalistas excepto las 3 semanas de entrenamiento guiado anteriores</p> <p>Zapatos de forma aleatoria (Salomon Sense, Salomon XT Wings, Salomon sense con masa añadida "diferencia de peso entre MS y MT")</p> <p>*Desciende el volumen de entrenamientos debido a la lluvia y para que se mantengan los mismos ritmos.</p>	<p>con zapatillas minimalistas, tradicionales o maximalistas.</p> <p>Máxima contracción voluntaria también fue evaluada (MVC) de los extensores de rodilla a través de un test isométrico antes y después del 18,4 trail</p>	<p>inducida por el trail running (TR) de corta distancia sobre la economía de carrera (ER) y la biomecánica en corredores bien entrenados y con calzado tradicional</p>	<p>isocinético de la pierna derecha a 90°.</p> <p><b>DURANTE</b> Monitorización FC, perfil de elevación y tiempo.</p> <p>Dolor muscular subjetivo extensor de rodilla (cuadriceps) y pantorrillas del 0-10</p> <p><b>DESPUES</b> - Medir la economía de carrera, rigidez vertical y de piernas (Kvert y Kleg), el angulo de impacto del pie.</p> <p>- Máxima contracción voluntaria (MVC) a través de un dinamómetro isocinético de la pierna derecha a 90°.</p>	<p>- Mayor disminución RE con calzado MS y MSm que con TS (podría ser por hábito)</p> <p>- Cambio significativo en la musculatura fatigada (MS y MSm más fatiga en pantorrilla y músculos dorsoflexores)</p> <p>*Se justifica la realización de futuros estudios para evaluar la relación entre el ER y el calzado con la fatiga en corredores experimentados con calzado mínimo y esfuerzos de más larga duración.</p>
4	Mo, S. et al., (2021).	<p>18 corredores hombres, habituales y sanos con tendencia a talonar (RFS).</p> <p>Entre 20 y 55 años, entre 10km a la semana durante los últimos 12 meses y sin experiencia con los modelos de zapatilla</p>	<p>Prueba de selección para los corredores.</p> <p>Zapatilla minimalista (newton running lab MV2) y maximalista Hoka One One, Clifton 3. Sin experiencia con estas zapatillas.</p> <p>Se realizó al aire libre en 3 sesiones (subida, plano y bajada) en ambos modelos de calzado con 30 min entre ellas.</p> <p>75m de llano y 50m de subida y bajada.</p>	<p>Examinar los efectos del calzado maximalista y minimalista en la biomecánica de corredores de trail running en el medio natural</p>	<p>- Carga de impacto y el patrón de golpeo a través de plantillas sensoras de presión (Pedar-X)</p> <p>- Aceleraciones a través de acelerómetro triaxial (tibia)</p>	<p>- Durante la subida se cambia a un apoyo de medio pie, mientras que plano o cuesta abajo siguen con apoyo trasero.</p> <p>- El tipo de calzado no afecta inmediatamente a la carga de impacto ni al patrón de golpeo (técnica de carrera).</p> <p>- El tipo de calzado tiene efectos mínimos en la biomecánica de la carrera de trail</p>
5	Horvais, N., & Giandolini, M. (2013).	<p>16 corredores hombres de trail en talla 8,5 de reino unido se dividieron en dos grupos (alto nivel 9 y medio 7).</p>	<p>Calentamiento de 15min. Realizaron 3 tipos de bajadas diferentes (Técnica, media y nada técnica)</p>	<p>Analizar el patrón de golpeo del pie y la aceleración máxima de la tibia entre dos niveles diferentes de corredores de trail durante tramos de</p>	<p>Se miden las aceleraciones de la espinilla (sistema Fox Hikob) para las aceleraciones máximas en la tibia (PTA)</p> <p>Dispositivo portátil de presión plantar (Sistema Pedar, Novel)</p>	<p>- El pico de aceleración de la tibia no difiere entre grupos, aunque un grupo corrió más rápido que otro.</p> <p>- Hipótesis, correr con un patrón de mediopie reduciría el dolor, daño muscular y mejorar el rendimiento en bajada o en la siguiente subida.</p>

