

UNIVERSIDAD EUROPEA DE VALENCIA

Facultad de Ciencias de la Salud Grado en
Fisioterapia

Trabajo Fin de Grado

Curso 2024-2025

**ANÁLISIS BIOMECÁNICO DE LA
MARATÓN DE VALENCIA 2024**



Autores

Martin Louis PATANCHON

Clément Guillaume Paul ARCELIN

Tutores

Clara PUJOL FUENTES, Javier GAMEZ PAYA

Valencia, 2025

**ANÁLISIS BIOMECÁNICO DE LA
MARATÓN DE VALENCIA 2024**

TRABAJO FINAL DE GRADO PRESENTADO POR:

Martin Louis PATANCHON

Clément Guillaume Paul ARCELIN

TUTORES DEL TRABAJO:

Clara PUJOL FUENTES, Javier GAMEZ PAYA

FACULTAD DE FISIOTERAPIA

UNIVERSIDAD EUROPEA DE

VALENCIA

VALENCIA CURSO 2024-2025

Agradecimientos

Queremos agradecer a nuestros tutores, Clara PUJOL FUENTES y Javier GAMEZ PAYA, por su acompañamiento, su disponibilidad constante y sus valiosas orientaciones durante todo el desarrollo de este Trabajo Fin de Grado.

Agradecemos también a la Universidad Europea de Valencia, por brindarnos los recursos y la oportunidad de realizar este proyecto en un entorno académico exigente y enriquecedor. Gracias por su ayuda, sin ustedes no habríamos podido llevar a cabo este trabajo.

También queremos agradecer a nuestros padres y familia, quienes nos han acompañado a lo largo de estos cuatro años, y especialmente en la realización de nuestro Trabajo de Fin de Grado.

Muchas gracias por todo.

Índice de contenido

Índice de abreviación.....	5
Índice de tablas.....	6
Índice de figuras	6
Índice de anexos	7
Resumen	8
Abstract.....	9
Introducción.....	10
1. Historia de la carrera	10
1.1. La maratón de Valencia	10
2. Biomecánica	10
3. Economía de carrera.....	11
4. Variables	12
4.1. Temporales	12
4.1.1. Cadencia	12
4.1.2. Tiempo de contacto con el suelo.....	12
4.1.3. Fase excéntrica. Tiempo de frenado o tiempo de flexión	12
4.1.4. Fase concéntrica. Tiempo de aceleración o tiempo de impulsión.....	13
4.1.5. Tiempo de vuelo.....	13
4.1.6. Duty factor.....	13
4.2. Técnicas	13
4.2.1. Tipo de apoyo (foot strike angle).....	13
4.2.2. Inclinación de la tibia con el suelo.....	14
4.3. Espacial	14
4.3.1. Longitud de pasos	14
4.4. Espacio temporal.....	15
4.4.1. RSI impulso (Reactive Strength Index)	15
4.4.2. RSI (Reactive Strength index) excentrico	15
4.4.3. RSI (Reactive Strength index) total.....	15
Hipótesis	15
Objetivos.....	15
Material y métodos.....	16
1. Estrategia de búsqueda.....	16
2. Diseño	17

Índice de abreviación

ABREVIACION	DEFINICION
RFS	<i>Rear Foot Strike</i>
MFS	<i>Middle Foot Strike</i>
FFS	<i>Front Foot Strike</i>
GCT	Tiempo de contacto con el suelo o <i>ground contact time</i>
RE	<i>Running Economy</i>
ppm	Pasos por minuto
m	Metros
Km	Kilómetros
WA	<i>World Athletics</i>
IAAF	<i>International Association of Athletics Federations</i>
FSP	<i>Foot strike pattern</i>
DF	<i>Duty factor</i>
LP	Longitud de paso
RSI imp	<i>Reactive Strength Index Impulso</i>
RSI ecc	<i>Reactive Strength Index Excéntrico</i>
RSI total	<i>Reactive Strength Index Total</i>

Índice de Tabla:

Tabla 1: Pregunta pico.....	19
Tabla 2: Palabras claves	20
Tabla 3: Tabla Excel de procesamiento de datos	30
Tabla 4: Frecuencia de FSA.....	33
Tabla 5: Frecuencia de inclinación de tibia	33
Tabla 6: Tabla descriptiva de las variables temporales comparando los 2 grupos	36
Tabla 7: Repartición de corredores talón o no talón entre el grupo 1 y 2.....	39
Tabla 8: Descripción de las variables espacio temporales comparando los 2 grupos	40
Tabla 9: Prueba T de Student de comparación entre los dos grupos para las variables temporales, espaciales y espacio temporales.....	41

Índice de figura:

Figura 1: Tres tipos de apoyo en el suelo	13
Figura 2: Ciclo de la carrera Fuente.....	13
Figura 3: Tres tipos de apoyo (FFS, MFS, RFS).....	16
Figura 4: Diferentes ángulos de tibia con el suelo.....	17
Figura 5: Recorrido del maratón de Valencia 2024 y lugar del estudio.....	21
Figura 6: Esquema de la zona de grabación.....	22
Figura 7: Configuración del sistema de grabación con GoPro e iPhone 13 Pro	22
Figura 8: Inicio y fin de la fase excéntrica	26
Figura 9: Inicio y fin de la fase concéntrica	26
Figura 10: Inicio y fin de la fase de vuelo.....	27
Figura 11: Diferentes tipos de apoyo y posición de la tibia.....	28
Figura 12: Box plot cadencia grupos 1 y 2	31
Figura 13: Box plot del tiempo de contacto suma grupo 1 y 2	31
Figura 14: Box plot tiempo de flexión grupo 1 y 2	32
Figura 15: Box plot tiempo de impulso grupo 1 y 2	32
Figura 16: Box plot tiempo de vuelo grupo 1 y 2	32
Figura 17: Box plot duty factor grupo 1 y 2.....	32
Figura 18: Box plot longitud de paso grupo 1 y 2	34
Figura 19: Box plot RSI imp grupo 1 y 2.....	34
Figura 20: Box plot RSI ecc grupo 1 y 2.....	34
Figura 21: Box plot RSI total grupo 1 y 2.....	35
Figura 22: Diagrama comparativo del tiempo de flexión entre el grupo 1 y 2	36

Figura 23: Diagrama comparativo del tiempo de contacto suma entre el grupo 1 y 2 36

Figura 24: Diagrama comparativo del tiempo de impulso entre el grupo 1 y 2 37

Figura 25: Diagrama comparativa del tiempo de vuelo entre el grupo 1 y 2 37

Figura 26: Diagrama comparativo del duty factor entre el grupo 1 y 2 37

Figura 27: Diagrama del porcentaje del tipo de apoyo entre el grupo 1 y 2 38

Tabla 7: Comparación del tipo de apoyo entre el grupo 1 y 2 38

Figura 28: Diagrama en barra de la inclinación de la tibia entre el grupo 1 y 2 38

Figura 29: Diagrama en barra que representa la frecuencia de apoyo talón en el grupo 1 y 2 39

Figura 30: Diagrama representativo de la longitud de paso entre el grupo 1 y 2 40

Figura 31: Diagrama representativo del RSI impulso entre el grupo 1 y 2 40

Figura 32: Diagrama representativo del RSI total entre el grupo 1 y 2 41

Figura 33: Diagrama representativo del RSI excéntrico entre el grupo 1 y 2 41

Resumen

Introducción: La biomecánica desempeña un papel fundamental en el rendimiento y la economía de carrera (RE) de los atletas de élite. La técnica de apoyo, la cadencia y otros parámetros espacio-temporales influyen directamente en la eficiencia del corredor. El Maratón de Valencia 2024 ofreció una oportunidad ideal para estudiar a los mejores atletas del mundo bajo condiciones de competición reales. **Objetivo:** Analizar las diferencias biomecánicas entre dos grupos de corredores élite masculinos del maratón de Valencia 2024, clasificados según su rendimiento (top 25 vs 25 siguientes), y como estas diferencias se relacionan con la economía de carrera (RE) y el rendimiento final. **Material y métodos:** Se realizó un estudio observacional sobre una muestra de 50 atletas masculinos de élite. Se grabó el tramo anterior al kilómetro 33 de la carrera utilizando cámaras de alta velocidad (240 *fps*). Se analizaron variables temporales (Cadencia, tiempo de contacto con el suelo, tiempo de frenado, tiempo de impulsión, tiempo de vuelo, duty factor), técnicas (tipo de apoyo, inclinación de la tibia con el suelo), espacial (longitud de paso), y espacio-temporales (RSI impulso, RSI excéntrico, RSI total) mediante el software Kinovea. Los datos se compararon entre dos grupos establecidos a priori según el rendimiento en carrera: los 25 primeros corredores clasificados y los 25 siguientes. Se emplearon pruebas estadísticas en función de la normalidad de los datos. **Resultados y discusión:** En cuanto a las variables técnicas, el patrón de pisada predominante fue el apoyo medio pie (*middle foot strike*, *MFS*) presente en el 70% de los corredores, seguido del apoyo con el talón (*rear foot strike*, *RFS*) con un 26%, y finalmente el apoyo de antepié (*FFS*) con solo un 4%. Además, la inclinación de la tibia más común fue la posición vertical (93%) frente a un 7% en extensión. Respecto a las variables temporales, la cadencia media fue de 184 ppm. El grupo con mejor rendimiento presenta menores tiempos de contacto con el suelo (172ms vs 180ms), menor tiempo de impulso (94ms vs 100ms) menor tiempo de flexión (77ms vs 80ms), menor duty factor (53% vs 55%) y un tiempo de vuelo ligeramente superior (151ms vs 147ms). En relación con las variables espacial, se observó una mayor longitud de zancada en el grupo de mayor rendimiento (183 vs 178 cm). En cuanto a las variables espacio temporales, el grupo 1 mostro mejor resultados en todos los índices RSI (Reactive Strength Index): RSI impulso (1,95 vs 1,80 cm/ms), RSI total (1,07vs 0,98 cm/ms) y RSI excéntrico (2,1 vs 2,20 cm/ms). Se encontraron diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) en variables claves como el tiempo

de contacto, el tiempo de impulso la longitud de pasos, el RSI impulso, el RSI total y el RSI excéntrico. Estas diferencias respaldan la hipótesis de que una técnica de carrera más eficiente está asociada con una mayor economía de carrera (RE) y un mayor rendimiento. **Conclusión:** El patrón biomecánico más eficiente en maratón se caracteriza por una pisada MFS, tibia vertical, cadencia elevada y tiempos de contacto e impulso reducidos. Estos elementos están estrechamente relacionados con el rendimiento en atletas élite. Futuras investigaciones deberían incluir análisis en mujeres y observar la evolución del patrón de carrera a lo largo de la prueba. **Palabras clave:** biomecánica, maratón, running, atletas de élite, patrón de pisada, economía de carrera.

Abstract

Introduction: Biomechanics plays a fundamental role in the performance and Running Economy (RE) of elite athletes. Foot strike technique, cadence, and other spatiotemporal parameters directly influence running efficiency. The 2024 Valencia Marathon offered an ideal opportunity to study the world's top athletes under real competition conditions. **Objective:** To analyze the biomechanical differences between two groups of elite male runners from the 2024 Valencia Marathon, classified according to their performance (top 25 vs. following 25), and how these differences relate to Running Economy (RE) and final performance. **Material and Methods:** An observational study was carried out on a sample of 50 elite male athletes. The section before the 33rd kilometer of the race was recorded using high-speed cameras (240 fps). Temporal variables (cadence, ground contact time, braking time, propulsion time, flight time, duty factor), technical variables (foot strike type, tibial inclination relative to the ground), spatial variable (step length), and spatiotemporal variables (RSI propulsion, RSI eccentric, total RSI) were analyzed using Kinovea software. The data were compared between two groups previously established according to race performance: the first 25 finishers and the following 25. Statistical tests were applied based on data normality. **Results and Discussion:** Regarding technical variables, the predominant foot strike pattern was midfoot strike (MFS), observed in 70% of the runners, followed by rearfoot strike (RFS) at 26%, and forefoot strike (FFS) at only 4%. Additionally, the most common tibial inclination was vertical (93%) compared to 7% in extension. In terms of temporal variables, the average cadence was 184 steps per minute. The higher-performing group showed lower ground contact times (172 ms vs. 180 ms), shorter propulsion times (94 ms vs. 100 ms), shorter braking times (77 ms vs. 80 ms), lower duty factor (53% vs. 55%), and slightly longer flight times (151 ms vs. 147 ms). Regarding the spatial variable, a greater step length was observed in the higher-performing group (183 cm vs. 178 cm). In terms of spatiotemporal variables, Group 1 showed better results in all RSI (Reactive Strength Index) metrics: RSI propulsion (1.95 vs. 1.80 cm/ms), total RSI (1.07 vs. 0.98 cm/ms), and RSI eccentric (2.1 vs. 2.20 cm/ms). Statistically significant differences ($p < 0.05$) were found in key variables such as ground contact time, propulsion time, step length, RSI propulsion, total RSI, and RSI eccentric. These differences support the hypothesis that a more efficient running technique is associated with better Running Economy (RE) and greater performance. **Conclusion:** The most efficient biomechanical pattern in marathon running is characterized by a midfoot strike (MFS), vertical tibial alignment, high cadence, and reduced contact and propulsion times. These elements are closely related to elite-level performance. Future studies should include female athletes and analyze how running patterns evolve throughout the race. **Keywords:** biomechanics, marathon, running, elite athletes, foot strike pattern, Running Economy.

