

UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE

FACULTAD DE MEDICINA

TRABAJO FIN DE GRADO

GRADO EN FISIOTERAPIA



**LESIONES ASOCIADAS AL USO DE ZAPATILLAS CON PLACA DE
CARBONO EN PERSONAS CORREDORAS: UNA REVISIÓN
BIBLIOGRÁFICA**

AUTOR: José Alberto Martínez Martín

TUTOR: Juan Carlos Andres Ortega

Departamento: Patología y Cirugía

Curso académico: 2025-2026

Convocatoria: Julio 2026

ÍNDICE

RESUMEN.....	1
ABSTRACT	2
1. INTRODUCCIÓN.....	3
2. OBJETIVOS.....	7
3. MATERIAL Y MÉTODOS	8
4. RESULTADOS.....	10
5. DISCUSIÓN.....	13
6. CONCLUSIONES.....	13
7. ANEXO DE FIGURAS Y TABLAS	16
8. BIBLIOGRAFÍA.....	28



RESUMEN

Introducción: Las zapatillas con placa de carbono han transformado el running de larga distancia debido a su capacidad para mejorar la economía de carrera y el rendimiento deportivo. Sin embargo, las modificaciones biomecánicas que generan han suscitado interés sobre su posible relación con la aparición de lesiones musculoesqueléticas.

Objetivo: Evaluar la evidencia científica disponible acerca de la posible relación entre el uso de zapatillas con placa de carbono y la aparición de lesiones musculoesqueléticas en corredores adultos.

Metodología: Se realizó una revisión sistemática siguiendo las recomendaciones PRISMA. La búsqueda bibliográfica se efectuó en las bases de datos PubMed, Scopus y Web of Science. Tras aplicar los criterios de inclusión y exclusión establecidos, se seleccionaron 14 estudios publicados entre 2023 y 2026. La calidad metodológica fue evaluada mediante la herramienta CASPe.

Resultados: Los estudios analizados mostraron mejoras consistentes en la economía de carrera, asociadas a reducciones del consumo de oxígeno y a una mayor eficiencia mecánica. Asimismo, se observaron modificaciones en la mecánica del pie y del tobillo, incluyendo cambios en la distribución de cargas, el trabajo articular y la movilidad de determinadas estructuras. La evidencia sobre lesiones fue limitada y se centró principalmente en casos de lesión por estrés del navicular temporalmente asociados al uso de este tipo de calzado.

Conclusiones: Las zapatillas con placa de carbono mejoran el rendimiento y modifican la biomecánica de carrera. Aunque algunos hallazgos sugieren una posible influencia sobre mecanismos relacionados con el riesgo lesional.

Palabras clave: *zapatillas con placa de carbono; running; lesiones musculoesqueléticas; biomecánica; economía de carrera.*

ABSTRACT

Introduction: Carbon-plated running shoes have changed long-distance running by improving running economy and athletic performance. However, the biomechanical adaptations associated with their use have raised concerns regarding a potential relationship with musculoskeletal injuries.

Objective: To evaluate the available scientific evidence on the possible relationship between carbon-plated running shoes and musculoskeletal injuries in adult runners.

Methods: A systematic review was conducted following PRISMA guidelines. The literature search was performed in PubMed, Scopus and Web of Science. After applying the eligibility criteria, 14 studies published between 2023 and 2026 were included. Methodological quality was assessed using the CASPe tool.

Results: The included studies consistently reported improvements in running economy through reduced oxygen consumption and enhanced mechanical efficiency. Several investigations also identified changes in foot and ankle biomechanics, including modifications in load distribution, joint work and movement patterns. Direct evidence regarding injuries was limited and mainly involved navicular stress injuries temporally associated with the use of carbon-plated footwear.

Conclusions: Carbon-plated running shoes improve performance and modify running biomechanics. Although some findings suggest a potential influence on mechanisms associated with injury risk.

Keywords: *carbon-plated shoes; running; musculoskeletal injuries; biomechanics; running economy.*

1. INTRODUCCIÓN

La carrera a pie constituye una de las actividades deportivas más practicadas a nivel mundial debido a su accesibilidad, bajo coste económico y beneficios sobre la salud física y mental. No obstante, a pesar de sus efectos positivos, el running presenta una elevada incidencia de lesiones musculoesqueléticas que afectan tanto a corredores recreativos como a deportistas de alto nivel. Según Lopes et al. (1), las lesiones relacionadas con la carrera aparecen con mayor frecuencia en las extremidades inferiores y suelen afectar estructuras como la rodilla, la pierna, el pie o el tendón de Aquiles. En la misma línea, van der Worp et al. (2) señalan que entre el 19 % y el 79 % de los corredores sufren algún tipo de lesión a lo largo de su práctica deportiva, lo que ha convertido la prevención de lesiones en una de las principales líneas de investigación dentro de las ciencias del deporte.

La aparición de estas lesiones responde habitualmente a una combinación de factores intrínsecos y extrínsecos. Entre ellos destacan los antecedentes de lesión previa, la experiencia deportiva, el volumen de entrenamiento, las características biomecánicas individuales y el equipamiento utilizado durante la carrera (2). Dentro de estos factores, el calzado ha adquirido una atención creciente debido a su capacidad para modificar la distribución de cargas mecánicas y alterar la interacción entre el corredor y la superficie de apoyo. Esta circunstancia ha cobrado especial relevancia con la aparición de nuevas tecnologías aplicadas al diseño de zapatillas de running.

La evolución del calzado deportivo ha estado tradicionalmente orientada a mejorar el rendimiento y optimizar la eficiencia de la carrera. Sin embargo, pocas innovaciones han generado tanto interés científico y mediático como las denominadas zapatillas con placa de fibra de carbono. Ruiz-Alias et al. (3) explican que este tipo de calzado forma parte de la denominada Advanced Footwear Technology (AFT), caracterizada por la combinación de mediasuelas de gran altura fabricadas con espumas altamente resilientes y placas rígidas integradas en su estructura. Su impacto en el atletismo de fondo ha sido tan notable que organismos como World Athletics han establecido regulaciones específicas sobre sus características técnicas (3).

El creciente interés por estas zapatillas se debe principalmente a sus efectos sobre la economía de carrera. Hoogkamer et al. (4) fueron de los primeros autores en demostrar que determinados modelos equipados con placa de carbono reducían significativamente el coste energético de la carrera respecto a zapatillas tradicionales. Posteriormente, Hoogkamer et al. (5) plantearon que estas mejoras biomecánicas podían contribuir a alcanzar rendimientos deportivos previamente considerados inalcanzables en pruebas de resistencia.

