



# UNIVERSIDAD DE GRANADA

Universidad de Granada

Facultad de Ciencias de Deporte

**DEPARTAMENTO DE EDUCACIÓN FÍSICA Y DEPORTIVA**

**PROGRAMA DE DOCTORADO EN BIOMEDICINA**

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN EN ACTIVIDAD FÍSICA Y DEPORTE**

## **ANÁLISIS DE LA POTENCIA MECÁNICA Y SU APLICACIÓN PRÁCTICA AL ENTRENAMIENTO EN CORREDORES DE FONDO MEDIANTE EL USO DE SENSORES INERCIALES**

Tesis Doctoral presentada por:

**ALBERTO ALEJANDRO ÑANCUPIL ANDRADE**

Tesis Doctoral dirigida por:

**Dr. FELIPE GARCÍA PINILLOS**

**Dr. ALEJANDRO PÉREZ CASTILLA**

Editor: Universidad de Granada. Tesis Doctorales  
Autor: Alberto Alejandro Ñancupil Andrade  
ISBN: 978-84-1195-133-3  
URI: <https://hdl.handle.net/10481/89141>

Granada, 2023



**Editor:** Universidad de Granada. Tesis Doctorales

**Autor:** Alberto Alejandro Ñancupil Andrade

**ISBN:**

**URI:**



## AGRADECIMIENTOS

Es muy grato dedicar unas palabras de agradecimiento a todas las personas que han contribuido y confiado en mí para la consecución de la presente Tesis Doctoral:

- A mi director y tutor de tesis, **Felipe García Pinillos**, quien sin conocerme tomó la decisión de atender a mi solicitud de guiar mi tesis para postular al doctorado en Biomedicina. Por lo tanto, desde el momento que comenzó su guía ha cumplido a cabalidad su labor, e incluso he sentido su presión cuando por exceso de trabajo me he tardado con entregas de trabajos, lo cual agradezco inmensamente porque sin su tutoría jamás hubiese conseguido llegar a esta etapa, pero no solamente ha sido un excelente guía, también un gran amigo que se ha ganado mi admiración y respeto.
- A mi segundo director, **Alejandro Pérez Castilla** y al querido compañero de doctorado, **Santiago Ruiz Alias**, quienes han sido parte fundamental de este proceso aportando su conocimiento y experiencia en publicación de artículos científicos, para mí son unos referentes y buenos amigos. Por este motivo, recalco que sin ellos nada de esto hubiese sido posible; y hago una mención especial a “Santiago” con quien comparto la misma pasión por el atletismo, lo cual ha sido fantástico porque me apoyó con cada uno de los artículos e incluso al llegar a Granada me ha hospedado en su piso brindándome todo el apoyo que requería en ese momento, por todo esto, solo tengo palabras de agradecimiento a estas maravillosas personas.
- A mi padre, **Bernardo Ñancupil**, quien fue muy importante en mi desarrollo profesional, inculcándome valores, alentándome a siempre confiar en mis capacidades, no rendirme ante las adversidades y amar siempre a la familia (pese a no estar en este mundo, estoy seguro que desde el cielo me apoya).
- A mi madre, **Ana Andrade Uribe** y a mi querido hermano, **Luis Ñancupil Andrade**, que han sido un pilar fundamental en toda esta etapa de doctorado, porque ellos son mi apoyo emocional y me han impulsado a seguir, pese a todas las dificultades que se han presentado; y una mención especial a “Luis” que me ha mostrado el hermoso mundo del atletismo desde una perspectiva de competencia y diversión, por lo tanto, gracias a Luis encontré un deporte que me llena el corazón y el alma, por este motivo mi enfoque se centró en investigar este hermoso deporte.
- A mi abuelita, **Rosalía Uribe Maldonado**, quien me ha cuidado, ha estado preocupada por cada detalle de mi vida y siempre me apoya en todo, simplemente soy un afortunado de tenerla.
- A mi novia, **Franchesca Barría Miranda**, quien desde el momento que llegó a mi vida, ha sido un pilar fundamental y pese a todo lo que hemos pasado sigue a mi lado apoyándome y demostrándome lo maravilloso que es tenerla como novia, mejor amiga, consejera y cada uno de los papeles que desempeña en mi vida.

- A mi mascota, **Anubis de Asturias**, que pese a no hablar me ha hecho muy feliz, con sus locuras, su pasión por correr y su forma de cambiar un día malo por una sonrisa.
- A mis amigos del Departamento de Salud, **Carla Bittner, Javiera Martínez, Nicole Fritz, Guido Contreras, Carolina Fuentes, Claudio Ángulo y Valeria Ortiz**, quienes me han apoyado siempre desde que me incorporé al departamento. Simplemente soy muy afortunado de tenerlos como colegas.

**¡MUCHAS GRACIAS A TODOS!**

**ÍNDICE**

|  |            |
|--|------------|
| <b>AGRADECIMIENTOS</b> .....   | <b>3</b>   |
| <b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....   | <b>6</b>   |
| <b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....  | <b>8</b>   |
| <b>LISTA DE ARTÍCULOS CIENTÍFICOS</b> .....  | <b>9</b>   |
| <b>ABREVIATURAS</b> .....  | <b>10</b>  |
| <b>RESUMEN</b> .....   | <b>12</b>  |
| <b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....   | <b>14</b>  |
| 1.1. Delimitación conceptual de la PC en carrera de distancia.....                           | 16         |
| 1.2. Análisis metodológico de la CPD para la determinación de PC y $W'$ . .....              | 18         |
| 1.3. Aplicación práctica de la CPD para predecir rendimiento en carreras de larga distancia. | 20         |
| <b>2. OBJETIVOS E HIPÓTESIS</b> .....  | <b>23</b>  |
| 2.1. Objetivo general.....   | 24         |
| 2.2. Objetivos e hipótesis específicos. ....   | 24         |
| <b>3. MATERIAL Y MÉTODO</b> .....  | <b>27</b>  |
| <b>4. RESULTADOS</b> .....   | <b>55</b>  |
| <b>5. DISCUSIÓN</b> .....  | <b>83</b>  |
| <b>6. CONCLUSIONES</b> .....   | <b>107</b> |
| <b>7. LÍMITACIONES Y PERSPECTIVAS FUTURAS DE ESTUDIO</b> .....                               | <b>112</b> |
| <b>8. BIBLIOGRAFÍA</b> .....   | <b>114</b> |
| <b>9. ANEXOS</b> .....   | <b>124</b> |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 1:</b> Participante utilizando el medidor de potencia Stryd en una pista de atletismo. ....   | 16 |
| <b>Figura 2:</b> Medidor de potencia tipo podómetro (Stryd). ....   | 31 |
| <b>Figura 3:</b> Software de recopilación y análisis de datos desarrollado por Stryd (Stryd Power Center). ....   | 32 |
| <b>Figura 4:</b> Cinta rodante, WOODWAY Pro XL. ....  | 34 |
| <b>Figura 5:</b> Bioimpedanciómetro Inbody 230. ....  | 35 |
| <b>Figura 6:</b> Analizador metabólico portátil PNOE, ENDO Medical. ....  | 36 |
| <b>Figura 7:</b> Plataforma Golden Cheetah para análisis de los datos de entrenamiento y competencias. ....   | 39 |
| <b>Figura 8:</b> Diseño experimental del estudio 5. ....  | 46 |
| <b>Figura 9:</b> Diseño experimental del estudio 6. ....  | 51 |
| <b>Figura 10:</b> Asociación entre la producción de potencia media (PPM) en valores absolutos (paneles de la izquierda) y relativos (paneles de la derecha), obtenidos a través de las diferentes pruebas de tiempo (PT [PT10, PT20 y PT30]) con respecto al umbral de potencia funcional (UPF). ....                       | 59 |
| <b>Figura 11:</b> Asociación entre la producción de potencia media (PPM) en valores absolutos (paneles de la izquierda) y relativos (paneles de la derecha), obtenidos a través de las diferentes pruebas de tiempo (PT [PT10, PT20 y PT30]) con respecto a la PC. ....   | 60 |
| <b>Figura 12:</b> Ilustración de la producción de potencia media (PPM) en las pruebas de tiempo (PT) de 9/3 minutos y cada etapa de la prueba de ejercicio graduado (PEG) relacionado con la PC. ....   | 63 |
| <b>Figura 13:</b> Localización del umbral anaeróbico (UA), punto de compensación respiratoria (PCR), potencia crítica (PC) y consumo máximo de oxígeno ( $VO_2max$ ) con respecto a las zonas de entrenamiento de Stryd. ....   | 63 |
| <b>Figura 14:</b> Localización de la potencia crítica (PC) con respecto a diferentes puntos de la curva potencia duración (CPD). ....   | 67 |
| <b>Figura 15:</b> Pruebas de tiempo hasta el agotamiento (PTA) estimada al ritmo de trabajo que se asocia a la prueba de tiempo (PT) de 4 minutos, según los valores de potencia crítica (PC) y la capacidad de trabajo por encima de la PC ( $W'$ ) reportados por cada modelo de PC, utilizando el balance de $W'$ . .... | 69 |
| <b>Figura 16:</b> Valores de potencia crítica (PC) y la capacidad de trabajo por encima de la PC ( $W'$ ) obtenidos de cinco pruebas de tiempo (PT) (es decir, 3, 4, 5, 10, 20 minutos) usando $PC_{trabajo}$ y $PC_{1/tiempo}$ . ....  | 71 |
| <b>Figura 17:</b> Influencia de la duración de las configuraciones de pruebas de dos tiempos aplicadas en diferentes modelos empíricos para la estimación de la producción de potencia media (PPM) en 60 minutos. ....  | 74 |
| <b>Figura 18:</b> Influencia de las duraciones en las configuraciones de tres tiempos, aplicadas en diferentes modelos empíricos para la estimación de la producción de potencia media (PPM) de 60 minutos. ....  | 76 |
| <b>Figura 19:</b> Relación entre el exponente g del modelo de ley de potencia (A) y el parámetro E del modelo de Peronnet (B) con el error entre la producción de potencia media (PPM) prevista y real de 60 minutos. ....  | 82 |



**Figura 20:** Producción de potencia media (PPM) prevista y real de 30 minutos y 60 minutos.  
..... 82

**ÍNDICE DE TABLAS**

|   |       |
|---|-------|
| <b>Tabla 1:</b> Detalle del diseño de investigación de los estudios que componen la Tesis Doctoral.<br>.....  | 27    |
| <b>Tabla 2:</b> Resumen de los principales resultados obtenidos en cada uno de los seis estudios que componen la presente Tesis Doctoral. ....  | 55    |
| <b>Tabla 3:</b> Datos descriptivos (media $\pm$ DE) de las diferentes pruebas de tiempo (PT) presentadas. ....  | 58    |
| <b>Tabla 4:</b> Nivel de acuerdo de la producción de potencia media (PPM) obtenida a través de las diferentes pruebas de tiempo (PT) con respecto al umbral de potencia funcional (UPF) y la potencia crítica (PC). ....  | 58    |
| <b>Tabla 5:</b> Potencia crítica (PC) y velocidad crítica (VC) determinadas por la prueba 9/3 de Stryd. ....  | 62    |
| <b>Tabla 6:</b> Localización de la potencia crítica (PC), umbrales ventilatorios (umbral anaeróbico [UA] y punto de compensación respiratoria [PCR]) y consumo máximo de oxígeno ( $VO_2max$ ).<br>.....  | 62    |
| <b>Tabla 7:</b> Valores de Potencia crítica (PC) y la capacidad de trabajo por encima de la PC ( $W'$ ) del modelado de la curva potencia duración (CPD) (es decir, pruebas de cuatro tiempos: 3, 5, 10, 20 minutos), a través de modelos PC de dos y tres parámetros. ....       | 65    |
| <b>Tabla 8:</b> Diferencias en valores de potencia crítica (PC) y la capacidad de trabajo por encima de la PC ( $W'$ ) entre modelos. ....  | 66    |
| <b>Tabla 9</b> Diferencias entre la potencia crítica (PC) reportada por los diferentes modelos de PC y las tasas reales de trabajo de la curva potencia duración (CPD). ....  | 68    |
| <b>Tabla 10:</b> Nivel de acuerdo de la potencia crítica (PC) y la capacidad de trabajo por encima de la PC ( $W'$ ) obtenida a través de diferentes combinaciones de dos pruebas de tiempo (PT), con respecto a la obtenida de cinco PT (es decir, 3, 4, 5, 10, 20 minutos) .... | 72    |
| <b>Tabla 11:</b> Error entre producción de potencia media (PPM) real y estimada en 60 minutos derivada de diferentes modelos empíricos utilizando configuraciones de prueba de dos tiempos. ....  | 75    |
| <b>Tabla 12:</b> Error entre la producción de potencia media (PPM) real y estimada en 60 minutos, derivada de diferentes modelos empíricos utilizando configuraciones de prueba de tres tiempos. ....   | 78-79 |
| <b>Tabla 13:</b> Nivel de acuerdo entre la producción de potencia media (PPM) prevista y real de 30 minutos y 60 minutos. ....  | 81    |

**LISTA DE ARTÍCULOS CIENTÍFICOS**

La presente Tesis Doctoral está compuesta por los siguientes artículos científicos:

- i. **Ñancupil-Andrade, A. A.**, Ruiz-alias, S. A., Pérez-Castilla, A., Jaén-Carrillo, D., & García-Pinillos, F. (2023). Running functional threshold versus critical power: Same concept but different values. *International Journal of Sports Medicine*. Online ahead of print. DOI: 10.1055/a-2155-6813.
- ii. Ruiz-alias, S. A., Olaya-Cuartero, J., **Ñancupil-Andrade, A. A.**, & García-Pinillos, F. (2022). 9/3-Minute running critical power test: Mechanical threshold location with respect to ventilatory thresholds and maximum oxygen uptake. *International Journal of Sports Physiology and Performance*. Online ahead of print. DOI: 10.1123/IJSP.2022-0069.
- iii. Ruiz-alias, S. A., **Ñancupil-Andrade, A. A.**, Pérez-Castilla, A., & García-Pinillos, F. (2023). Critical power in endurance runners: A comparison of the estimated parameters reported by different theoretical models. *International Journal of Sports Medicine*. Online ahead of print.
- iv. Ruiz-alias, S. A., **Ñancupil-Andrade, A. A.**, Pérez-Castilla, A., & García-Pinillos, F. (2023); Determination critical power and  $W'$  in running: Accuracy of different two-point models using the power metric. *Part P: Journal of Sports Engineering and Technology*. Online ahead of print.
- v. Ruiz-alias, S. A., **Ñancupil-Andrade, A. A.**, Pérez-Castilla, A., & García-Pinillos, F. (2023). Can we predict long duration running power output? A matter of selecting the appropriate predicting trials and empirical model. *European Journal of Applied Physiology*, 123, 2283-2294. DOI: 10.1007/s00421-023-05243-y.
- vi. Ruiz-alias, S. A., **Ñancupil-Andrade, A. A.**, Pérez-Castilla, A., & García-Pinillos, F. (2023). Can we predict long duration running power output? Validity of the critical power, power law and logarithmic models. *Journal of Strength and Conditioning Research*. Online ahead of print.

**ABREVIATURAS**

|                      |   |
|----------------------|---|
| <b>ANOVA</b>         | Análisis de varianza                    |
| <b>C<sub>M</sub></b> | Centro de masa                          |
| <b>CSL</b>           | Concentración sanguínea de lactato      |
| <b>CCI</b>           | Coefficiente de correlación intercalase |
| <b>CPD</b>           | Curva potencia-duración                 |
| <b>CPV</b>           | Curva potencia-velocidad                |
| <b>CV</b>            | Coefficiente de variación               |
| <b>VC</b>            | Velocidad crítica                       |
| <b>DME</b>           | Diferencias de medias estandarizadas    |
| <b>DE</b>            | Desviación estándar                     |
| <b>EC</b>            | Efectividad de carrera                  |
| <b>EEM</b>           | Error estándar de la medida             |
| <b>EES</b>           | Error estándar de la estimación         |
| <b>F</b>             | Fuerza                                  |
| <b>FC</b>            | Frecuencia cardiaca                     |
| <b>GPS</b>           | Sistema de posicionamiento Global       |
| <b>FRS</b>           | Fuerza de reacción del suelo            |
| <b>FCI</b>           | Factor de corrección individual         |
| <b>UMI</b>           | Unidad de medición inercial             |
| <b>J</b>             | Julios                                  |
| <b>UL</b>            | Umbral del lactato                      |
| <b>UPF</b>           | Umbral funcional de potencia            |
| <b>UV</b>            | Umbral ventilatorio                     |
| <b>m</b>             | Masa                                    |
| <b>MC</b>            | Masa corporal                           |
| <b>PAM</b>           | Potencia aeróbica máxima                |
| <b>PPM</b>           | Producción de potencia media            |
| <b>Pmax</b>          | Potencia máxima                         |

|                          |                                       |
|--------------------------|---------------------------------------|
| <b>PC</b>                | Potencia crítica                      |
| <b>PCR</b>               | Punto de compensación respiratoria    |
| <b>PE</b>                | Percepción del esfuerzo               |
| <b>PEG</b>               | Prueba de ejercicio graduada          |
| <b>PT</b>                | Pruebas de tiempo o Contrarreloj      |
| <b>PTA</b>               | Prueba de tiempo hasta el agotamiento |
| <b>R<sup>2</sup></b>     | Coficiente de determinación           |
| <b>V</b>                 | Velocidad                             |
| <b>VO<sub>2</sub>max</b> | Consumo máximo de oxígeno             |
| <b>W</b>                 | Vatios                                |
| <b>W'</b>                | Capacidad de trabajo por encima de PC |

## RESUMEN

La 'potencia crítica' (PC) ha emergido como un concepto fundamental en el mundo del ciclismo, que se deriva de la interpretación matemática de la asíntota horizontal de la 'curva potencia duración' (CPD). Esta PC, se considera una medida de intensidad donde la CPD se estabiliza por completo. Por tal razón, ha ganado aprobación por los entrenadores y atletas en ciclismo, e incluso intentándose relacionar con el hito mecánico del 'umbral de potencia funcional' (UPF). A medida que estos conceptos han comenzado a integrarse en la carrera de distancia, surge la necesidad de delimitar claramente el alcance y la aplicación práctica de la PC.