Introducción

1. Historia de la carrera

1.1. La maratón de Valencia:

En 2016, la Maratón de Valencia recibió la etiqueta “*Road Race Gold*” por la *World athletics* (WA) (anteriormente *International Association of Athletics Federations* (IAAF)), y está reconocido como el primer maratón de España (Borao, P. s.f). El 1 de diciembre tuvo lugar la maratón de Valencia 2024, recordado como "el maratón de las emociones", en homenaje a las víctimas de la DANA que afectó a la Comunidad Valenciana días antes del evento (Valencia ciudad del running, 2024) Más de 35.000 personas estaban inscritas a este evento de reconocimiento mundial y unos 28.000 llegaron a la meta con más de 5.000 personas en menos de tres horas. El keniano, Sebastián Sawe ganó la carrera en 2h 02min 05s. En cuanto a las mujeres, ganó la etíope Megertu Alemu en 2h 16min 48s (*Clasificaciones Maratón de Valencia, 2024*).

2. Biomecánica

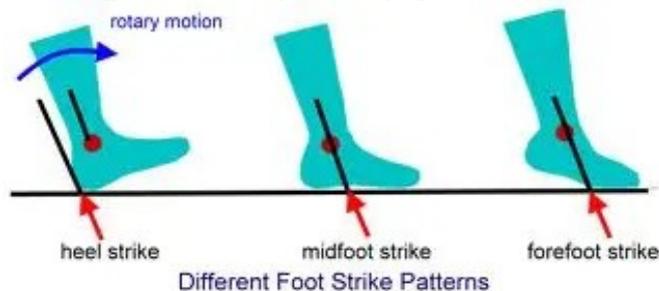
La biomecánica de la carrera describe cómo el cuerpo se mueve durante el desplazamiento. Los corredores adoptan tres patrones de contacto con el suelo (*Foot Strike Pattern*, FSP): RFS (*Rear Foot Strike*) (contacto de talón), MFS (*Middle Foot Strike*) (medio pie) y FFS (*Front Foot Strike*) (antepié), cada uno con características específicas de apoyo y propulsión (Figura 1) (Almeida et al., 2015; Hanley et al., 2019).

El ciclo de la zancada se divide en fase de apoyo y fase de vuelo, siendo más rápida y potente que en la marcha (Figura 2) (Rojano, 2019; Nicola & Jewison, 2012). A mayor velocidad, aumentan la longitud de zancada y la cadencia, así como las fuerzas de reacción del suelo (Nicola & Jewison, 2012). Además, con el incremento de la velocidad, se observa una transición hacia patrones de apoyo más anteriores (Hasegawa et al., 2007). El tipo de apoyo afecta la activación muscular: el FFS reduce la acción de los extensores de rodilla y aumenta la de los flexores plantares, lo que puede favorecer la economía de carrera (*RE*) (Kuhman et al., 2016; Paavolainen et al., 1999). La técnica modula las cargas biomecánicas y debe adaptarse a la velocidad, que se clasifica en trote, carrera y sprint (Chan & Rudins, 1994).

Durante el maratón, los corredores tienden a aumentar su GCT (*Ground*

Contact Time) debido a la fatiga (Hayes & Caplan, 2012). Aunque los corredores amateurs suelen usar el RFS, los de élite mantienen mayor estabilidad en su patrón (Larson et al., 2011; Hanley et al., 2019). La técnica de carrera influye directamente en la *RE* y en el rendimiento (Folland et al., 2017), especialmente a velocidades altas, donde la potencia se genera principalmente a nivel de cadera (Novacheck, 1998).

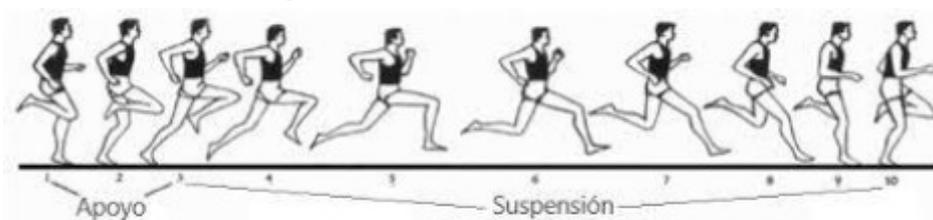
Figura 1: Tres tipos de apoyo en el suelo



Fuente: Extraído de

PersonalRunning.com

Figura 2: Ciclo de la carrera Fuente



Extraído de la página web de la clínica AD Fisioterapia Valencia

3. Economía de carrera

La *RE* se refiere a la cantidad de oxígeno o energía necesaria para correr a una velocidad constante y depende de factores metabólicos, cardiorrespiratorios, biomecánicos y neuromusculares (Van Hooren et al., 2024). Los corredores con calzado minimalista son ligeramente más eficientes energéticamente que los que utilizan calzado tradicional, probablemente debido a un mejor almacenamiento y restitución de la energía elástica (Perl et al., 2012). Los corredores que contactan primero con el talón tienden a ser más económicos que los que lo hacen con el mediopié, principalmente debido a las diferencias en los tiempos de contacto y suspensión (Ogueta-Alday et al., 2014). La optimización de la *RE* requiere un compromiso entre el contacto *MFS* y un mayor tiempo de contacto con el suelo (*GCT*) (Di Michele & Merni, 2014). La longitud de zancada influye en la *RE*, y la mayoría de los corredores adoptan espontáneamente una longitud de zancada óptima (Thompson, 2017). No

existe una técnica biomecánica universal que optimice la *RE* para todos los corredores. Características como una masa corporal centrada en el torso y brazos de palanca más cortos en el tendón de Aquiles parecen mejorar la *RE*. La activación muscular antes y al inicio del contacto con el suelo también desempeña un papel clave en la promoción de la rigidez de la pierna y el uso de la energía elástica (Barnes & Kilding, 2015). Los parámetros biomecánicos explican entre el 4% y el 12% de las variaciones interindividuales en la *RE*, y la combinación de varios factores puede mejorar esta predicción (Van Hooren et al., 2024).

4. Variables

4.1. Variables temporales:

4.1.1. Cadencia

Numerosos estudios han examinado los efectos biomecánicos de un cambio en la cadencia de carrera. En cuanto a la cadencia óptima, a menudo se acepta como referencia 180 pasos por minuto (ppm), aunque es demasiado pronto para afirmar que esta cadencia debe aplicarse a todos los corredores. (Lenhart et al., 2014; Heiderscheit et al., 2011)

4.1.2. Tiempo de contacto con el suelo

Una reducción del *GCT* suele asociarse a una mejora de la *RE*, aunque algunos estudios han arrojado resultados contradictorios sobre esta relación (Joubert et al., 2020). Un *GCT* más corto se asocia con una aceleración más rápida y mientras que un *GCT* más largo se asocia con una menor producción de fuerza y tiempos de carrera más largos (Blauberger et al., 2024). Además, las investigaciones han demostrado que los corredores europeos suelen tener un *GCT* más corto, lo que podría explicar su mejor *RE* en comparación con los corredores norte africanos (Santos-Concejero et al., 2013). El *GCT* también puede verse influido por el tipo de apoyo con el suelo. De hecho, varios estudios han observado un menor *GCT* y un mayor tiempo de vuelo en corredores que utilizan un apoyo *MFS*, en comparación con los que utilizan un apoyo con *RFS* (Roche-Seruendo et al., 2023).

4.1.3. Fase excéntrica. Tiempo de frenado o tiempo de flexión

La fuerza de frenado corresponde a la cantidad de energía enviada por la pierna de delante hacia atrás cuando el pie toca el suelo. Una fuerza de frenado elevada puede aumentar el riesgo de lesiones. Y a la inversa, una fuerza de frenado reducida puede reducir el riesgo de lesiones (Napier et

al., 2019). Durante una contracción excéntrica, el músculo se alarga bajo el efecto de la fuerza externa que se acumula. Esta acumulación de energía absorbida se transforma en energía mecánica que puede disiparse en forma de calor. Este fenómeno es especialmente importante en la zancada, donde la fase excéntrica comienza en cuanto el pie toca el suelo (A) y termina cuando la rodilla contralateral alcanza el mismo nivel (B). En esta posición, los fémures están paralelos en el plano sagital (Douglas et al., 2017). Es durante este periodo cuando el músculo actúa como amortiguador reduciendo la energía transmitida durante el impacto, limitando así el estrés articular. Esta capacidad de absorción es esencial, ya que la fase excéntrica impone una carga significativa al sistema musculoesquelético, lo que influye en el rendimiento y en la prevención de lesiones (Pipkin et al., 2016; Burgos-Jara et al., 2023).

4.1.4. Fase concéntrica. Tiempo de aceleración o tiempo de impulsión

A diferencia de la fase excéntrica, durante una contracción concéntrica el músculo se acorta acercando su inserción y su origen. Este mecanismo se basa en la dinámica de los sarcómeros, que se acortan en la concéntrica y se alargan en la excéntrica (Schoenfeld et al., 2017; Franchi et al., 2017). En la zancada, la fase concéntrica comienza cuando las rodillas alcanzan el mismo nivel en el plano sagital y termina cuando el pie abandona el suelo. Esta fase desempeña un papel clave en la propulsión del cuerpo hacia delante al transformar la fuerza muscular en movimiento mediante la transmisión del esfuerzo a la articulación a través del tendón (Pakosz et al., 2023; Pipkin A., 2016).

4.1.5. Tiempo de vuelo

Corresponde al momento entre el final de la fase concéntrica (despegue de un pie) y el inicio de la fase concéntrica (aterrizaje del otro pie). Es el periodo durante el cual el atleta no tiene contacto con el suelo (Ortega, 2019).

4.1.6. Duty factor

El DF (*Duty Factor*) representa el porcentaje del ciclo de zancada en el que el pie está en contacto con el suelo, y se utiliza para diferenciar estilos de carrera (Patoz et al., 2022). Un DF alto se asocia a mayor flexión de cadera, rodilla y tobillo, un patrón de pisada tipo RFS, y menor esfuerzo de propulsión. Por el contrario, un DF bajo implica una zancada más horizontal y una pierna más extendida en el contacto (Patoz et al., 2020; Patoz et al.,

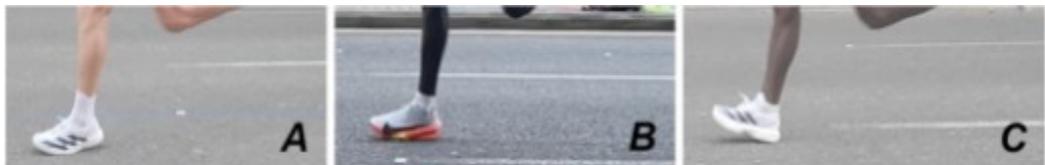
2022). Aunque se ha observado una relación entre *DF* y *FSP*, su vínculo con la *RE* no es concluyente. Un *DF* bajo suele corresponder a un coste energético menor, pero no siempre; por tanto, el *DF* no está directamente relacionado con la *RE* (Van Hooren et al., 2024).

4.2. Variables técnicas:

4.2.1. Tipo de apoyo (foot strike angle)

El análisis del apoyo de los corredores fue realizado siguiendo un enfoque similar al descrito por Souza, R. B. (2016) en su estudio. Según su estudio, es importante analizar el apoyo durante la primera fase de carga. Es en este momento que se produce una deformación de la suela de la zapatilla debido a su caída (*drop*). Para clasificar el tipo de apoyo, hemos utilizado el mismo método que Hanley et al. (2019). El tipo de apoyo (*FSA*), corresponde al ángulo formado durante el contacto inicial entre el pie y el suelo. (Ensink et al., 2024) En un apoyo *FFS* (Figura 3A), el pie contacto con el suelo primero la parte delantera del pie, sin contacto del talón. En un apoyo *MFS* (Figura 3B), el pie toca el suelo de manera plana. En un apoyo *RFS* (Figura 3C) el talón es la primera parte del pie que impacta el suelo.