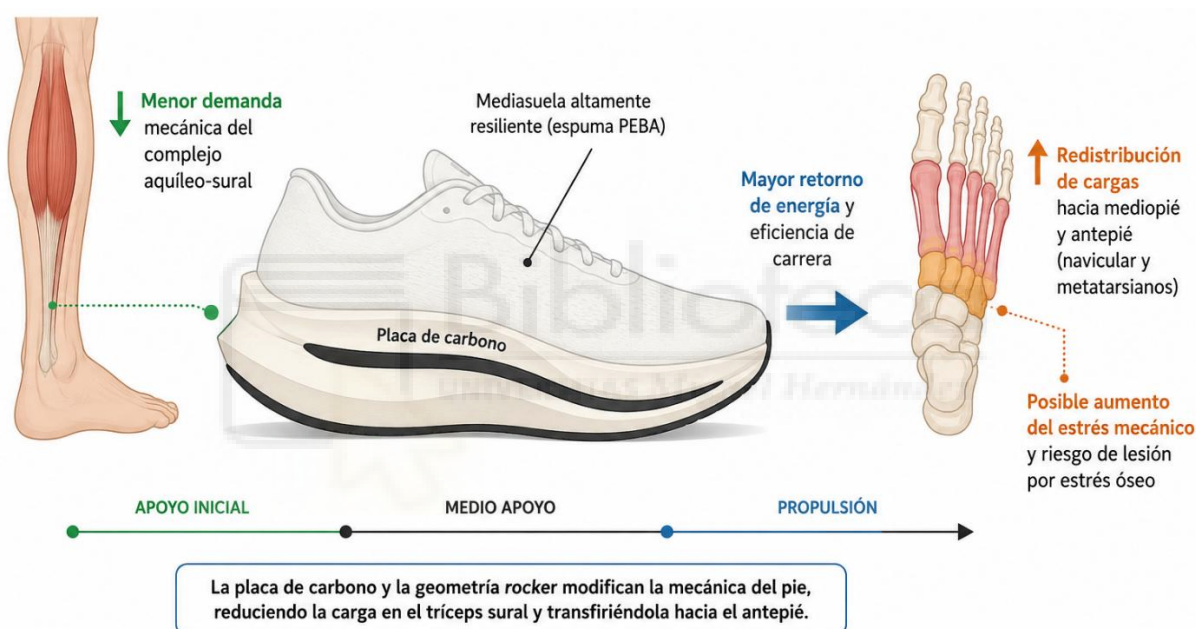
La evidencia acumulada durante los últimos años ha reforzado esta hipótesis. Kobayashi et al. (6), en una revisión sistemática y metaanálisis, concluyeron que las zapatillas con placa de carbono producen mejoras significativas en diferentes parámetros metabólicos relacionados con la carrera. De forma similar, Bruvere y Bernans (7) destacan beneficios consistentes sobre la economía de carrera, la velocidad de desplazamiento y el rendimiento en pruebas de resistencia.

Los mecanismos responsables de estas mejoras continúan siendo objeto de estudio. Según Bruvere y Bernans (7), la combinación entre una espuma altamente deformable y una placa rígida permite almacenar y devolver parte de la energía mecánica generada durante cada apoyo. Además, la geometría curvada de la suela facilita la transición hacia la fase de propulsión, reduciendo determinadas demandas mecánicas sobre las articulaciones distales. No obstante, Beck et al. (8) cuestionan que los beneficios observados puedan atribuirse exclusivamente a la placa de carbono, sugiriendo que la interacción entre los materiales de la mediasuela, la rigidez estructural y la respuesta muscular desempeña un papel igualmente importante. En la misma línea, Healey y Hoogkamer (9) observaron que el incremento de la rigidez longitudinal no siempre se traduce en mejoras adicionales de la economía de carrera.

Desde una perspectiva biomecánica, diversos estudios han mostrado que estas zapatillas modifican la forma de correr. Rodrigo-Carranza et al. (10) describen que la rigidez longitudinal influye sobre la transferencia de fuerzas y el comportamiento articular durante la carrera, mientras que Corbí-Santamaría et al. (11) observaron cambios significativos en distintos parámetros biomecánicos relacionados con el rendimiento. Estas modificaciones podrían alterar la distribución habitual de cargas entre las diferentes estructuras del miembro inferior.

En este sentido, la Figura 1 resume de forma esquemática el mecanismo biomecánico propuesto para las zapatillas con placa de carbono. La combinación de una placa rígida y una mediasuela altamente resiliente puede reducir parte de las demandas mecánicas del complejo aquíleo-sural, al tiempo que modifica la distribución de cargas hacia el mediopié y el antepié. Esta redistribución ha sido propuesta como una posible explicación de determinadas lesiones por estrés óseo descritas recientemente en corredores de fondo (7,10,13).

Figura 1. Hipótesis biomecánica de redistribución de cargas asociada al uso de zapatillas con placa de carbono.



Fuente: Elaboración propia a partir de Bruvere y Bernans (7), Rodrigo-Carranza et al. (10) y Werkhausen et al. (13).

La influencia de estas zapatillas no parece limitarse al rendimiento. Luo et al. (12) analizaron los efectos combinados de la fatiga y del uso de zapatillas con placa de carbono sobre la biomecánica de las extremidades inferiores, encontrando alteraciones en distintos patrones de movimiento conforme aumentaba el esfuerzo físico. Estos hallazgos resultan especialmente relevantes porque muchas lesiones relacionadas con la carrera aparecen en situaciones de fatiga acumulada, cuando disminuye la capacidad de control neuromuscular y las cargas mecánicas se redistribuyen de forma diferente.

Como consecuencia de estas modificaciones biomecánicas, algunos investigadores han comenzado a plantear la posibilidad de que las zapatillas con placa de carbono puedan influir en la aparición de determinadas lesiones. Aunque la evidencia disponible todavía es limitada, de hecho diversos autores han planteado que las modificaciones biomecánicas inducidas por estas zapatillas podrían influir en la distribución de cargas mecánicas durante la carrera (13). Los autores sugieren que la combinación de elevada rigidez, gran capacidad de retorno energético y cambios en la mecánica del pie podría alterar la distribución habitual de cargas sobre determinadas estructuras anatómicas sometidas a elevados niveles de estrés repetitivo.

Entre las lesiones que han despertado mayor interés destacan las fracturas por estrés del hueso navicular y de los metatarsianos. Aunque actualmente no existe evidencia concluyente que permita establecer una relación causal directa entre el uso de zapatillas con placa de carbono y la aparición de estas lesiones, los cambios biomecánicos descritos justifican la necesidad de continuar investigando esta posible asociación (13). Además, el riesgo lesional depende de múltiples factores, entre ellos la experiencia del corredor, la carga de entrenamiento, la técnica de carrera, la velocidad de competición y los antecedentes de lesión previa (2). Por ello, cualquier análisis sobre las posibles consecuencias del uso de AFT debe abordarse desde una perspectiva multifactorial.

La realización de esta revisión bibliográfica se justifica por la necesidad de sintetizar el conocimiento disponible en un ámbito que continúa evolucionando rápidamente. Comprender cómo estas tecnologías modifican la mecánica de carrera y cuál puede ser su influencia sobre la aparición de lesiones resulta fundamental para orientar tanto la práctica clínica como futuras líneas de investigación dirigidas a optimizar un uso seguro y eficaz de este tipo de calzado.

2. OBJETIVOS

Con el fin de orientar la revisión bibliográfica y definir con precisión el objeto de estudio, se formuló una pregunta de investigación siguiendo la estrategia PECO, la cual permitió estructurar la búsqueda y selección de la literatura científica relevante (Anexo I).

Pregunta de investigación:

¿Existe una asociación entre el uso de zapatillas con placa de carbono y la aparición de lesiones musculoesqueléticas en corredores adultos en comparación con el empleo de calzado de running convencional?

En base a esta pregunta el trabajo plantea el siguiente objetivo general:

Evaluar la evidencia científica disponible acerca de la posible relación entre el uso de zapatillas con placa de carbono y la aparición de lesiones musculoesqueléticas en corredores adultos.

Además de del objetivo general, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Describir las características biomecánicas de las zapatillas con placa de carbono y sus efectos sobre la mecánica de carrera.
- Identificar las lesiones musculoesqueléticas que han sido relacionadas con el uso de este tipo de calzado en la literatura científica.
- Examinar los mecanismos biomecánicos que podrían explicar la aparición de dichas lesiones.
- Analizar la influencia de factores individuales y de entrenamiento en el riesgo lesional asociado al uso de zapatillas con placa de carbono.

3. MATERIAL Y MÉTODOS

El presente trabajo se desarrolló mediante una revisión bibliográfica sistemática.

Este Trabajo Fin de Grado fue autorizado por la Oficina de Investigación Responsable (OIR) de la Universidad Miguel Hernández de Elche mediante el código de autorización COIR TFG.GFL.JCA.JAM.260508.