En la práctica actual, el aumento de los dispositivos portátiles para estimar la potencia mecánica en tiempo real, con 'Stryd' a la vanguardia, ha llevado a la utilización de la PC para identificar zonas de entrenamiento. Sin embargo, para una aplicación precisa, se requiere una comprensión clara de la relación entre la PC y el UPF, junto con los principales hitos fisiológicos. Es en este contexto que se ha planteado el primer tópico de la presente Tesis Doctoral: ***“delimitación conceptual de la PC en carrera de distancia”***.

Los conceptos de PC y la 'capacidad de trabajo por encima de la PC' ( $W'$ ) se derivan de la CPD, que representa la relación curvilínea entre la generación de potencia y la posible duración del esfuerzo. A pesar de la precisión lograda en ciclismo mediante modelos empíricos basados en pruebas de corta duración, su aplicación en carreras de distancia plantea incertidumbres en cuanto a su precisión y fiabilidad. Por ende, el segundo tópico de esta Tesis Doctoral se centra en un ***“análisis metodológico de la CPD para la determinación de PC y  $W'$  en corredores de distancia”***.

En la práctica, los corredores de distancia equipados con medidores de potencia buscan aplicaciones prácticas y simplificadas para estimar la PC, junto con la comprensión del nivel de precisión de la CPD en la predicción del rendimiento en carreras de larga duración, especialmente de 30 y 60 minutos. En este sentido, el tercer tópico de esta Tesis Doctoral se enfoca en la ***“aplicación práctica de la CPD para predecir rendimiento en carreras de larga distancia”***.

Fundamentada en estos tres tópicos, la presente Tesis Doctoral tiene como objetivo general "Analizar la potencia mecánica y su aplicación práctica al entrenamiento de corredores de distancia mediante sensores inerciales". Este objetivo se ha abordado a través de seis estudios publicados en revistas indexadas en el Journal Citation Reports, con objetivos específicos que incluyen:

(1) Determinar la localización de la PC y el UPF en la CPD utilizando las métricas de potencia en carrera y estimar la PC y el UPF a partir de una sola prueba de tiempo (PT) de corta duración (PT de 10 minutos, PT de 20 minutos y PT de 30 minutos) (estudio 1, **primer tópico**); (2) determinar la relación entre el umbral mecánico (es decir, PC) y los umbrales

fisiológicos (es decir, umbral anaeróbico [UA], punto de compensación respiratoria [PCR] y consumo máximo de oxígeno [ $VO_2max$ ]), en corredores de distancia entrenados (estudio 2, **primer tópico**).

(3) Comparar los valores de PC y el  $W'$  reportados por los diferentes modelos teóricos y los disponibles en softwares de análisis de entrenamientos actuales para localizar la PC con respecto a la CPD en corredores de distancia (estudio 3, **segundo tópico**); (4) determinar el nivel de concordancia de la PC y el  $W'$  en la carrera de distancia cuando son obtenidos de diferentes combinaciones que incluyen dos PT con los derivados de cinco PT, utilizando modelos lineales de la PC (estudio 4, **segundo tópico**).

(5) Determinar validez de los diferentes modelos empíricos de la PC (lineales y no lineales) disponibles en software actuales de entrenamiento (es decir, Golden Cheetah y Stryd) para predecir la producción de potencia en carreras de larga duración (es decir, 60 minutos) (estudio 5, **tercer tópico**); y (6) determinar la validez de diferentes modelos (es decir, PC, ley de potencia y Peronnet) para predecir la producción de potencia en carreras de larga duración (es decir, 30 y 60 minutos) (estudio 6; **tercer tópico**).

Los resultados de la presente Tesis Doctoral ponen en manifiesto que:

(1) La PC no es intercambiable con el UPF ni con los principales umbrales fisiológicos propuestos por la literatura científica, pero se pueden aproximar con precisión cuando se aplica un factor de corrección individual para cada umbral (estudio 1 y 2).

(2) Los datos de la PC y el  $W'$  se obtienen con mayor precisión cuando la CPD se modela con diferentes PT sin intercambiar modelos empíricos, aunque también se pueden obtener de forma simplificada con modelos matemáticos y softwares comerciales (es decir, Golden Cheetah y Stryd), pero se debe considerar que la precisión de estimación de la PC y el  $W'$  es dependiente del modelo seleccionado y del tiempo entre la PT de corta duración y de larga duración (estudio 3 y 4).

(3) La aplicación práctica de la potencia mecánica en carrera radica en la capacidad de la CPD para predecir rendimiento en carreras de larga distancia. Por este motivo, se informa que la precisión depende de varios factores como: la duración de las PT localizadas en los extremos, el nivel atlético de los corredores y la cantidad de configuraciones que utilicen las PT (estudio 5 y 6).

# 1. INTRODUCCIÓN



La potencia crítica (PC) es un concepto que se refiere a la tasa de trabajo más alta en la que los metabolitos inducidos por la fatiga logran permanecer bajo niveles críticos (Hill, 1993) y se ha introducido en el campo de la carrera de distancia con el desarrollo de herramientas portátiles de monitoreo que reportan el dato de producción de potencia media (PPM) en tiempo real (Cerezuela-Espejo, Hernández-Belmonte, Courel-Ibáñez, Conesa-Ros, Mora-Rodríguez, et al., 2020).

La PC también se puede explicar como la intensidad en la cual la curva potencia duración (CPD) se estabiliza por completo (Moritani et al., 1981). Esta CPD se refiere a una relación curvilínea entre la generación de potencia y la posible duración del esfuerzo (Monod et al., 1965; Poole et al., 1988). Por lo tanto, la PC es una métrica utilizada por el medidor de potencia Stryd (sensor inercial con mayor validación científica) (Cerezuela-Espejo, Hernández-Belmonte, Courel-Ibáñez, Conesa-Ros, Mora-Rodríguez, et al., 2020; Imbach et al., 2020), para identificar 5 dominios de intensidad en carrera de distancia (fácil, moderado, umbral, intervalo y repetición) (<https://www.stryd.com/es/>).

Aunque, la PC se considera un marcador de intensidad, los autores coinciden que no es intercambiable con los hitos fisiológicos propuestos por la literatura científica (Ruiz-Alias et al., 2022). Además, la PC difiere del UPF derivado del ciclismo. Por este motivo, el primer tópico de la presente Tesis Doctoral consiste en una *“delimitación conceptual de la PC en la carrera de distancia”*.

La PC y la capacidad de trabajo realizado por encima de la PC ( $W'$ ), se derivan de la CPD y requieren de una visita al laboratorio para estimar la PC con un protocolo en rampa (Murgatroyd et al., 2014). Por lo tanto, esta visita debe ser complementada con varias visitas más (entre 3 a 7 normalmente) para realizar pruebas a intensidad constante por encima de la PC, que terminen entre los 3 y los 15 minutos por agotamiento total del atleta (Chorley et al., 2020). Por este motivo, diferentes autores han propuesto modelos empíricos para la estimación de la PC, y el  $W'$  mediante dos o tres pruebas de corta duración (Ruiz-Alias et al., 2023a; Triska et al., 2017).

Estos modelos y pruebas propuestas son ampliamente conocidas y validadas en ciclismo; sin embargo, se debe mencionar que, en la carrera de distancia se desconoce la precisión de estos modelos empíricos para estimar la PC y la  $W'$ . Por lo tanto, el segundo tópico de la presente Tesis Doctoral se refiere a un *“análisis metodológico de la CPD para la determinación de PC y  $W'$  en corredores de distancia”*.

Finalmente, los deportistas que utilizan la potencia como marcador de intensidad están requiriendo aplicaciones prácticas y simplificadas para predecir el rendimiento en carrera, porque es bien sabido que la capacidad para mantener un ritmo de trabajo disminuye con el aumento de tiempo, y se han propuesto diferentes funciones para modelarlo (Drake et al., 2022; Kennelly, 1906; Peronnet et al., 1989). Además, aún se

desconoce la precisión de la CPD (es decir, cuando es modelada con datos de los dispositivos portátiles) para predecir el rendimiento en carreras de larga duración (es decir, 30 y 60 minutos). De acuerdo a lo mencionado, el tercer tópico de la presente Tesis Doctoral es la *“aplicación práctica de la CPD para estimar rendimiento en carreras de larga distancia”*.

A continuación, se presenta una breve introducción para cada uno de los tres tópicos que componen la presente Tesis Doctoral:

### **1.1. Tópico 1: delimitación conceptual de la PC en carrera de distancia.**

Las intensidades en carrera de distancia se caracterizan por una respuesta individualizada del sistema cardiorrespiratorio, lo que permite delimitar 4 dominios de intensidades: intensidad moderada, que se asocia al consumo de oxígeno en estado estacionario ( $VO_2$ ); intensidad pesada, que se relaciona con un estado estacionario retrasado, debido al componente lento del  $VO_2$ ; intensidad severa, que se caracteriza por la consecución del  $VO_{2m\acute{a}x}$ ; e intensidad extrema, donde la fatiga emerge antes de alcanzar el  $VO_{2max}$  (Poole & Jones, 2012).

Estos dominios de intensidades en carrera de distancia pueden mantenerse durante un período específico (es decir, tiempo hasta el agotamiento) a una tasa de trabajo igual o inferior al umbral anaeróbico (UA). Por lo tanto, la incapacidad para continuar en estos dominios se debe principalmente a la deshidratación, hipertermia o simple aburrimiento (Fitts, 1994). Entre los diferentes umbrales, la fatiga muscular está altamente correlacionada con depleción de glucógeno muscular (Fitts, 1994), la hidrólisis de la fosfocreatina, por encima del PCR, y la resultante acumulación de iones de fosfato que afectan la contracción muscular al reducir la sensibilidad al calcio y la liberación de este por parte del retículo sarcoplásmico (Fitts, 1994). Estas limitaciones de la fisiología humana se pueden ilustrar en la relación hiperbólica entre la velocidad y el tiempo sostenido en los récords mundiales (Hill, 1925).

Al incluir múltiples ensayos de tiempo hasta el agotamiento de un atleta, la asíntota horizontal de la relación hiperbólica denota el concepto llamado velocidad crítica (VC) o PC (Hill, 1993). Definido como la tasa de trabajo más alta en la que la fatiga inducida por los metabolitos permanecen bajo niveles críticos, por tanto, la PC representa el límite entre los dominios de intensidad pesada y severa (Hill, 1993).

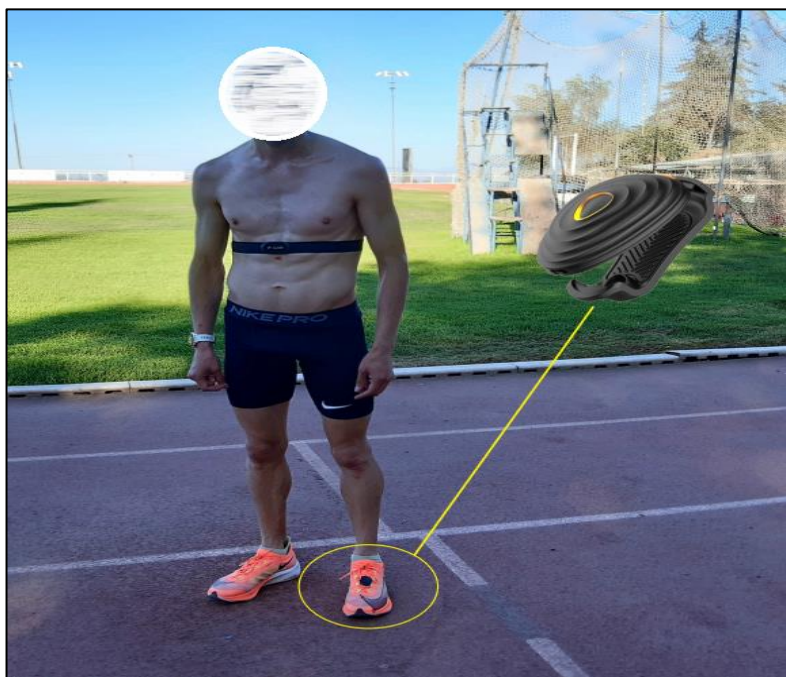
Se debe considerar que una estimación precisa de la PC es crucial debido al rango estrecho de tasas de trabajo que delimitan esta perturbación metabólica. Esto está condicionado a varios factores, como el número, duración y el período de descanso entre los ensayos de predicción o el modelo matemático utilizado (es decir, hiperbólico o lineal)

(Hill, 1993). Debido a estos hechos, la VC y los valores de PC pueden diferir en gran medida para el mismo grupo de atletas (Gorostiaga et al., 2022).

Hoy en día, la PC se ha introducido en el campo de la carrera de distancia con el desarrollo de herramientas portátiles de monitoreo, que reportan el dato de PPM, que podría representar más precisamente la intensidad de carrera influenciada por el contexto (es decir, superficie, gradiente, peso), lo que podría consolidar la funcionalidad de este estrecho umbral de PC (Cerezuela-Espejo, Hernández-Belmonte, Courel-Ibáñez, Conesa-Ros, Mora-Rodríguez, et al., 2020).

En particular, el medidor de potencia en carrera Stryd (Stryd Summit Power Meter) (**figura 1**) está recibiendo mucha atención de la comunidad de corredores debido a su capacidad para reflejar trabajo y su repetibilidad en diferentes condiciones de carrera en comparación con los diferentes dispositivos disponibles en el mercado (Cerezuela-Espejo, Hernández-Belmonte, Courel-Ibáñez, Conesa-Ros, Mora-Rodríguez, et al., 2020; Imbach et al., 2020).

Para determinar la PC, el grupo de Stryd propuso una prueba basada en 2 esfuerzos máximos de 9 y 3 minutos, respectivamente, con un descanso de recuperación activa de 30 minutos entre los 2 esfuerzos (Taboga et al., 2021). Luego, en base a un porcentaje de PC, se establecen 5 zonas de entrenamiento (es decir, zona 1 fácil: 65%–80%; zona 2 moderada: 80%–90%; zona 3 umbral: 90%–100%; zona 4 intervalo: 100 %–115 % y zona 5 repetición: 115%–300%) (Taboga et al., 2021). Como se mencionó anteriormente, la determinación de la PC es altamente influenciada por el protocolo utilizado (es decir, número, duración y recuperación entre ensayos predictivos).



**Figura 1.** Participante utilizando el medidor de potencia Stryd en una pista de atletismo.

Debido a los diferentes protocolos de estimación de la PC, es necesario ser preciso. Por este motivo, derivado del campo del ciclismo, surge el concepto de umbral de potencia funcional (UPF) que ha capturado gran atención por parte de los corredores de distancia (Allen, 2019). El UPF se conoce como la producción potencia más alta que se puede mantener en un estado cuasi-estacionario, sin fatigarse, aproximadamente durante 60 minutos (Allen, 2019). Este concepto se ha asociado con el máximo estado estable del lactato (MEEL). Además este dato puede verse comprometido por el método utilizado para su estimación, por lo tanto, se ha simplificado a distancias más cortas (Jeffries et al., 2021; Karsten et al., 2021; Lillo-Bevia et al., 2022). Por este motivo, se propuso la prueba de tiempo (PT) de 20 minutos (PT20) con un factor de corrección individual (FCI) de 95% para obtener UPF (Allen, 2019).

Al trasladarse el UPF a la carrera de distancia, se han propuesto factores de corrección (~ 90%, 94% y 95%) a los valores de PPM desarrollados en las PT10, PT20 y PT30 en la cinta rodante, observándose un bajo error estándar de la estimación (EES) (es decir,  $EES \leq 10.4 \text{ W}$ ) (Cartón-Llorente et al., 2021).

Según lo mencionado, se puede observar que la PC es un concepto derivado del ciclismo, al igual que el UPF, pero corresponden a diferentes intensidades. Por tal razón, solo se pueden aproximar mediante FCI y no se consideran intercambiables. Además, al analizar la PC en carrera de distancia, se puede observar que no se ha relacionado en este campo (es decir, carrera de distancia) con los hitos fisiológicos propuestos por la literatura y, además, se desconoce su localización. Por este motivo, el primer tópico de la presente tesis doctoral pretende delimitar conceptualmente la PC con respecto al UPF,  $VO_2\text{max}$ , UA y PCR.

## **1.2. Tópico 2: análisis metodológico de la CPD para la determinación de PC y $W'$ .**

La construcción de la CPD o curva potencia-velocidad (CPV) permite la identificación de 2 variables fundamentales en el entrenamiento de resistencia que delimitan el tipo y el grado de fatiga experimentada (Burnley & Jones, 2016; Skiba & Clarke, 2021). Estos son la PC o la VC que representan la tasa trabajo máxima en la que la estabilidad metabólica es sostenible (Hill, 1993). Al hablar de la capacidad de trabajo por encima de la PC, el concepto asociado es  $W'$  y para el trabajo por encima de la VC, el concepto asociado es la  $D'$ , que determinan el tiempo hasta el agotamiento en el dominio de intensidad severa (Skiba & Clarke, 2021).

En teoría cuando se agota  $W'$ , los atletas no pueden seguir ejercitándose por encima de la PC, lo que permite a los entrenadores guiar a sus atletas en las tácticas para diseños de entrenamientos interválicos y de competición. Kirby et al. (2021) ilustró como el

balance en  $W'$  estuvo fuertemente asociada con el tiempo fraccionado al final de los 400 metros en una pista atlética durante eventos de resistencia (es decir, 5000 y 10000 metros).

Cuando no es considerada la influencia potencial de los modelos de recuperación del balance en  $W'$ , tanto en modelo lineales como no lineales (Skiba & Clarke, 2021), es necesario estimar adecuadamente la PC y la  $W'$  para su utilidad en los entrenamientos y la competición. Galbraith et al. (2015) utilizaron el modelo de PC lineal de dos parámetros (es decir, distancia-tiempo) con tres carreras de 12, 7 y 3 minutos de duración, con el propósito de prescribir las intensidades de los intervalos y determinar el balance en  $W'$  a lo largo de la sesión de entrenamiento. Sin embargo, la selección de un modelo de PC diferente pudo haber dado lugar a resultados diferentes (Housh et al., 2001; Mattioni Maturana et al., 2018).