Figura 3: Tres tipos de apoyo (FFS, MFS, RFS)



Fuente: Propia

4.2.2. Inclinación de la tibia con el suelo

La tibia puede ser en dos posiciones diferentes, vertical (Figura 4A) o en extensión (Figura 4B). Para saber en qué posición está, debemos mirar la posición de la rótula, y compararla con un marcador perpendicular al suelo que pasa por el maléolo. Si la rótula está alineada con el marcador, la tibia será vertical. (Figura 4A) Si la rótula está detrás del marcador, la tibia será en extensión. (Figura 4B) (Souza, 2016)

Figura 4: Diferentes ángulos de tibia con el suelo



Fuente: Propia

4.3. Variables espaciales:

4.3.1. Longitud de pasos:

Se ha demostrado que la LP (Longitud de Pasos) afecta a la *RE* de distancia. (Cavanagh & Kram, 1989) Una reducción de la longitud de zancada parece reducir algunos de los factores biomecánicos clave asociados a las lesiones en carrera. (Schubert et al., 2014)

4.3.2. Reactive Strength Index impulso (RSI imp)

El *RSI* (*Reactive Strength index*) se utiliza normalmente para perfilar la tolerancia a la carga de estiramiento (Markwick et al., 2015). Mide la eficiencia con la que el cuerpo puede pasar de una contracción muscular excéntrica a una concéntrica. El *RSI* es un indicador de rendimiento. (Southey et al., 2024).

4.3.3. *Reactive Strength index* excéntrico (RSI ecc)

El *RSI* excéntrico evalúa la capacidad del atleta a absorber la energía de la fase excéntrica. Un *RSI* excéntrico bueno corresponde a una buena capacidad de amortiguación, lo que permite disminuir el riesgo de lesión y mejorar la eficacia del corredor. Una deficiencia en esta capacidad puede provocar un aumento del gasto energético, una técnica de carrera menos eficaz y un mayor riesgo de lesiones, sobre todo al final de la carrera, cuando la fatiga neuromuscular altera la capacidad de absorber fuerzas de forma eficaz.

4.3.4. *Reactive Strength index* total (RSI total)

El *RSI* total es un indicador del rendimiento. Según Louder et al. (2019), el

RSI representa una herramienta válida y sensible para evaluar la capacidad explosiva. En atletas de alto rendimiento, un *RSI* elevado se asocia con una mayor eficiencia para ejecutar movimientos explosivos con tiempos de contacto mínimos. Este parámetro no solo permite valorar la economía neuromuscular, sino también monitorear adaptaciones al entrenamiento pliométrico o detectar signos de fatiga neuromuscular en contextos competitivos. Se eligió este tema para investigar el patrón de pisada y la cadencia de los atletas masculinos de la maratón de Valencia 2024.

Hipótesis:

La hipótesis de nuestro estudio fue que los corredores del primer grupo (grupo A de mejor rendimiento) corren con un mayor apoyo MFS (*Middle Foot Strike*), la tibia en una posición más vertical, una cadencia mantenida de 180 o más ppm y un tiempo de flexión más corto que el tiempo de impulso, que el grupo B (menor rendimiento).

Objetivos:

- Objetivo principal: Analizar las diferencias biomecánicas entre dos grupos de corredores élite masculinos del maratón de Valencia 2024, clasificados según su rendimiento (top 25 vs 25 siguientes),
- Los objetivos específicos son:
 - Analizar las variables biomecánicas temporales de los corredores élite masculinos en el maratón de Valencia 2024.
 - Analizar las variables biomecánicas técnicas de los corredores élite masculinos en el maratón de Valencia 2024.
 - Analizar las variables biomecánicas espaciales de los corredores élite masculinos en el maratón de Valencia 2024.
 - Analizar las variables biomecánicas espacio temporales de los corredores élite masculinos en el maratón de Valencia 2024.

Material y métodos

1. Estrategia de búsqueda

1.1. Descripción de la pregunta PICO

Se siguió el modelo PICO (Tabla 1), una metodología utilizada en la investigación clínica para formular preguntas estructuradas y obtener respuestas precisas (Da Costa Santos et al., 2007).

Tabla 1: Pregunta pico

P	- Pacientes: Atletas/ corredor de elite masculino.
I	- Intervención: Análisis biomecánico a través de herramientas de videograbación
C	- Comparación o control: Grupo de los 25 primeros (mayor rendimiento) y 25 segundos (menor rendimiento)
O	- Resultados/ Outcomes: Economía de carrera.

Fuente: Elaboración propia

Pregunta resultante: ¿Cuáles son las diferencias biomecánicas entre dos grupos de corredores élite masculinos del maratón de Valencia 2024, clasificados según su rendimiento (top 25 vs 25 siguientes), y cómo influyen en la economía de carrera y en el rendimiento?

Para llevar a cabo nuestra búsqueda, se utilizó las palabras claves siguientes: Biomecánica, maratón, running, atletas de élite, patrón de pisada, economía de carrera. (*Keywords: Biomechanics, marathon, running, elite athlete, Foot Strike Pattern, Running Economy*). La siguiente tabla (Tabla 2) muestra las palabras clave utilizadas, su correspondencia en la terminología *MeSH (Medical Subject Headings)* y su definición.

Tabla 2: Palabras claves

Palabras claves	MeSH	Definición
Biomecánica	<i>Biomechanical phenomena</i>	The properties, processes, and behavior of biological systems under the action of mechanical forces.
Maratón	<i>Marathon Running</i>	A sporting event in which participants run a distance of approximately 26.2 miles in a race.
Carrera	<i>Running</i>	
Atletas de élite	<i>Elite athlete</i>	Individuals who have developed skills, physical stamina and strength or participants in SPORTS or other physical activities.
Patrón de pisada	<i>Foot strike pattern</i>	The way the foot touches the ground
Economía de carrera	<i>Running economy</i>	Cantidad de oxígeno que utiliza nuestro cuerpo cuando corremos a una intensidad o velocidad determinada.

Fuente: Elaboración propia

2. Diseño

Este trabajo se desarrolla como un estudio observacional. Se realizó un estudio bidimensional del patrón de pisada en los corredores del maratón de Valencia, el cual permitió estudiar el movimiento en dos dimensiones dentro del plano sagital. En este caso, la atención se centró en el plano sagital, es decir, en los movimientos del cuerpo hacia delante y hacia atrás. Analizar una carrera oficial de categoría mundial nos permite estudiar a los atletas de élite que compiten en el mismo lugar y en idénticas condiciones. Se recogieron los datos el 1/12/2024 durante la maratón de Valencia. Se eligió justo antes del kilómetro 33 para grabar los vídeos, en una calle ancha y con poca gente. Se colocó esparadrapo blanco en el suelo para facilitar la visión en el suelo negro. La Figura 5 muestra el recorrido de la maratón. La flecha roja representa el lugar de la grabación. Se establecido

una comparación entre dos grupos de corredores elite masculinos, definido según su orden de llegada, los 25 primeros (grupo A) y los 25 segundos (grupo B).

Figura 5: Recorrido del maratón de Valencia 2024 y lugar del estudio

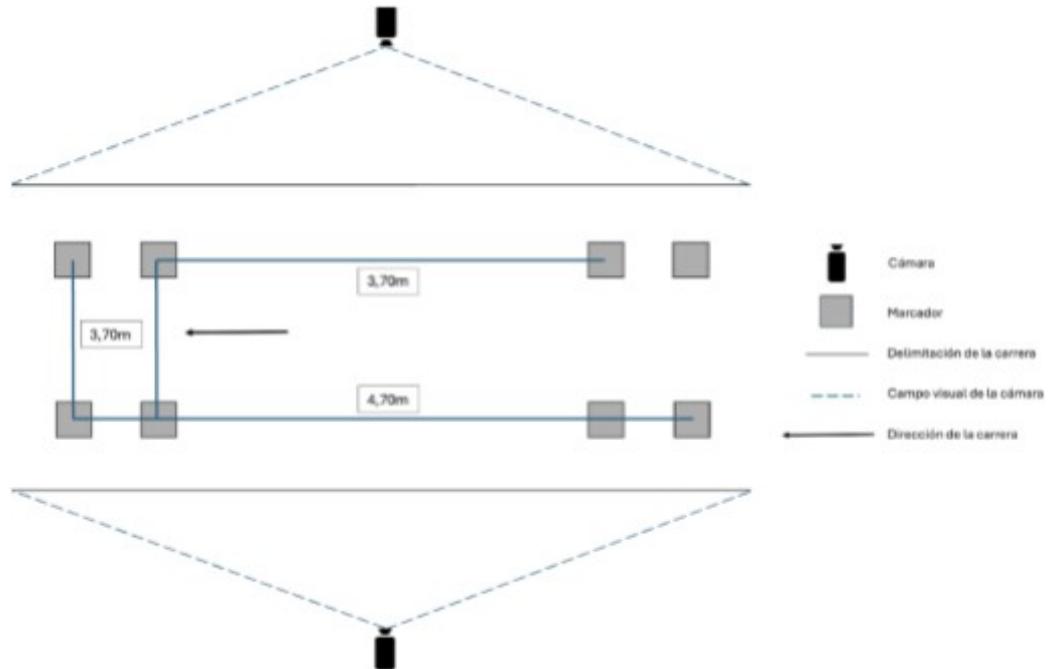


Fuente: Extraído de Valencia Ciudad del Running –

Recorrido Maratón

Se delimitó un área de 4,70m de largo y 3,70m de ancho para delimitar la zona de análisis. Se eligió esta distancia, porque corresponde al ángulo máximo que la cámara podía grabar. También, estábamos pendientes del paso de coches y de peatones. Si nos situábamos más lejos, teníamos riesgo de que pasarán por delante y nos tapanán la cámara. Se colocaron marcas en las cuatro esquinas para facilitar el reconocimiento de los límites. Se colocaron otras marcas a 1m de las cuatro esquinas. Se colocaron dos cámaras a cada lado de la zona para grabar a los corredores desde distintos ángulos. El campo visual de las cámaras está representado por líneas de puntos. La dirección de la carrera se indica con una flecha negra. (Figura 6)

Figura 6: Esquema de la zona de grabación



Fuente: Elaboración propia

Para la grabación, se utilizaron dos cámaras (una GoPro Hero 8 Black y un iPhone 13 Pro), ambas montadas sobre trípodes a una altura de 75 cm desde el suelo (Figura 7)

Figura 7: Configuración del sistema de grabación con GoPro e iPhone 13 Pro



Fuente: Imagen propia

Las dos cámaras son de alta resolución, se graban a 240 imágenes por segundo a 1080 HP. Las cámaras están colocadas una frente a otra, en el centro del espacio definido, para ofrecer la mejor visibilidad posible para el análisis.

3. Participantes:

De los 28 000 que llegaron a la meta, se eligió grabar a los 50 primeros. De estos 50, se observó posteriormente que 25 realizaron un tiempo igual o inferior a la mínima olímpica (2h08:10). Esta mínima olímpica representa el criterio establecido en España para determinar la elegibilidad de los atletas que deseen competir a nivel internacional. (Real Federación Española de Atletismo, 2023)

3.1. Criterios de selección

Para garantizar la pertinencia y coherencia del estudio, se definieron criterios específicos de inclusión y exclusión con el fin de seleccionar adecuadamente los participantes.

3.2. Criterios de inclusión

- Corredores de sexo masculino.
- Atletas que se encontrasen dentro de los 50 primeros que pasan en el kilómetro 33
- Atletas que pasaran dentro de los marcadores delimitados en el suelo.
-

3.3. Criterios de exclusión

- Atletas que caminan durante el tramo analizado
- Corredores que estaban parcial o totalmente ocultos detrás de otros participantes en los vídeos. Esta obstrucción visual impedía una observación clara de sus movimientos, lo que impide el análisis biomecánico.

3.4. Justificación de los criterios de selección

El objetivo es analizar los parámetros biomecánicos representativos del rendimiento de alto nivel en maratón. Por esto se seleccionaron los 50 primeros corredores, porque son atletas de nivel élite.

Se eligieron exclusivamente hombres debido a la dinámica de la competición: las primeras mujeres en pasar al kilómetro 33 lo hacen cuando ya han sido superadas por un gran número de hombres, lo que genera una situación de aglomeración en la zona. Esta superposición de atletas dificulta la visibilidad de los apoyos, ya que los pies de las corredoras pueden quedar

parcialmente ocultos por otros corredores, comprometiendo así la precisión del análisis.