Los criterios de inclusión establecidos fueron los siguientes:

- Estudios realizados en corredores adultos, tanto recreativos como competitivos.
- Investigaciones que analizaran el uso de zapatillas con placa de carbono o tecnologías avanzadas de calzado que incorporaran placas rígidas integradas en la mediasuela.
- Estudios que evaluaran lesiones musculoesqueléticas, lesiones por sobrecarga, fracturas por estrés o variables biomecánicas relacionadas con el riesgo de lesión.
- Estudios originales de diseño observacional, experimental o prospectivo.
- Artículos publicados en revistas científicas revisadas por pares.
- Publicaciones disponibles en inglés o español.
- Estudios publicados entre enero de 2020 y junio de 2026.

Por su parte, se establecieron los siguientes criterios de exclusión:

- Revisiones sistemáticas, metaanálisis, editoriales, cartas al editor, protocolos de investigación y artículos de opinión.
- Estudios realizados en población infantil o adolescente.
- Investigaciones centradas exclusivamente en el rendimiento deportivo sin analizar variables biomecánicas o relacionadas con el riesgo lesional.
- Estudios que no permitieran identificar de forma específica el uso de zapatillas con placa de carbono.

La búsqueda bibliográfica se realizó entre los meses de junio y julio de 2026 en las bases de datos PubMed (MEDLINE), Scopus y Web of Science. Estas fuentes fueron seleccionadas por su amplia cobertura de literatura científica relacionada con la fisioterapia, la biomecánica, la medicina deportiva

y las ciencias de la actividad física. De forma complementaria, se efectuó una búsqueda manual en Google Scholar con el objetivo de localizar estudios potencialmente relevantes no recuperados mediante las estrategias de búsqueda principales.

Para elaboración de la estrategia de búsqueda se utilizaron descriptores normalizados procedentes de los tesauros MeSH y DeCS, combinados con términos libres relacionados con la temática objeto de estudio. La relación completa de descriptores y términos utilizados se presenta en la Tabla 2 del Anexo II. Los términos fueron combinados mediante operadores booleanos AND y OR, adaptando la sintaxis a las características específicas de cada base de datos. Las ecuaciones completas empleadas en cada base de datos se presentan detalladamente en la Tabla 3 del Anexo II.

Una vez obtenidos los resultados, todas las referencias fueron exportadas al gestor bibliográfico Zotero®, herramienta que permitió organizar los registros recuperados y detectar posibles duplicados. Tras la eliminación de estos, se llevó a cabo una primera fase de selección mediante la lectura de títulos y resúmenes. Posteriormente, aquellos artículos que cumplían los criterios de inclusión o generaban dudas respecto a su elegibilidad fueron analizados a texto completo.

El proceso de selección se desarrolló siguiendo las diferentes etapas propuestas por PRISMA. En primer lugar, se identificaron los registros potencialmente relevantes mediante las búsquedas electrónicas. A continuación, se eliminaron los documentos duplicados y se realizó una evaluación inicial basada en títulos y resúmenes. Finalmente, los artículos seleccionados fueron sometidos a una revisión completa para verificar su adecuación a los objetivos de la investigación. El procedimiento seguido se representará mediante un diagrama de flujo PRISMA incluido en el Anexo III.

La calidad metodológica de los estudios finalmente incluidos fue evaluada mediante las listas de verificación CASPe (Critical Appraisal Skills Programme), seleccionando en cada caso la herramienta más adecuada según el diseño metodológico de la investigación analizada (15). Esta evaluación permitió valorar aspectos relacionados con la validez metodológica, la calidad de los resultados obtenidos y la aplicabilidad de la evidencia aportada por cada estudio. Los resultados de dicha valoración se presentan en las tablas correspondientes incluidas en el Anexo III.

4. RESULTADOS

Tras la aplicación de la estrategia de búsqueda y del proceso de selección descrito en el apartado metodológico, se incluyeron 14 estudios para su análisis. El proceso completo de identificación, cribado, elegibilidad e inclusión de los artículos se presenta en el diagrama de flujo PRISMA recogido en el Anexo IV. Las características metodológicas, la calidad de los estudios y los principales hallazgos se resumen en la Tabla 4 del Anexo V.

Los estudios incluidos fueron publicados entre 2023 y 2026 y analizaron diferentes modelos de zapatillas de competición con tecnologías avanzadas, caracterizadas principalmente por la incorporación de placas rígidas y espumas de elevada capacidad de retorno energético. Predominaron los diseños experimentales cruzados, aunque también se identificaron estudios observacionales y una serie de casos clínicos. Las muestras estuvieron formadas por corredores recreativos, entrenados y de élite, con tamaños muestrales comprendidos entre 5 y 31 participantes.

La calidad metodológica de los estudios fue evaluada mediante la herramienta CASPe, adaptando la lista de verificación al diseño metodológico de cada investigación. Las puntuaciones obtenidas oscilaron entre 8 y 10 puntos sobre un máximo de 11, lo que indica una calidad metodológica global moderada-alta. Los estudios experimentales presentaron, en general, las valoraciones más elevadas, mientras que las principales limitaciones identificadas estuvieron relacionadas con la ausencia de procedimientos de cegamiento, los reducidos tamaños muestrales y la escasez de investigaciones con seguimiento longitudinal. Los resultados detallados de la evaluación de calidad se presentan en el Anexo VI.

Las variables analizadas abarcaron aspectos biomecánicos, fisiológicos y clínicos. Entre los instrumentos de medida empleados destacaron los sistemas tridimensionales de captura de movimiento, las plataformas de fuerza, los analizadores metabólicos para el estudio del consumo de oxígeno y diversos sistemas de monitorización de parámetros espacio-temporales de la carrera. Algunos autores incorporaron además análisis de presiones plantares, biomarcadores sanguíneos y pruebas de imagen para la valoración de lesiones (16,22,26).

Una parte importante de las investigaciones se centró en la economía de carrera y en la respuesta fisiológica al esfuerzo. Los resultados mostraron de forma consistente que las zapatillas con tecnologías avanzadas favorecen una reducción del coste energético durante la carrera. Wang et al. (20) observaron descensos significativos tanto del consumo de oxígeno como de la frecuencia cardiaca al comparar un modelo con placa de carbono y espuma PEBA frente a otros modelos de referencia. En la misma línea, Petrella et al. (21), Paradisis et al. (28) y Suo et al. (29) describieron mejoras en la eficiencia de carrera asociadas a una mayor capacidad de almacenamiento y retorno de energía de la mediasuela. Asimismo, Rodrigo-Carranza et al. (27) señalaron que las zapatillas con espuma PEBA presentaban inicialmente una mejor economía de carrera que las fabricadas con EVA, aunque esta ventaja tendía a disminuir tras varios cientos de kilómetros de uso.

En relación con la biomecánica de carrera, los estudios identificaron modificaciones relevantes en distintos segmentos del miembro inferior. Bruneau et al. (17) registraron cambios en la cadencia, la eversión del retropié y el momento plantarflexor del tobillo, mientras que Luo et al. (18) observaron una reducción del rango de movimiento de la articulación metatarsofalángica cuando se utilizaban zapatillas con placa de carbono. Del mismo modo, Miyazaki et al. (25) describieron una mejora de la eficiencia mecánica del tobillo y una disminución de las demandas mecánicas asociadas a la musculatura plantarflexora. Otros trabajos señalaron alteraciones en la distribución de cargas y en el trabajo articular del pie y el tobillo, especialmente cuando se modificaban elementos como la placa rígida o el material de la mediasuela (19,23).

También se observaron cambios en variables relacionadas con la absorción y transmisión de cargas. Geisler y Hannigan (26) encontraron menores presiones plantares y una reducción de la dorsiflexión máxima del tobillo en algunos modelos de zapatillas avanzadas. Por su parte, Koegel et al. (24) identificaron respuestas biomecánicas diferentes entre corredores ante variaciones en la altura de la entresuela, lo que sugiere que el efecto del calzado no es uniforme y puede depender de las características individuales de cada deportista.