				descenso en senderos.	Electronics) para localizar en 2D el centro de presión.	
6	Giandolini, M., et al., (2015).	1 corredor de élite mundial.  Líder actual mundial de trail y ultra-trail (26 años, 56,6kg y 171cm)  Terminó primero con 4h23'	Durante la carrera Kilian's Classik 2013 (Font-Romeu, Francia). Carrera oficial de trail running de 45km con 1627+  *Solo los 20km debido a la batería del sistema gps.  3 acelerómetros (tibia, talón y metatarsos). *Diferente sistema de Giandolini	- Describir la cinemática de carrera (distribución de técnicas de golpeo del pie y SF) en uno de los mejores corredores de ultra-trail  - Examinar cómo la pendiente, velocidad y tiempo de carrera (fatiga) influyen en esta distribución  - Cuantificar la gravedad global del estrés sufrido por un corredor a lo largo de una carrera típica	- Velocidad de carrera y pendiente a partir de altitud, latitud y longitud por el GPS.  - Aceleración vertical (longitudinal), anteroposteriores (anterior medial) y medio-lateral (ortogonal y transversal)  - Parámetros de impacto a partir de tiempo y frecuencia.  - Aceleración máxima de la tibia (PTA) vertical PTax, anteroposterior PTay, resultante PTAr  - Frecuencia de pisada a través de la aceleración vertical de la tibia, inversa a la duración del ciclo de zancadas (tiempo entre los dos picos tibiales consecutivos)	- En 20km solo se produjo un 18% de RFS, algo atípico. (puede ser porque era mayoritariamente en subida).  - El estrés global puede ser influenciada por el desnivel, velocidad, frecuencia y patrón de carrera  - La aceleración anteroposterior no se debe despreciar al medir la magnitud del impacto en carrera
7	Kerhervé, H. A. et al., (2017).	14 hombres sanos (edad: 21,7 ± 3,0 años; altura: 180,2 ± 4,7 cm; peso: 72,3 ± 6,7 kg; índice de masa corporal 22,2 ± 1,6 kg-m2; volumen de actividad física semanal: 6,00 ± 2,02 h), con experiencia en carreras de trail y entrenados (>2h semanales), recibir estudio médico, sin competiciones durante la fase de estudio.	Estudio aleatorio y cruzado entre maguitos degresivos CS (compresión sleeves 23+-2 mmHg) y CON (control sleeves 4mmHg) En las pantorrillas  Un recorrido dividido en 2 sesiones: 1 de terreno moderadamente plano y no técnico y el 2 de 13km y más técnico. 24km y 1020+  Primero a ritmo constante en terreno llano y otro "all out" en terreno montañoso  Carrera de +-150min	Determinar si las mangas de compresión "calf compression" en la pantorrilla afectan a parámetros fisiológicos y biomecánicos, rendimiento y sensación de fatiga muscular, dolor y molestias durante una carrera de montaña al aire libre (2h30')	Tiempo de carrera, frecuencia cardiaca y oxigenación muscular del musculo gastrocnemio medio (a través de espectroscopia infrarroja portátil cercano) de forma continua  Capacidades funcionales musculares (potencia y rigidez) a través de 20" salto máximo después de las sesiones.  Patrones biomecánicos (cinemática, verticalidad, rigidez) medidos a 12km/h antes, durante y después  Dolor del tendón de Aquiles y dolor de pantorrilla de aparición retardada (DOMS) mediante escalas analógicas visuales.	- Compresión de pantorrilla no modificó la oxigenación muscular durante 2h30' de trail  - Compresión cambió la biomecánica de carrera y capacidades funcionales en extremidades inferiores (dinamismo)  - Compresión no afectó al rendimiento ni al DOMS (dolor muscular retardado en la pantorrilla)  - Minimizó el dolor del tendón de Aquiles inmediatamente después de correr.  - Ningún efecto adverso en las variables medidas.

Leyenda tabla de resultados:

**DTR** (downhill trail run), **FSP** (foot strike pattern), **FFP** (forefoot strike pattern)

**VL** (vasto lateral), **BF** (bíceps femoral), **GL** (gastrocnemio lateral), **TA** (tibial anterior), **KE** (extensor de rodilla), **PF** (flexores plantares), **EMG** (electromiografía), **RFS** (rearfoot strike), **MS** (calzado minimalista), **MSm** (MS con masa añadida), **TS** (calzado tradicional), **RE** (economía de carrera), **MVC** (máxima contracción voluntaria), **Kvert** (rigidez vertical), **Kleg** (rigidez de piernas), **FC** (frecuencia cardiaca).

**PTA** (pico de aceleración tibial), **SF** (step frequency), **PTAx** (pico de aceleración tibial vertical), **PTAy** (pico de aceleración tibial anteroposterior), **PTAr** (pico de aceleración tibial resultante), **CS** (maguitos degresivos, compresión 23+-2 mmHg) y **CON** (manguitos control compresión 4mmHg).

En la presente revisión sistemática, se obtuvieron resultados de un total de 108 corredores de Trail running, cuya edad media fue de 37,85 años, siendo la edad inferior 18 años y la superior 50 años, la masa corporal media de los corredores del 71,5 kg, 56,6kg el peso más bajo y 81,1kg el más alto y la altura media de los corredores de 176 m, 170 la altura más baja y 185 la más alta. En general, tal y como se puede comprobar en las muestras analizadas hay gran variedad, pero todos coinciden en el sexo masculino y con experiencia en el deporte del trail running.

Los objetivos principales de los estudios son bastante diferentes, pero todos tienen en común la búsqueda de aspectos relacionados con la biomecánica de carrera realizando los estudios al aire libre, en terreno de montaña o sendero. Si analizamos las variables biomecánicas más estudiadas en los artículos incluidos en la revisión encontramos que 5 de 7 artículos tienen en cuenta el análisis de los impactos de aceleración, 5 de los 7 artículos analizan la actividad muscular y la fatiga neuromuscular, 3 de 7 artículos analizan efectos del calzado y mallas de compresión y 5 de los artículos analizan el patrón de golpeo del pie. Además, muchos de los artículos analizan diferentes variables al mismo tiempo.