Mattioni-Maturana et al. (2018) han informado recientemente que el rango de PC oscila entre 252 y 275 W, y  $W'$  de 16.1 a 23.1 kJ, cuando se utilizan los diferentes modelos de PC en ciclismo (Mattioni-Maturana et al., 2018). En carrera, Housh et al. (2001) concluyeron que los modelos de PC de dos parámetros reportan valores de PC similares, difiriendo solo en 0.2 km/h, mientras que los modelos de PC de tres parámetros difieren en 2.5 km/h.

El marco teórico del concepto de PC determina que la CPD debe construirse de cuatro a cinco PT, con duraciones que logren en los atletas su  $VO_2\text{max}$ , normalmente establecido entre 2 y 20 minutos (Hill, 1993). Estas PT deben ser en orden para obtener estimaciones válidas de la PC y la  $W'$ . Esto es de suma importancia para monitorizar con precisión la intensidad realizada en cada PT, dado que estos parámetros son bastante sensibles a ligeros cambios de rendimiento (Triska et al., 2017).

En condiciones de campo, las mediciones de velocidad de carrera se pueden condicionar a la precisión de los dispositivos GPS de muñeca. Así mismo, su relación con el costo de energía en carrera podría estar condicionado por diferentes factores (es decir, pendiente, peso corporal y viento), desequilibrando la relación trabajo interno/externo, por lo tanto, invalidando el uso de la VC y la  $D'$ .

Por estos motivos, el uso de Stryd para estimar la potencia en carrera se ha masificado en corredores de diferentes niveles. Aunque el procesamiento de datos no ha sido divulgado, los valores de potencia mecánica han mostrado alto nivel de acuerdo (coeficiente de determinación  $[R^2] \geq 0.93$ ), con el derivado de dos modelos teóricos basados en la ley de la física, los entornos y condiciones mencionadas anteriormente (Cerezuela-Espejo, Hernández-Belmonte, Courel-Ibáñez, Conesa-Ros, Martínez-Cava, et al., 2020). Además, la disposición del modelo de PC en diferentes paquetes de software de entrenamiento, por ejemplo, el Golden Cheetah (<https://www.goldencheetah.org/>) y la

plataforma de Stryd (<https://www.stryd.com>), han impulsado el uso de la potencia y el análisis de la CPD.

Entre los diferentes modelos de PC (Ruiz-Alias et al., 2023a), el trabajo-tiempo ( $PC_{\text{trabajo}}$ ) y potencia-1/tiempo ( $PC_{1/\text{tiempo}}$ ), permiten simplificar la CPD a solo dos PT, dada su función lineal (Hill, 1993). Para obtener la PC y la  $W'$  con precisión a través de un modelo de dos puntos, se han establecido diferentes recomendaciones derivadas del campo del ciclismo. Es así que, Housh et al. (1990) afirmó que la prueba corta debe diferir al menos en 5 minutos con respecto a la de mayor duración. Por su parte, Mattioni-Maturana et al. (2018) establecieron que modelar la CPD con PT de menos de 10 minutos, da como resultado una sobrestimación y una subestimación de la PC y la  $W'$ , respectivamente. Según el conocimiento de los autores, estas recomendaciones no han sido determinadas en el campo de la carrera y, en particular, con respecto a la métrica de potencia.

Según lo informado en ciclismo, se entiende que, mientras más PT de diferentes duraciones se utilicen para construir la CPD, mayor será la precisión de esta para poder estimar la PC y  $W'$ . Por este motivo, el segundo tópico de la presente Tesis Doctoral, analizará el nivel de acuerdo de la PC y la  $W'$  a partir de diferentes configuraciones de PT y los modelos empíricos propuestos por la literatura científica, incluyendo los softwares actuales de entrenamiento en corredores de distancia.

### **1.3. Tópico 3: aplicación práctica de la CPD para predecir rendimiento en carreras de larga distancia.**

Predecir el rendimiento en carreras de larga distancia ha sido siempre de gran interés para los atletas de élite y noveles. Es bien sabido, que la capacidad para mantener un ritmo de trabajo disminuye con el aumento de tiempo, y se han propuesto diferentes funciones para modelarlo (Drake et al., 2022; Kennelly, 1906; Peronnet et al., 1989). Por un lado, los modelos de PC definen la CPD a lo largo del dominio de intensidad severa y la potencia declina con el aumento del tiempo hasta que la asíntota horizontal (es decir, PC) tiende al infinito (Hill, 1927). Por otro lado, se han propuesto diferentes modelos no asintóticos para observar un decaimiento de la potencia hasta cero. Peronnet et al. (1989) propusieron una ecuación para modelar la disminución de potencia a partir de la potencia aeróbica máxima (PAM). La PAM fue establecida en 7 minutos, donde a partir de este tiempo la energía decaería en un cierto ritmo, de acuerdo con la capacidad de resistencia del atleta. Asimismo, Kennely (1906) propuso una ley de potencia para modelar este problema.

La capacidad predictiva de estos modelos ha sido probada en diferentes estudios (Gamelín et al., 2006; Girardi et al., 2022). Gamelín et al. (2006) usaron 2 modelos lineales, 2 no lineales, y 1 de PC exponencial para predecir la velocidad más alta que podría

mantenerse durante 60 minutos en un grupo de corredores bien entrenados en larga distancia. La CPD fue modelada a través de 3 ensayos de 6, 9 y 12 minutos. Por lo tanto, las comparaciones entre lo predicho y el rendimiento real revelaron una sobreestimación por parte de todos los modelos (del 3% al 11%), lo que reveló la limitada capacidad de la asíntota para predecir el rendimiento cuando se excede el tiempo por encima de la PC. Por otro lado, el modelo de la ley de potencia ha mostrado mayor nivel de precisión que los modelos de PC lineal y no lineal (Girardi et al., 2022).

La importancia de la capacidad predictiva de los modelos debe ir acompañada por una adecuada interpretación psicofisiológica, por parte de los atletas, de las diferentes fuentes de fatiga que van apareciendo a lo largo de la carrera, que podrían ser manejables si adoptan una estrategia de ritmo apropiada (Foster et al., 2023). En base a la experiencia previa o de acuerdo con el tipo de carrera, los atletas seguirían una determinada estrategia de ritmo (es decir, negativo, positivo, total, uniforme, parabólico o ritmo variable), aunque, para distancias largas, un ritmo constante parece ser más adecuado para asegurar el equilibrio entre prevenir fallas fisiológicas y realizar un máximo esfuerzo (Abbiss & Laursen, 2008; Noakes, 2011). Por lo tanto, estimaciones precisas del rendimiento en carrera ofrecería a los atletas y practicantes el ritmo objetivo a seguir para intentar realizar marcas personales.

Se han propuesto diferentes métodos para estimar rendimiento de larga distancia, como tablas de puntuación (Purdy, 1975; Spiriev et al., 2022), nomogramas (Coquart et al., 2009; Coquart & Bosquet, 2010; Lerebourg et al., 2022) o funciones (Coquart & Bosquet, 2010; Vandewalle, 2018; Zinoubi et al., 2017). Mientras tanto, la vigencia de ciertos métodos ha sido cuestionada (Gamelin et al., 2006; Ruiz-Alias et al., 2023b), otros han mostrado una alta capacidad predictiva (Girardi et al., 2022; Ruiz-Alias et al., 2023b).

Gamelin et al. (2006) afirma que los diferentes modelos lineales de VC sobreestimaron la velocidad de carrera de 60 minutos (> 5%) al comparar con los modelos de VC no lineales (< 4.5%) en un grupo de corredores bien entrenados en larga distancia. Asimismo, utilizando la métrica de potencia en carrera, Ruiz-Alias et al. (2023b) mostraron que los modelos de PC lineales sobreestimaron la PPM de 60 minutos (> 8%) y los modelos de PC no lineales proporcionaron estimaciones válidas (< 2%). Por lo tanto, el usar un modelo apropiado permitiría a los atletas y practicantes determinar con precisión la intensidad de las sesiones con entrenamiento específico y elaborar una estrategia con ritmos realistas.

Para seleccionar modelos de predicción precisos, así como para el ritmo de la intensidad de carrera objetivo, es de gran importancia utilizar herramientas de seguimiento precisas y sensibles. Con respecto a esto, la velocidad de carrera medida a través de

dispositivos GPS comúnmente presenta errores de medición, y este también está influenciado por el contexto ambiental (por ejemplo, una carrera en montaña).

De acuerdo a lo mencionado, los atletas y practicantes están optando por monitorear la métrica de potencia desarrollada en carrera, dada su alta repetibilidad, sensibilidad y nivel de acuerdo con el trabajo externo y el  $VO_2$  en diferentes entornos (es decir, interiores, exteriores) y condiciones (es decir, velocidad de carrera, peso corporal y pendiente) (Cerezuela-Espejo, Hernández-Belmonte, Courel-Ibáñez, Conesa-Ros, Mora-Rodríguez, et al., 2020; García-Pinillos et al., 2019; Imbach et al., 2020; Ruiz-Alias et al., 2022; Taboga et al., 2021).

Además, la métrica de potencia obtenida de cada sesión de carrera puede ser analizada en diferentes paquetes de software de entrenamiento, como el Golden Cheetah de código abierto (Liversedge, 2023a) o el software propietario de Stryd, donde los modelos de PC conocidos están disponibles, así como los propietarios no revelados (Dearing & Paton, 2022; Ruiz-Alias et al., 2022, 2023a).

Según los estudios previos, la predicción de rendimiento en carrera de distancia mediante los diferentes modelos empíricos y software de entrenamiento aún no está clara. Por este motivo, el tercer tópico de la presente Tesis Doctoral tiene como propósito determinar la validez y precisión de predicción de los modelos lineales y no lineales de la PC, disponibles en los diferentes softwares de entrenamiento (es decir,  $PC_{cheetah}$ ,  $PC_{stryd}$ ) y otros modelos no asintóticos (es decir, ley de potencia y Peronnet).





## 2. OBJETIVOS E HIPÓTESIS

## 2.1. Objetivo general.

- Analizar la potencia mecánica y su aplicación práctica al entrenamiento en corredores de distancia mediante sensores inerciales.

## 2.2. Objetivos e hipótesis específicos.

La presente Tesis Doctoral se ha organizado en seis estudios basados en los siguientes objetivos e hipótesis específicas.

**Estudio 1: *Umbral de potencia funcional versus potencia crítica: Conceptos iguales pero diferentes valores.***

**Study 1: *Running functional threshold versus critical power: Same concept but different values.***

- **Objetivo:** Determinar la localización de la PC y el UPF en la CPD utilizando métricas de potencia en carrera y estimar la PC y el UPF a partir de un solo esfuerzos de corta duración (PT10, PT20 y PT30).
- **Hipótesis:** (1) La PC se localiza más próximo a la intensidad severa, mientras que el UPF se localiza en intensidad pesada, por lo tanto, no se pueden utilizar indistintamente; (2) la estimación de la PC mediante una sola prueba de corta duración solo se debe aplicar con un factor de corrección individual, mientras que el UPF presenta mayor precisión a medida que aumenta la duración de la prueba.

**Estudio 2: *Running functional threshold versus critical power: Same concept but different values.***

**Study 2: *9/3-minute running critical power test: Mechanical threshold location with respect to ventilatory thresholds and maximum oxygen uptake.***

- **Objetivo:** Determinar relación entre el umbral mecánico (PC) y los umbrales fisiológicos (UA, PCR y VO<sub>2</sub>max) en corredores de distancia entrenados.
- **Hipótesis:** La PC resultante de la prueba 9/3 de Stryd se localiza más próxima al PCR (Dekerle et al., 2003) que el UA y el VO<sub>2</sub>max, por lo tanto, aplicando un factor de corrección adecuado se puede estimar los umbrales fisiológicos a partir de umbrales mecánicos como la PC.

**Estudio 3: *Potencia crítica en corredores de resistencia: Una comparación de parámetros estimados y reportados por diferentes modelos teóricos.***

**Study 3: *Critical power in endurance runners: A comparison of the estimated parameters reported by different theoretical models.***

- **Objetivo:** Comparar los valores de PC y  $W'$  reportados por los diferentes modelos teóricos y los disponibles en los softwares de análisis actuales para localizar la PC con respecto a la CPD en corredores de distancia.
- **Hipótesis:** El dato de PC y  $W'$  no se pueden utilizar indistintamente con los diferentes tipos de modelos teóricos y softwares de análisis disponibles actualmente, por lo tanto, se debe considerar cuidadosamente el modelo de PC utilizado para evaluar rendimiento y planificar entrenamiento en corredores de distancia.

**Estudio 4: *Determinación de la potencia crítica y la  $W'$  en carrera: Precisión de los diferentes modelos de dos puntos al usar métricas de potencia.***

**Study 4: *Determining critical power and  $W'$  in running: Accuracy of different two point models using the power metric.***

- **Objetivo:** Determinar el nivel de concordancia de la PC y  $W'$  en carrera obtenidos de diferentes combinaciones de dos PT con los derivados de cinco PT utilizando modelos lineales de la PC.
- **Hipótesis:** El dato de la PC y el  $W'$  estimado a través de la combinación de dos PT de los modelos lineales presenta alta precisión al compararse con las cinco PT, y aumenta proporcionalmente a la separación entre la PT de corta y larga duración.

**Estudio 5: *¿Podemos predecir la carrera de larga duración mediante la producción de potencia? Un asunto de seleccionar las pruebas de predicción y el modelo empírico adecuado.***

**Study 5: *Can we predict long-duration running power output? A matter of selecting the appropriate predicting trials and empirical model.***

- **Objetivo:** Determinar la validez de diferentes modelos empíricos de la PC (lineales y no lineales), disponibles en software actuales de entrenamiento (es decir, Golden Cheetah y Stryd) para predecir la PPM en carrera de larga duración (es decir, 60 minutos).
- **Hipótesis:** Los modelos de predicción de PC presentan estimaciones válidas para predecir carrera de larga duración, pero su aplicación se condiciona al software de entrenamiento seleccionado.

**Estudio 6: *¿Podemos predecir mediante la producción de potencia las carreras de larga duración? Validación de la potencia crítica, ley de potencia y modelos logarítmicos.***

**Study 6: *Can we predict long durations running power output? Validity of the critical power, power law, and logarithmic models.***

- **Objetivo:** Determinar la validez de los diferentes modelos (es decir, PC, ley de potencia y Peronnet) para predecir la PPM en carrera de larga duración (es decir, 30 y 60 minutos).
- **Hipótesis:** Los modelos de predicción de la PC presentan estimaciones válidas para predecir carrera de larga duración, pero no se pueden intercambiar entre ellos y su aplicación se condiciona a la selección de uno solo para realizar el seguimiento de entrenamientos y favorecer el rendimiento en carrera.

### **3. MATERIAL Y MÉTODO**

Los aspectos más relevantes del apartado de material y métodos se presentan resumidamente en la **tabla 1**. Además, se presenta información detallada de las distintas subsecciones que conforman cada estudio de la tesis doctoral.

**Tabla 1.** Detalle del diseño de investigación de los estudios que componen la Tesis Doctoral.

| Estudio  | Diseño   | Muestra   |
|--|--|---|
| <i>Running functional threshold versus critical power: Same concept but different values.</i>  | -Estudio Observacional de corte transversal.<br>-Durante cinco semanas se realizaron dos PT cada semana en orden aleatorio.<br>-Las configuraciones de las PT fueron: 60–1 minuto, 50–2 minutos, 30–3 minutos, 20–4 minutos y 10–5 minutos.  | N= 15 atletas entrenados (8 hombres y 7 mujeres, edad: $23 \pm 5$ años, altura: $166 \pm 6$ cm, MC: $58 \pm 8$ kg, volumen de entrenamiento: $110 \pm 15$ km por semana, mejor tiempo personal 5km: $15:29 \pm 00:53$ ).    |
| <i>9/3-minute running critical power test: Mechanical threshold location with respect to ventilatory thresholds and maximum oxygen uptake.</i> | -Estudio Observacional de corte transversal.<br>-Se realizaron 2 sesiones de laboratorio para determinar la PC, UA, PCR y $VO_2$ max.<br>-Finalmente, se realizó una prueba de ejercicio gradual (PEG) para determinar el UA, PCR y $VO_2$ max.  | N= 15 atletas entrenados (edad: $30.7 \pm 9.5$ años, altura: $175 \pm 10$ cm, MC: $70.6 \pm 5.5$ kg, masa magra $48.5\% \pm 3.3\%$ , masa grasa $14.2\% \pm 5.6\%$ , $VO_2$ max $66.3 \pm 7.20$ mL/kg/min).                 |
| <i>Critical power in endurance runners: A comparison of the estimated parameters reported by different theoretical models.</i>                 | -Estudio Observacional de corte transversal.<br>-Durante cinco semanas se realizaron 4 PT para definir la CPD.<br>-Las PT fueron: 3, 5, 10 y 20 minutos.<br>- Se realizaron tres pruebas de tiempo adicionales, dos para localizar los valores de PC en la CPD y una para probar la validez del modelo balance en $W'$ . | N= 15 atletas entrenados (8 hombres y 7 mujeres, edad: $23 \pm 5$ años, altura: $166 \pm 6$ cm, MC: $58 \pm 8$ kg, volumen de entrenamiento: $110 \pm 15$ km por semana, mejor tiempo personal en 5km: $15:29 \pm 00:53$ ). |
| <i>Determining critical power and <math>W'</math> in running: Accuracy of different two-point models using the power metric.</i>               | -Estudio Observacional de corte transversal.<br>-Durante tres semanas se realizaron 5 PT para definir la CPD.<br>-Las PT fueron: 3, 4, 5, 10 y 20 minutos.   | N= 15 atletas entrenados (8 hombres y 7 mujeres, edad: $23 \pm 5$ años, altura: $166 \pm 6$ cm, MC: $58 \pm 8$ kg, volumen de entrenamiento: $110 \pm 15$   |

|  |   |   |
|--|---|---|
|  | - PC y W' se determinaron a través de la $PC_{trabajo}$ y $PC_{1/tiempo}$ , introduciendo diferentes combinaciones de pruebas de dos tiempos (es decir, 3-4, 3-5, 3-10, 3-20, 4-5, 4-10, 4-20, 5-10, 5-20, 10-20 minutos).  | km por semana, mejor tiempo personal en 5km: 15:29 ± 00:53.   |
| <i>Can we predict long-duration running power output? A matter of selecting the appropriate predicting trials and empirical model.</i> | -Estudio Observacional de corte transversal.<br>-Durante cinco semanas se realizaron 9 PT en orden aleatorio.<br>-Las PT fueron: 1, 2, 3, 4, 5, 10, 20, 30 y 60 minutos.<br>-La CPD fue definida por diferentes modelos, usando diferentes PT de dos y tres configuraciones.<br>-Los modelos fueron: PC, Ley de Potencia y Peronnet.<br>-Estos modelos fueron extrapolados a los 60 minutos para poder predecir la PPM. | N= 15 atletas entrenados (8 hombres y 7 mujeres, edad: 23 ± 5 años, altura: 166 ± 6 cm, MC: 58 ± 8 kg, volumen de entrenamiento: 110 ± 15 km por semana, mejor tiempo personal en 5km: 15:29 ± 00:53. |
| <i>Can we predict long durations running power output? Validity of the critical power, power law, and logarithmic models.</i>          | -Estudio Observacional de corte transversal.<br>-Durante cuatro semanas se realizaron 7 PT en orden aleatorio.<br>-Las PT fueron: 3, 4, 5, 10, 20, 30 y 60 minutos.<br>-La CPD fue definida por diferentes modelos, usando las PT de 3, 5, 10 y 20.<br>-Los modelos fueron: PC, Ley de Potencia y Peronnet.<br>- Estos modelos fueron extrapolados a 30 y 60 minutos para poder predecir la PPM.                        | N= 15 atletas entrenados (8 hombres y 7 mujeres, edad: 23 ± 5 años, altura: 166 ± 6 cm, MC: 58 ± 8 kg, volumen de entrenamiento: 110 ± 15 km por semana; mejor tiempo personal en 5km: 15:29 ± 00:53. |

PC: Potencia crítica; CPD: Curva potencia duración; W': Capacidad de trabajo por encima de PC; PT: Prueba de tiempo; PEG: Prueba de ejercicio graduada; MC: Masa corporal; UA: Umbral anaeróbico; PCR: Punto de compensación respiratoria; VO<sub>2</sub>max: Consumo máximo de oxígeno.