Respecto al objetivo principal de esta revisión, la evidencia disponible sobre lesiones fue más limitada que la relativa al rendimiento y a la biomecánica. El estudio de Tenforde et al. (16) describió cinco casos

de lesión por estrés del navicular en corredores de alto nivel cuyo inicio coincidió temporalmente con la utilización de zapatillas con placa de carbono. Además, Luo et al. (18) observaron incrementos en la tasa de carga vertical tras la aparición de fatiga, una variable que se ha relacionado previamente con determinados procesos de sobrecarga. Sin embargo, la mayoría de los estudios incluidos no analizaron directamente la incidencia de lesiones, sino posibles mecanismos biomecánicos asociados a un aumento o redistribución de las cargas mecánicas durante la carrera.

Finalmente, algunos trabajos evaluaron indicadores fisiológicos relacionados con la recuperación y el daño muscular. Alda-Blanco et al. (22) observaron incrementos de creatina quinasa tras el ejercicio independientemente del modelo utilizado, aunque uno de los modelos analizados se asoció con menores niveles de dolor muscular percibido durante las primeras 24 horas posteriores al esfuerzo.



5. DISCUSIÓN

El principal aporte de esta revisión es integrar la evidencia reciente sobre las zapatillas con placa de carbono desde una perspectiva clínica y biomecánica, no solo como tecnología orientada al rendimiento, sino como un posible factor modificador de la carga musculoesquelética en corredores adultos. Esta aproximación permite responder a la pregunta de investigación con prudencia: los estudios revisados no permiten afirmar que estas zapatillas causen lesiones, pero sí muestran que modifican la mecánica de carrera de forma suficiente como para considerar su influencia en determinados procesos de sobrecarga.

En relación con el objetivo general, la evidencia disponible apunta a una asociación todavía débil entre el uso de zapatillas con placa de carbono y la aparición de lesiones musculoesqueléticas. El trabajo de Tenforde et al. (16) es el que aborda esta cuestión de forma más directa, al describir cinco casos de lesión por estrés del navicular en corredores de alto nivel cuyo inicio coincidió temporalmente con el uso de este tipo de calzado. No obstante, al tratarse de una serie de casos, sus resultados deben interpretarse como una señal clínica de alerta, no como prueba de causalidad. Esta prudencia es importante, porque otros estudios incluidos, como los de Wang et al. (20), Paradisis et al. (28), Petrella et al. (21) y Suo et al. (29), se orientan principalmente al rendimiento y muestran beneficios metabólicos claros, sin documentar un aumento directo de lesiones.

Respecto a las características biomecánicas de estas zapatillas y sus efectos sobre la mecánica de carrera, los resultados son más consistentes. Bruneau et al. (17) observaron cambios en la cadencia, la eversión del retropié y el momento plantarflexor del tobillo al utilizar calzado AFT. Luo et al. (18) identificaron una reducción del rango de movimiento de la articulación metatarsofalángica, mientras que Miyazaki et al. (25) describieron una mejora de la eficiencia mecánica del tobillo y una menor demanda sobre la musculatura plantarflexora. En una línea similar, Geisler y Hannigan (26) encontraron menor dorsiflexión máxima del tobillo y menores presiones plantares en determinados modelos avanzados. Estos resultados sugieren que la placa y la geometría del calzado no actúan de forma neutra, sino que modifican la estrategia de apoyo y propulsión del corredor.

La mejora de la economía de carrera fue uno de los hallazgos más sólidos, aunque no constituye el foco principal del trabajo. Wang et al. (20) registraron reducciones del consumo de oxígeno y de la frecuencia

cardiaca con un modelo con placa de carbono y espuma PEBA, Petrella et al. (21) atribuyeron parte del beneficio a una mayor compliance de la mediasuela, Paradisis et al. (28) describieron reducciones del consumo de oxígeno de hasta el 5 % y Suo et al. (29) relacionaron la mejora con mayor almacenamiento y retorno de energía. Sin embargo, estos beneficios no deben interpretarse de manera aislada. Rodrigo-Carranza et al. (27) mostraron que la ventaja inicial de la espuma PEBA disminuía tras 450 km de uso, lo que introduce un matiz importante: el efecto del calzado puede cambiar con el desgaste y, por tanto, las recomendaciones clínicas o deportivas no deberían basarse únicamente en estudios realizados con modelos nuevos.

En cuanto a las lesiones musculoesqueléticas descritas, la evidencia directa es escasa. La lesión por estrés del navicular aparece como el hallazgo clínico más relevante, especialmente por su gravedad potencial y por su localización en una zona clave para la transmisión de fuerzas entre el retropié y el antepié (16). Sin embargo, otros trabajos no identifican lesiones como variable principal, sino cambios biomecánicos que podrían actuar como factores intermedios. Luo et al. (18), por ejemplo, observaron un aumento de la tasa de carga vertical tras la fatiga, mientras que Ghanbari et al. (19,23) mostraron que la placa de carbono y el material de la mediasuela modifican el trabajo articular del pie y del tobillo. Así, la evidencia actual no señala tanto un “riesgo lesional” demostrado como una alteración del patrón de carga que podría adquirir relevancia en corredores concretos.

Los mecanismos biomecánicos que podrían explicar la aparición de lesiones parecen relacionarse con una redistribución de cargas más que con un simple aumento global de impacto. Ghanbari et al. (19) observaron que retirar la placa incrementaba el trabajo negativo metatarsofalángico y el trabajo positivo del tobillo, lo que indica que la placa modifica qué estructuras participan más en la absorción y generación de energía. Miyazaki et al. (25) añadieron que la placa curva mejora la eficiencia del tobillo, mientras que Geisler y Hannigan (26) mostraron cambios en la presión plantar. Esta combinación puede ser beneficiosa para el rendimiento, pero también plantea una cuestión clínica relevante: si el reparto de cargas cambia de forma brusca, algunas estructuras pueden quedar expuestas a demandas para las que no han tenido suficiente adaptación.

La variabilidad individual constituye otro elemento clave. Koegel et al. (24) identificaron tres patrones de respuesta ante diferentes alturas de entresuela: corredores con respuestas potencialmente favorables, corredores con cambios opuestos y otros prácticamente no respondedores. Esta observación ayuda a interpretar por qué los resultados no siempre son uniformes entre estudios. También Ghanbari et al. (19) señalaron diferencias individuales en la respuesta al material de la mediasuela. Por ello, no parece adecuado recomendar o desaconsejar de forma generalizada el uso de zapatillas con placa de carbono. La respuesta puede depender del patrón de apoyo, el historial lesional, el volumen de entrenamiento, el nivel competitivo, la fuerza del complejo pie-tobillo y el tiempo de adaptación al calzado.

Desde la fisioterapia, estos hallazgos tienen implicaciones prácticas claras. La elección del calzado debería formar parte de la anamnesis del corredor, especialmente cuando aparecen molestias en mediopié, navicular, metatarsianos, fascia plantar o complejo aquileo-sural. Además, la introducción de zapatillas con placa de carbono debería realizarse de forma progresiva, evitando su uso intensivo inmediato en entrenamientos de alta carga o en corredores con antecedentes de lesiones por estrés óseo. El fisioterapeuta no debe interpretar estas zapatillas como un factor lesivo por sí mismo, sino como una variable externa que puede modificar la carga y que debe analizarse junto con la programación del entrenamiento, la técnica de carrera y la tolerancia tisular individual.

La principal limitación de esta revisión es la escasez de estudios longitudinales que evalúen la incidencia real de lesiones en corredores usuarios de zapatillas con placa de carbono. Además, la búsqueda se centró en un periodo reciente y en estudios con sujetos corredores, lo que permite obtener una visión actualizada, pero limita la amplitud de la evidencia disponible. Futuras investigaciones deberían incluir muestras más amplias y diversas, seguimiento prolongado, análisis diferenciado por sexo, nivel deportivo y patrón de apoyo, así como registros claros de exposición al calzado. Solo así podrá determinarse si las modificaciones biomecánicas observadas se traducen en un riesgo lesional real o si, por el contrario, forman parte de una adaptación funcional compatible con un uso seguro y eficaz.