Los resultados principales del estudio son muy variados, siendo los más significativos que el patrón de pisada influye de forma diferente en la intensidad y la frecuencia de los impactos axiales y transversales y que no existe una técnica ideal, se sugiere la alternancia de técnica durante los descensos para reducir la fatiga. Pese a que se ha demostrado que correr con un patrón de mediopié reduce el dolor, daño muscular y mejora el rendimiento en bajada o en la siguiente subida.

El tipo de calzado no afecta inmediatamente a la carga de impacto ni al patrón de golpeo (técnica de carrera). Pero se observan alteraciones específicas en la economía de carrera y biomecánica a lo largo del tiempo durante las condiciones de minimalismo y maximalismo en comparación con la condición de calzado tradicional. Por otro lado, la compresión a través de manguitos cambia la biomecánica de carrera y capacidades funcionales en extremidades inferiores (dinamismo), aunque no afecta al rendimiento ni al DOMS (dolor muscular retardado en la pantorrilla).



## **5. Discusión**

El objetivo principal de esta revisión es conocer, estudiar y analizar cuáles son los patrones de movimiento ideales a nivel biomecánico para la economía de carrera en montaña. Los principales resultados obtenidos en la presente revisión fueron que no existe una técnica ideal para las carreras por montaña, se sugiere la alternancia de técnica durante los descensos para reducir la fatiga. Aunque el patrón de pisada influye de forma diferente en la intensidad y la frecuencia de los impactos axiales y transversales. Por ejemplo, correr con un patrón de mediopié reduce el dolor, daño muscular y mejora el rendimiento en bajada o en la siguiente subida.

Las carreras por montaña o trail running consisten en recorrer distancias entre 20km y 300km con cambios de elevación positivos y negativos. Debido a este estrés musculoesquelético, los corredores están expuestos a lesiones, entre las más habituales se dan problemas de rodillas, fémur, cadera, tibia, peroné y pie. (Hoffman y Krishnan, 2014; Lopes et al., 2012). Esta gran cantidad de lesiones osteo-articulares puede estar relacionada con el elevado número de contactos entre el pie y el suelo (Lafortune et al., 1996). Algunos estudios mencionan que entre el 50 y 75% de las lesiones por correr son lesiones por sobrecarga, es decir, un uso excesivo debido a la repetición constante del mismo movimiento (van Mechelen, 1992). Un estudio ha demostrado que los impactos están muy relacionados con las lesiones y sobrecargas (Daoud et al., 2012). Algo, qué si se descuida, nunca favorecerá a tener un buen rendimiento en la modalidad deportiva en cuestión.

La biomecánica de carrera, así como la longitud de zancada afecta de diferente manera al sistema musculoesquelético ya que hay cambios en la cantidad e intensidad que el cuerpo soporta los impactos (Kulmala, Avela, Pasanen, & Parkkari, 2013; Rooney & Derrick, 2013). El patrón de pisada del pie (foot strike pattern) influye en la magnitud del impacto y en el estrés aplicado al sistema locomotor (E.G, Boyer et al., 2014; Divert et al., 2005; Giandolini et al., 2013; Kulmala et al., 2013; Lieberman et al., 2010; Shih et al., 2013). Numerosos estudios han investigado sus efectos en la carga articular o el impacto (Kulmala, Avela, Pasanen, & Parkkari, 2013; Rooney & Derrick, 2013) aunque más centrados en el riesgo de lesiones relacionadas con la carrera.

Para el análisis de este tipo de patrón de pisada hay una gran cantidad de metodologías y datos a analizar diferentes. Los métodos más comunes utilizados para identificar los patrones de pisada son la medición del ángulo entre el pie y el suelo en el contacto inicial a través del análisis de vídeo en 2 o 3 dimensiones (Hasegawa et al., 2007; Kasmer et al., 2013a, 2013; Larson et al., 2011). Sin embargo, esos métodos son difícilmente aplicables en el terreno ya que se necesitan condiciones estables para su medición. Además, debido a que durante un ejercicio prolongado en el tiempo puede ser asimétrico y alterado por la fatiga, Giandolini, M., et al., (2015) plantea un método basado en la medición de aceleraciones para describir patrones de carrera y medir la magnitud del impacto a través de mediciones continuas.

Se han identificado 3 tipos de patrones de pisada que pueden variar la biomecánica de carrera: pisada de retropié (Rare foot strike), pisada de mediopie (Mid foot strike) y la pisada de antepié (Fore foot strike) Giandolini, M., et al. (2016). Según Giandolini, M., et al. (2016), la adopción de un patrón de golpeo

del pie más anterior crea más intensidad de choque a lo largo del eje axial y una menor a lo largo del eje transversal. Esto lleva a mejorar la atenuación de las frecuencias axiales y las resultantes del impacto. El mismo autor determina en un estudio posterior que un patrón FFS produce un mayor aumento de la demanda de gastrocnemio lateral (GL) y menor del tibial anterior (TA) y vasto lateral (VL) por lo que demanda más de la musculatura de los flexores plantares (PF) (Giandolini, M., et al., 2017). Por el contrario, un patrón RFS aumenta la activación del vasto lateral (VL) por lo que reduce el daño de los extensores de rodilla (KE).