La búsqueda se basa en el análisis de vídeos públicos del Maratón de Valencia, grabados durante la competición. De acuerdo con el artículo 23 del reglamento del 43K Valencia 2024, podemos «almacenar, procesar y utilizar sus nombres, resultados e imágenes recogidas durante la carrera mediante fotografías, vídeos», de todos los corredores inscritos. (Reglamento maratón, 2025) El estudio se centró exclusivamente en el análisis de variables biomecánicas a partir de grabaciones accesibles sin ninguna intervención directa sobre los corredores. No fue necesario obtener el consentimiento informado individual ni la aprobación de un comité ético formal.

3.5. Cálculo muestral:

Se selecciono una muestra de 50 corredores elites masculinos que participaron en el maratón de valencia de 2024. Con el fin de establecer la comparación, la muestra fue dividida en dos grupos de igual tamaño (n=25) según su posición de llegada. Grupo A los 25 primeros corredores que pasan, y grupo B los 25 corredores siguientes. Es importante destacar que este criterio de agrupación fue definido antes del análisis estadístico, sin conocimiento previo de los tiempos individuales. De manera involuntaria y a posteriori, se observó que todos los corredores del grupo A habían alcanzado la mínima olímpica (2h08:10), mientras que los del grupo B no. Esta coincidencia no condiciono el diseño del estudio, pero aporta valor añadido a la interpretación de los resultados.

En 2024, 408 atletas de élite de todo el mundo consiguieron correr un maratón en menos de 2 horas y 10 minutos. Para nuestro estudio, seleccionamos una muestra de 50 corredores de este grupo, alrededor del 12,5% del total (World Athletics, n.d.). Ampliar el tamaño de la muestra más allá de estos 50 corredores supondría incluir a atletas con tiempos más alejados de la élite mundial, lo que podría afectar a la homogeneidad del análisis.

3.6. Variables:

Las variables son todo lo que se mide para responder a los objetivos propuestos. Las variables fueron clasificadas en tres grupos: Temporales, técnicas y espacio temporales. Las variables temporales son medidas relacionadas con la dimensión temporal del movimiento. Permiten cuantificar la duración o el ritmo de determinadas fases de la pisada. En

cuanto a las variables técnicas, permiten clasificar o describir la forma del movimiento sin medida directa. Por ejemplo, se pueden emplear para identificar el tipo de apoyo (*FFS*, *MFS* o *RFS*) o el ángulo de la tibia. Estas variables no se expresan en unidades de medida, sino que permiten organizar la información en categorías según las características observadas. Y las variables espacio temporales son variables numéricas, es decir las que expresan una cantidad medible.

3.6.1. Variables temporales:

3.6.1.1. Cadencia

La cadencia corresponde a la cantidad de ppm. Para calcularla hemos utilizado la fórmula siguiente: $\frac{\text{número de pasos} \times 60}{\text{Tiempo de doble paso}}$ La frecuencia de pasos puede también ser expresada en Hz. Corresponde a los números de contactos con el suelo por segundo. Para calcularla, se utiliza la fórmula siguiente: $\frac{\text{Cadencia}}{60}$ (Gamez-Paya et al., 2023)

3.6.1.2. Tiempo de frenado o tiempo de flexión (Fase excéntrica).

El tiempo de frenado, también llamado tiempo de flexión, empieza cuando el pie toca el suelo, y acaba cuando las rodillas y los fémures están alineadas. El tiempo de frenado, o tiempo de flexión, coincide con la fase excéntrica de la carrera, durante la cual los músculos, especialmente los extensores de la pierna se activan para absorber las fuerzas de impacto y controlar la desaceleración del cuerpo. Durante esta fase, el músculo se alarga bajo el efecto de la fuerza externa que se acumula. Este fenómeno es especialmente importante en la zancada. Empieza cuando el pie toca el suelo (Figura 8A) y termina cuando la rodilla contralateral alcanza el mismo nivel (Figura 8B). (Douglas et al., 2017).

Para calcularlo, se utiliza la fórmula siguiente:

$$\text{Tiempo de frenado} = T(\text{toma de contacto}) \rightarrow T(\text{fémures paralelos}).$$

Figura 8: Inicio y fin de la fase excéntrica



Fuente: Elaboración propia

3.6.1.3. Tiempo de aceleración o tiempo de impulsión (Fase concéntrica).

El tiempo de aceleración o tiempo de impulsión es el tiempo durante el cual el corredor genera fuerza hacia el suelo para propulsarse hacia delante. Esta fase está relacionada con la fase concéntrica. Durante esta fase, el músculo se contrae, acercando su origen y su inserción.

(Schoenfeld et al., 2017; Franchi et al., 2017). Calculamos el tiempo cuando las rodillas están alineadas (Figura 9A), hasta el despegue del pie (Figura 9B).

Figura 9: Inicio y fin de la fase concéntrica



Fuente: Elaboración propia

3.6.1.4. Tiempo de vuelo:

Corresponde al momento entre el final de la fase concéntrica (despegue de un pie) y el inicio de la fase excéntrica (aterrizaje del otro pie). Durante este periodo, el atleta no tiene contacto con el suelo (Ortega, 2019). Para tener el tiempo de vuelo, se calcula el tiempo entre el despegue del pie (Figura 10A) y el apoyo del pie contralateral (Figura 10B).

Figura 10: Inicio y fin de la fase de vuelo



Fuente: Elaboración propia

3.6.1.5. Duty factor

El *DF* (*Duty Factor*) corresponde al porcentaje del tiempo en el cual el pie toca el suelo durante una zancada. (Nijs et al., 2022; Patoz et al., 2022; Patoz et al., 2019; der Meulen et al., 2024)

Para calcularlo, se aplica la siguiente fórmula:

$$\frac{\text{Tiempo de contacto suma Derecha} + \text{Tiempo de contacto suma Izquierda}}{\text{Tiempo de contacto suma Derecha} + \text{Tiempo de contacto suma Izquierda} + \text{Tiempo de vuelo Derecha} + \text{Tiempo de vuelo Izquierda}} \times 100.$$

3.6.2. Variables técnicas:

3.6.2.1. Tipo de apoyo (foot strike angle)

El *FSA* (*Foot Strike Angle* o tipo de apoyo), corresponde al ángulo formado durante el contacto inicial entre el pie y el suelo (Ensink et al., 2024).

En su artículo, Souza (2016) evalúa el tipo de apoyo de los corredores observando el momento del contacto inicial a través de vídeos en cámara lenta, analizándolos imagen por imagen. Basándonos en el análisis descrito por Souza (2016), pudimos clasificar los apoyos como FFS (Figura 11A), MFS (Figura 11B) o RFS (Figura 11C).

Figura 11: Diferentes tipos de apoyo y posición de la tibia

(A): FFS: Contacto inicial con el antepié, tibia vertical.

(B): MFS: Contacto simultáneo entre el antepié y el retropié, tibia vertical.

(C): RFS: Contacto inicial con el retropié, tibia vertical.



Fuente: Elaboración propia

3.6.2.2. Inclínación de la tibia con el suelo

La tibia puede ser en tres posiciones diferentes, en flexión en extensión o vertical. Para saber en qué posición está, marcamos una línea perpendicular al suelo. Si la rótula está detrás de la línea, la tibia sería en extensión, si la rótula está alineada, sería una tibia vertical, y si la rótula está delante de la línea, sería una tibia en flexión. (Souza, 2016)

3.6.3. Espacial

3.6.3.1. Longitud de pasos:

La LP se define como la distancia recorrida entre el despegue de un pie y el contacto con el pie opuesto. (Santos-Concejero et al., 2013). Para medir una distancia en Kinovea, es necesario calibrar el software utilizando marcadores colocados en el suelo. Estos marcadores sirven como referencia visual para definir una escala en el software. Al calibrar la escala de referencia en Kinovea utilizando estos puntos previamente marcados, podemos medir distancias con precisión directamente desde la pantalla del ordenador, garantizando que las mediciones sean correctas y proporcionales al entorno real. La zancada del paso izquierdo se calcula midiendo la distancia entre la punta del pie izquierdo antes del despegue y la punta del pie derecho al final de la fase excéntrica de la pierna derecha. Se repite el mismo procedimiento para medir la LP de la pierna derecha.

3.6.4. Variables espacio temporales:

3.6.4.1. *RSI*

El *RSI* es un indicador utilizado para evaluar la capacidad de un deportista para pasar rápidamente de una contracción muscular excéntrica a una concéntrica. (Rebelo et al., 2022) Por lo tanto, refleja la eficacia del ciclo de estiramiento-acortamiento, que es un mecanismo clave en movimientos explosivos como correr, saltar o realizar cambios rápidos de dirección. (Ciacci et al., 2024)

3.6.4.2. *RSI imp*

La fase de impulso corresponde a la parte concéntrica del movimiento, cuando el atleta empuja contra el suelo para generar fuerza vertical. En esta fase, un *RSI* elevado indica una capacidad para generar una gran cantidad de fuerza en un espacio de tiempo muy corto, lo que refleja un buen uso de la energía elástica acumulada durante la fase excéntrica. Esta capacidad es esencial para acciones como el rebote rápido o la aceleración. (Ciacci et al., 2024; Rebelo et al., 2022)

Para calcularlo, hemos utilizado la fórmula siguiente:

$$\frac{\text{Longitud de paso}}{\text{Tiempo de impulso}}$$

3.6.4.3. *RSI ecc*

La fase excéntrica precede al impulso y representa el momento en que el músculo se alarga bajo tensión, como al aterrizar de un salto. Un *RSI* eficaz depende de la capacidad del sistema neuromuscular para almacenar energía elástica durante esta fase y liberarla inmediatamente después. Esta capacidad está directamente relacionada con la integridad de las estructuras musculotendinosas y la coordinación intermuscular. (Ciacci et al., 2024; Rebelo et al., 2022)

Para calcularlo, hemos utilizado la fórmula siguiente:

$$\frac{\text{Longitud de paso}}{\text{Tiempo de flexión}}$$

3.6.4.4. *RSI total*

El *RSI* total tiene en cuenta el *GCT* con el suelo y la longitud de zancada, calculando la relación entre estos dos valores. Por lo tanto, un *RSI* elevado se caracteriza por una gran altura con un *GCT* muy corto, que es un indicador clave del rendimiento. (Ciacci et al., 2024; Rebelo et al., 2022).

Para calcularlo, hemos utilizado la fórmula siguiente:

$$\frac{\text{Longitud de paso}}{\text{Tiempo de flexión} + \text{tiempo de impulso}}$$

4. Análisis de datos

Las variables temporales y técnicas fueron analizadas a partir de los vídeos mediante el software Kinovea (versión 2023.1.2) (Fernández-González P., 2020). El análisis de los datos fue realizado de forma independiente por dos observadores (C.A. y M.P.). Posteriormente, un tercer observador externo (J.G.), con experiencia en análisis biomecánico de la carrera, verificó la fiabilidad de los resultados. Los datos fueron recopilados en una tabla excel compuesta de una serie de variables (Tabla 3).

Tabla 3: Tabla Excel de procesamiento de datos

SEXO	KM	clasificació n	ATLETA	MARCA	PIE (I/D)	TIEMPO CONTACTO SUMA	TIEMPO DE FLEXIÓN	TIEMPO IMPULSO	TIEMPO VUELO	DUTY FACTOR	SWING TIME	PASOS	TIEMPO	TIEMPO S	CADENCIA Hz	CADENCIA Hz	LONGITUD PASO (M)	FSA	INCLINACIÓ N TIBIA
	33	1			D	165	77	88	64			2			0	#DIV/0!			
	33	1			I	0						2			0	#DIV/0!			
	33	2			D							2							
	33	2			I							2							
	33	3			D							2							
	33	3			I							2							
	33	4			D							2							
	33	4			I							2							
	33	5			D							2							
	33	5			I							2							
	33	6			D							2							
	33	6			I							2							
	33	7			D							2							

Fuente: Elaboración propia

Se utilizó el software JAMOVI para obtener gráficos y tablas a partir de nuestros resultados. También se utiliza R Core Team (2024). R: *A Language and environment for statistical computing*. (Version 4.4) CRAN. (2024, August 7). Computer software. Retrieved from <https://cran.r-project.org> Kerby, D. S. (2014). The simple difference formula: An approach to teaching nonparametric correlation. *Comprehensive Psychology*, 3, 2165–2228. <https://doi.org/10.2466/11.IT.3.1> Se utilizó el software para la comparación de datos entre el grupo 1 y 2, para saber si hay diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$). Primero se analizaron los valores atípicos y, posteriormente, se comprobó la normalidad de las variables mediante la prueba de Shapiro-Wilk. Se estableció un nivel de significación estadística de $p < 0,05$. Algunas variables mostraron una distribución normal, mientras que otras no. Por este motivo, se empleó la prueba T de Student para comparar los grupos, cuando $p > 0.05$. En cambio, cuando $p < 0.05$, se utilizó la prueba no paramétrica U de Mann-Whitney, adecuada para comparar dos grupos independientes con distribuciones no normales.