6. CONCLUSIONES

La evidencia científica disponible indica que las zapatillas con placa de carbono producen modificaciones biomecánicas significativas en la mecánica de carrera y mejoran de forma consistente la economía de carrera, favoreciendo una mayor eficiencia durante el esfuerzo.

Los principales cambios biomecánicos observados afectan a la mecánica del pie y del tobillo, incluyendo alteraciones en la movilidad de la articulación metatarsofalángica, la distribución de cargas, el trabajo articular y determinados parámetros relacionados con la propulsión y la absorción de impactos.

Las lesiones musculoesqueléticas asociadas con mayor frecuencia en la literatura al uso de zapatillas con placa de carbono son las lesiones por estrés óseo, especialmente a nivel del hueso navicular.

Los mecanismos que podrían explicar la aparición de estas lesiones parecen estar relacionados con la redistribución de cargas mecánicas, las modificaciones del trabajo articular y los cambios en la transmisión de fuerzas a través del pie y el tobillo durante la carrera.

La respuesta al uso de zapatillas con placa de carbono no es uniforme entre corredores. Factores individuales como el patrón de carrera, las características biomecánicas, el nivel de entrenamiento y el periodo de adaptación al calzado pueden influir en los efectos obtenidos y en el posible riesgo lesional.

A partir de la evidencia analizada, no puede afirmarse que las zapatillas con placa de carbono causen lesiones musculoesqueléticas.

7. ANEXO DE FIGURAS Y TABLAS

7.1. Anexo I.

Tabla 1. Planteamiento PECO

Elemento	Descripción
P (Población)	Corredores adultos.
E (Exposición)	Uso de zapatillas de running con placa de carbono.
C (Comparación)	Uso de zapatillas convencionales sin placa de carbono.
O (Outcome/Resultado)	Aparición de lesiones musculoesqueléticas, lesiones por sobrecarga o alteraciones biomecánicas asociadas al riesgo lesional.

Fuente: Elaboración propia

7.2. Anexo II

Tabla 2. Descriptores DeCS/MeSH y términos libres empleados en la estrategia de búsqueda

Concepto	DeCS	MeSH	Términos libres
Corredores	Corredores; Carrera	Running; Runners	runner, runners, running athlete, endurance runner, distance runner
Zapatillas con placa de carbono	Calzado deportivo	Footwear	carbon-plated running shoes, carbon plate shoes, carbon fiber plate footwear, carbon-plated footwear, racing shoes
Tecnología avanzada de calzado	Calzado deportivo	Footwear	advanced footwear technology, AFT, performance footwear, high-performance shoes
Lesiones musculoesqueléticas	Traumatismos deportivos; Lesiones musculoesqueléticas	Athletic Injuries; Musculoskeletal Diseases	musculoskeletal injury, running injury, sports injury, overuse injury
Lesiones por estrés óseo	Fracturas por estrés	Fractures, Stress	bone stress injury, bone stress injuries, stress fracture, navicular stress fracture, metatarsal stress fracture
Biomecánica	Biomecánica	Biomechanical Phenomena	biomechanics, lower limb biomechanics, running biomechanics, gait biomechanics

Economía de carrera	Gasto energético	Energy Metabolism	running economy, energetic cost, energy cost, metabolic cost
Fatiga	Fatiga	Fatigue	fatigue, running-induced fatigue, exercise fatigue
Rendimiento deportivo	Rendimiento atlético	Athletic Performance	running performance, endurance performance, athletic performance
Extremidad inferior	Extremidad inferior	Lower Extremity	lower limb, foot, ankle, lower extremity

Fuente: Elaboración propia a partir de los tesauros DeCS y MeSH.

7.3. Anexo III

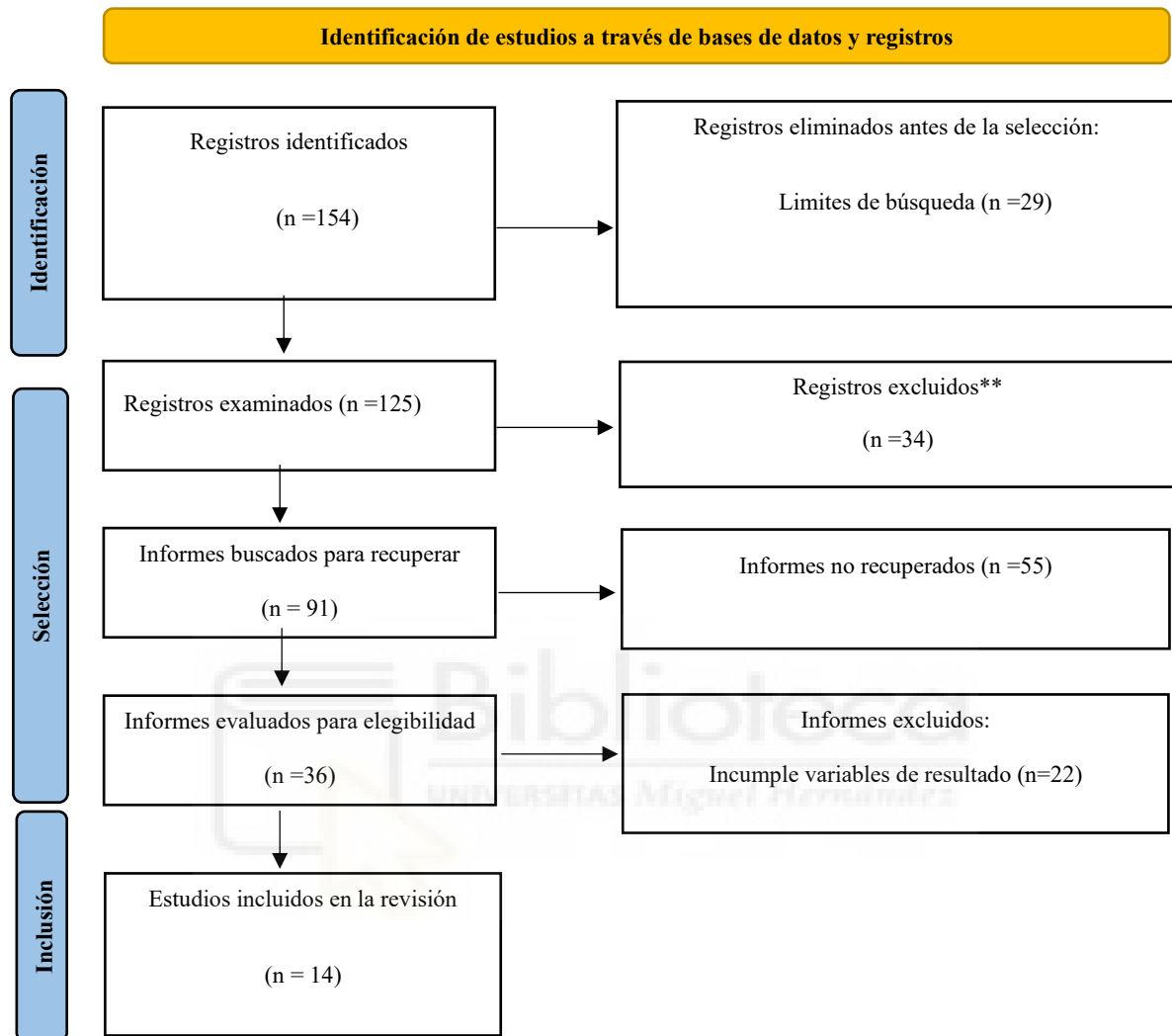
Tabla 3. Estrategias de búsqueda utilizadas en las bases de datos seleccionadas

Base de datos	Ecuación de búsqueda	1	2
PubMed (MEDLINE)	("carbon-plated running shoes" OR "carbon fiber plate footwear" OR "advanced footwear technology") AND ("running injuries" OR "musculoskeletal injuries" OR "bone stress injuries" OR "stress fracture" OR biomechanics) AND (runners OR running)	43	43
Scopus	TITLE-ABS-KEY ("carbon-plated running shoes" OR "carbon fiber plate footwear" OR "advanced footwear technology") AND TITLE-ABS-KEY ("running injuries" OR "musculoskeletal injuries" OR "bone stress injuries" OR "stress fracture" OR biomechanics) AND TITLE-ABS-KEY (runners OR running)	58	32
Web of Science	("carbon-plated running shoes" OR "carbon fiber plate footwear" OR "advanced footwear technology") AND ("running injuries" OR "musculoskeletal injuries" OR "bone stress injuries" OR "stress fracture" OR biomechanics) AND (runners OR running)	53	50
		154	125

Fuente: Elaboración propia.