### **Estudio 1:**

***Umbral de potencia funcional versus potencia crítica:***

***Conceptos iguales pero diferentes valores.***

-----∞-----

***Running functional threshold versus critical power:***

***Same concept but different values.***



**Participantes.**

Quince atletas altamente entrenados (8 hombres y 7 mujeres, edad:  $23 \pm 5$  años, altura:  $166 \pm 6$  cm, MC:  $58 \pm 8$  kg, volumen de entrenamiento:  $110 \pm 15$  km por semana, mejor tiempo en 5 km:  $15:29 \pm 00:53$ ) participaron en el estudio (McKay et al., 2022). Los siguientes criterios de inclusión fueron establecidos para seleccionar atletas altamente entrenados: (i) realizar un volumen de entrenamiento  $>$  a 150 minutos por semana y (ii) competir a nivel nacional. Todos los atletas fueron informados sobre el propósito de la investigación y procedimientos del estudio, antes de firmar un formulario de consentimiento informado por escrito. El protocolo de estudio se adhirió a los principios de la declaración de Helsinki y fue aprobado por la junta de revisión institucional de la Universidad de Granada (aprobación del IRB: 2288/CEIH/2021).

**Pruebas de tiempo.**

Los atletas comenzaron las sesiones de prueba con un calentamiento estandarizado que constó de 10 minutos de carrera a una intensidad de baja a moderada (es decir, la intensidad correspondiente a sesiones fáciles de carrera de larga duración). Después de una serie de ejercicios de movilidad dinámica, se realizaron tres series de alta intensidad con dos minutos de descanso para completar el calentamiento. Entonces, los atletas comenzaron cada PT con la instrucción de completar la mayor distancia posible. Un total de 10 PT (es decir, 1, 2, 3, 4, 5, 10, 20, 30, 50 y 60 minutos) se realizaron en una pista atlética de 400 metros. Para evitar cualquier efecto del entrenamiento, se realizaron dos PT a lo largo de cada semana en orden aleatorio (es decir, cinco configuraciones diferentes: 60 – 1 minuto, 50 – 2 minutos, 30 – 3 minutos, 20 – 4 minutos y 10 – 5 minutos). El ritmo fue autoseleccionado y el tiempo de vuelta se informó mediante retroalimentación después de cada 400 metros.

**Medidor de potencia.**

Se utilizó el medidor de potencia en carrera Stryd (Stryd Summit Power Meter, Boulder, CO, USA, **Figura 2**) para determinar la PPM (W) de cada PT. Stryd es un sensor inercial utilizado como podómetro ligero (8.0 g su última versión), reforzado con fibra de carbono que incluye un sensor de movimiento inercial de 6 ejes (giroscopio de 3 ejes, acelerómetro de 3 ejes). Además, presenta una frecuencia de muestreo de 1000 Hz, detecta las aceleraciones horizontales, verticales, laterales y las velocidades angulares para inferir las fuerzas de reacción del suelo. Como resultado, Stryd proporciona medidas en tiempo real de la oscilación vertical, elevación, distancia y el tiempo de contacto con el suelo, además proporciona métricas interesantes relacionadas con la potencia (es decir, potencia

media transcurrida, potencia máxima, potencia de forma, rigidez de la pierna y efectividad de carrera). Se debe considerar que la última actualización del dispositivo estima la fuerza y la resistencia que ofrece viento (es decir, resistencia del aire) expresada en PPM (<https://blog.stryd.com/tag/validation-white-papers/>).

Finalmente, para obtener las métricas de potencia de Stryd, se midió la MC con una balanza (Seca 813; Seca Ltd, Hamburg, Germany) y se actualizó diariamente. La localización del medidor de potencia fue conectado a los cordones del calzado derecho para todas las PT.



**Figura 2.** Medidor de potencia tipo podómetro (Stryd).

### **PC y UPF.**

La PC se determinó en la plataforma Stryd (<https://www.stryd.com/powercenter>) (**figura 3**). De acuerdo con las recomendaciones del fabricante, se necesitaron las siguientes duraciones para ser introducidas en la plataforma: Largo (40-60 minutos), medio (10-20 minutos), corto (3-5 minutos) y sprint (30-60 segundos) (Dearing & Paton, 2022). Por lo tanto, la PPM de las PT de 1, 2, 3, 4, 5, 10, 20, 30, 50 y 60 minutos se cargaron en la plataforma Stryd que reporta la PC automáticamente. El UPF se determinó directamente como la PPM desarrollada en la PT60. Entonces, la PC y el UPF estimados fueron exploradas utilizando la PPM desarrollada en PT10, PT20 y PT30.



**Figura 3.** Software de recopilación y análisis de datos “desarrollado por Stryd” (Stryd Power Center).

### Análisis estadístico.

Los datos descriptivos se presentaron como media  $\pm$  desviación estándar (DE) y 95% de intervalos confianza. La distribución normal de los datos se confirmó mediante la prueba de Shapiro-Wilk ( $P > 0.05$ ). Las estimaciones del UPF y la PC derivada de las PT individuales más cortas se evaluaron mediante el coeficiente de correlación de Pearson ( $r$ ) y el error estándar de estimación (EES) obtenido del análisis de regresión lineal. La fuerza de los coeficientes  $r$  se interpretó como: trivial (0.00-0.09), pequeña (0.10-0.29), moderada (0.30-0.49), grande (0.50-0.69), muy grande (0.70-0.89), casi perfecto (0.90-0.99), y perfecto (1.00) (Hopkins et al., 2009). Se consideró una estimación aceptable del UPF y la PC si se cumplían los siguientes criterios:  $r$  casi perfecto ( $>0.90$ ), bajo EES (UPF:  $<13$  W y  $0.2$  W $\cdot$ kg $^{-1}$  [valores correspondientes al error medio de PT30]; PC:  $<8$  W y  $0.1$  y W $\cdot$ kg $^{-1}$  [valores correspondientes al error medio de PT50]). Los análisis estadísticos se realizaron utilizando el paquete de software SPSS (IBM SPSS versión 25.0, Chicago, IL, USA). La significancia estadística se fijó en  $P \leq 0.05$ .



## **Estudio 2:**

***Prueba de potencia crítica 9/3 minutos en carrera:  
Localización del umbral mecánico con respecto a los  
umbrales ventilatorios y consumo de oxígeno  
máximo.***

-----∞-----

*9/3-Minute running critical power test: Mechanical  
threshold location with respect to ventilatory  
thresholds and maximum oxygen uptake.*

### Diseño experimental.

Se llevó a cabo una investigación observacional compuesta por 2 sesiones de laboratorio para determinar la PC, UA, PCR y VO<sub>2</sub>max. El primer día antes iniciar la prueba de PC 9/3 minutos de Stryd, se evaluaron las medidas antropométricas de los atletas. Cabe destacar que los atletas fueron requeridos a no realizar actividad vigorosa en las 48 horas previas a cada sesión. Finalmente, se realizó una prueba de ejercicio gradual (PEG) para determinar el UA, PCR y VO<sub>2</sub>max. Ambas sesiones de prueba se realizaron en una cinta rodante (WOODWAY Pro XL, Woodway, Inc, **figura 4**) bajo las mismas condiciones ambientales (~22 °C y ~60% humedad), calzado y hora del día (±1 hora).



**Figura 4.** Cinta rodante, WOODWAY Pro XL.

### Participantes.

Un grupo de 15 deportistas entrenados (edad  $30.7 \pm 9.7$  años, altura  $175 \pm 10$  cm, MC  $70.6 \pm 5.5$  kg, masa magra  $48.5 \% \pm 3.3 \%$ , masa grasa  $14.2\% \pm 5.6\%$ , VO<sub>2</sub>max  $66.33 \pm 7.20$  mL/kg/min) participaron en el estudio. Todos los participantes eran miembros de grupos locales de entrenamiento. Se establecieron los siguientes criterios de inclusión para seleccionar atletas de alto nivel (Honert et al., 2020): (1) > a 3 años de experiencia regular en carreras, (2) > a 4 sesiones/semana y (3) un ritmo de 30 a 42 minutos en 10 km. Los atletas estaban acostumbrados a correr en cinta rodante como parte de su rutina de entrenamiento. Todos los atletas fueron informados sobre el propósito de investigación y

procedimientos del estudio antes de firmar un formulario de consentimiento informado por escrito. El protocolo del estudio se adhirió a los principios de la Declaración de Helsinki y fue aprobado por la junta de revisión institucional de la Universidad de Granada (Nº 2276/CEIH/2021).

### **Composición Corporal.**

Se obtuvieron las características antropométricas (MC, porcentaje de masa grasa y porcentaje de masa magra) de los atletas utilizando el bioimpedanciómetro (Inbody 230, Inbody, **figura 5**) validado previamente por un sistema de rayos X de energía dual.



**Figura 5.** Bioimpedanciómetro Inbody 230.

### **Prueba de PC Stryd.**

Los atletas comenzaron las sesiones de prueba con un calentamiento estandarizado que constó de 10 minutos de carrera a una intensidad de baja a moderada (es decir, la intensidad correspondiente a sesiones fáciles de carrera de larga duración). Después, se realizaron 2 a 3 series cortas de 1 minuto de alta intensidad con 2 minutos de descanso activo para completar el calentamiento. Posteriormente, se colocó el medidor de potencia en carrera (Stryd Summit Power Meter) en los cordones de la zapatilla derecha antes de realizar los 2 esfuerzos máximos de 9 y 3 minutos, respectivamente, con un descanso de recuperación activa de 30 minutos entre los 2 esfuerzos (Taboga et al., 2021). Antes de comenzar, se preguntó a los atletas sobre el ritmo inicial que establecerían en

ambas pruebas. El tiempo comenzó a registrarse una vez que se estabilizó la velocidad (la velocidad de carga se regulaba a voluntad del corredor).

#### PEG.

Los atletas comenzaron con el procedimiento de calentamiento mencionado previamente. Por lo tanto, se les equipó con el medidor de potencia de carrera Stryd y el analizador metabólico portátil validado (PNOE, ENDO Medical, **figura 6**) (Tsekouras et al., 2019). Antes de la prueba, el dispositivo se calibró correctamente según las instrucciones del fabricante. En nuestro laboratorio, el error típico de medición del  $VO_2$  submáximo fue del 2.1% (Hopkins, 2000). A partir de una velocidad inicial de 9 km/h y el aumento fue de 1 km/h cada 3 minutos hasta el agotamiento volitivo (Kuipers et al., 2003). El dato absoluto (en vatios [W]) y relativo (en W por kilogramo) de potencia se registró en las PT de 9 y 3 minutos. Estos 2 valores se ingresaron en la calculadora de Stryd para estimar la PC (<https://www.stryd.com/powercenter>). W a W por kilogramo se registró en la PEG durante el último minuto de cada etapa.



**Figura 6.** Analizador metabólico portátil PNOE, ENDO Medical.

#### PC, Umbrales Ventilatorios y $VO_{2max}$ .

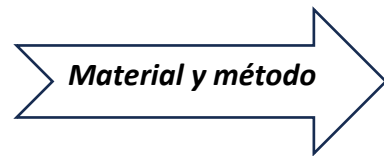
El siguiente análisis de datos se ha realizado en estudios previos (Leo et al., 2017). Los datos respiración a respiración de cada registro se exportaron desde la plataforma PNOE (<https://platform.mypnoe.com/>) a una hoja de cálculo excel. Se excluyeron respiraciones errantes y valores fuera del intervalo de confianza del 95% de la media. Luego, los datos respiración a respiración se interpolaron linealmente para dar valores de 1 segundo y luego el promedio contenido en 10 segundos. El valor medio de  $VO_{2max}$  fue considerado el más alto de 30 segundos. Para determinar los umbrales ventilatorios (UV), un mínimo de 2

investigadores experimentados evaluaron cada gráfico en la búsqueda de las siguientes consideraciones: UA se definió como la mínima carga a la que la ventilación (VE)/salida de dióxido de carbono ( $VCO_2$ ) exhibió un aumento sistemático, sin un aumento paralelo en VE/ $VCO_2$  (Wasserman et al., 1973). PCR se estableció como la carga mínima a la que el aumento en VE/ $VO_2$  fue seguido por un aumento en VE/ $VCO_2$  (Wasserman & McIlroy, 1964).

### **Análisis estadístico.**

La estadística descriptiva fue representada como media  $\pm$  (DE) e IC del 95%. La distribución normal de los datos y la homogeneidad de las varianzas se confirmaron a través de la prueba Shapiro-Wilk y Levene, respectivamente. Se aplicó una regresión lineal para determinar la relación entre W- $VO_2$  durante la PEG. Un análisis unidireccional de medidas repetidas de varianza con correcciones post hoc de Bonferroni se llevó a cabo para comparar los valores de UA, PCR, PC y  $VO_{2max}$ . La esfericidad fue confirmada por la prueba de Mauchly. El nivel de significación utilizado fue de  $p < 0.05$ . El análisis de datos se realizó con el software SPSS (versión 25).





### **Estudio 3:**

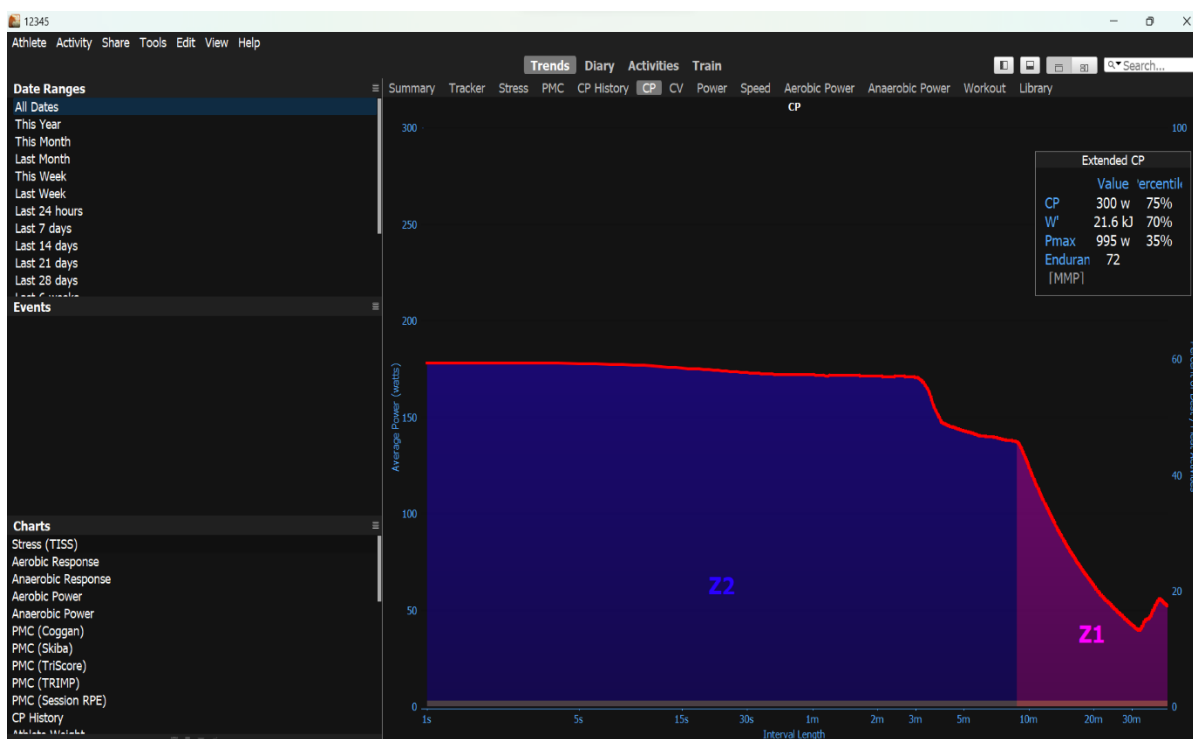
***Potencia crítica en corredores de resistencia: Una comparación de parámetros estimados y reportados por diferentes modelos teóricos.***

-----∞-----

*Critical power in endurance runners: A comparison of the estimated parameters reported by different theoretical models.*

## Diseño experimental.

En un período de entrenamiento de cinco semanas los atletas realizaron pruebas de cuatro tiempos (es decir, 3, 5, 10 y 20 minutos) para definir su CPD a través de los modelos de PC disponibles en diferentes paquetes de software de análisis (es decir, la plataforma Golden Cheetah [figura 7] y Stryd). Se realizaron tres pruebas de tiempo adicionales, dos para localizar los valores de PC en la CPD (es decir, 30 y 60 minutos) y una para probar la validez del modelo balance en  $W'$  (es decir, 4 minutos). Las sesiones de prueba fueron precedidas por dos días de entrenamiento ligero y se realizaron en las mismas condiciones ambientales (18 – 23 °C y 30 – 60 % de humedad), calzado, pista de atletismo y hora del día ( $\pm 1$  hora).