Durante la carrera a nivel, varios estudios demostraron que modificar el patrón de pisada del pie (pisada con el pie trasero a pie delantero) reducía el impacto con el suelo y por tanto la fatiga (Squadrome y Gallozi 2009, Lieberman et al. 2010, Delgado et al. 2012). Aunque (Vercruyssen, F. et al., (2016) observan mayores beneficios biomecánicos respecto a un tipo de pisada más de antepié o medio pie frente a la de retro pie. Esto es debido a que la acción elástica óptima del pie sólo sería posible durante carreras de nivel o llanas, optimizando los mecanismos de ahorro (Vercruyssen, F. et al., (2016). Respecto a esto Hasegawa et al. (2007) observó que los corredores de mayor nivel tienen un patrón de pisada más de antepié debido principalmente a que este tipo de patrones se dan más frecuentemente a mayor velocidad. Giandolini, M., et al., (2017) concluye con que no existe una técnica ideal, por lo que se sugiere es la alternancia de patrón de pisada durante los descensos para reducir la fatiga.

Por otro lado, en el trail running hay grandes cambios positivos y negativos que inducen a una gran fatiga neuromuscular, tanto central (activación voluntaria) como periférica (menor excitabilidad del sarcolema, es decir, excitación-

contracción) (Millet et al., 2002, 2011; Saugy et al., 2013; Temesi et al., 2014). Respecto a la fatiga, en diferentes estudios se llega a la conclusión de que los atletas adoptan un tipo de carrera más suave y segura después del esfuerzo, debido, probablemente a una menor tolerancia a los golpes (Degache et al., 2013; Millet et al., 2009; Morin, Samozino, & Millet, 2011a; Morin, Tomazin, et al., 2011).

Horvais, N., & Giandolini, M. (2013) plantean la hipótesis de que correr con un patrón de golpeo con el medio pie que reduzca el impacto durante el descenso podría reducir el dolor y el daño muscular, y a su vez aumentar el rendimiento en la bajada, o en la siguiente subida. Esto a su vez, cambiaría la postura del cuerpo hacia adelante, favoreciendo a la gravedad y por tanto reduciendo la fase excéntrica. También Vercruyssen, F. et al., (2016) nombran que la alteración de la economía de carrera (RE) a lo largo de una carrera prologada en el tiempo, puede ser debido a la fatiga neuromuscular. Mo, S. et al., (2021) llega a la conclusión de que la mayoría de los corredores cambia a un patrón de pisada de medio pie (FMS) durante las subidas mientras que mantienen su técnica habitual de retropié (FRS) en las bajadas y plano para reducir la fatiga general creada.

Por último, con respecto a los estudios relacionados con el material utilizado en este tipo de carreras, se han investigado los efectos agudos o prolongados del calzado sobre el patrón de golpeo del pie (Horvais & Samozino, 2013; Ridge et al., 2013; Squadrone & Gallozzi, 2009; Warne & Warrington, 2012). Según Mo, S. et al., (2021). no hay diferencias significativas en el pico de aceleración de la tibia (PTA) entre calzados minimalistas y maximalistas. Al contrario de lo analizado por (Ogston, 2019) que observó mayor carga plantar en calzado minimalista que maximalista. También Sinclair (2017) observa una menor PTA

en calzado minimalista frente a la maximalista. Esto parece indicar que el uso de calzado minimalista produce un mayor pico de aceleración a nivel distal, lo que podría traducirse en un incremento de la transmisión de impactos a lo largo de todas las articulaciones del cuerpo.

Otro estudio de Kerhervé, H. A. et al., (2017) analizó las medias de comprensión para la reducción de la carga muscular durante la carrera prolongado y comprobar si había una alteración de la técnica. La compresión a través de manguitos cambió la biomecánica de carrera y capacidades funcionales en extremidades inferiores (mayor dinamismo), aunque esta no afectó al rendimiento ni al DOMS (dolor muscular retardado en la pantorrilla). Los resultados fueron que estas mangas no modifican el rendimiento del ejercicio, la oxigenación muscular y la frecuencia cardiaca, aunque parece no estar asociado a ningún efecto adverso.

## **5.1. Limitaciones de la revisión y futuras líneas de investigación**

EA través de esta revisión, no se observa la existencia de un consenso en la metodología y criterios a seguir para realizar estudios de biomecánica en el trail running, por lo que crear un protocolo estandarizado y fácil de replicar para futuros estudios es indispensable. Además, durante la realización de esta revisión se encuentra que los estudios analizan muestras muy dispares, lo que dificulta tanto el análisis de los resultados, como su comparación. Debido a estas grandes diferencias y discrepancias entre los estudios analizados y la base científica actual sobre el tema, se hacen necesarios más recursos científicos,

tratando de aumentar las muestras de corredores estudiadas y tratando de unificar los protocolos de medida en este tipo de carreras. Esta limitación impide realizar un meta-análisis debido a la heterogeneidad de las variables analizadas y de los protocolos analizados.

Respecto al apartado de material deportivo durante las carreras de trail se observa un gran debate. Esto puede ser debido a que algunos estudios utilizan sujetos no acostumbrados a realizar entrenamientos con el tipo de calzado minimalista y/o maximalista, lo que altera los resultados obtenidos, o también debido a que es muy complicado saber el tipo de terreno donde se realiza el estudio. Respecto al material deportivo relacionado con la biomecánica del trail running, se deben realizar más investigaciones ya que las existentes son escasas y con conclusiones muy diferenciadas entre ellas.