7.4. Anexo IV

Figura 2. Diagrama de flujo



Fuente: Elaboración propia siguiendo las recomendaciones PRISMA 2020 (14).

7.5. Anexo V

Tabla 4. Tabla de resultados

Autor (año)	Diseño	Muestra	Herramientas de medida	Tipo de zapatilla/comparación	Variables evaluadas	Resultados principales
Tenforde et al. (16) 2023	Serie de casos y artículo de opinión clínica	5 corredores de alto nivel (3 corredores de atletismo y 2 triatletas; 17-38 años) con lesión por estrés del navicular asociada al uso de zapatillas con placa de carbono	Resonancia magnética (RM), tomografía computarizada (TC), exploración clínica y seguimiento médico	Zapatillas con placa de fibra de carbono (CFP)	Lesiones por estrés óseo, localización lesional, factores biomecánicos asociados al riesgo de lesión	Se identificaron 5 casos de lesión por estrés del navicular asociados temporalmente al uso de zapatillas con placa de carbono. Tres casos correspondieron a fracturas por estrés tipo III y dos a reacciones de estrés óseo del navicular.
Bruneau et al. (17) 2026	Estudio transversal de cohortes	23 corredores de élite sanos (11 mujeres y 12 hombres), edad media $25,4 \pm 2,7$ años; volumen semanal de entrenamiento $67,2 \pm 18,5$ millas; 47% con antecedentes de lesión por estrés óseo y 87% con antecedentes de lesión relacionada con la carrera	Sistema de captura de movimiento 3D Vicon (250 Hz), cinta instrumentada AMTI (1000 Hz), marcadores reflectantes corporales y análisis biomecánico mediante Visual3D	Zapatilla neutra (New Balance 880 v14) vs zapatilla con espuma reactiva sin placa (New Balance Rebel v4) vs zapatilla AFT con placa de carbono (New Balance Supercomp Elite v3)	Excursión y velocidad de eversión del retropié, fuerza de reacción vertical, momento plantarflexor de tobillo, excursión vertical del centro de masas, cadencia y duty factor	La zapatilla AFT redujo la cadencia en comparación con la zapatilla neutra ($-0,98$ pasos/min; $p=0,002$) y la de espuma reactiva ($-1,17$ pasos/min; $p<0,001$). La excursión de eversión fue mayor con AFT respecto a la neutra ($+0,30^\circ$; $p=0,017$). El momento plantarflexor fue menor con AFT que con la zapatilla neutra ($-0,17$ BW·m; $p<0,001$).

Luo et al. (18) 2026	Estudio experimental de medidas repetidas	16 corredores recreativos varones; 80,6 ± 24,3 km/semana	Sistema Vicon 3D, plataforma de fuerzas Kistler, Visual 3D	Zapatillas con placa de carbono vs. sin placa; condiciones pre y post fatiga	Cinemática y cinética articular, rigidez y VALR	Las zapatillas con placa redujeron el ROM de la articulación metatarsofalángica ($p < 0,001$). La fatiga disminuyó el momento de flexión de rodilla ($p = 0,024$) y la rigidez de rodilla ($p = 0,036$). La VALR aumentó tras la fatiga ($p = 0,025$) y fue superior con zapatillas de carbono en estado fatigado ($p = 0,031$).
Ghanbari et al. (19) 2025	Estudio experimental cruzado	16 corredores recreativos varones	Captura de movimiento y plataformas de fuerza	Nike Vaporfly 4% original vs. modelo sin placa de carbono vs. modelo con espuma EVA	Trabajo articular positivo y negativo en pie, tobillo, rodilla y cadera	La retirada de la placa aumentó el trabajo negativo metatarsofalángico y el trabajo positivo del tobillo. La sustitución de PEBA por EVA redujo el trabajo positivo pie-zapatilla. Se observaron respuestas individuales al material de la mediasuela.
Wang et al. (20) 2026	Estudio experimental cruzado aleatorizado	30 corredores recreativos (13 mujeres y 17 hombres; 27,1 ± 4,6 años)	Analizador metabólico Jaeger Oxycon Pro, pulsómetro Polar H10, sistema de captura 3D Qualisys, cinta instrumentada HP Cosmos	Nike Vaporfly 3 (PEBA + placa carbono) vs Nike Invincible 3 (PEBA) vs Brooks Levitate 5 (TPU)	Consumo de oxígeno, frecuencia cardíaca, VALR, VILR, impulso de frenado, tiempo de contacto y descenso pélvico contralateral	Vaporfly 3 redujo el VO_2 en 1,75-1,91 $\text{mL} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ y la FC en 4,75-5,43 lpm respecto a las otras zapatillas ($p < 0,001$). Brooks Levitate 5 presentó valores superiores de VALR y VILR respecto a ambos modelos con PEBA ($p < 0,001$). No hubo diferencias en tiempo de

						contacto ni descenso pélvico contralateral.
Petrella et al. (21) 2026	Estudio experimental cruzado	19 corredores varones altamente entrenados	Calorimetría indirecta, captura de movimiento 3D y fuerzas de reacción del suelo en cinta instrumentada	Zapatilla de mayor compliance de mediasuela vs menor compliance	Economía de carrera, rigidez de pierna, cinemática y cinética de rodilla	La mayor compliance mejoró la economía de carrera un 3,9% ($p<0,001$) y aumentó la rigidez de pierna un 2,98% ($p<0,01$). La potencia positiva media de rodilla disminuyó un 9,46% ($p=0,001$).
Alda-Blanco et al. (22) 2025	Estudio experimental aleatorizado cruzado	12 corredores masculinos de larga distancia altamente entrenados	Analíticas sanguíneas (CK, LDH, IL-6, ALT, cortisol, TAS), IMU Stryd Power Meter, acelerómetro RunEASI y escala DOMS	Cloudbloom Strike vs Cloudbloom Echo 3 (ambas AFT con placa de carbono y espuma PEBA)	Biomarcadores de daño muscular, estrés oxidativo y metabólico, dolor muscular percibido y variables biomecánicas	La CK aumentó tras el ejercicio en ambos modelos ($p=0,026$ y $p=0,018$). No se observaron diferencias en LDH, IL-6, ALT, cortisol ni TAS. El modelo Cloudbloom Strike produjo menor DOMS a las 24 h que Cloudbloom Echo 3 ($p=0,016$). No se encontraron diferencias biomecánicas entre zapatillas.
Ghanbari et al. (23) 2025	Estudio experimental comparativo	16 corredores recreativos masculinos	Captura de movimiento y plataformas de fuerza	Nike Vaporfly 4% original vs Vaporfly sin placa de fibra de carbono vs Vaporfly con espuma EVA en lugar de PEBA	Trabajo articular positivo y negativo en articulaciones metatarsofalángica, tobillo, rodilla y cadera; trabajo pie-zapatilla	La eliminación de la placa de carbono incrementó significativamente el trabajo negativo en la articulación metatarsofalángica y el trabajo positivo en el tobillo. La sustitución de la espuma PEBA por EVA redujo significativamente el trabajo