**Figura 7.** Plataforma Golden Cheetah para análisis de los datos de entrenamiento y competencias.

## Participantes.

Quince atletas altamente entrenados (8 hombres y 7 mujeres, edad:  $23 \pm 5$  años, altura:  $166 \pm 6$  cm, MC:  $58 \pm 8$  kg, volumen de entrenamiento:  $110 \pm 15$  km por semana; mejor tiempo en 5 km:  $15 :29 \pm 00:53$ ) participaron en el estudio (McKay et al., 2022). Todos los atletas fueron informados sobre el propósito de la investigación y los procedimientos del estudio antes de proporcionar el formulario de consentimiento informado por escrito. El protocolo del estudio se adhirió a los principios de la Declaración de Helsinki y fue aprobado por la junta de revisión institucional de la Universidad de Granada (No. 2288/CEIH/2021).

### **Pruebas de tiempo.**

Las PT se realizaron en una pista de atletismo de 400 metros. Los atletas comenzaron las sesiones de prueba con un calentamiento estandarizado que consistió en 10 minutos de carrera a una intensidad de baja a moderada (es decir, la intensidad correspondiente a las sesiones de carrera largas y fáciles). Después de una serie de ejercicios de movilidad dinámica, se realizaron tres series cortas de alta intensidad de 30 segundos con dos minutos de descanso para completar el calentamiento. Luego, los atletas comenzaron la PT bajo la instrucción de completar la distancia más larga. El ritmo fue autoseleccionado y se proporcionó información sobre el tiempo de vuelta cada 400 metros. Para evitar cualquier efecto del entrenamiento, se realizaron pruebas de dos tiempos a lo largo de cada semana, en un orden aleatorio, excepto por los 60 minutos (por ejemplo, 5-10, 3-30, 4-20 y 60 minutos).

### **Medidor de potencia.**

Se usó el medidor de potencia en carrera Stryd (Stryd Summit Power Meter, Boulder, CO, EE. UU.) para determinar la PPM (W) de cada PT. El medidor de potencia Stryd ha demostrado una alta precisión y nivel de acuerdo con el trabajo externo y el  $VO_2$  en diferentes entornos (es decir, interiores y exteriores) y condiciones (es decir, velocidad, peso corporal y pendiente) (Cerezuela-Espejo, Hernández-Belmonte, Courel-Ibáñez, Conesa-Ros, Mora-Rodríguez, et al., 2020; Ruiz-Alias et al., 2022; Taboga et al., 2021). La MC se midió con una báscula (Seca 813, Seca Ltd, Hamburgo, Alemania) y se actualizó diariamente en la aplicación móvil del potenciómetro. Este siempre estuvo anclado a los cordones del calzado derecho.

### **Modelos de PC.**

Se usaron pruebas de cuatro tiempos (es decir, 3, 5, 10 y 20 minutos) para determinar la PC y el  $W'$  a través de los modelos de PC de dos y tres parámetros disponibles en los paquetes de software de análisis (Golden Cheetah, V3.5). Estos fueron (i)  $PC_{trabajo}$  (Moritani et al., 1981): que define la relación trabajo y tiempo  $[(PPM * t) = W' + PC * t]$ , (ii)  $PC_{1/tiempo}$  (Whipp et al., 1982): que define la inversa de la relación potencia y tiempo  $[PPM = W' * (1/t) + PC]$ , (iii)  $PC_{hyp}$  (Morton, 1996): que define la relación de potencia y tiempo, incluyendo el parámetro de potencia máxima ( $P_{max}$ )  $[(W' / PPM - PC) + (W' / PC - P_{max})]$ , y (iv)  $PC_{cheetah}$ : que fundamentan la relación de potencia y tiempo en la bioenergética humana. Además, también se determinó el valor de la PC reportado por la plataforma Stryd (<https://www.stryd.com/powercenter>) (v) ( $PC_{stryd}$ ). Este último utiliza el historial de entrenamiento de los 90 días anteriores (Dearing & Paton, 2022), pero solo se incluyeron

en la plataforma las pruebas de cuatro tiempos. Según el conocimiento de los autores, no se sabe qué modelo de PC descrito en la literatura sigue al  $PC_{cheetah}$  y  $PC_{stryd}$ . Los métodos de ajuste de mínimos cuadrados ( $PC_{trabajo}$ ,  $PC_{1/tiempo}$  y  $PC_{hyp}$ ) y envolvente ( $PC_{cheetah}$ ) se aplicaron en el paquete de software Golden Cheetah (Skiba et al., 2015). Se utilizó el modelo de balance en  $W'$  con los datos reportados por cada modelo de PC para estimar la prueba de tiempo hasta el agotamiento (PTA) a la intensidad realizada en la PT de 4 minutos.

### **Análisis estadístico.**

Las estadísticas descriptivas se representaron como media  $\pm$  (DE) e IC del 95%. La distribución normal de los datos y la homogeneidad de las varianzas se confirmaron mediante las pruebas de Shapiro-Wilk y Levene, respectivamente. Se utilizó un ANOVA unidireccional con la prueba post hoc de Bonferroni para comparar los parámetros estimados (es decir, PC,  $W'$ , PTA). Se utilizó la raíz cuadrada media de los errores (RMSE) entre la PPM ( $W$ ) estimada y registrada para determinar la bondad de ajuste de cada modelo de PC. Se utilizó el análisis de Bland-Altman para determinar el error sistemático y el error aleatorio (diferencia de medias  $\pm 1.96 \cdot DE$ ) (Bland & Altman, 1986). Se utilizó la regresión ordinaria de productos mínimos para determinar si había un error fijo y proporcional (Ludbrook, 2002, 2010). Se consideró un error fijo cuando el IC del 95% de las gráficas de Bland-Altman no contenía 0 (Ludbrook, 2002). Se consideró error proporcional cuando la pendiente de la línea de regresión de los gráficos de Bland-Altman era diferente de 0 (Ludbrook, 2002). El nivel de significación utilizado fue  $p \leq 0.05$ . El análisis de datos se realizó con el paquete de software SPSS (IBM SPSS versión 25.0, Chicago, IL., EE. UU).



#### **Estudio 4:**

***Determinación de la potencia crítica y la  $W'$  en carrera: Precisión de los diferentes modelos de dos puntos al usar métricas de potencia.***



*Determining critical power and  $W'$  in running:  
Accuracy of different two-point models using the  
power metric.*

**Participantes.**

Quince atletas altamente entrenados (8 hombres y 7 mujeres, edad:  $23 \pm 5$  años, altura:  $166 \pm 6$  cm, MC:  $58 \pm 8$  kg, volumen de entrenamiento:  $110 \pm 15$  km por semana; mejor tiempo en 5 km:  $15:29 \pm 00:53$ ) participaron en el estudio (McKay et al., 2022). Todos los atletas fueron informados sobre el propósito de la investigación y los procedimientos del estudio antes de proporcionar el formulario de consentimiento informado por escrito. El protocolo del estudio se adhirió a los principios de la Declaración de Helsinki y fue aprobado por la junta de revisión institucional de la Universidad de Granada (No. 2288/CEIH/2021).

**Diseño de la investigación.**

La CPD de carrera se definió a través de cinco PT (es decir, 3, 4, 5, 10, 20 minutos) realizadas en un período de entrenamiento de tres semanas en un orden aleatorio. Las sesiones de prueba fueron precedidas por dos días de entrenamiento ligero y se realizaron en condiciones ambientales similares ( $18 - 23$  °C y  $30 - 60$  % de humedad), calzado, pista de atletismo y hora del día ( $\pm 1$  hora). Luego, los valores de PC y  $W'$  se determinaron a través de  $PC_{\text{trabajo}}$  (Moritani et al., 1981) y  $PC_{1/\text{tiempo}}$  (Whipp et al., 1982), introduciendo las cinco PT (es decir, 3, 4, 5, 10, 20 minutos) y a través de diferentes combinaciones de pruebas de dos tiempos (es decir, 3-4, 3-5, 3-10, 3-20, 4-5, 4-10, 4-20, 5-10, 5-20, 10-20 minutos).

**PT.**

Los atletas comenzaron las sesiones de evaluación con un calentamiento estandarizado que consistió en diez minutos de carrera a una intensidad de baja a moderada (es decir, la intensidad correspondiente a las sesiones de carrera largas y fáciles). Después de una serie de ejercicios de movilidad dinámica, se realizaron tres series cortas de alta intensidad con dos minutos de descanso para completar el calentamiento. Posteriormente, los atletas comenzaron la PT bajo la instrucción de completar la distancia más larga posible. Se realizaron un total de cinco PT (es decir, 3, 4, 5, 10, 20 minutos) en una pista atlética de 400 metros, durante un período de entrenamiento de tres semanas con al menos 72 horas entre ellas. Para evitar cualquier efecto de entrenamiento, el orden de las PT fue aleatorio. El ritmo se seleccionó automáticamente y se proporcionó información sobre el tiempo de las vueltas cada 400 metros. Después de completar cada PT, se preguntó inmediatamente a los atletas sobre su esfuerzo percibido, utilizando la escala de percepción del esfuerzo de Borg (CR-10) (Borg, 1998).

### **Medidor de potencia.**

Se utilizó el medidor de potencia Stryd (Stryd Summit Power Meter, Boulder, CO, USA) para determinar la producción de potencia absoluta media (W) de la PT. La MC se midió con una báscula (Seca 813; Seca Ltd, Hamburg, Alemania) y se actualizó en el potenciómetro si se observaban diferencias de 1 kg o superiores. Para cada sesión el potenciómetro se anclaba a los cordones del calzado derecho.

### **PC y W'.**

PC y W' fueron definidos mediante  $PC_{1/tiempo}$  (Whipp et al., 1982):

$$[PPM = W'*(1/t) + PC]$$

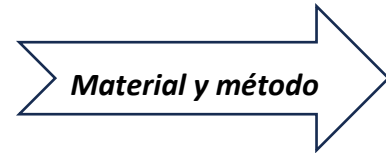
Se define la relación entre PPM y la inversa del tiempo (1/t, en segundos), a través de la  $PC_{trabajo}$  (Moritani et al., 1981).

$$[(PPM*t) = W' + PC*t]$$

Define la relación trabajo (PPM\*t, en julios) y tiempo (t, en segundos). La PC y el W' derivados de las cinco PT (es decir, 3, 4, 5, 10, 20 minutos) se tomaron como valores de referencia y se compararon con los informados por las diferentes combinaciones de dos PT.

### **Análisis estadístico.**

Los datos descriptivos se presentan como media  $\pm$  (DE) e IC del 95%. La distribución normal de los datos fue confirmada por la prueba de Shapiro-Wilk ( $P > 0.05$ ), excepto para el CR-10. El nivel de acuerdo de la PC y el W' se examinó a través del error sistemático, el  $R^2$  y EES obtenidos del análisis de regresión lineal, y el CCI utilizando un modelo mixto de dos vías para acuerdo absoluto (Koo & Li, 2016). Se consideró un nivel de acuerdo aceptable si se cumplían los siguientes criterios: bajo error y EES (PC:  $< 14$  W [valores correspondientes al  $\pm 5\%$  de la media de la PC]; W':  $< 2.0$  kJ [valores correspondientes al  $\pm 10\%$  de la media de W']) (Muniz-Pumares et al., 2019),  $R^2 > 0.90$  y CCI  $> 0.81$  (Koo & Li, 2016). Se utilizó la prueba ANOVA de Friedman para comparar el CR-10 entre PT. Los análisis estadísticos se realizaron utilizando el paquete de software SPSS (IBM SPSS versión 25.0, Chicago, IL, USA). La significación estadística se fijó en  $P \leq 0.05$ .



### **Estudio 5:**

***¿Podemos predecir la carrera de larga duración mediante la producción de potencia? Un asunto de seleccionar las pruebas de predicción y el modelo empírico adecuado.***

-----∞-----

*Can we predict long-duration running power output?  
A matter of selecting the appropriate predicting trials  
and empirical model.*



### **Diseño experimental.**

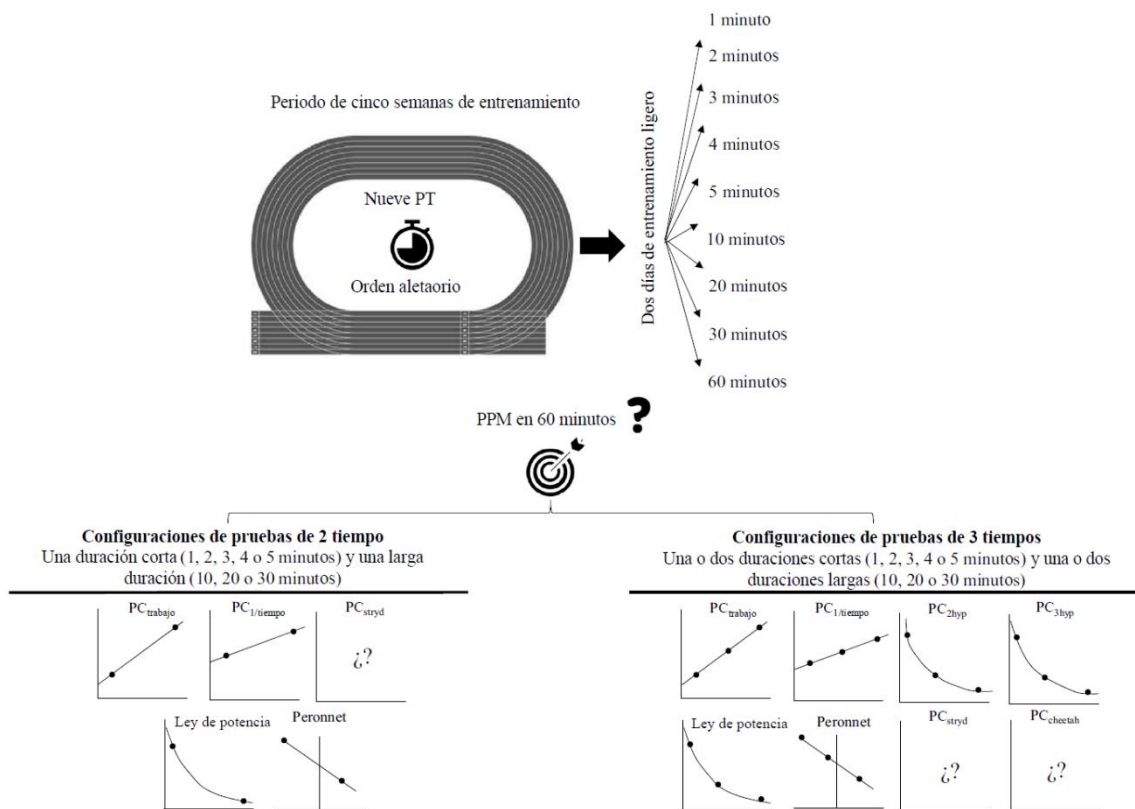
En un período de 5 semanas, los atletas realizaron nueve PT (es decir, 1, 2, 3, 4, 5, 10, 20, 30 y 60 minutos) en un orden aleatorio. Las sesiones de evaluación estuvieron precedidas por dos días de entrenamiento ligero y se realizaron en las mismas condiciones ambientales (18–23 °C y 30–60 % de humedad), calzado, pista de atletismo y hora del día ( $\pm 1$  hora). Luego, sus CPD se definieron a través de diferentes modelos (es decir, PC, Ley de potencia y Peronnet), utilizando diferentes configuraciones de prueba de dos y tres tiempos. Posteriormente, estos modelos se extrapolaron a los 60 minutos para obtener una estimación de la PPM que se comparó con el rendimiento real.

### **Participantes.**

Quince atletas masculinos altamente entrenados (edad:  $23 \pm 5$  años, altura:  $1.66 \pm 0.06$  m, MC:  $58 \pm 8$  kg, volumen de entrenamiento:  $110 \pm 15$  km por semana; mejor tiempo en 5 km:  $15:29 \pm 00:53$ ) participaron en el estudio (McKay et al., 2022). Todos los atletas fueron informados sobre el propósito de la investigación y los procedimientos del estudio antes de firmar un formulario de consentimiento informado por escrito. El protocolo del estudio se adhirió a los principios de la Declaración de Helsinki y se obtuvo la aprobación ética por parte de la junta de revisión institucional de la Universidad de Granada (No. 2288/CEIH/2021).

### **PT.**

Las PT se realizaron en una pista de atletismo de 400 m. Los atletas comenzaron las sesiones de evaluación con un calentamiento estandarizado, que constaba de 10 minutos de carrera a una intensidad entre baja y moderada (es decir, la intensidad correspondiente a las sesiones de carrera larga y fácil). Después de una serie de ejercicios de movilidad dinámica, se realizaron tres series cortas de alta intensidad con 2 minutos de descanso como parte del calentamiento específico. Luego, los atletas comenzaron la PT bajo la instrucción de completar la distancia más larga posible. El ritmo fue autoseleccionado y se entregó retroalimentación del tiempo en cada vuelta de los 400 m. Para evitar efecto del entrenamiento, se realizaron pruebas de dos tiempos aleatoriamente cada semana, excepto la PT de 60 minutos (es decir, cinco configuraciones diferentes: 1–30, 2–20, 3–10, 4–5, 60 minutos, **Figura 8**).



**Figura 8.** Diseño experimental del estudio 5. PT: Prueba de tiempo; PPM: Producción de potencia media.

### Medidor de potencia.

Se usó el medidor de potencia de carrera Stryd (Stryd Summit Power Meter, Boulder, CO, EE. UU.) para determinar la PPM (W) de cada PT. El medidor de potencia Stryd ha demostrado una alta repetibilidad y nivel de acuerdo con el trabajo externo y el  $VO_2$  en diferentes entornos (es decir, interiores y exteriores) y condiciones (es decir, velocidad, peso corporal y pendiente) (Cerezuela-Espejo, Hernández-Belmonte, Courel-Ibáñez, Conesa-Ros, Mora-Rodríguez, et al., 2020; García-Pinillos et al., 2019; Imbach et al., 2020; Ruiz-Alias et al., 2022; Taboga et al., 2021). La MC se midió con una báscula (Seca 813; Seca Ltd., Hamburgo, Alemania) y se actualizó diariamente en el potenciómetro. Este siempre estaba anclado a los cordones del calzado derecho.