Debido a la dificultad de medición de los parámetros *“in situ”* y la gran variedad de factores que se deben tener en cuenta para analizar la biomecánica, es necesario un sistema o aparato que facilite este proceso de análisis (acelerómetro, potenciómetro...), así como una metodología de medición organizada y fácil de replicar.

## **6. Conclusiones**

- No se puede concluir que haya una técnica de carrera idónea en terrenos de montaña. Lo que estudios recomiendan es alternar entre unos y otros para provocar menos fatiga y por lo tanto aumentar el rendimiento.
- Debido a los grandes debates respecto al equipamiento deportivo actualmente, se hacen necesarios más estudios para definir hipótesis concluyentes.

- La fatiga es un factor limitante en las carreras de montaña, por lo que es un aspecto que se debe tener en cuenta para el entrenamiento de este tipo de pruebas.
- Una técnica de FFS o FMS (pisada ante pie o medio pie) durante la subida es un patrón habitualmente adquirido por el corredor, pero se observan grandes diferencias entre patrones de pisada durante las secciones de descenso.
- Hay muchos estudios de biomecánica de carrera en asfalto o en cinta de correr, pero no suficientes al aire libre. Se hacen por lo tanto necesarios más estudios al aire libre, así como los factores que afectan a la biomecánica de carrera, para, de esta forma, plantear nuevas preguntas que puedan dar lugar a más líneas de investigación.

## 7. Bibliografía

- ARRS - Association of Road Racing Statiscians (2018). Trail and Mountain Race Histories. Recuperado el 22 de octubre de 2018, de: <https://arrs.run/RaceHist.ht>
- Babí Lladós, Joan & Soler, Susanna & Inglés Yuba, Eduard & Labrador, Víctor. (2021). Historia y proceso de ordenación de las carreras en la montaña en España. [History and planning process of trail races in Spain]. RICYDE. Revista internacional de ciencias del deporte. 17. 140-159. 10.5232/ricyde2021.06403. DOI:10.5232/ricyde2021.06403
- Bermejo Frutos, J. (2013). Revisión del concepto de la técnica deportiva desde la perspetiva biomecánica del movimiento. EmasF, Revista Digital de Educación Física, 25. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4707702>
- Boyer, E.R., Rooney, B.D., Derrick, T.R., 2014. Rearfoot and midfoot or forefoot impacts in habitually shod runners. Medicine & Sciencie in Sports & Exercise 46, 1384-1391. DOI: 10.1249/MSS.0000000000000234
- Chase, A., & Hobbs, N. (2010). Ultimate Guide to Trail Running: Everything You Need to Know About Equipment\* Finding Trails\* Nutrition\* Hill Strategy\* Racing\* Avoiding Injury\* Training\* Weather\* Safety (2nd ed.). Guilford: Globe Pequot Press.
- Cunningham CB, Schilling N, Anders C, Carrier DR. (2010). The influence of foot posture on the cost of transport in humans. Journal of Experimental Biology. Mar 1;213(5):790-7. doi: 10.1242/jeb.038984.



- Daoud, A.I., Geissler, G.J., Wang, F., Saretsky, J., Daoud, Y.A., & Lieberman, D.E. (2012). Foot strike and injury rates in endurance runners: A retrospective study. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 44(7), 1325-1334. DOI: 10.1249/MSS.0b013e3182465115
- Degache, F., Guex, K., Fourchet, F., Morin, J. B., Millet, G. P., Tomazin, K., & Millet, G. Y. (2013). Changes in running mechanics and spring-mass behaviour induced by a 5-hour hilly running bout. *Journal of Sports Sciences*, 31(3), 299–304. <https://doi.org/10.1080/02640414.2012.729136>
- Delgado, T.L., Kubera-Shelton, E., Robb, R.R., Hickman, R., Wallmann, H.W., & Dufek, J.S. (2012). Effects of foot strike on low back posture, shock attenuation, and comfort in running. *Medicine & Science in Sports & Exercise*. doi:10.1249/MSS.0b013e3182781b2c
- Divert, C., Mornieux, G., Baur, H., Mayer, F., Belli, A., (2005). Mechanical comparison of barefoot and shod running. *International Journal of Sports Medicine* 26, 593-598. DOI: 10.1055/s-2004-821327
- Garbisu-Hualde A, Santos-Concejero J. (2020). What are the Limiting Factors During an Ultra-Marathon? A Systematic Review of the Scientific Literature. *Journal of Human Kinetics*. Mar 31;72:129-139. doi: 10.2478/hukin-2019-0102. PMID: 32269654; PMCID: PMC7126261.
- Giandolini, M., Arnal, P.J., Millet, G.Y., Peyrot, N., Samozino, P., Dubois, B., Morin, J.B., 2013. Impact reduction during running: efficiency of simple acute interventions in recreational runners. *European Journal of Applied Physiology* 113, 599-609. DOI: 10.1007/s00421-012-2465-y
- Giandolini, M. (2015). Gestion de l'impact et de la fatigue neuromusculaire en trail running. *Physiologie*. Tesis Doctoral. Université Jean Monnet - Saint-Etienne