Resultados

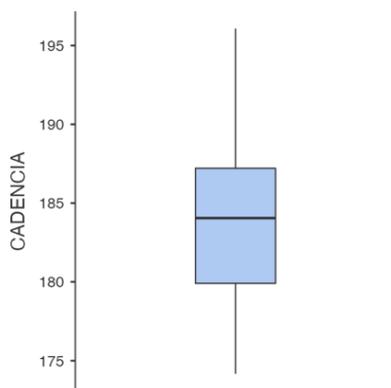
La edición 2024 de la Maratón de Valencia salió a las 8h15, con un tiempo de 12°, 80% de humedad, y 5 km/h de viento. Un año más, es una de las maratones más rápidas del mundo. Se ganó en 2:02:05, mejor marca del año. Los 10 primeros hicieron un tiempo de menos de 2:05:00. (Valencia, Ciudad del running, 2024).

1. Resultados de los 50 primeros corredores

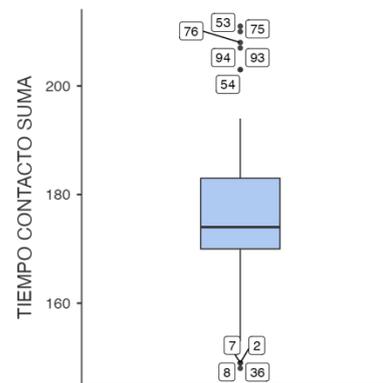
1.1. Variables temporales

En cuanto a las variables temporales, se ha obtenido una cadencia media de 184 ppm (Figura 12), un *GCT* con el suelo de 176 milisegundos (ms) (Figura 13), un tiempo de flexión de 78,8 ms (Figura 14), un tiempo de impulsión de 97,5 ms (Figura 15), un tiempo de vuelo de 149 ms (Figura 16), un *DF* de 54,2% (Figura 17).

Figura 12: Box plot cadencia grupos 1 y 2 **Figura 13: Box plot del tiempo de contacto suma grupo 1 y 2**

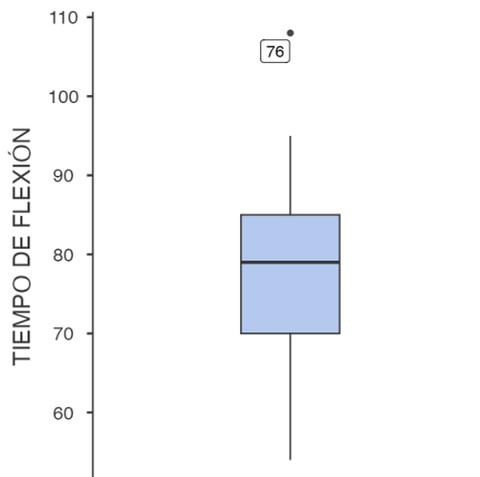


Fuente: Elaboración propia



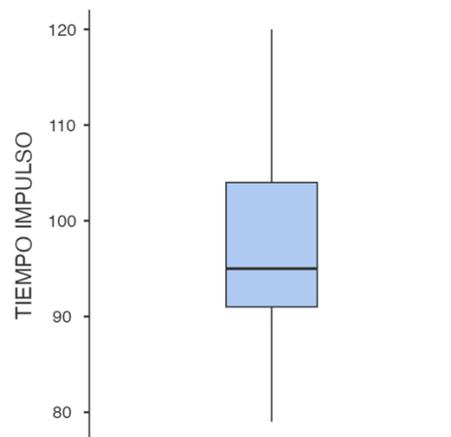
Fuente: Elaboración propia

Figura 14: Box plot tiempo de flexión grupo 1 y 2



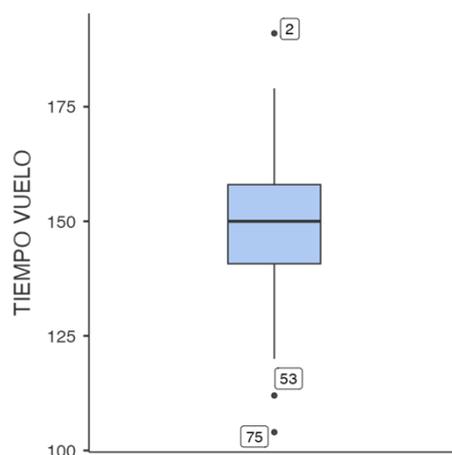
Fuente: Elaboración propia

Figura 15: Box plot tiempo de impulso grupo 1 y 2



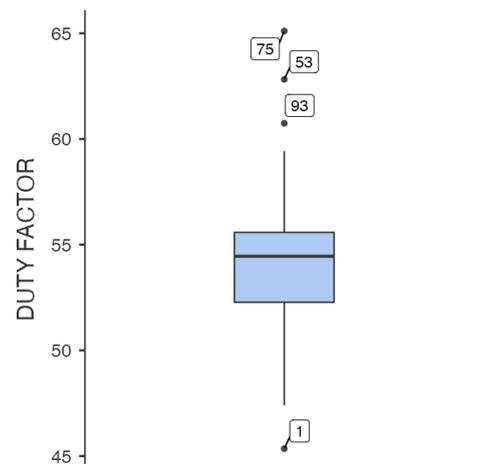
Fuente: Elaboración propia

Figura 16: Box plot tiempo de vuelo grupo 1 y 2



Fuente: Elaboración propia

Figura 17: Box plot duty factor grupo 1 y 2



Fuente: Elaboración propia

1.2. Variables técnicas:

Gracias al análisis de los 50 primeros atletas, sabemos que el patrón de apoyo predominante fue el apoyo *MFS* con un 70%, seguido de un apoyo *RFS* con un 26%, mientras que el apoyo en el *FFS* fue el menos frecuente con sólo un 4%. La tabla 4 muestra los resultados, con los dos grupos y los tres tipos de apoyo (Tabla 4).

Tabla 4: Frecuencia de FSA

FSA	Total
3 (FFS)	4 4.0%
2 (MFS)	70 70.0%
1 (RFS)	26 26.0%
Total	100 100.0%

Fuente: Elaboración propia

En relación con la inclinación tibial de la población estudiada, la proporción de tibias verticales fue del 93% y en extensión del 7%. La tabla 5 muestra los resultados total con las dos posiciones de la tibia. (Tabla 5)

Tabla 5: Frecuencia de inclinación de tibia

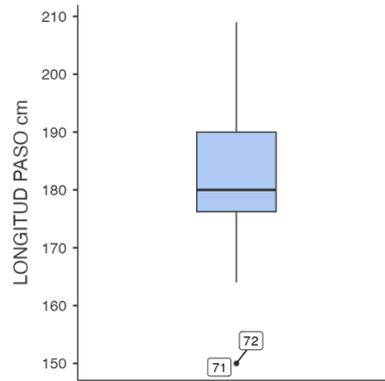
INCLINACIÓN TIBIA	Total
2 (Tibia vertical)	93 93.0%
1 (Tibia en extensión)	7 7.0%
Total	100 100.0%

Fuente: Elaboración propia

1.3. Variable espacial

En cuanto a la variable espacial, se ha obtenido una LP media de 181 cm (Figura 18).

Figura 18: Box plot longitud de paso grupo 1 y 2

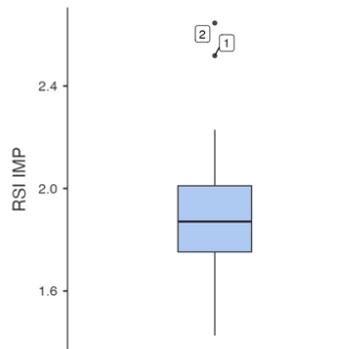


Fuente: Elaboración propia

1.4. Variables espacio temporales

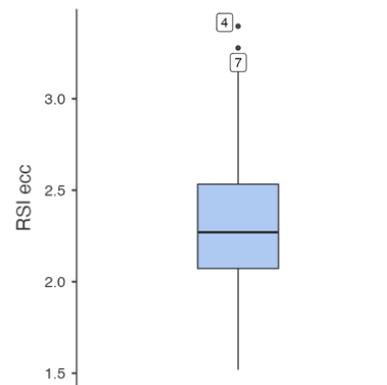
En cuanto a las variables espacio temporales, se ha obtenido un *RSI imp* de 1,77 cm/s (Figura 19), un *RSI ecc* de 2,18 cm/s (Figura 20), y un *RSI total* de 0,971 cm/s (Figura 21).

Figura 19: Box plot RSI imp grupo 1 y 2



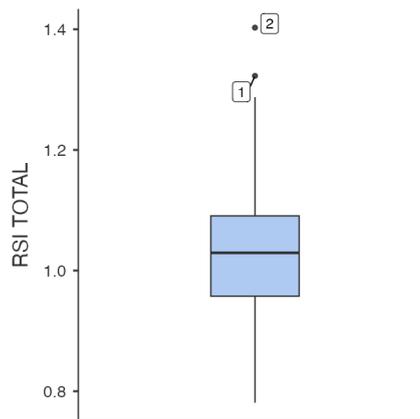
Fuente: Elaboración propia

Figura 20: Box plot RSI ecc grupo 1 y 2



Fuente: Elaboración propia

Figura 21: Box plot RSI total grupo 1 y 2



Fuente: Elaboración propia

2. Comparación de resultados entre grupo 1 y 2

Después de analizar los valores de los dos grupos por separado, vamos a compararlos entre sí.

2.1. Variables temporales

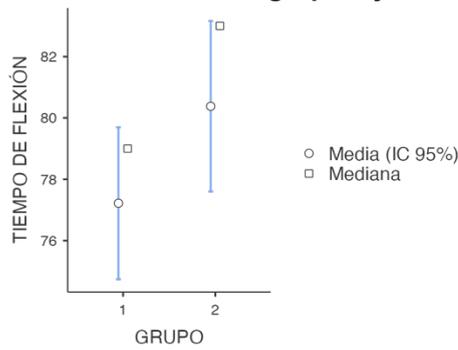
En cuanto a la comparación de las variables temporales, tenemos para cada grupo $N=50$, porque incluimos los dos pies de cada corredor. El grupo 1 tiene una cadencia ($d=0,285$) de 184 ppm y el grupo 2 182 ppm (Tabla 6). El tiempo de contacto suma ($d=-0,683$) entre 172 ms para el grupo 1 y 180 ms para el grupo 2 (Figura 23). El tiempo de flexión ($d=-0,333$) medio está más bajo en el grupo 1: 77 ms, que en el grupo 2, 80 ms (Figura 22). El tiempo de impulso ($d=0,629$), 94 ms para el grupo 1 y 100 ms para el grupo 2 (Figura 24), y el tiempo de vuelo ($d=0,296$) de 151 ms para el grupo 1 y 147 ms para el grupo 2 (Figura 25). En cuanto al DF ($d=-0,544$), el grupo 1 tiene 53% y el grupo 2 tiene 55% (Figura 26).