### Modelización de la CPD.

Los modelos de PC lineales y no lineales disponibles en el paquete de software Golden Cheetah se utilizaron para modelar la curva de potencia-duración. Estos fueron el (i)  $PC_{trabajo}$  (Moritani et al., 1981) que define la relación trabajo ( $PPM * t$ ) y tiempo (t):

$$(PPM * t) = W' + PC * t$$

Siendo  $W'$  la capacidad de trabajo sobre la PC, el (ii)  $PC_{1/tiempo}$  (Whipp et al., 1982) que define la PPM y la relación inversa del tiempo:

$$PPM = W' * (1/t) + PC$$

El (iii)  $PC_{2hyp}$  (Hill, 1927): que define la relación de potencia y tiempo:

$$t = W'(PPM * PC)$$

El (iv)  $PC_{3hyp}$  (Morton, 1996) que define la relación entre potencia y tiempo, incluido el parámetro de potencia máxima ( $P_{max}$ ):

$$t = (W'/PPM - PC) + (W/P_{max} - PC)$$

El (v)  $PC_{cheetah}$  (Liversedge, 2023a, b) que es un modelo propietario.

Los métodos de ajuste de mínimos cuadrados ( $PC_{trabajo}$ ,  $PC_{1/tiempo}$ ,  $PC_{2hyp}$ ,  $PC_{3hyp}$  y  $PC_{cheetah}$ ) se aplicaron de acuerdo con las instrucciones del fabricante (Liversedge, 2023a, b). Además de los modelos antes mencionados disponibles en Golden Cheetah, también se determinó el modelo exclusivo de Stryd no revelado (vi)  $PC_{stryd}$  (Dearing & Paton, 2022; Stryd, 2023). Este se informa automáticamente en el sitio web de Stryd y utiliza de forma predeterminada los datos de entrenamiento de los últimos 90 días, aunque para este modelo solo se incluyeron las diferentes configuraciones de prueba de dos y tres tiempos.

El modelo de ley de potencia (vii) (Kennelly, 1906):

$$PPM * t = k * tg$$

Se aplicó en una hoja de cálculo de excel, donde  $k$  es una constante que representa la  $P_{max}$  durante un segundo y  $g$  es un exponente que indica el decaimiento de la potencia con el aumento del tiempo. Asimismo, el modelo de Peronnet y Thibault (viii) (1989):

$$PO = PAM - E * LN(t/420)$$

Se determinó en una hoja de cálculo de excel, donde la PAM es la potencia aeróbica máxima alcanzada teóricamente a los 420 s, y a partir de esta, la potencia disminuye como  $E$  con el aumento del tiempo. Las CPD se definió a través de diferentes configuraciones de prueba de dos tiempos (es decir, una de corta duración [1, 2, 3, 4 o 5 minutos] y una de larga duración [10, 20 o 30 minutos]) usando el  $PC_{trabajo}$ ,  $PC_{1/tiempo}$ ,  $PC_{stryd}$ , Ley de potencia y modelos Peronnet. Configuraciones de prueba de tres tiempos (es decir, una o dos de corta duración [1, 2, 3, 4 o 5 minutos] y una o dos de larga duración [10, 20 o 30 minutos]) también se aplicaron a los modelos mencionados y al  $PC_{2hyp}$ ,  $PC_{3hyp}$  y  $PC_{cheetah}$ . Luego, estos modelos se extrapolaron a 60 minutos para obtener una estimación de la PPM.

### **Análisis estadístico.**

Los datos descriptivos se presentan como media  $\pm$  (DE) e IC del 95%. La distribución normal de los datos y la homogeneidad de las varianzas se confirmaron mediante las pruebas de Shapiro-Wilk y Levene, respectivamente. La validez de los diferentes modelos

para predecir la PPM de 60 minutos, utilizando configuraciones de prueba de dos y tres tiempos se examinó a través de los gráficos de Bland-Altman (Bland & Altman, 1986). Se utilizó el modelo de regresión de mínimos productos ordinarios para determinar si había un error fijo y proporcional (Ludbrook, 2002, 2010). Se determinó un error fijo cuando el IC del 95% de los gráficos de Bland-Altman no contenía 0 (Ludbrook, 2002). Se consideró un error proporcional cuando la pendiente de la línea de regresión de los gráficos de Bland-Altman era diferente de 0 (Ludbrook, 2002). Se determinó una estimación aceptable cuando el IC del 95 % del error medio fue inferior al 5 % de la PPM en 60 minutos. El análisis de datos se realizó con el paquete de software SPSS (IBM SPSS versión 25.0, Chicago, IL., EE. UU.).



## **Estudio 6:**

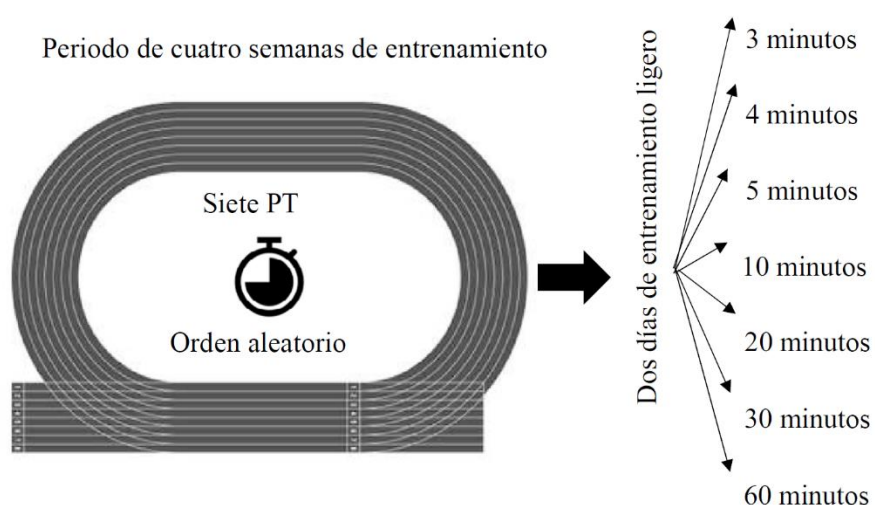
***¿Podemos predecir mediante la producción de potencia las carreras de larga duración? Validación de la potencia crítica, ley de potencia y modelos logarítmicos.***

-----∞-----

*Can we predict long durations running power output?  
Validity of the critical power, power law, and  
logarithmic models.*

### Diseño experimental del problema.

En un período de entrenamiento de 4 semanas, los atletas realizaron 7 pruebas de tiempo (es decir, 3, 4, 5, 10, 20, 30 y 60 minutos) en orden aleatorio. Las sesiones de evaluación estuvieron precedidas por 2 días de entrenamiento ligero y se realizaron en las mismas condiciones ambientales (18–23 °C y 30–60 % de humedad), calzado, pista de atletismo y hora del día ( $\pm 1$  hora). Luego, la CPD se definió a través de diferentes modelos (es decir, PC, ley de potencia y Peronnet) utilizando las pruebas de tiempo de 3, 4, 5, 10 y 20 minutos. Posteriormente, estos modelos se extrapolaron a los 30 y 60 minutos para obtener una estimación de la PPM y compararlos con el rendimiento real (**figura 9**).



**Figura 9.** Diseño experimental del estudio 6. PT: prueba de tiempo.

### Participantes.

Quince atletas altamente entrenados (edad:  $23 \pm 5$  años, altura:  $166 \pm 6$  cm, MC:  $58 \pm 8$  kg, volumen de entrenamiento:  $110 \pm 15$  km por semana; mejor tiempo en 5 km:  $15:29 \pm 00:53$ ) participaron en el estudio (McKay et al., 2022). Todos los atletas fueron informados sobre el propósito de la investigación y los procedimientos del estudio antes de firmar un formulario de consentimiento informado por escrito. El protocolo del estudio se adhirió a los principios de la Declaración de Helsinki y fue aprobado por el consejo de revisión institucional de la Universidad de Granada (No. 2288/CEIH/2021).

### PT.

Los atletas comenzaron las sesiones de evaluación con un calentamiento estandarizado que consistió en diez minutos de carrera a una intensidad de baja a moderada (es decir, la intensidad correspondiente a las sesiones de carrera largas y fáciles).

Después de una serie de ejercicios de movilidad dinámica, se realizaron tres series cortas de alta intensidad con dos minutos de descanso para completar el calentamiento. Posteriormente, los atletas comenzaron la PT bajo la instrucción de completar la distancia más larga posible. El ritmo fue autoseleccionado y se proporcionó información sobre el tiempo de las vueltas cada 400 metros. Para evitar cualquier efecto del entrenamiento, se realizaron pruebas de 2 tiempos al azar cada semana, excepto la PT de 60 minutos (p. ej., 5–10, 3–30, 4–20 y 60 minutos).

### **Medidor de potencia.**

Se usó el medidor de potencia de carrera Stryd (Stryd Summit Power Meter, Boulder, CO, EE. UU.) para determinar la PPM (W) de cada PT. El medidor de potencia Stryd ha demostrado una alta repetibilidad y nivel de acuerdo con el trabajo externo y el  $VO_2$  en diferentes entornos (es decir, interiores y exteriores) y condiciones (es decir, velocidad, peso corporal y pendiente) (Cerezuela-Espejo, Hernández-Belmonte, Courel-Ibáñez, Conesa-Ros, Mora-Rodríguez, et al., 2020; García-Pinillos et al., 2019; Imbach et al., 2020; Ruiz-Alias et al., 2022; Taboga et al., 2021). La MC se midió con una báscula (Seca 813; Seca Ltd, Hamburgo, Alemania) y se actualizó diariamente en el potenciómetro. Este siempre estaba anclado a los cordones del calzado derecho.

### **Modelado de la CPD.**

Los datos de potencia de las PT de 3, 4, 5, 10 y 20 minutos se exportaron del sitio web de Stryd, al paquete de software Golden Cheetah (versión 3.5, código abierto, <https://www.goldencheetah.org/>). Los modelos de PC de 2 y 3 parámetros disponibles en este software, se utilizaron para modelar la CPD. Estos fueron el (i)  $PC_{trabajo}$  que define la relación trabajo ( $PPM * t$ ) y tiempo ( $t$ ):

$$(PPM * t) = W' + PC * t$$

Siendo  $W'$  la capacidad de trabajo sobre la PC, (ii)  $PC_{1/tiempo}$  (Whipp et al., 1982) que define la PPM y la relación inversa del tiempo:

$$PPM = W' * (1/t) + PC$$

(iii)  $PC_{2hyp}$  (Hill, 1927) que define la relación de potencia y tiempo:

$$t = W' / (PPM * PC)$$

(iv)  $PC_{3hyp}$  (Imbach et al., 2020) que define la relación entre potencia y tiempo, incluido el parámetro de  $P_{max}$ :

$$t = (W' / PPM - PC) + (W' / P_{max} - PC)$$

(v)  $PC_{cheetah}$  (Liversedge, 2023): que es un modelo patentado no revelado. Los métodos de ajuste de mínimos cuadrados ( $PC_{trabajo}$ ,  $PC_{1/tiempo}$ ,  $PC_{2hyp}$  y  $PC_{3hyp}$  y  $PC_{cheetah}$ ) se aplicaron de acuerdo con las instrucciones del fabricante. Además, de los modelos disponibles en Golden Cheetah, también se determinó el modelo patentado de Stryd no revelado (vi)  $PC_{stryd}$  (Dearing & Paton, 2022). Este modelo de PC se calcula automáticamente en el sitio web de Stryd y utiliza de forma predeterminada los datos de entrenamiento de los últimos 90 días y para este modelo solo se incluyeron las 5 PT. Se aplicó el modelo de ley de potencia (vii) (Kennelly, 1906) en una hoja de cálculo de excel, donde K es una constante que representa la Pmax para 1 segundo, y g es un exponente que indica el decaimiento de la potencia con el aumento del tiempo:

$$PPM * t = k * t^g$$

Asimismo, se determinó el modelo (viii) Peronnet y Thibault (1989) en una hoja de cálculo de excel, donde la PAM es la potencia aeróbica máxima teóricamente alcanzada a los 420 segundos, a partir de la cual la potencia disminuyo como E con el aumento de tiempo:

$$PPM = PAM - E * LN(t/420)$$

Posteriormente, estos modelos se extrapolaron a los 30 y 60 minutos para obtener una estimación de la PPM.

### **Análisis estadístico.**

Los datos descriptivos se presentan como media  $\pm$  (DE) e IC de 95%. La distribución normal de los datos y la homogeneidad de las varianzas se confirmaron mediante las pruebas de Shapiro-Wilk y Levene, respectivamente. La validez de los diferentes modelos para predecir la producciones de potencia de larga duración (es decir, 30 y 60 minutos) se examinó a través de una prueba de t student para muestras pareadas, error sistemático y la pendiente de la línea de regresión de los gráficos de Bland-Altman (Bland & Altman, 1986). Se utilizó el modelo de regresión de mínimos productos ordinarios para determinar si había un error fijo y proporcional (Ludbrook, 2002, 2010). Se determinó un error fijo cuando el IC del 95 % de los gráficos de Bland-Altman no contenía 0 (Ludbrook, 2002). Se consideró un error proporcional cuando la pendiente de la línea de regresión de Bland Altman era diferente de 0 (Ludbrook, 2002). El nivel de significación utilizado fue  $p > 0.05$ . El análisis de datos se realizó con el paquete de software SPSS (IBM SPSS versión 25.0, Chicago, IL).





## 4. RESULTADOS

Los principales resultados de cada estudio se muestran a modo de resumen en la **tabla 2**. La sección de resultados se presenta agrupando los distintos estudios para cada una de las temáticas que componen la presente Tesis Doctoral:

**Tabla 2.** Resumen de los principales resultados obtenidos en cada uno de los seis estudios que componen la presente Tesis Doctoral.

| Estudio  | Resultados  |
|--|---|
| <i>Running functional threshold versus critical power: Same concept but different values.</i>  | El análisis de regresión lineal reveló una estimación aceptable del UPF para las PT de 10, 20 y 30 minutos ( $EES \leq 12.27$ W) correspondiente a un FCI de 85%, 90% y 95%, respectivamente. Sólo se observó una estimación de PC aceptable para la PT de 20 minutos ( $EES = 6.67$ W), correspondiente a un FCI del 95%. El PC se localizó en la PPM de 30 min ( $1.0 [-5.1$ a $7.1]$ W), que estaba por encima del UPF ( $14 [7.0$ a $21]$ W).   |
| <i>9/3-minute running critical power test: Mechanical threshold location with respect to ventilatory thresholds and maximum oxygen uptake.</i> | El UA, PCR y la PC se localizaron en el 73% (5.41%), 86.82% (3.85%) y 88.71% (5.84%) del $VO_{2max}$ , respectivamente, con un $VO_{2max}$ de $66.3 (7.20)$ ml/kg/min. No se obtuvieron diferencias significativas entre PC y PCR en ninguna de sus unidades (es decir, en W por kilogramo y mililitros por kilogramo por minuto; $p \geq 0.184$ ).   |
| <i>Critical power in endurance runners: A comparison of the estimated parameters reported by different theoretical models.</i>                 | Se informaron diferencias significativas ( $p < 0.001$ ) entre todos los modelos para los parámetros estimados (PC y $W'$ ). El $PC_{cheetah}$ se asoció con la PPM desarrollada entre 10 y 20 minutos, el $PC_{trabajo}$ a 20 minutos y el $PC_{1/tiempo}$ , $PC_{hyp}$ y $PC_{stryd}$ a 30 minutos. El $W'$ reportado por cada modelo sobrestimó el tiempo real de 4 minutos hasta el agotamiento, siendo el $PC_{1/tiempo}$ el único modelo válido ( $p = 0.233$ , error: $0.40 [0.06$ a $0.75]$ minutos). |

|   |  |
|---|--|
| <p><i>Determining critical power and W' in running: Accuracy of different two-point models using the power metric.</i></p>                    | <p>Para ambos modelos de PC, la combinación válida más corta fue de 3-10 minutos, mientras que la de 3-20, 4-20 y 5-20 minutos mostraron el mayor nivel de acuerdo. La W' presentó un EES alto para PC<sub>trabajo</sub> (14.1 ± 5.2%) y PC<sub>1/tiempo</sub> (13.8 ± 6.2%) al utilizar las cinco PT.</p>   |
| <p><i>Can we predict long-duration running power output? A matter of selecting the appropriate predicting trials and empirical model.</i></p> | <p>La configuración válida más corta (IC del 95% &lt; 12 W) para el PC<sub>trabajo</sub> y PC<sub>1/tiempo</sub> fue de 3-30 minutos (Error: 8.3 [4.9 a 11.7] W), para PC<sub>stryd</sub> fue de 10-30 minutos (Error: 4.2 [- 1.0 a 9.4] W), para PC<sub>2hyp</sub>, PC<sub>3hyp</sub> y PC<sub>cheetah</sub> fue de 3-5-30 minutos (Error &lt; 5.7 W), para la ley de potencia fue de 1-3-10 minutos (- 1.0 [- 11.9 a 9.9] W) y para Peronnet fue de 4-20 minutos (- 3.0 [- 10.2 a 4.3] W).</p>   |
| <p><i>Can we predict long durations running power output? Validity of the critical power, power law, and logarithmic models.</i></p>          | <p>PC<sub>2hyp</sub>, PC<sub>3hyp</sub>, PC<sub>stryd</sub> y PC<sub>cheetah</sub> proporcionaron estimaciones válidas de PPM en 30 y 60 minutos (≤ 2.6%). La PC<sub>trabajo</sub> y la PC<sub>1/tiempo</sub> presentaron un gran error de predicción a los 30 minutos (≥ 4.4%), que aumentó a los 60 minutos (≥ 8.1 %). La ley de potencia y los modelos de Peronnet aumentaron progresivamente su error de predicción en la duración más larga (30 minutos: ≤ -1.6 %; 60 minutos: ≤ -6,6%), lo que estuvo condicionado por la capacidad de resistencia de los atletas.</p> |

PT: Prueba de tiempo; UPF: Umbral de potencia funcional; EES: Error estándar de estimación; W: Vatios; FCI: Factor de corrección individual; PC: Potencia crítica; PPM: Producción de potencia media; UA: Umbral anaeróbico; PCR: Punto de compensación respiratoria; VO<sub>2</sub>max: Consumo máximo de oxígeno; W': Capacidad de trabajo por encima de PC; IC: Intervalo de confianza.