- Giandolini, M., Horvais, N., Rossi, J., Millet, G. Y., Morin, J. B., & Samozino, P. (2017). Effects of the foot strike pattern on muscle activity and neuromuscular fatigue in downhill trail running. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, 27(8), 809–819. <https://doi.org/10.1111/sms.12692>
- Giandolini, M., Horvais, N., Rossi, J., Millet, G. Y., Samozino, P., & Morin, J. B. (2016). Foot strike pattern differently affects the axial and transverse components of shock acceleration and attenuation in downhill trail running. *Journal of Biomechanics*, 49(9), 1765–1771. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2016.04.001>
- Giandolini, M., Pavailler, S., Samozino, P., Morin, J. B., & Horvais, N. (2015). Foot strike pattern and impact continuous measurements during a trail running race: proof of concept in a world-class athlete. *Footwear Science*, 7(2), 127–137. <https://doi.org/10.1080/19424280.2015.1026944>
- Hasegawa, H.; Yamauchi, T., & Kramer, W. J. (2007). Foot strike patterns of runners at the 15 km point during an elite-level half marathon. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 21(3), 888-893. DOI: 10.1519/R-22096.1
- Hoffman, M.D., Krishnan, E., (2014). Health and exercise-related medical issues among 1,212 ultramarathon runners: baseline findings from the Ultrarunners Longitudinal TRacking (ULTRA) Study. *PLOS One* 9, e83867. doi: 10.1371/journal.pone.0083867
- Hoffman, M. D.; Ong, J. C., & Wang, G. (2010). Historical analysis of participation in 161 km ultramarathons in North America. *The International journal of the history of sport*, 27(11), 1877–1891. DOI: 10.1080/09523367.2010.494385

- Horvais, N., & Giandolini, M. (2013). Foot strike pattern during downhill trail running. *Footwear Science*, 5(SUPPL. 1).  
<https://doi.org/10.1080/19424280.2013.799535>
- Horvais N, Samozino P (2013). Effect of midsole geometry on foot-strike pattern and running kinematics. *Footwear Science* ;5(2):81-9  
DOI:10.1080/19424280.2013.767863
- House, S., Johnston, S., & Jornet, K. (2019). Training for the uphill athlete (1.a ed.). Patagonia.
- Kasmer, M.E., Liu, X., Roberts K.G., & Valadao, J.M. (2013a). Foot-strike pattern and performance in a marathon. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 8(3), 286-292. DOI: 10.1123/ijsp.8.3.286
- Kasmer, M.E., Wren, J.J., & Hoffman, M.D. (2013). Foot strike pattern and gait changes during a 161-km ultramarathon. *Journal of Strength and Conditioning Research.*, 28(5), 1343-1350. DOI: 10.1519/JSC.0000000000000282
- Kerhervé, H. A., Samozino, P., Descombe, F., Pinay, M., Millet, G. Y., Pasqualini, M., & Rupp, T. (2017). Calf compression sleeves change biomechanics but not performance and physiological responses in trail running. *Frontiers in Physiology*, 8(APR). <https://doi.org/10.3389/fphys.2017.00247>
- Kulmala, J.P., Avela, J., Pasanen, K., Parkkari, J., (2013). Forefoot strikers exhibit lower running-induced knee loading than rearfoot strikers. *Medicine & Science in Sports & Exercise* 45, 2306-2313. DOI: 10.1249/MSS.0b013e31829efcf7
- Kulmala, J.P., Avela, J. Pasanen, K., Parkkari, J. (2013). Forefoot strikers exhibit lower running-induced knee loading than rearfoot strikers. *Medicine &*

- Science in Sports & Exercise, 45(12), 2306-2313. DOI: 10.1249/MSS.0b013e31829efcf7
- Kyrolainen, H.; Belli, A., & Komi, P. V. (2001). Biomechanical factors affecting running economy. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 33(8), 1330-1337. DOI: 10.1097/00005768-200108000-00014
- Page, J., Joanne McKenzie, E., & Patrick Bossuyt, M. (2021). Declaración PRISMA 2020: una guía actualizada para la publicación de revisiones sistemáticas. *Revista española de cardiología*, 74(9), 790–799. <https://doi.org/10.1016/j.recesp.2021.06.016>
- Millet, G.Y., Morin, J.B., Degache, F., Edouard, P., Feasson, L., Verney, J., & Oullion, R. (2009). Running from Paris to Beijing: biomechanical and physiological consequences. *European Journal of Applied Physiology*, 107(6), 731-738 DOI: 10.1007/s00421-009-1194-3
- Millet GY, Lepers R, Maffiuletti NA, Babault N, Martin V, Lattier G. (2002) Alterations of neuromuscular function after an ultramarathon. *Journal of Applied Physiology*, 92: 486–492. DOI: 10.1152/japplphysiol.00122.2001
- Millet GY (2011). Changes in running mechanics and spring-mass behavior induced by a mountain ultra-marathon race. *Journal of Biomechanics*: 44(6): 1104–1107. DOI: 10.1016/j.jbiomech.2011.01.028
- Morin, J.B., Samozino, P., & Millet, G.Y. (2011). Changes in running kinematics, kinetics, and spring-mass behavior over a 24-h run. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 43(5), 829-836 DOI: 10.1249/MSS.0b013e3181fec518
- Morin J.B, Tomazin K, Edouard P, Millet GY (2011). Changes in running mechanics and spring-mass behavior induced by a mountain ultra marathon