Tabla 6: Tabla descriptiva de las variables temporales comparando los 2 grupos

	Grupo	N	Media	Mediana	DE	EE
TIEMPO DE FLEXIÓN	1	50	77.22	79.00	8.931	1.2631
	2	50	80.380	83.000	10.0364	1.4194
TIEMPO CONTACTO SUMA	1	50	172.08	174.00	12.160	1.7197
	2	50	180.440	179.000	12.3158	1.7417
TIEMPO IMPULSO	1	50	94.86	95.00	8.212	1.1613
	2	50	100.060	99.000	8.3260	1.1775
TIEMPO VUELO	1	50	151.06	152.00	12.796	1.8096
	2	50	147.060	145.000	14.2161	2.0105
DUTY FACTOR	1	25	53.26	53.80	3.237	0.6474
	2	25	55.115	55.228	3.5546	0.7109
CADENCIA	1	50	184.60	184.90	5.477	0.7745
	2	50	183.090	182.648	5.1539	0.7289

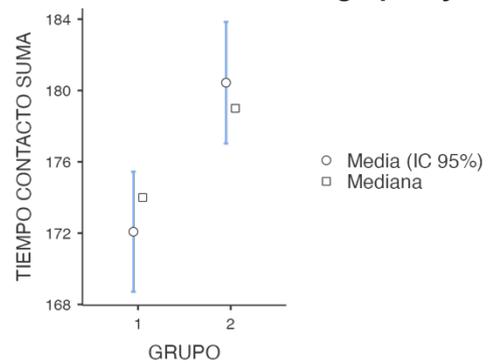
Fuente: Elaboración propia

Figura 22: Diagrama comparativo del tiempo de flexión entre el grupo 1 y 2



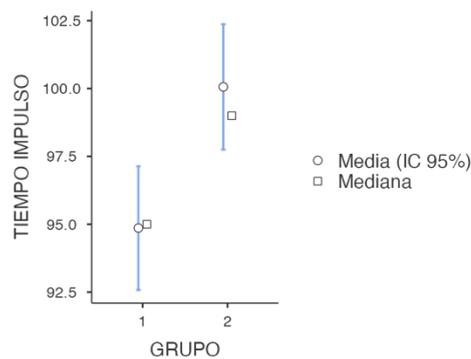
Fuente: Elaboración propia

Figura 23: Diagrama comparativo del tiempo de contacto suma entre el grupo 1 y 2



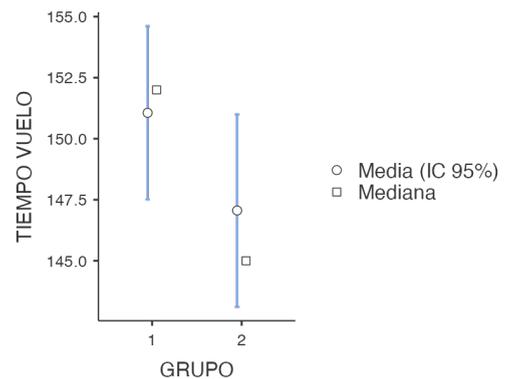
Fuente: Elaboración propia

Figura 24: Diagrama comparativo del tiempo de impulso entre el grupo 1 y 2



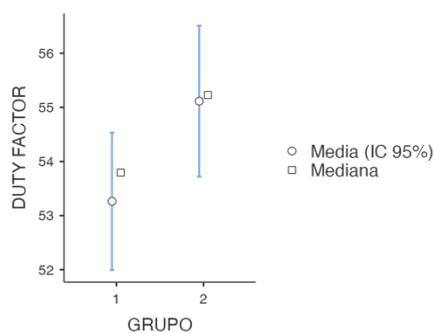
Fuente: Elaboración propia

Figura 25: Diagrama comparativa del tiempo de vuelo entre el grupo 1 y 2



Fuente: Elaboración propia

Figura 26: Diagrama comparativo del duty factor entre el grupo 1 y 2

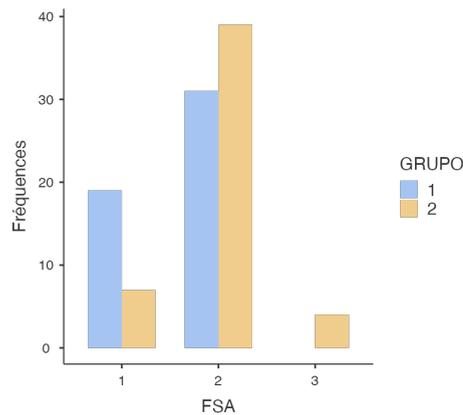


Fuente: Elaboración propia

2.2. Variables técnicas:

En cuanto a las variables técnicas, el tipo de apoyo predominante es el *MFS* (62%), seguido por el *RFS* (38%). No había apoyo *FFS* en el grupo 1. En el grupo 2, el tipo de apoyo predominante es el apoyo *MFS* (78%), seguido del apoyo *RFS* (26%) y *FFS* (4%). La Figura 27 muestra el diagrama en barra que representa la repartición de los tres tipos de apoyo en los dos grupos (1: *RFS*, 2: *MFS*, 3: *FFS*), y la tabla comparativa con los porcentajes de apariciones (Tabla 7).

Figura 27: Diagrama del porcentaje del tipo de apoyo entre el grupo 1 y 2



Fuente: Elaboración propia

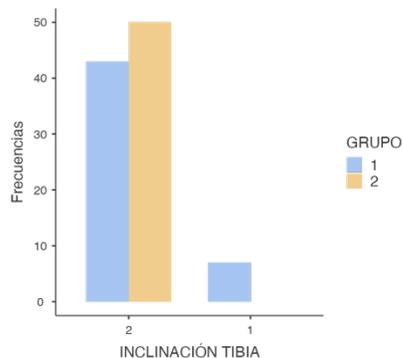
Tabla 7: Comparación del tipo de apoyo entre el grupo 1 y 2

FSA	GRUPO		Total
	1	2	
3 (FFS)	0 0.0%	4 8.0%	4 4.0%
2 (MFS)	31 62.0%	39 78.0%	70 70.0%
1 (RFS)	19 38.0%	7 14.0%	26 26.0%
Total	50 100.0%	50 100.0%	100 100.0%

Fuente: Elaboración propia

En cuanto a la inclinación de la tibia, hicimos un diagrama del porcentaje de inclinación de la tibia (Figura 28). El grupo 1 tiene una tibia vertical al 86%, y un 14% en extensión (Tabla 8). En cuanto al grupo dos, tenían todos una inclinación de la tibia vertical (Tabla 8).

Figura 28: Diagrama en barra de la inclinación de la tibia entre el grupo 1 y 2



Fuente: Elaboración propia

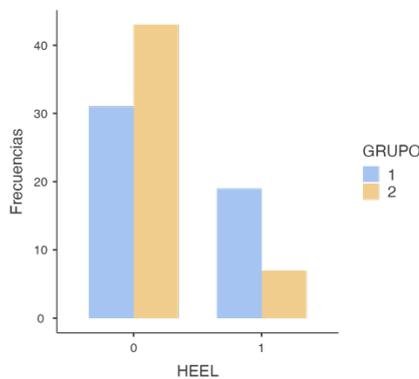
Tabla 8: Repartición de la inclinación de la tibia entre el grupo 1 y 2

INCLINACIÓN TIBIA	1	2	Total
2 (tibia vertical)	43 86.0%	50 100.0%	93 93.0%
1 (tibia en extensión)	7 14.0%	0 0.0%	7 7.0%
Total	50 100.0%	50 100.0%	100 100.0%

Fuente: Elaboración propia

Después de saber los tipos de apoyo predominantes (Figura 29), para tener una visión más amplia, podemos comparar en corredores que apoyan con talón y los que no apoyan con talón. Los corredores del grupo 1 apoyan el talón en un 38% y el grupo 2 un 14%. El grupo 1 no apoya con el talón en un 62%, y el grupo 2 en un 86% (Tabla 9). La Figura 29 es el diagrama de repartición de corredores talonadores y no talonadores.

Figura 29: Diagrama en barra que representa la frecuencia de apoyo talón en el grupo 1 y 2



Fuente: Elaboración propia

Tabla 7: Repartición de corredores talón o no talón entre el grupo 1 y 2

HEEL	1	2	Total
0	31 62.0%	43 86.0%	74 74.0%
1	19 38.0%	7 14.0%	26 26.0%
Total	50 100.0%	50 100.0%	100 100.0%

Fuente: Elaboración propia

2.3. Variable espacial

Se ha calculado que el grupo 1 tiene una LP (d=516) de 183 cm mientras que el grupo 2 tiene 178 cm (Tabla 10) (Figura 30).

2.4. Variables espacio temporal:

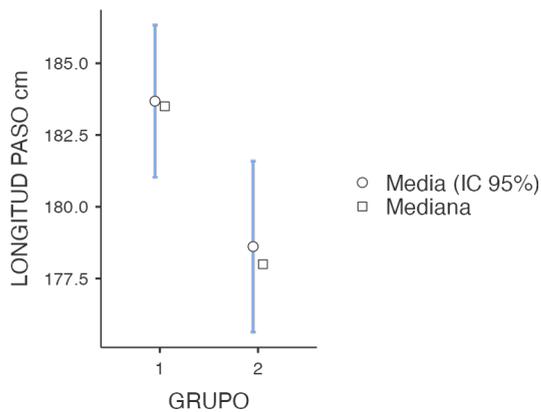
En cuanto a los *RSI*, el grupo 1 tiene un *RSI imp* (d=0,736) de 1,95cm/ms (Tabla 10) (Figura 31), y *RSI total* (d=887) de 1,07 cm/ms (Tabla 10) (Figura 32), y un *RSI ecc* (d=0,674) (Tabla 10) (Figura 33) de 2,41 cm/ms, en comparación el grupo 2 tiene un *RSI imp* de 1,803 cm/ms, un *RSI total* de 0,986 cm/ms y un *RSI ecc* de 2,202 cm/ms. La tabla 10, es una tabla resumen de las variables espacio temporales de comparación entre los dos grupos (Tabla 10).

Tabla 8: Descripción de las variables espacio temporales comparando los 2 grupos

	Grupo	N	Media	Mediana	DE	EE
LONGITUD PASO cm	1	50	183.68	183.50	9.563	1.3524
	2	44	178.614	178.000	10.0862	1.5205
RSI IMP	1	50	1.95	1.96	0.225	0.0318
	2	44	1.803	1.820	0.1792	0.0270
RSI TOTAL	1	50	1.07	1.06	0.109	0.0153
	2	44	0.986	0.983	0.0862	0.0130
RSI ecc	1	50	2.41	2.34	0.344	0.0487
	2	44	2.202	2.145	0.2796	0.0422

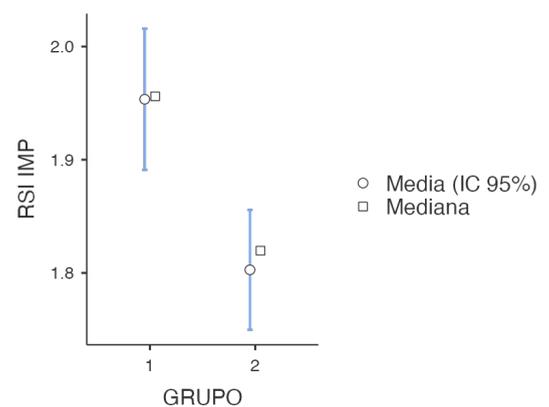
Fuente: Elaboración propia

Figura 30: Diagrama representativo de la longitud de paso entre el grupo 1 y 2



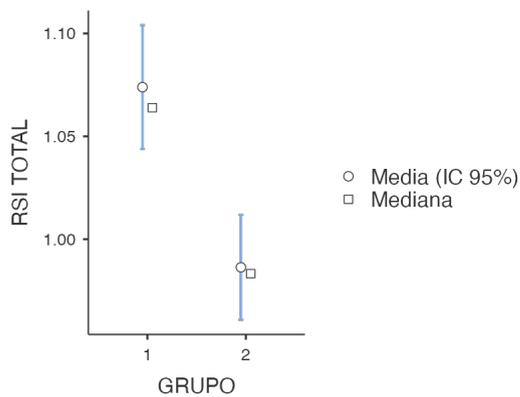
Fuente: Elaboración propia

Figura 31: Diagrama representativo del RSI impulso entre el grupo 1 y 2



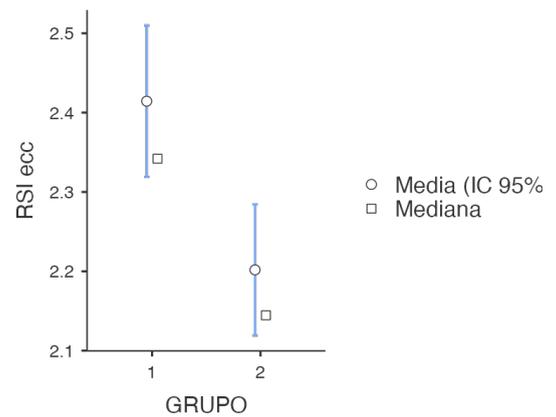
Fuente: Elaboración propia

Figura 32: Diagrama representativo del RSI total entre el grupo 1 y 2



Fuente: Elaboración propia

Figura 33: Diagrama representativo del RSI excéntrico entre el grupo 1 y 2



Fuente: Elaboración propia

Entre el grupo 1 y 2, había diferencias estadísticamente significativas $p < 0,05$, lo que significa que las variables no son iguales, para el tiempo de contacto suma ($p < 0,01$), el tiempo de impulso ($p = 0,02$), la LP ($p = 0,014$), el RSI imp ($p < 0,01$), el RSI total ($p < 0,001$) y el RSI ecc ($p = 0,02$) (Tabla 11).

Pero no había diferencias estadísticamente significativas $p > 0,05$, lo que significa que las variables son iguales, para el tiempo de flexión, el tiempo de vuelo, el DF, y la cadencia.

Tabla 9: Prueba T de Student de comparación entre los dos grupos para las variables temporales, espaciales y espacio temporales.