						positivo del sistema pie-zapatilla.
Koegel et al. (24) 2024	Estudio observacional de campo con análisis de conglomerados (cluster analysis)	31 corredores masculinos entrenados	Sensor wearable STRYD, reloj Garmin Forerunner 245, análisis de componentes principales (PCA) y análisis de conglomerados	Tres zapatillas experimentales con la misma espuma TPEE y placa de carbono, pero con alturas de entresuela de 25 mm, 35 mm y 45 mm	Cadencia, velocidad, tiempo de vuelo, tiempo de contacto, longitud de zancada, rigidez elástica de la pierna, oscilación vertical y fuerza máxima de reacción al suelo	Se identificaron tres patrones de respuesta biomecánica ante diferentes alturas de entresuela. Un grupo mostró aumento de la rigidez elástica y reducción de la oscilación vertical y tiempo de contacto (respuesta potencialmente favorable), otro presentó cambios opuestos y un tercer grupo apenas modificó su patrón de carrera. No se encontraron diferencias entre grupos en altura, peso, longitud de pierna o velocidad de carrera. Los resultados sugieren una respuesta altamente individual a las zapatillas con mayor altura de entresuela.
Miyazaki et al. (25) 2024	Estudio experimental cruzado	14 corredores de fondo con apoyo medio/antepié	Captura tridimensional del movimiento, plataformas de fuerza, análisis cinemático y cinético, cálculo de gasto energético	Zapatilla con placa curva de carbono (Carbon) vs misma zapatilla sin placa (Non)	Eficiencia mecánica del tobillo, trabajo mecánico, torque plantarflexor, velocidad angular del pie y de la pierna, variables	La incorporación de una placa curva de carbono mejoró la eficiencia mecánica del tobillo (MEC) y redujo el gasto energético mecánico (MEE) durante la fase concéntrica de apoyo. Además, disminuyó el torque de flexión plantar y modificó las velocidades

			mecánico (MEE) y compensación energética mecánica (MEC)		cinéticas y cinemáticas	angulares del pie y la pierna, favoreciendo una propulsión más eficiente. Los autores concluyen que la curvatura de la placa de carbono constituye un componente clave de la tecnología avanzada del calzado de carrera.
Geisler y Hannigan (26) 2024	Estudio experimental cruzado con medidas repetidas	17 corredoras universitarias de fondo (NCAA División I)	Unidades de medición inercial (IMU APDM), plantillas de presión plantar XSENSOR, cronometraje de velocidad, ANOVA de medidas repetidas	Nike Zoom Dragonfly (AFT), Nike Air Zoom Victory (AFT) y Nike Zoom Matumbo (tradicional)	Tiempo de contacto, cadencia, dorsiflexión de tobillo, aceleración tibial, centro de presión, presión plantar total, antepié y retropié	Las zapatillas con tecnología avanzada (Dragonfly y Victory) redujeron significativamente la dorsiflexión máxima del tobillo respecto al modelo tradicional. La Dragonfly mostró menores presiones plantares máximas y medias en pie completo, antepié y retropié. No se observaron diferencias significativas en tiempo de contacto, cadencia, aceleración tibial o patrón de apoyo. Los autores sugieren que estas modificaciones biomecánicas podrían relacionarse con mejoras del rendimiento, aunque no se evaluó directamente la economía de carrera.

Rodrigo-Carranza et al. (27) 2024	Estudio experimental aleatorizado cruzado	22 corredores entrenados varones	Analizador metabólico CPX Ultima, Optojump Next, sensor Stryd®, medición de lactato, escalas visuales analógicas, ensayo mecánico de rigidez y retorno energético	Zapatillas AFT con espuma PEBA nueva y usada (450 km) frente a zapatillas AFT con espuma EVA nueva y usada (450 km)	Economía de carrera (coste energético y consumo de oxígeno), longitud de zancada, frecuencia de paso, tiempo de contacto, oscilación vertical, rigidez de pierna, confort y percepción del esfuerzo	Las zapatillas nuevas con espuma PEBA presentaron mejor economía de carrera que las EVA nuevas ($\approx 1,9\%$ de mejora). Tras 450 km de uso, la PEBA perdió esta ventaja, aumentando significativamente el coste energético ($+2,28\%$), mientras que la EVA mantuvo valores similares entre condición nueva y usada. Las diferencias biomecánicas fueron pequeñas, observándose principalmente menor tiempo de contacto y mejor eficiencia energética en la PEBA nueva. Los autores concluyen que la PEBA es más eficiente para competición, aunque parece deteriorarse más rápidamente que la EVA.
Paradisis et al. (28) (2023)	Estudio experimental cruzado aleatorizado	10 corredores recreativos (5 hombres y 5 mujeres; $23,3 \pm 1,1$ años)	Análisis de gases (VO_2), monitor de frecuencia cardíaca, cámara de alta velocidad (300 Hz), análisis biomecánico de rigidez y variables	Saucony Endorphin Speed 2 (superzapatilla con placa de nylon) vs. Saucony Cohesion 13 (zapatilla convencional)	Consumo de oxígeno, frecuencia cardíaca, rigidez de pierna, rigidez vertical, longitud de zancada, frecuencia de paso, tiempo de contacto y vuelo	Las superzapatillas redujeron el consumo de oxígeno un $3,9\%$ a velocidades equivalentes al 65% del $\text{vVO}_{2\text{peak}}$ y un $5,0\%$ al 80% del $\text{vVO}_{2\text{peak}}$. También disminuyeron la frecuencia cardíaca y aumentaron la rigidez de la pierna, además de reducir el tiempo de contacto y

			espacio- temporales			mejorar variables biomecánicas asociadas a una mayor economía de carrera.
Suo et al. (29) (2026)	Estudio experimental cruzado aleatorizado	16 corredores masculinos de maratón (<3 h) con patrón de apoyo no- retropié (NRFS)	Análisis metabólico (VO ₂ y potencia metabólica), captura de movimiento 3D, plataforma instrumentada, análisis cinético y mecánico de la zapatilla	Zapatilla avanzada de estructura hueca (HAFT, Li-Ning Dragon Flight) vs. zapatilla avanzada convencional (NAFT, Nike Vaporfly Next% 3)	Economía de carrera, VO ₂ , potencia metabólica, almacenamiento y retorno de energía, compresión de mediasuela, rigidez de pierna y trabajo articular	La HAFT mejoró la economía de carrera respecto a la NAFT, reduciendo el coste energético un 2,9% tras corregir por masa del calzado. Presentó mayor compresión de la mediasuela, mayor almacenamiento y retorno de energía, y mayor rigidez de pierna, lo que favoreció una menor demanda metabólica durante la carrera.

7.6. Anexo VI.

Tabla 5. Resultados CASPe

Autor (n°)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	Puntuación global
Tenforde et al. (16)	Sí	No	Sí	No	No	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	8/11
Bruneau et al. (17)	Sí	No	Sí	No	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	9/11
Luo et al. (18)	Sí	Sí	Sí	No	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	10/11
Ghanbari et al. (19)	Sí	Sí	Sí	No	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	10/11
Wang et al. (20)	Sí	Sí	Sí	No	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	10/11
Petrella et al. (21)	Sí	Sí	Sí	No	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	10/11
Alda-Blanco et al. (22)	Sí	Sí	Sí	No	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	10/11
Ghanbari et al. (23)	Sí	No	Sí	No	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	9/11
Koegel et al. (24)	Sí	No	Sí	No	No	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	8/11
Miyazaki et al. (25)	Sí	Sí	Sí	No	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	10/11
Geisler y Hannigan (26)	Sí	No	Sí	No	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	9/11
Rodrigo-Carranza et al. (27)	Sí	Sí	Sí	No	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	10/11
Paradisis et al. (28)	Sí	Sí	Sí	No	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	10/11
Suo et al. (29)	Sí	Sí	Sí	No	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	10/11