**4.1. Tópico 1: delimitación conceptual de la PC en carrera de distancia.**



### **Estudio 1:**

***Umbral de potencia funcional versus potencia crítica:***

***Conceptos iguales pero diferentes valores.***

-----∞-----

***Running functional threshold versus critical power:***

***Same concept but different values.***

**Tabla 3.** Datos descriptivos (media  $\pm$  DE) de las diferentes pruebas de tiempo (PT) presentadas.

| PT<br>(minutos) | PPM absoluta<br>(W) | PPM relativa<br>(W·kg <sup>-1</sup> ) | Velocidad de<br>carrera (km·h <sup>-1</sup> ) | Distancia<br>(m) |
|-----------------|---------------------|---------------------------------------|---|------------------|
| 1               | 371 $\pm$ 59        | 6.34 $\pm$ 0.48                       | 23.4 $\pm$ 1.1                                | 390 $\pm$ 19     |
| 2               | 355 $\pm$ 65        | 6.05 $\pm$ 0.48                       | 21.9 $\pm$ 1.7                                | 730 $\pm$ 55     |
| 3               | 346 $\pm$ 57        | 5.92 $\pm$ 0.57                       | 20.6 $\pm$ 1.5                                | 1023 $\pm$ 69    |
| 4               | 321 $\pm$ 56        | 5.47 $\pm$ 0.44                       | 19.8 $\pm$ 1.4                                | 1322 $\pm$ 91    |
| 5               | 314 $\pm$ 64        | 5.33 $\pm$ 0.40                       | 19.1 $\pm$ 1.4                                | 1596 $\pm$ 114   |
| 10              | 292 $\pm$ 58        | 4.96 $\pm$ 0.50                       | 18.0 $\pm$ 1.3                                | 3002 $\pm$ 219   |
| 20              | 275 $\pm$ 58        | 4.67 $\pm$ 0.44                       | 17.7 $\pm$ 1.4                                | 5879 $\pm$ 482   |
| 30              | 260 $\pm$ 55        | 4.42 $\pm$ 0.48                       | 17.3 $\pm$ 1.4                                | 8643 $\pm$ 713   |
| 50              | 253 $\pm$ 55        | 4.30 $\pm$ 0.51                       | 16.7 $\pm$ 1.1                                | 13905 $\pm$ 949  |
| 60              | 247 $\pm$ 51        | 4.20 $\pm$ 0.53                       | 16.5 $\pm$ 1.2                                | 16499 $\pm$ 1242 |

PPM: Producción de potencia media.

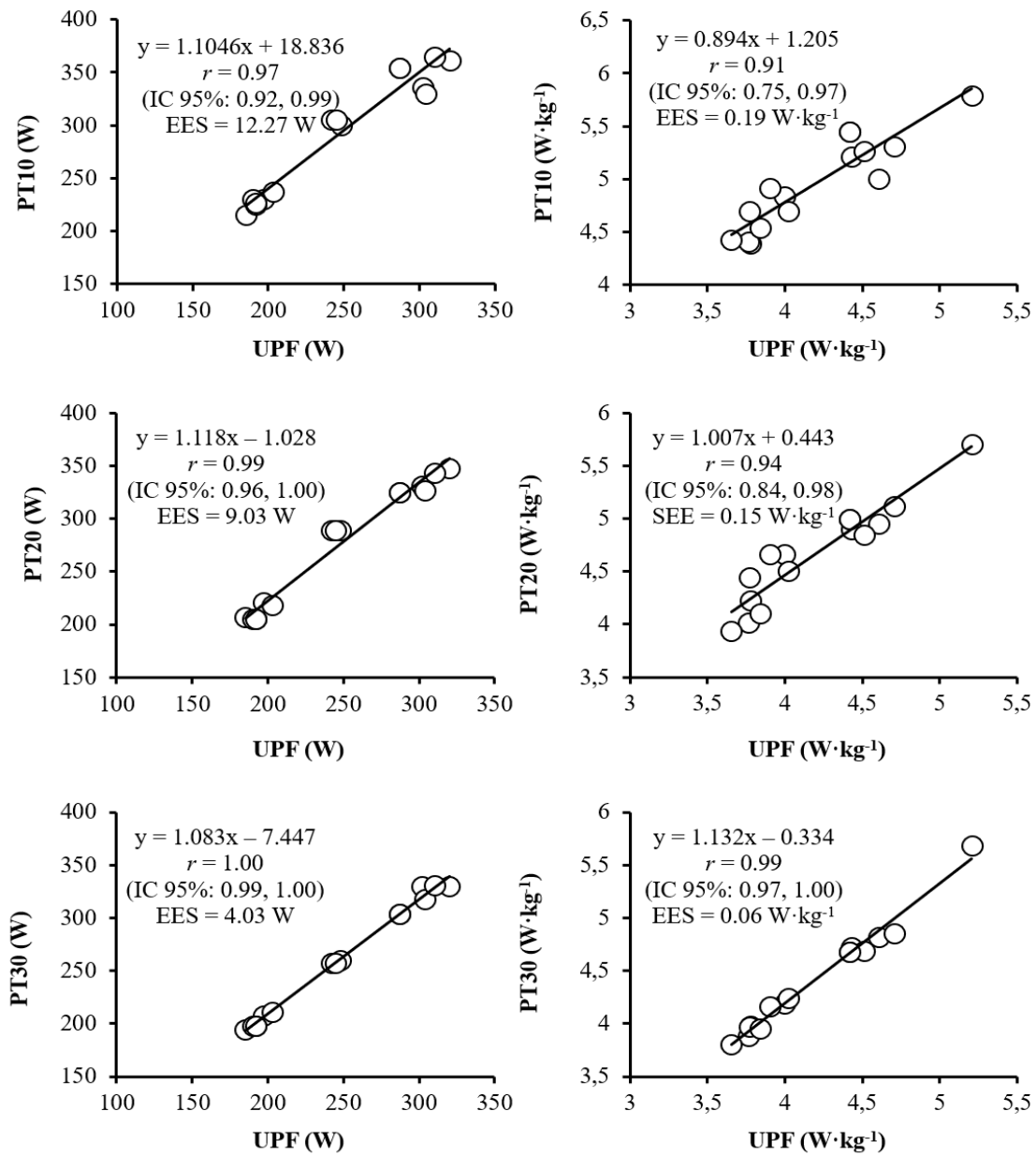
#### **UPF estimado a partir de las PT cortas.**

Se observó una estimación del UPF aceptable para las PT10, PT20 y PT30 ( $r \geq 0.91$ , EES  $\leq 12.27$  W y  $0.19$  W·kg<sup>-1</sup>) (**figura 10**) correspondiente a un factor de corrección de 85%, 90% y 95%, respectivamente (**tabla 3**). El EES se redujo progresivamente con el aumento de la duración (PT10:  $12.27$  W y  $0.19$  W·kg<sup>-1</sup>; PT20:  $9.03$  W y  $0.15$  W·kg<sup>-1</sup>; PT30:  $4.03$  W y  $0.06$  W·kg<sup>-1</sup>).

**Tabla 4.** Nivel de acuerdo de la producción de potencia media (PPM) obtenida a través de las diferentes pruebas de tiempo (PT) con respecto al umbral de potencia funcional (UPF) y la potencia crítica (PC).

| PT<br>(minutos) | Parámetros   | Error<br>(IC 95%) (W) | FCI<br>(IC 95%) (%) |
|-----------------|--------------|-----------------------|---------------------|
| 10              | Absoluto UPF | -44.7 (-53 a -37.4)   | 85 (83 a 87)        |
|                 | Relativo UPF | -0.8 (-0.9 a -0.7)    | 85 (83 a 87)        |
| 20              | Absoluto UPF | -28 (-35 a -22)       | 90 (88 a 92)        |
|                 | Relativo UPF | -0.5 (-0.8, -0.2)     | 90 (88 a 92)        |
| 30              | Absoluto UPF | -13 (-16 a -10)       | 95 (94 a 96)        |
|                 | Relativo UPF | -0.2 (-0.3 a -0.2)    | 95 (94 a 96)        |
| 10              | Absoluto PC  | -30 (-37 a -24)       | 89 (87 a 91)        |
|                 | Relativo PC  | -0.5 (-0.6 a -0.4)    | 89 (87 a 91)        |
| 20              | Absoluto PC  | -14 (-18 a -10)       | 95 (94 a 96)        |
|                 | Relativo PC  | -0.2 (-0.3 a -0.2)    | 95 (94 a 96)        |
| 30              | Absoluto PC  | 1.0 (-5.1 a 7.1)      | 100 (98 a 103)      |
|                 | Relativo PC  | 0.0 (-0.1 a 0.1)      | 100 (98 a 103)      |
| UPF             | Absoluto PC  | 14 (7.0 a 21)         | 106 (103 a 108)     |
|                 | Relativo PC  | 0.2 (-0.1 a 0.3)      | 106 (103 a 108)     |

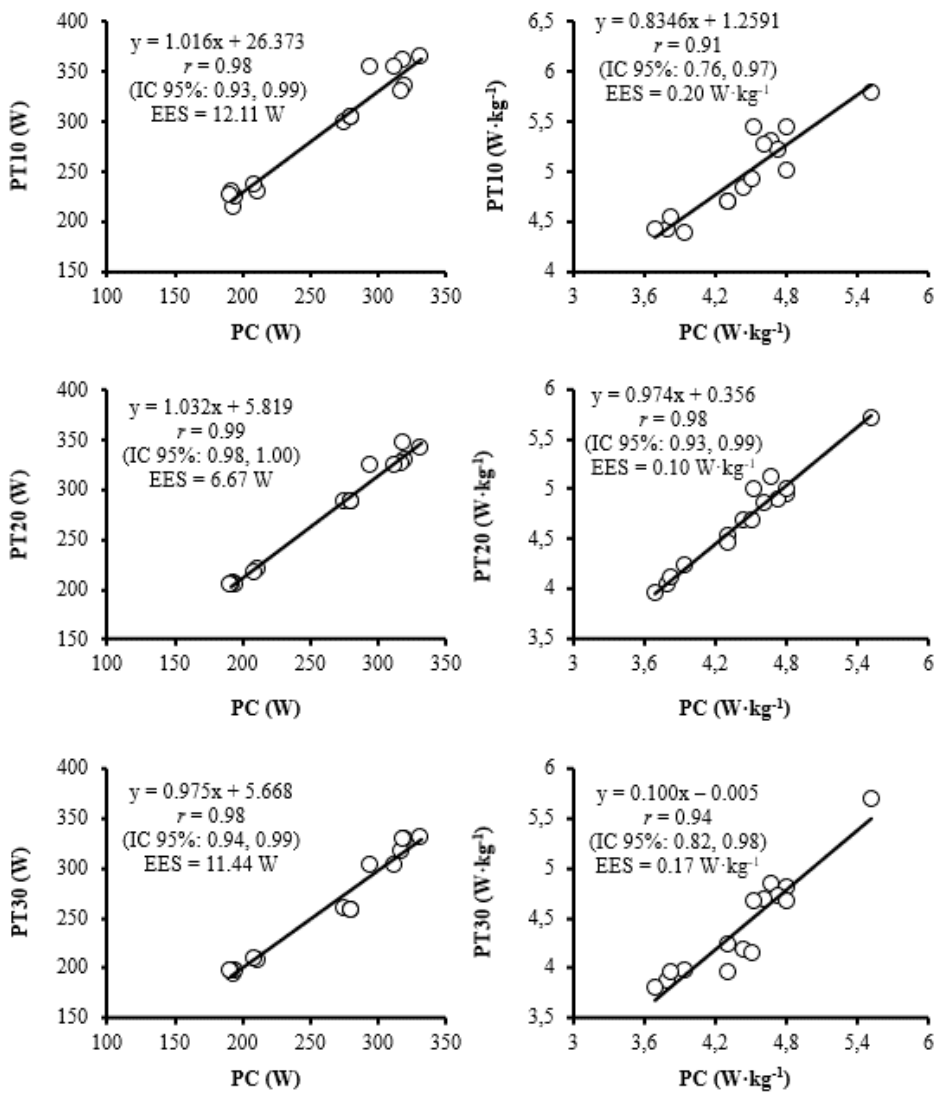
IC 95%: Intervalo de confianza del 95%; FCI: Factor de corrección Individual.



**Figura 10.** Asociación entre la producción de potencia media (PPM) en valores absolutos (paneles de la izquierda) y relativos (paneles de la derecha), obtenidos a través de las diferentes pruebas de tiempo (PT [PT10, PT20 y PT30]) con respecto al umbral de potencia funcional (UPF). Se representan las ecuaciones de regresión, los coeficientes de correlación de Pearson ( $r$ ) con sus correspondientes intervalos de confianza del 95% (IC del 95%) y los errores estándar de estimación (EES).

**PC estimada a partir de PT cortas.**

Solo se observó una estimación de PC aceptable para el PT20 ( $r \geq 0.98$ , EES = 6.67 W y 0.10 W·kg<sup>-1</sup>) (figura 11) correspondiente a un FCI del 95%.



**Figura 11.** Asociación entre la producción de potencia media (PPM) absoluta (paneles de la izquierda) y relativa (paneles de la derecha), obtenida a través de las diferentes pruebas de tiempo (PT [PT10, PT20 y PT30]) con respecto a la PC. Se representan las ecuaciones de regresión, los coeficientes de correlación de Pearson ( $r$ ) con sus correspondientes IC del 95 % y los EES.

#### **Localización de la PC y el UPF en la CPD.**

La PC se localizó en la PT30 (1.0 [-5.1 a 7.1] W y 0.0 [-0.1 a 0.1]  $W \cdot kg^{-1}$ ), que es por encima del UPF (14 [7.0 a 21] W y 0.2 [0.1 a 0.3]  $W \cdot kg^{-1}$ ).



## **Estudio 2:**

***Prueba de potencia crítica 9/3 minutos en carrera:  
Localización del umbral mecánico con respecto a los  
umbrales ventilatorios y consumo de oxígeno  
máximo.***

-----∞-----

*9/3-Minute running critical power test: Mechanical  
threshold location with respect to ventilatory  
thresholds and maximum oxygen uptake.*



**Prueba de PC 9/3.**

La **tabla 5** muestra los datos de los atletas durante la prueba de PC 9/3 de Stryd. En promedio, los sujetos completaron las PT de 9 y 3 minutos a 17.60 (1.48) y 19.80 (1.70) km/h, respectivamente, que implicaba una VC de 16.60 (1.58) km/h. Estas velocidades correspondieron a 4.91 (0.42) y 5.39 (0.44) W/kg en las PT de 9 y 3 minutos, y 4.67 (0.42) W/kg en la PC estimada. El  $R^2$  obtenido en las regresiones lineales que se aplicaron entre la velocidad de carrera (en kilómetros por hora) y la potencia (en W por kilogramo) durante la PEG fue de 0.99 (0.01).

**Tabla 5.** Potencia crítica (PC) y velocidad crítica (VC) determinadas por la prueba 9/3 de Stryd, media (DE).

|                 | 9'            | 3'            |
|-----------------|---------------|---------------|
| Distancia (km)  | 2.64 (0.22)   | 0.99 (0.08)   |
| Ritmo (km/h)    | 17.60 (1.48)  | 19.80 (1.70)  |
| Potencia (W/kg) | 4.91 (0.42)   | 5.39 (0.44)   |
| PC (%)          | 105.10 (1.27) | 115.41 (3.81) |
| PC (W/kg)       |               | 4.67 (0.42)   |
| VC (km/h)       |               | 16.60 (1.58)  |
| W' (kJ)         |               | 8.91 (2.04)   |

W': Capacidad de trabajo por encima de PC.

**PEG.**

La **tabla 6** muestra los datos reportados por los atletas durante la PEG, donde el UA y la PCR se localizaron al 72.86% (6.01%) y 86.40% (4.34%) del  $VO_{2max}$ , respectivamente, con un  $VO_{2max}$  de 66.3 (7.20) mL/kg/min.

**Tabla 6.** Localización de la potencia crítica (PC), umbrales ventilatorios (umbral anaeróbico [UA] y punto de compensación respiratoria [PCR]) y consumo máximo de oxígeno ( $VO_{2max}$ ).