		Estadístico	gl	p		Tamaño del Efecto
TIEMPO DE FLEXIÓN	T de Student	-1.66	98.0	0.099	La d de Cohen	-0.333
TIEMPO CONTACTO SUMA	T de Student	-3.42	98.0	<0.001	La d de Cohen	-0.683
TIEMPO IMPULSO	T de Student	-3.14	98.0	0.002	La d de Cohen	-0.629
TIEMPO VUELO	T de Student	1.48	98.0	0.142	La d de Cohen	0.296
DUTY FACTOR	T de Student	-1.92	48.0	0.060	La d de Cohen	-0.544
CADENCIA	T de Student	1.42	98.0	0.158	La d de Cohen	0.285
LONGITUD PASO cm	T de Student	2.50	92.0	0.014	La d de Cohen	0.516
RSI IMP	T de Student	3.56	92.0	<0.001	La d de Cohen	0.736
RSI TOTAL	T de Student	4.29	92.0	<0.001	La d de Cohen	0.887
RSI ecc	T de Student	3.26	92.0	0.002	La d de Cohen	0.674

Nota: H₀: $\mu_1 = \mu_2$

Fuente: Elaboración propia

Discusión

A continuación, se discuten los resultados obtenidos estructurados según los objetivos específicos planteados: Analizar las variables biomecánicas temporales, técnicas, espaciales y espacio temporales de los corredores élite masculinos en el maratón de Valencia 2024.

Esta organización permite verificar la hipótesis y alcanzar el objetivo principal del estudio:

Analizar las diferencias biomecánicas entre dos grupos de corredores élite masculinos del maratón de Valencia 2024, clasificados según su rendimiento (top 25 vs 25 siguientes), y como estas diferencias se relacionan con la economía de carrera (RE) y el rendimiento final.

En cuanto a las variables temporales, la cadencia media observada en el grupo A fue de aproximadamente 184 pasos por minuto, por encima del umbral de 180 pasos/min, el cual está asociado con una reducción de las fuerzas de impacto articulares (Wang et al., 2020). Esto refuerza la idea de que los corredores de élite adoptan estrategias técnicas que no solo optimizan su rendimiento, sino que también previenen lesiones. El grupo A (mejor rendimiento) presentó un *GCT* medio de 172 ms y un tiempo de impulso de 94 ms. En contraste, el grupo B registró valores más elevados: 180 ms de contacto y 100 ms de impulso. Estos datos confirman lo propuesto por Di Michele et al. (2014), quienes afirman que un menor *GCT* está vinculado a un menor coste metabólico. Además, según Kawamori et al. (2013), un menor tiempo de impulso refleja una mayor capacidad neuromuscular para generar fuerza rápidamente. En consecuencia, los valores obtenidos en el grupo A confirman una eficiencia biomecánica superior. El grupo A tenía un tiempo de vuelo más elevado que el grupo B (151 vs 147 ms), y un duty factor menos importante (53 vs 55%).

En cuanto a las variables técnicas, el análisis técnico reveló que el apoyo *MFS* fue predominante en el 70% de los atletas observados. Esta técnica se acompaña, en la mayoría de los casos, de una tibia en posición vertical en el momento del contacto con el suelo. Este patrón ha sido descrito en la literatura como más eficiente desde el punto de vista energético y menos lesivo para el sistema musculoesquelético (Hasegawa et al., 2007; Larson et al., 2013; Pipkin et al., 2016). Por el contrario, el apoyo de talón (*RFS*), presente en un 26% de los casos, se ha asociado a un mayor riesgo de lesiones por sobreuso (Daoud et al., 2012), mientras que el apoyo de antepié (*FFS*), aunque biomecánicamente eficiente, solo fue observado en el 4% de los casos, probablemente por el alto coste muscular que representa en largas distancias (Ahn et al., 2014). Estos resultados

confirman que el patrón *MFS* y tibia vertical es característico de los corredores de élite, y apoya nuestra hipótesis. Por el contrario, una cadencia inferior, como la registrada en el grupo B, puede reflejar una menor eficiencia biomecánica. Por tanto, la cadencia se confirma como un indicador clave del rendimiento y un objetivo de intervención para entrenadores y especialistas.

En cuanto a la variable espacial, longitud de pasos, el grupo 1 tiene una longitud de pasos más importante que el grupo 2 (183 vs 178cm).

Y por último, las variables espacio-temporales también muestran diferencias significativas entre los grupos analizados. En relación con el *RSI*, el grupo A también presentó valores más elevados (*RSI* imp = 1,95 cm/ms, *RSI* ecc = 2,41 cm/ms), frente al grupo B (*RSI* emp = 1,803 cm/ms, *RSI* ecc = 2,202 cm/ms). Estos valores sugieren una mayor capacidad de transición excéntrico-concéntrica, como lo destacan Rebelo et al. (2022), lo cual es clave para el rendimiento en pruebas de resistencia.

La comparación entre los grupos A y B muestra diferencias claras y consistentes en todas las variables analizadas. El grupo A no solo corre con mejor técnica (apoyo *MFS* y tibia vertical), sino que también presenta mejores valores en tiempo de impulso, *RSI*, cadencia y longitud de zancada (183 cm frente a 178 cm en el grupo B).

Estas diferencias apoyan nuestra hipótesis y muestran que los corredores con mejores marcas tienden a presentar un patrón biomecánico más eficiente. Además, estos resultados son coherentes con estudios previos sobre *RE* y técnica de élite, lo que valida nuestra metodología observacional.

Limitaciones

A continuación, se exponen las limitaciones. Este estudio se basa en un análisis realizado en un contexto real, lo cual conlleva una serie de limitaciones metodológicas. En primer lugar, el uso de una grabación bidimensional restringe el análisis únicamente en el plano sagital. Por ello, no se han podido evaluar variables relevantes como la pronación/supinación del pie, el valgo/varo de rodilla o la inclinación lateral del tronco, que también influyen en la biomecánica de la pisada.

Además, al tratarse de un evento competitivo en directo, no ha sido posible utilizar marcadores sobre los atletas, lo que impide calcular con precisión determinados ángulos del patrón de carrera, así como la oscilación vertical del cuerpo. Esta ausencia de marcadores limita la exactitud de los resultados obtenidos y reduce la capacidad de análisis detallado en algunas variables biomecánicas clave. Asimismo, la notoriedad del evento deportivo introduce múltiples factores externos que afectan la calidad del análisis. Vehículos oficiales, cámaras móviles, y la densidad de los grupos de corredores dificultan la visibilidad continua y clara de los atletas, lo que puede conllevar pérdidas de datos o errores de interpretación.

Otra de las limitaciones de este estudio reside en el pequeño tamaño del campo de vídeo utilizado para analizar a los corredores del maratón de Valencia. Un campo de vídeo más grande, que cubriera una mayor parte del recorrido, habría permitido recoger más datos sobre la zancada, la postura y la regularidad de los atletas. Esto habría permitido obtener una media más fiable y representativa de su comportamiento en carrera, reduciendo el impacto de cualquier variación ocasional observada en una distancia corta.

Por último, no se dispone de información individual sobre los atletas analizados, como la edad, la experiencia, el tipo de preparación previa o la existencia de lesiones actuales o pasadas. Estos factores intrínsecos podrían influir en los patrones biomecánicos observados y representar una fuente adicional de variabilidad.

Investigaciones futuras:

Para investigaciones futuras, se sugiere realizar un análisis en varios puntos del recorrido del maratón con el fin de evaluar la evolución del patrón de carrera bajo el efecto de la fatiga, lo cual podría enriquecer la comprensión del comportamiento biomecánico a lo largo de la prueba. Este análisis podría realizarse en una futura investigación centrada en mujeres, lo que permitiría comparar los resultados entre sexos y ampliar la comprensión de las diferencias biomecánicas en el maratón.

Conclusiones

Este estudio observacional ha permitido identificar patrones biomecánicos relevantes en atletas masculinos de élite durante una maratón.

Entre las variables temporales, se ha observado que la cadencia media supera los 180 pasos por minuto y está cerca de 184 ppm. Se ha observado un tiempo de contacto suma cerca de 180 ms, un tiempo de flexión cerca de 77 ms, y más corto que el tiempo de impulso de 94 ms. Un tiempo de vuelo cerca de los 151 ms, y un duty factor cerca de los 53%.

Entre las variables técnicas, se ha observado que el tipo de apoyo más frecuente es el apoyo medio del pie (*MFS*), presente en el 70 % de los corredores. Además, la posición de la tibia en el momento del contacto es mayoritariamente vertical (93 %), lo que sugiere una estrategia de carrera común entre las atletas con mejor rendimiento.

En cuanto a la longitud de paso, estaba cerca de los 180 cm. Y por último para las variables temporales, se ha obtenido un *RSI* (*Reactive Strength Index*) impulso cerca de los 1,9 cm/s, un *RSI* total cerca de los 1 cm/s y un *RSI* excéntrico cerca de los 2,3cm/s.

Asimismo, se han encontrado diferencias significativas entre los dos grupos comparados, especialmente en variables como, el tiempo de contacto suma ($p < 0,01$), el tiempo de impulso ($p = 0,02$), la longitud de paso (*LP*) ($p = 0,014$), el *RSI* imp (*Reactive Strength Index* Impulso) ($p < 0,01$), el *RSI* total (*Reactive Strength Index* total) ($p < 0,001$) y el *RSI* ecc (*Reactive Strength Index* Excéntrico) ($p = 0,02$).

A partir de la comparación entre los grupos, se puede establecer que el perfil biomecánico más eficiente para el rendimiento en maratón se caracteriza por: un apoyo *MFS*, una tibia vertical, un tiempo de impulso cercano a los 100 ms, un *GCT* total alrededor de los 180 ms, una *LP* próxima a los 180 cm, y una cadencia de aproximadamente 185 ppm.

Para investigaciones futuras, se recomienda realizar análisis en distintos puntos del recorrido del maratón con el fin de evaluar el efecto de la fatiga sobre el patrón de carrera. Esto permitiría obtener una visión más completa de la evolución biomecánica a lo largo de la prueba y su impacto en el rendimiento final del atleta.

Sería relevante replicar este estudio con población femenina, para comparar los resultados entre mujeres y también para establecer una comparación directa con los hombres.

Bibliografía

- Ahn, A. N., Brayton, C., Bhatia, T., & Martin, P. (2014). Muscle activity and kinematics of forefoot and rearfoot strike runners. *Journal of Sport and Health Science*, 3(2), 102-112. <https://doi.org/10.1016/j.ishs.2014.03.007>
- Almeida, M. O., Davis, I. S., & Lopes, A. D. (2015). Biomechanical Differences of Foot-Strike Patterns During Running: A Systematic Review With Meta-analysis. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*, 45(10), 738-755. <https://doi.org/10.2519/jospt.2015.6019>
- Barnes, K. R., & Kilding, A. E. (2015). Running economy: Measurement, norms, and determining factors. *Sports Medicine - Open*, 1, 8. <https://doi.org/10.1186/s40798-015-0007-y>
- Blauberger, P., Fukushima, T., Russomanno, T., & Lames, M. (2024). A Pilot Study in Sensor Instrumented Training (SIT)—Ground Contact Time for Monitoring Fatigue and Curve Running Technique. *International Journal of Computer Science in Sport*, 23, 80-92. <https://doi.org/10.2478/ijcss-2024-0005>
- Borao, P. (s. f.). *40 aniversario*. Valencia Ciudad del Running. Recuperado 9 de marzo de 2025, de <https://www.valenciaciudaddelrunning.com/maraton/40-aniversario/>
- Burgos-Jara, C., Cerda-Kohler, H., Aedo-Muñoz, E., & Miarka, B. (2023). Eccentric Resistance Training: A Methodological Proposal of Eccentric Muscle Exercise Classification Based on Exercise Complexity, Training Objectives, Methods, and Intensity. *Applied Sciences*, 13(13), Article 13. <https://doi.org/10.3390/app13137969>
- Cavanagh, P. R., & Kram, R. (1989). Stride length in distance running: Velocity, body dimensions, and added mass effects. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 21(4), 467.
- Chan, C. W., & Rudins, A. (1994). Foot Biomechanics During Walking and Running. *Mayo Clinic Proceedings*, 69(5), 448-461. [https://doi.org/10.1016/S0025-6196\(12\)61642-5](https://doi.org/10.1016/S0025-6196(12)61642-5)
- Ciacci, S., Nigro, F., & Bartolomei, S. (2024). A New Method for Evaluating the Reactive Strength Index in Track and Field Sprinting: Relationships with Muscle Architecture. *Applied Sciences*, 14(8), Article 8. <https://doi.org/10.3390/app14083232>