8. BIBLIOGRAFÍA

1. Lopes AD, Hespanhol LC Jr, Yeung SS, Costa LOP. What are the main running-related musculoskeletal injuries? A systematic review. *Sports Med.* 2012;42(10):891-905. <https://doi.org/10.1007/BF03262301>
2. Van der Worp MP, Ten Haaf DSM, van Cingel R, de Wijer A, Nijhuis-van der-Sanden MWG, Staal JB. Injuries in runners; a systematic review on risk factors and sex differences. *PLoS One.* 2015;10(2). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0114937>
3. Ruiz-Alias SA, Jaén-Carrillo D, Roche-Seruendo LE, Pérez-Castilla A, Soto-Hermoso VM, García-Pinillos F. A review of the potential effects of the World Athletics stack height regulation on the footwear function and running performance. *Appl Sci.* 2023;13(21):11721. <https://doi.org/10.3390/app132111721>
4. Hoogkamer W, Kipp S, Frank JH, Farina EM, Luo G, Kram R. A comparison of the energetic cost of running in marathon racing shoes. *Sports Med.* 2018;48(4):1009-1019. <https://doi.org/10.1007/s40279-017-0811-2>
5. Hoogkamer W, Kram R, Arellano CJ. How biomechanical improvements in running economy could break the 2-hour marathon barrier. *Sports Med.* 2017;47(9):1739-1750. <https://doi.org/10.1007/s40279-017-0708-0>
6. Kobayashi EN, de Toledo RR, de Almeida MO, Sprey JW, Jorge PB. Metabolic effects of carbon-plated running shoes: a systematic review and meta-analysis. *Front Sports Act Living.* 2025;7:1710224. <https://doi.org/10.3389/fspor.2025.1710224>
7. Bruvere DD, Bernans E. Mechanisms, economy, and performance of advanced footwear technology in endurance running—A review. *Muscles.* 2025;5(1):2. <https://doi.org/10.3390/muscles5010002>
8. Beck ON, Golyski PR, Sawicki GS. Adding carbon fiber to shoe soles may not improve running economy: a muscle-level explanation. *Sci Rep.* 2020;10(1):17154. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-74097-7>

9. Healey LA, Hoogkamer W. Longitudinal bending stiffness does not affect running economy in Nike Vaporfly shoes. *J Sport Health Sci.* 2022;11(3):285-292. <https://doi.org/10.1016/j.jshs.2021.07.002>
10. Rodrigo-Carranza V, Hoogkamer W, González-Ravé J. Relationship between advanced footwear technology longitudinal bending stiffness and running performance. *Physiology.* 2024;43(6):639-642. <https://doi.org/10.1101/2023.12.27.573423>
11. Corbí-Santamaría P, Gil-Calvo M, Herrero-Molleda A, García-López J, Boullosa D, García-Tormo JV. The impact of advanced footwear technology on the performance and running biomechanics of mountain runners. *Appl Sci.* 2025;15(2):531. <https://doi.org/10.3390/app15020531>
12. Luo X, Liu R, Li B. Influence of carbon-plated running shoes and fatigue on lower limb biomechanics. *J Biomech.* 2025;113102. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2025.113102>
13. Werkhausen A, Lund-Hansen M, Wiedenbruch L, Peikenkamp K, Rice H. Technologically advanced running shoes reduce oxygen cost and cumulative tibial loading per kilometer in recreational female and male runners. *Scientific Reports.* 2024 May 24;14(1):11903. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-62263-0>
14. Page MJ, McKenzie JE, Bossuyt PM, Boutron I, Hoffmann TC, Mulrow CD, et al. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ.* 2021;372:n71. Disponible en: <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
15. Critical Appraisal Skills Programme (CASP). CASP Cohort Study Checklist [Internet]. Oxford: CASP; 2024 [citado 2026 Jun 15]. Disponible en: <https://casp-uk.net/casp-tools-checklists/>
16. Tenforde AS, Hoenig T, Saxena A, Hollander K. Bone stress injuries in runners using carbon fiber plate footwear. *Sports Med.* 2023;53(8):1499-1505. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s40279-023-01818-z>
17. Bruneau MM, Gaudette LW, Sirls E, Hollander K, Saxena A, Hoenig T, De Carlo F, Fodera A, Sullivan V, Bean A, Lussner A, et al. Biomechanics associated with bone stress injuries while using advanced footwear technology in elite distance runners. *PM R.* 2026;18(S1):S143-S150. Disponible en: <https://doi.org/10.1002/pmrj.70153>

18. Luo X, Liu R, Li B. Influence of carbon-plated running shoes and fatigue on lower limb biomechanics. *J Biomech.* 2025;113:102. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2025.113102>
19. Kettner C, Stetter B, Stein T. The effects of running shoe stack height on running style and stability during level running at different running speeds. *Front Bioeng Biotechnol.* 2025;13:1526752. Disponible en: <https://doi.org/10.3389/fbioe.2025.1526752>
20. Wang W, Potthast W, Torniainen K, Xu S, Ammann K, Jing Y, Wang S, Fu W, Liu J, Arndt A. Performance benefits without added injury risk? Effects of advanced footwear technology on running economy and biomechanical risk in recreational runners. *Scand J Med Sci Sports.* 2026;36(4):e70275. Disponible en: <https://doi.org/10.1111/sms.70275>
21. Petrella D, Swinnen W, Tam N, Lane B, Vanwanseele B. The isolated effect of midsole compliance on running economy and biomechanics in highly trained runners. *Med Sci Sports Exerc.* 2026;58(2):310-320.
22. Alda-Blanco A, González-Mohiño F, González-Ravé JM, Santos-Concejero J. Biomarkers of muscle damage and oxidative stress and biomechanical responses of two different advanced footwear technology shoes to a 60-min running test in competitive long-distance runners. *Front Physiol.* 2025;16:1653896. Disponible en: <https://doi.org/10.3389/fphys.2025.1653896>
23. Ghanbari A, Vienneau J, Nigg SR, Nigg BM. Effects of selected features of advanced footwear technology on lower limb joint work. *Sports Biomech.* 2025;24(9):2707-2721. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/14763141.2025.2508244>
24. Koegel J, Huerta S, Gambietz M, Ullrich M, Heyde C, Dorschky E, Eskofier B. Clustering runners' response to different midsole stack heights: a field study. *Sensors (Basel).* 2024;24(14):4694. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/s24144694>
25. Miyazaki T, Aimi T, Yamada Y, Nakamura Y. Curved carbon plates inside running shoes modified foot and shank angular velocity improving mechanical efficiency at the ankle joint. *J Biomech.* 2024;172:112224. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2024.112224>

26. Geisler C, Hannigan JJ. A biomechanical comparison of track spikes with advanced footwear technology to a traditional track spike in female distance runners. *Sports Biomech.* 2024;23(12):3667-3679. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/14763141.2024.2393199>
27. Rodrigo-Carranza V, Hoogkamer W, González-Ravé JM, Horta-Muñoz S, Serna-Moreno MC, Romero-Gutierrez A, González-Mohiño F. Influence of different midsole foam in advanced footwear technology use on running economy and biomechanics in trained runners. *Scand J Med Sci Sports.* 2024;34(1):e14526. Disponible en: <https://doi.org/10.1111/sms.14526>
28. Paradisis GP, Zacharogiannis E, Bissas A, Hanley B. Recreational runners gain physiological and biomechanical benefits from super shoes at marathon paces. *Int J Sports Physiol Perform.* 2023;18(12):1420-1426. Disponible en: <https://doi.org/10.1123/ijsp.2023-0115>
29. Suo B, Fu F, Wu K, Wang J, Lu Z, Yu B, Zhi R, Yang F, Fu W. Hollow-structured advanced footwear technology improves running economy through enhanced energy storage and return in sub-3-hour non-rearfoot strike marathon runners. *Scand J Med Sci Sports.* 2026;36(4):e70280. Disponible en: <https://doi.org/10.1111/sms.70280>