- race. *Journal of Biomechanics*, 44(6): 1104–1107 DOI: 10.1016/j.jbiomech.2011.01.028
- Mo, S., Chan, Z. Y. S., Lai, K. K. Y., Chan, P. P. K., Wei, R. X. Y., Yung, P. S. H., Shum, G. & Cheung, R. T. H. (2021). Effect of minimalist and maximalist shoes on impact loading and footstrike pattern in habitual rearfoot strike trail runners: An in-field study. *European Journal of Sport Science*, 21(2), 183–191. DOI: 10.1080/17461391.2020.1738559
- Ng, S.-L.; Leung, Y.-F.; Cheung, S.-Y., & Fang, W. (2018). Land degradation effects initiated by trail running events in an urban protected area of Hong Kong. *Land Degradation & Development*, 29(3), 422–432. <https://doi.org/10.1002/ldr.2863>
- Larson, P., Higgins, E., Kaminski, J., Decker, T., Preble, J., Lyons, D., ... and Normile, A. (2011). Foot strike patterns of recreational and sub-elite runners in a long-distance road race. *Journal of Sport Sciences*, 29(15), 1665-1673 DOI: 10.1080/02640414.2011.610347
- Lafortune, M.A., Lake, M.J., Hennig, E.M., 1996. Differential shock transmission response of the human body to impact severity and lower limb posture. *Journal of Biomechanics* 29, 1531-1537.
- Lieberman, D.E., Venkadesan, M., Werbel, W.A., Daoud, A.I., D'Andrea, S., Davis, I.S., Pitsiladis, Y. (2010). Foot strike patterns and collision forces in habitually barefoot versus shod runners. *Nature*, 463(7280), 531-535. DOI: 10.1038/nature08723
- Ogston, J. K. (2019). Comparison of in-shoe plantar loading forces between minimalist and maximalist cushion running shoes. *Footwear Science*, 11(1), 55-61. doi: 10.1080/19424280.2018.1561760.

- Ogueta Alday, A. García López, J. (2016). Factores que afectan al rendimiento en carreras de fondo. RICYDE. Revista Internacional de Ciencias del Deporte. 12 (45), pp.278-308 <http://dx.doi.org/10.5232/ricyde2016.04505>
- Olmedillas, H. (2018). Performance factors in Trail-running. Archivos de medicina del deporte, 35, 6–7 [http://archivosdemedicinadeldeporte.com/articulos/upload/EDITORIAL\\_183\\_ingles.pdf](http://archivosdemedicinadeldeporte.com/articulos/upload/EDITORIAL_183_ingles.pdf)
- Page MJ, McKenzie JE, Bossuyt PM, Boutron I, Hoffmann TC, Mulrow CD, et al. (2021) The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. BMJ;372:n71. doi: 10.1136/bmj.n71
- Perl DP, Daoud AI, Lieberman DE. (2012) Effects of footwear and strike type on running economy. Medicine & Science in Sports & Exercise. Jul;44(7):1335-43. doi: 10.1249/MSS.0b013e318247989e.
- Ridge, S.T., Johnson, A.W., Mitchel, U.H., Hunter, I., Robinson, E., Rich, B.S.E., Brown, S.D. (2013). Foot bone marrow edema after a 10-wk transition to minimalist running shoes. Medicine & Science in Sports & Exercise, 45(7), 1363-1368 DOI: 10.1249/MSS.0b013e3182874769
- Rooney, B.D., & Derrick, T.R. (2013). Joint contact loading in forefoot and rearfoot strike patterns during running. Journal of Biomechanics, 46(13), 2201-2206. DOI: 10.1016/j.jbiomech.2013.06.022
- Saugy J, Place N, Millet GY, Degache F, Schena F, Millet GP (2013) Alterations of neuromuscular function after the world's most challenging mountain ultra-marathon. PLoS ONE: 8: e65596. DOI: 10.1371/journal.pone.0065596
- Seguí Urbaneja, J. & Inés Fariás, E. (2018). El trail running (carreras de o por montaña) en España. Inicios, evolución y (actual) estado de la situación.

- Retos: nuevas tendencias en educación física, deporte y recreación, 33, pp.123-128. DOI: <https://doi.org/10.47197/retos.v0i33.56462>
- Shih, Y., Lin, K.L., Shiang, T.Y., 2013. Is the foot striking pattern more important than barefoot or shod conditions in running? *Gait Posture*. DOI: 10.1016/j.gaitpost.2013.01.030
- Squadrone, R., & Gallozzi, C. (2009). Biomechanical and physiological comparison of barefoot and two shod conditions in experienced barefoot runners. *Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 49(1), 6-13.
- Temesi J, Rupp T, Martin V, Arnal PJ, Feasson L, Verges S, Millet GY (2014). Central fatigue assessed by transcranial magnetic stimulation in ultratrail running. *Med Sci Sports Exerc*: 46: 1166–1175. DOI: 10.1249/MSS.0000000000000207
- Urrutia, G., & Bonfill, X. (2010) Declaración PRISMA: una propuesta para mejorar la publicación de revisiones sistemáticas y metaanálisis. *Medicina clínica*, 135(11), 507-5011 DOI: 10.1016/j.medcli.2010.01.015
- Van Mechelen, W., (1992). Running injuries. A review of the epidemiological literature. *Sports Med* 14, 320-335. DOI: 10.2165/00007256-199214050-00004
- Vercruyssen, F., Tartaruga, M., Horvais, N., & Brisswalter, J. (2016). Effects of Footwear and Fatigue on Running Economy and Biomechanics in Trail Runners. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 48(10), 1976–1984. DOI: 10.1249/MSS.0000000000000981
- Warne, J.P., & Warrington, G.D. (2012). Four-week habituation to simulated barefoot running improves running economy when compared with shod