- Clasificaciones Maratón 2024*. (2024, diciembre 1). Valencia Ciudad del Running.
<https://www.valenciaciudaddelrunning.com/maraton/clasificaciones-maraton-2024/>
- Da Costa Santos, C. M., de Mattos Pimenta, C. A., & Nobre, M. R. C. (2007). The PICO strategy for the research question construction and evidence search. *Revista Latino-Americana De Enfermagem*, 15(3), 508-511.
<https://doi.org/10.1590/s0104-11692007000300023>
- 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 and Science in Sports and Exercise*, 44(7), 1325-1334.
<https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e3182465115>
- der Meulen, L. V., Bonnaerens, S., Caekenberghe, I. V., Clercq, D. D., Segers, V., & Fiers, P. (2024). Habitual Running Style Matters: Duty Factor, and Not Stride Frequency, Relates to Loading Magnitude. *Journal of Human Kinetics*, 94, 37-45. <https://doi.org/10.5114/jhk/191528>
- Di Michele, R., & Merni, F. (2014). The concurrent effects of strike pattern and ground-contact time on running economy. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 17(4), 414-418.
<https://doi.org/10.1016/j.isams.2013.05.012>
- Douglas, J., Pearson, S., Ross, A., & McGuigan, M. (2017). Eccentric Exercise: Physiological Characteristics and Acute Responses. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 47(4), 663-675.
<https://doi.org/10.1007/s40279-016-0624-8>
- Ensink, C. J., Hofstad, C., Theunissen, T., & Keijsers, N. L. W. (2024). Assessment of Foot Strike Angle and Forward Propulsion with Wearable Sensors in People with Stroke. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 24(2), 710. <https://doi.org/10.3390/s24020710>
- Fernández-González, P., Koutsou, A., Cuesta-Gómez, A., Carratalá-Tejada, M., Miangolarra-Page, J. C., & Molina-Rueda, F. (2020). Reliability of Kinovea® Software and Agreement with a Three-Dimensional Motion System for Gait Analysis in Healthy Subjects. *Sensors*, 20(11), 3154. <https://doi.org/10.3390/s20113154>
- Finisher's magazine* (2025). Recuperado 9 de marzo de 2025, de <https://cdn1.valenciaciudaddelrunning.com/revistas/42Kfinishersmagazine24/6-7/index.html#zoom=true>

- Folland, J. P., Allen, S. J., Black, M. I., Handsaker, J. C., & Forrester, S. E. (2017). Running Technique is an Important Component of Running Economy and Performance. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 49(7), 1412-1423. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000001245>
- Franchi, M. V., Reeves, N. D., & Narici, M. V. (2017). Skeletal Muscle Remodeling in Response to Eccentric vs. Concentric Loading: Morphological, Molecular, and Metabolic Adaptations. *Frontiers in Physiology*, 8, 447. <https://doi.org/10.3389/fphys.2017.00447>
- Gamez-Paya, J., Aladro-Gonzalvo, A. R., Marcos, D. G., Villarón-Casales, C., & Amo, J. L. L. (2023). Footstrike Pattern and Cadence of the Marathon Athletes at the Tokyo 2020 Olympic Games. *Applied Sciences*, 13(11), Article 11. <https://doi.org/10.3390/app13116620>
- Hanley, B., Bissas, A., Merlino, S., & Gruber, A. H. (2019). Most marathon runners at the 2017 IAAF World Championships were rearfoot strikers, and most did not change footstrike pattern. *Journal of Biomechanics*, 92, 54-60. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2019.05.024>
- Hasegawa, H., Yamauchi, T., & Kraemer, 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. <https://doi.org/10.1519/R-22096.1>
- Hayes, P., & Caplan, N. (2012). Foot strike patterns and ground contact times during high-calibre middle-distance races. *Journal of Sports Sciences*, 30(12), 1275-1283. <https://doi.org/10.1080/02640414.2012.707326>
- Heiderscheit, B. C., Chumanov, E. S., Michalski, M. P., Wille, C. M., & Ryan, M. B. (2011). Effects of step rate manipulation on joint mechanics during running. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 43(2), 296-302. <https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e3181ebedf4>
- Joubert, D. P., Guerra, N. A., Jones, E. J., Knowles, E. G., & Piper, A. D. (2020). Ground Contact Time Imbalances Strongly Related to Impaired Running Economy. *International Journal of Exercise Science*, 13(4), 427-437.
- Kawamori, N., Nosaka, K., & Newton, R. U. (2013). Relationships

between ground reaction impulse and sprint acceleration performance in team sport athletes. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 27(3), 568-573.

<https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e318257805a>

Kuhman, D., Melcher, D., & Paquette, M. R. (2016). Ankle and knee kinetics between strike patterns at common training speeds in competitive male runners. *European Journal of Sport Science*, 16(4), 433-440. <https://doi.org/10.1080/17461391.2015.1086818>

Larson, P., Higgins, E., Kaminski, J., Decker, T., Preble, J., Lyons, D., McIntyre, K., & Normile, A. (2011). Foot strike patterns of recreational and sub-elite runners in a long-distance road race. *Journal of Sports Sciences*, 29(15), 1665-1673.

<https://doi.org/10.1080/02640414.2011.610347>

Lenhart, R., Thelen, D., & Heiderscheit, B. (2014). Hip Muscle Loads During Running at Various Step Rates. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*, 44(10), 766-A4.

<https://doi.org/10.2519/jospt.2014.5575>

Los criterios de España para competir en el maratón de los Juegos Olímpicos de París 2024. (2023, octubre 3). Runner's World.

<https://www.runnersworld.com/es/noticias-running/a45424836/criterios-espana-compe-tir-maraton-juegos-olimpicos-paris-2024/>

Louder, T., Thompson, B. J., Banks, N., & Bressel, E. (2019). A Mixed-Methods Approach to Evaluating the Internal Validity of the Reactive Strength Index. *Sports*, 7(7), Article

7. <https://doi.org/10.3390/sports7070157>

Marathon—Men—Senior—All—2024. (s. f.). Recuperado 7 de abril de 2025, de https://worldathletics.org/records/toplists/road-running/marathon/all/men/senior/2024?_page=5

Markwick, W. J., Bird, S. P., Tufano, J. J., Seitz, L. B., & Haff, G. G. (2015). The Intraday Reliability of the Reactive Strength Index Calculated From a Drop Jump in Professional Men's Basketball. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 10(4), 482-488. <https://doi.org/10.1123/ijspp.2014-0265>

Napier, C., MacLean, C. L., Maurer, J., Taunton, J. E., & Hunt, M. A. (2019). Real-Time Biofeedback of Performance to Reduce Braking Forces Associated With

- Running-Related Injury: An Exploratory Study. *The Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy*, 49(3), 136-144. <https://doi.org/10.2519/jospt.2019.8587>
- Nicola, T. L., & Jewison, D. J. (2012). The Anatomy and Biomechanics of Running. *Clinics in Sports Medicine*, 31(2), 187-201. <https://doi.org/10.1016/j.csm.2011.10.001>
- Nijs, A., Roerdink, M., & Beek, P. J. (2022). Running-style modulation: Effects of stance-time and flight-time instructions on duty factor and cadence. *Gait & Posture*, 98, 283-288. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2022.10.002>
- Novacheck, T. F. (1998). The biomechanics of running. *Gait & Posture*, 7(1), 77-95. [https://doi.org/10.1016/S0966-6362\(97\)00038-6](https://doi.org/10.1016/S0966-6362(97)00038-6)
- Ogueta-Alday, A., Rodríguez-Marroyo, J. A., & García-López, J. (2014). Rearfoot Striking Runners Are More Economical Than Midfoot Strikers. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 46(3), 580-585. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000000139>
- Ortega, R. (2019). *Análisis temporal de las distintas fases del ciclo de carrera en corredores recreacionales*
- Paavolainen, L., Häkkinen, K., Hämmäläinen, I., Nummela, A., & Rusko, H. (1999). Explosive-strength training improves 5-km running time by improving running economy and muscle power. *Journal of Applied Physiology*, 86(5), 1527-1533. <https://doi.org/10.1152/jappl.1999.86.5.1527>
- Pakosz, P., Konieczny, M., Domaszewski, P., Dybek, T., Gnoiński, M., & Skorupska, E. (2023). Comparison of concentric and eccentric resistance training in terms of changes in the muscle contractile properties. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 73, 102824. <https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2023.102824>
- Patoz, A., Gindre, C., Thouvenot, A., Mourot, L., Hébert-Losier, K., & Lussiana, T. (2019). Duty Factor Is a Viable Measure to Classify Spontaneous Running Forms. *Sports*, 7(11), 233. <https://doi.org/10.3390/sports7110233>
- Patoz, A., Lussiana, T., Breine, B., Cyrille, G., & Malatesta, D. (2022). Duty factor and foot-strike pattern do not represent similar running pattern at the individual level. *Scientific Reports*, 12. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-17274-0>
- Patoz, A., Lussiana, T., Thouvenot, A., Mourot, L., & Gindre, C. (2020). Duty Factor Reflects Lower Limb Kinematics of Running. *Applied Sciences*, 10(24), Article 24. <https://doi.org/10.3390/app10248818>
- Perl, D. P., Daoud, A. I., & Lieberman, D. E. (2012). Effects of Footwear

- and Strike Type on Running Economy. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 44(7), 1335-1343. <https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e318247989e>
- Pipkin, A., Kotecki, K., Hetzel, S., & Heiderscheit, B. (2016). Reliability of a Qualitative Video Analysis for Running. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*, 46(7), 556-561. <https://doi.org/10.2519/jospt.2016.6280>
- Rebelo, A., Pereira, J. R., Martinho, D. V., Duarte, J. P., Coelho-e-Silva, M. J., & Valente-dos-Santos, J. (2022). How to Improve the Reactive Strength Index among Male Athletes? A Systematic Review with Meta-Analysis. *Healthcare*, 10(4), 593. <https://doi.org/10.3390/healthcare10040593>
- Roche-Seruendo, L. E., Cartón-Llorente, A., Molina-Molina, A., Rubio-Peirutén, A., Mayo-Nieto, C., & Nuñez-Trull, A. (2023). El primer rocker : influencia del patrón de contacto inicial sobre la biomecánica, lesiones y rendimiento en la carrera de larga distancia. *Revista Española de Podología*, 34. <https://doi.org/10.20986/revesppod.2023.1679/2023>
- Rojano, D. (2019). *Análisis temporal de las distintas fases del ciclo de carrera en corredores recreacionales*.
- Santos-Concejero, J., Granados, C., Irazusta, J., Bidaurrezaga-Letona, I., Zabala-Lili, J., Tam, N., & Gil, S. M. (2013). Differences in ground contact time explain the less efficient running economy in north african runners. *Biology of Sport*, 30(3), 181-187. <https://doi.org/10.5604/20831862.1059170>
- Schoenfeld, B. J., Ogborn, D. I., Vigotsky, A. D., Franchi, M. V., & Krieger, J. W. (2017). Hypertrophic Effects of Concentric vs. Eccentric Muscle Actions: A Systematic Review and Meta-analysis. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 31(9), 2599. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000001983>
- Schubert, A. G., Kempf, J., & Heiderscheit, B. C. (2014). Influence of Stride Frequency and Length on Running Mechanics. *Sports Health*, 6(3), 210-217. <https://doi.org/10.1177/1941738113508544>
- Southey, B., Willshire, M., Connick, M. J., Austin, D., Spits, D., & Beckman, E. (2024). Reactive Strength Index as a Key Performance Indicator in Different Athlete Populations – A Systematic Review. *Science & Sports*, 39(2), 129-143. <https://doi.org/10.1016/j.scispo.2023.01.004>
- Souza, R. B. (2016). An Evidence-Based Videotaped Running

Biomechanics Analysis. *Physical Medicine and Rehabilitation Clinics of North America*, 27(1), 217-236.
<https://doi.org/10.1016/j.pmr.2015.08.006>

Thompson, M. A. (2017). Physiological and Biomechanical Mechanisms of Distance Specific Human Running Performance. *Integrative and Comparative Biology*, 57(2), 293-300.
<https://doi.org/10.1093/icb/ix069>

Van Hooren, B., Jukic, I., Cox, M., Frenken, K. G., Bautista, I., & Moore, I. S. (2024). The Relationship Between Running Biomechanics and Running Economy: A Systematic Review and Meta-Analysis of Observational Studies. *Sports Medicine*, 54(5), 1269-1316.
<https://doi.org/10.1007/s40279-024-01997-3>

Wang, J., Luo, Z., Dai, B., & Fu, W. (2020). Effects of 12-week cadence retraining on impact peak, load rates and lower extremity biomechanics in running. *PeerJ*, 8, e9813.
<https://doi.org/10.7717/peerj.9813>

World Athletics. (n.d.). Home. Retrieved May 14, 2025, from <https://www.worldathletics.org>