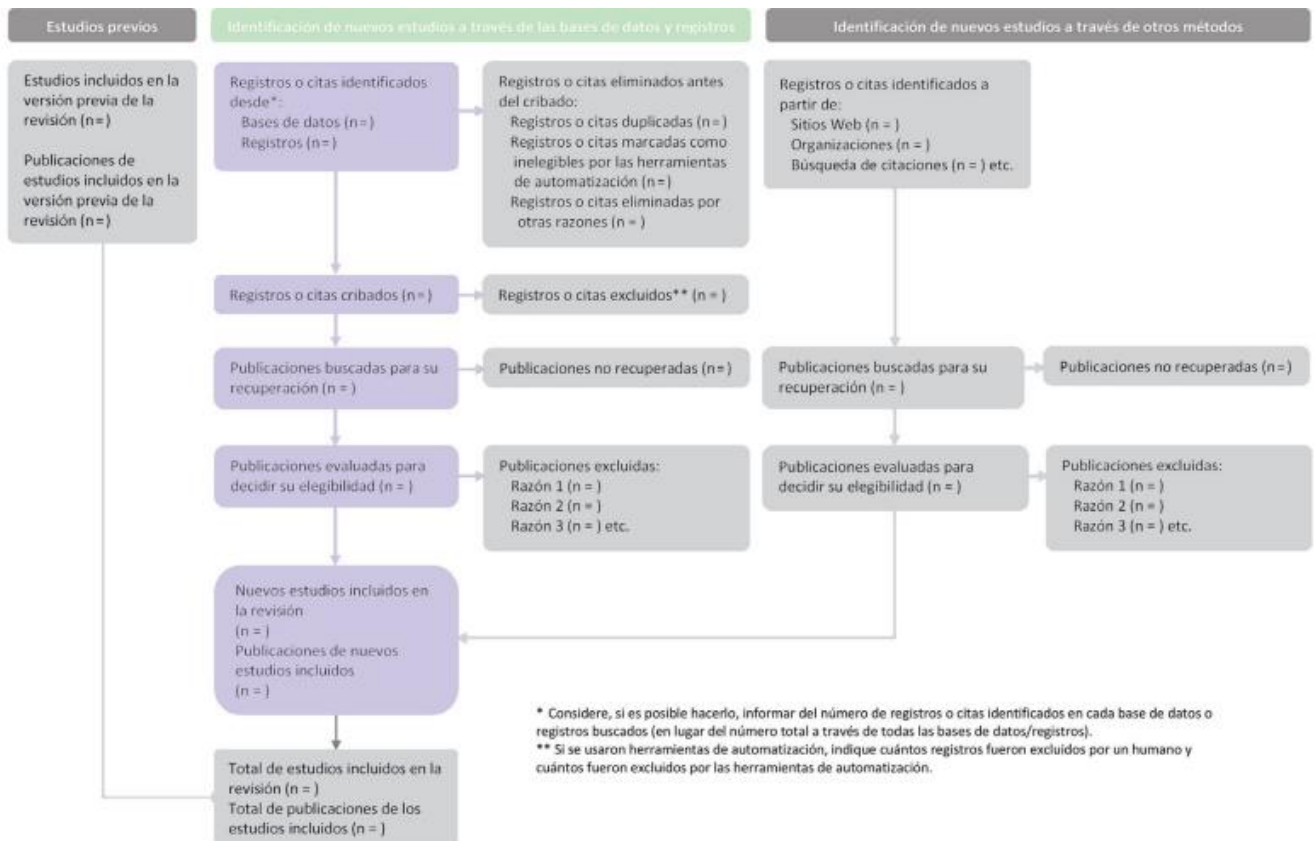
running. Scandinavian Journal of Medicine & Science, 24(3), 563-568 DOI:  
10.1111/sms.12032

World Athletics Home Page | World Athletics. (s. f.-b). worldathletics.org.  
<https://worldathletics.org/>



## Anexos

### Anexo 1 – Diagrama de flujo prisma 2020



## **Anexo 2 – Estrategia de búsqueda en cada una de las bases de datos y resultados obtenidos.**

	<b>Comando utilizado</b>	<b>Número de artículos</b>
<b>PubMed</b>	("trail run*" AND ("foot strike" OR "Biomech*" OR "techni*"))	16
<b>Scopus</b>	TITLE-ABS-KEY ( "trail run*" ) AND TITLE-ABS-KEY ( "foot strike" OR "biomech*" OR "techni*" ) )	61
<b>WOS</b>	"trail run*" (All Fields) and "foot strike" (All Fields)	9
<b>Total</b>		<b>86</b>