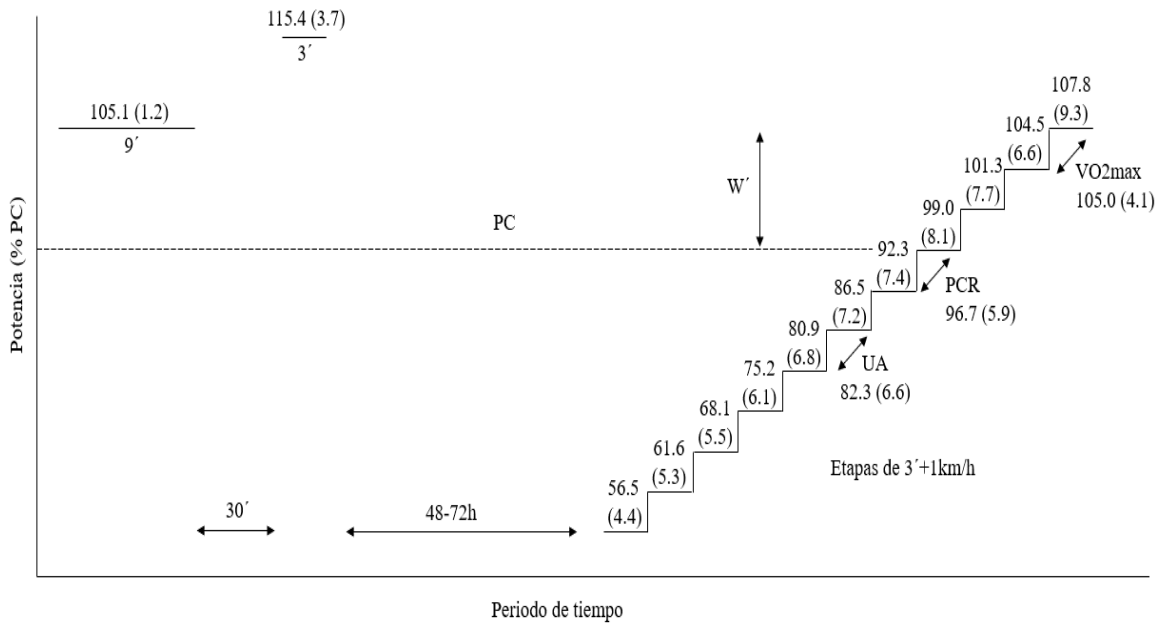
|               | UA                        | PCR          | PC           | $VO_{2max}$                | <i>p</i> |
|---------------|---------------------------|--------------|--------------|----------------------------|----------|
| ml/kg/min     | 48.31 (6.61) <sup>a</sup> | 57.35 (7.15) | 58.83 (7.56) | 66.33 (7.20) <sup>a</sup>  | <0.001   |
| % $VO_{2max}$ | 72.86 (6.01) <sup>a</sup> | 86.40 (4.34) | 88.71 (5.84) | 100                        | <0.001   |
| W/kg          | 3.88 (0.42) <sup>a</sup>  | 4.56 (0.42)  | 4.72 (0.42)  | 4.95 (0.36) <sup>a</sup>   | <0.001   |
| % PC          | 82.27 (6.57) <sup>b</sup> | 96.72 (5.95) | 100          | 105.04 (4.08) <sup>b</sup> | <0.001   |

<sup>a</sup> Diferencias significativas con PC. <sup>b</sup> Diferencias significativas con PCR.

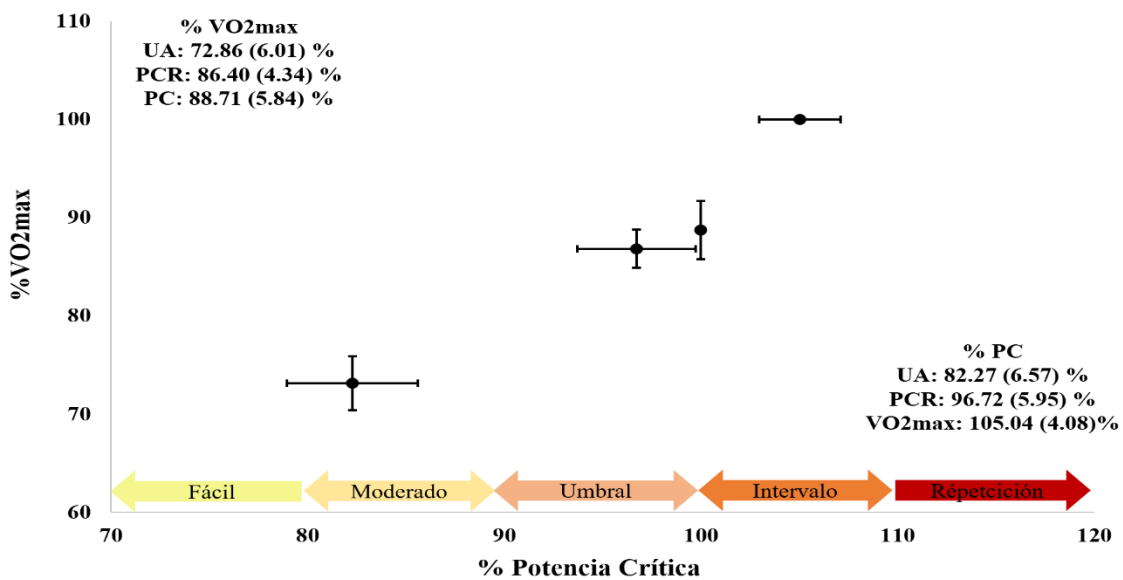
**Localización de la PC y los umbrales ventilatorios (UV).**

El  $R^2$  obtenido por las regresiones lineales aplicadas entre el  $VO_2$  (en mililitros por kilogramo por minuto) y la potencia (en W por kilogramo) durante la PEG fue de 0.97 (0.01). La PC se estableció en 58.83 (7.56) mL/kg/min a 88.71% (5.84%) del  $VO_{2max}$ . El análisis de varianza de medidas repetidas de 1 vía mostró diferencias significativas entre umbrales ( $P < 0.05$ ), pero no entre PC y PCR en ninguna de sus unidades (es decir, en W por kilogramo y

mililitros por kilogramo por minuto) ( $P \geq 0.184$ ) (tabla 6). Los resultados obtenidos en las pruebas de PC en Stryd y la PEG se ilustran en las figuras 12 y 13.

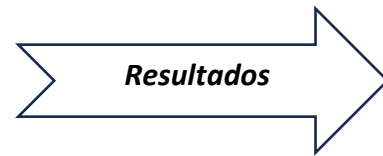


**Figura 12.** Ilustración de la producción de potencia media (PPM) en las pruebas de tiempo (PT) de 9/3 minutos y cada etapa de la PEG relacionada con la PC. UA: Umbral anaeróbico; PC: Potencia crítica; PCR: Punto de compensación respiratoria; VO<sub>2</sub>max: Consumo máximo de oxígeno; W': Capacidad de trabajo por encima de PC.



**Figura 13.** Localización del umbral anaeróbico (UA), punto de compensación respiratoria (PCR), potencia crítica (PC) y consumo de oxígeno (VO<sub>2</sub>max) con respecto a las zonas de entrenamiento de Stryd.

**4.2. Tópico 2: análisis metodológico de la CPD para determinación de W' y PC.**



### **Estudio 3:**

***Potencia crítica en corredores de resistencia: Una comparación de parámetros estimados y reportados por diferentes modelos teóricos.***

-----∞-----

*Critical power in endurance runners: A comparison of the estimated parameters reported by different theoretical models.*

### Modelos de PC.

La **tabla 7** proporciona los datos descriptivos de los parámetros estimados reportados por cada modelo de PC. El promedio de RMSE varió de 2.5 a 29.3 W. Los 15 atletas mostraron pobre bondad de ajuste con la PC<sub>hyp</sub> (**tabla 8**). Por otro lado, los 15 atletas mostraron mejor bondad de ajuste con la PC<sub>1/tiempo</sub>.

**Tabla 7.** Valores de Potencia crítica (PC) y el trabajo por encima de la PC (W') del modelado de la curva potencia duración (CPD) (es decir, pruebas de cuatro tiempos: 3, 5, 10, 20 minutos), a través de modelos PC de dos y tres parámetros.

| Modelo                 | PC (W)   | W' (kJ)    | RMSE (W)   |
|------------------------|----------|------------|------------|
| PC <sub>trabajo</sub>  | 278 (62) | 20.7 (2.4) | 14.2 (2.9) |
| PC <sub>1/tiempo</sub> | 265 (59) | 14.7 (1.7) | 2.5 (1.8)  |
| PC <sub>hyp</sub>      | 259 (58) | 30.7 (2.3) | 29.3 (1.7) |
| PC <sub>stryd</sub>    | 264 (58) | --         | --         |
| PC <sub>cheetah</sub>  | 285 (62) | 28.4 (2.0) | 4.5 (1.8)  |

RMSE: Raíz cuadrática media de los errores.

### PC.

Se encontraron diferencias significativas entre los modelos de PC ( $F_{(4, 14)} = 411, p < 0.001$ ) (**tabla 7**). Los modelos de PC de dos parámetros revelaron que el PC<sub>1/tiempo</sub> estaba bajo PC<sub>trabajo</sub> ( $p < 0.001$ , error: -13.0 W [-14.8 a -11.2 W]). Los modelos de PC de tres parámetros revelaron que PC<sub>cheetah</sub> era más alto que PC<sub>hyp</sub> ( $p < 0.001$ , error: 26.6 W [24.3 a 28.9 W]). El PC<sub>stryd</sub> fue mayor que el PC<sub>hyp</sub> ( $p < 0.001$ , error: 4.9 W [3.8 a 6.0 W]). El PC<sub>cheetah</sub> reportó el valor más alto de PC seguido por PC<sub>trabajo</sub>, PC<sub>1/tiempo</sub>, PC<sub>stryd</sub> y PC<sub>hyp</sub>. Se observó un error proporcional entre PC<sub>trabajo</sub> y PC<sub>1/tiempo</sub>, PC<sub>hyp</sub> y PC<sub>stryd</sub> ( $R^2 > 0.87$ ), PC<sub>hyp</sub> y PC<sub>cheetah</sub> ( $R^2 = 0.75$ ), PC<sub>cheetah</sub> y PC<sub>stryd</sub> ( $R^2 = 0,75$ ) y PC<sub>1/tiempo</sub> y PC<sub>cheetah</sub> ( $R^2 = 0,74$ ).

### W'.

Se encontraron diferencias significativas entre los modelos de PC ( $F_{(3, 14)} = 302, p < 0.001$ ) (**tabla 8**). Los modelos de PC de dos parámetros revelaron que PC<sub>1/tiempo</sub> estaba por debajo de PC<sub>trabajo</sub> ( $p < 0.001$ , error: -6.0 kJ [-6.9 a -5.1 kJ]). Los modelos de PC de tres parámetros revelaron que PC<sub>cheetah</sub> estaba por debajo de PC<sub>hyp</sub> ( $p < 0.001$ , error: -2.3 kJ [-3.0 a -1.6 kJ]). El PC<sub>hyp</sub> reportó el valor más alto de W' seguido de PC<sub>cheetah</sub>, PC<sub>trabajo</sub> y PC<sub>1/tiempo</sub>. Se obtuvo un error no proporcional en todas las comparaciones por pares.

**Tabla 8.** Diferencias en valores de potencia crítica (PC) y el trabajo por encima de la PC (W') entre modelos.

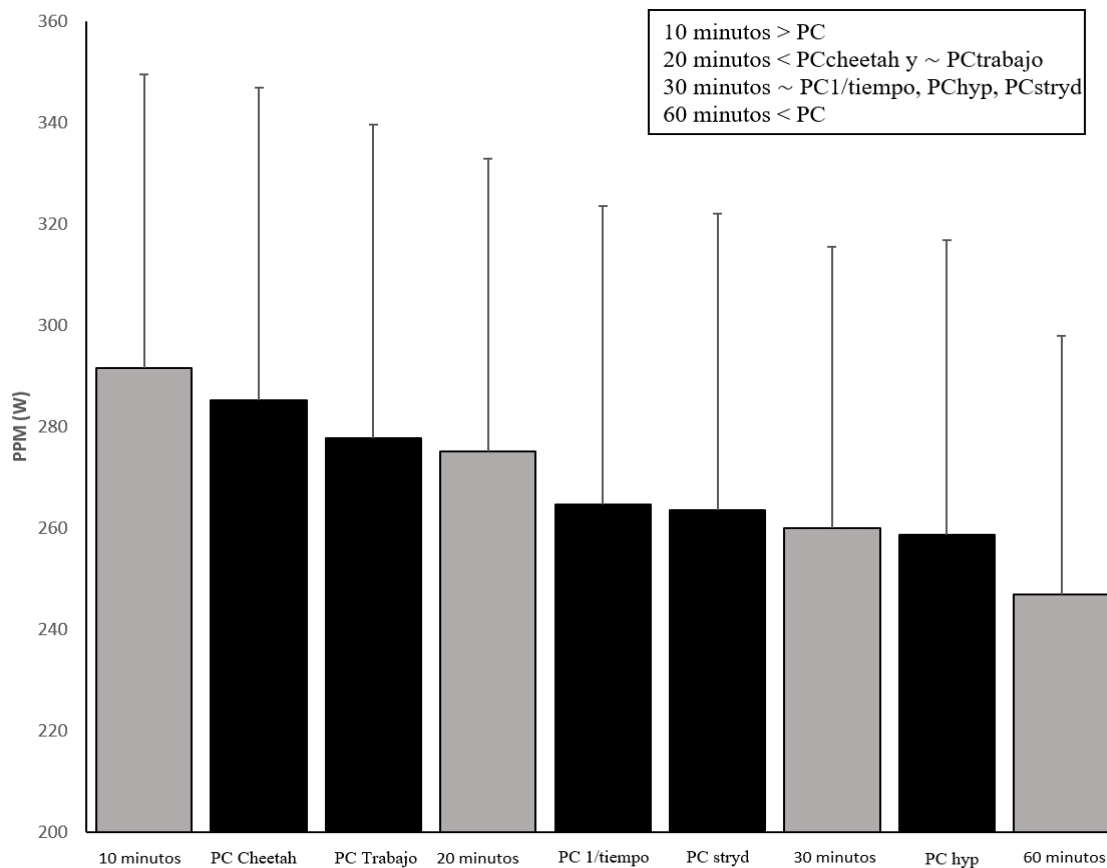
| Modelos                    |                            | Error (IC 95%)             |                            | R <sup>2</sup> |       | Pendiente (IC 95%)      |                         |
|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------|-------|-------------------------|-------------------------|
|                            |                            | PC (W)                     | W' (kJ)                    | PC             | W'    | PC (W)                  | W' (kJ)                 |
| PC <sub>trabajo</sub>      | PC <sub>1/tiem</sub><br>po | -13.0*†<br>(-14.8 a -11.2) | -6.0*†<br>(-6.9 a -5.1)    | 0.94#          | 0.21  | -0.05<br>(-0.06 a 0.04) | -0.00<br>(-0.01 a 0.00) |
|                            | ↑fit: 0<br>↓fit: 0         | -19.1*†<br>(-21.3 a 16.8)  | 10.0*†<br>(8.2 a 11.8)     | 0.87#          | 0.00  | -0.06<br>(-0.08 a 0.05) | -0.03<br>(-1.17 a 1.09) |
|                            |                            | 7.5*†<br>(6.8 a 8.2)       | 7.7*†<br>(6.2 a 9.2)       | 0.01           | 0.04  | 0.00<br>(-0.01 a 0.01)  | -0.31<br>(-1.23 a 0.61) |
|                            |                            | PC <sub>stryd</sub>        | -14.1*†<br>(-16.0 a -12.2) | --             | 0.92# | --                      | -0.05<br>(-0.06 a 0.04) |
| PC <sub>1/tiem</sub><br>po | PC <sub>hyp</sub>          | -6.1*†<br>(-7.1 a -5.0)    | 16.0*†<br>(14.7 a 17.4)    | 0.13           | 0.11  | -0.01<br>(-0.03 a 0.00) | 0.51<br>(-0.35 a 1.36)  |
|                            | ↑fit: 15<br>↓fit: 0        | 20.5*†<br>(18.6 a 22.4)    | 13.7*†<br>(12.6 a 14.8)    | 0.74#          | 0.03  | 0.05<br>(0.03 a 0.06)   | 0.23<br>(-0.56 a 1.01)  |
|                            |                            | PC <sub>stryd</sub>        | -1.1*†<br>(-1.4 a -0.8)    | --             | 0.21  | --                      | -0.00<br>(-0.01 a 0.00) |
| PC <sub>hyp</sub>          | PC <sub>cheeta</sub><br>h  | 26.6*†<br>(24.3 a 28.9)    | -2.3*†<br>(-3.0 a -1.6)    | 0.75#          | 0.09  | 0.05<br>(0.04 a 0.08)   | -0.19<br>(-0.55 a 0.17) |
|                            | ↑fit: 0<br>↓fit: 15        | 4.9*†<br>(3.8 a 6.0)       | --                         | 0.04           | --    | 0.01<br>(-0.01 a 0.03)  | --                      |
| PC <sub>cheeta</sub><br>h  | PC <sub>stryd</sub>        | -21.7*†<br>(-23.7 a -19.6) | --                         | 0.75#          | --    | -0.05<br>(-0.07 a 0.03) | --                      |
| ↑fit: 0<br>↓fit: 0         |                            |                            |                            |                |       |                         |                         |

IC 95%: Intervalo de confianza del 95%; R<sup>2</sup>: Coeficiente de determinación; (\*): Los valores medios difieren significativamente en el nivel de 0.05; (†): El error fijo está presente si el IC del 95% no incluye 0; (#): El error proporcional está presente si la pendiente de la línea de regresión es diferente de 0; ↑fit: Número de atletas con la mejor bondad de ajuste; ↓fit: Número de atletas con la peor bondad de ajuste.

**Localización de la PC a lo largo de la CPD.**

La **figura 14** muestra la PC estimada informada por cada modelo y las tasas de trabajo reales de las PT de 10, 20, 30 y 60 minutos. Se encontraron diferencias significativas entre la PC informada por cada modelo y las tasas de trabajo reales de la CPD ( $F_{(4, 14)} \geq 74.9$ ,  $p < 0.001$ ) (**tabla 9**). Las comparaciones por pares revelaron diferencias no significativas entre el trabajo de PC y la tasa de trabajo de 20 minutos ( $p = 0.682$ , error: -2.6 W [-5.4 a 0.2 W]). La PC<sub>1/tiempo</sub> reveló diferencias no significativas con el ritmo de trabajo de 30 minutos ( $p > 0.05$ ; error: -4.7 W [-10.4 a 1.0 W]). El PC<sub>hyp</sub> reveló diferencias no significativas con la tasa de trabajo de 30 minutos ( $p > 0.05$ ; error: 1.4 W [-4.8 a 7.6 W]). La PC<sub>cheeta</sub>h reveló

diferencias significativas con cada PT ( $p < 0.05$ ), localizándose entre los 10 (error: 6.3 W [2.1 a 10.6 W]) y 20 minutos (error: -10.1 W [-12.9 a -7.3 W]) de la tasa de trabajo. La PC<sub>stryd</sub> reveló diferencias no significativas con la tasa de trabajo de 30 minutos ( $p > 0.05$ , error: -3.5 W [-9.2 a 2.1 W]). Todos los modelos de PC presentaron un error proporcional con el ritmo de trabajo en 60 minutos ( $R^2 \geq 0.39$ ,  $p \leq 0.05$ ).



**Figura 14:** Localización de la potencia crítica (PC) con respecto a diferentes puntos de la curva potencia duración (CPD). Media  $\pm$  DE. PPM: Producción de potencia media.

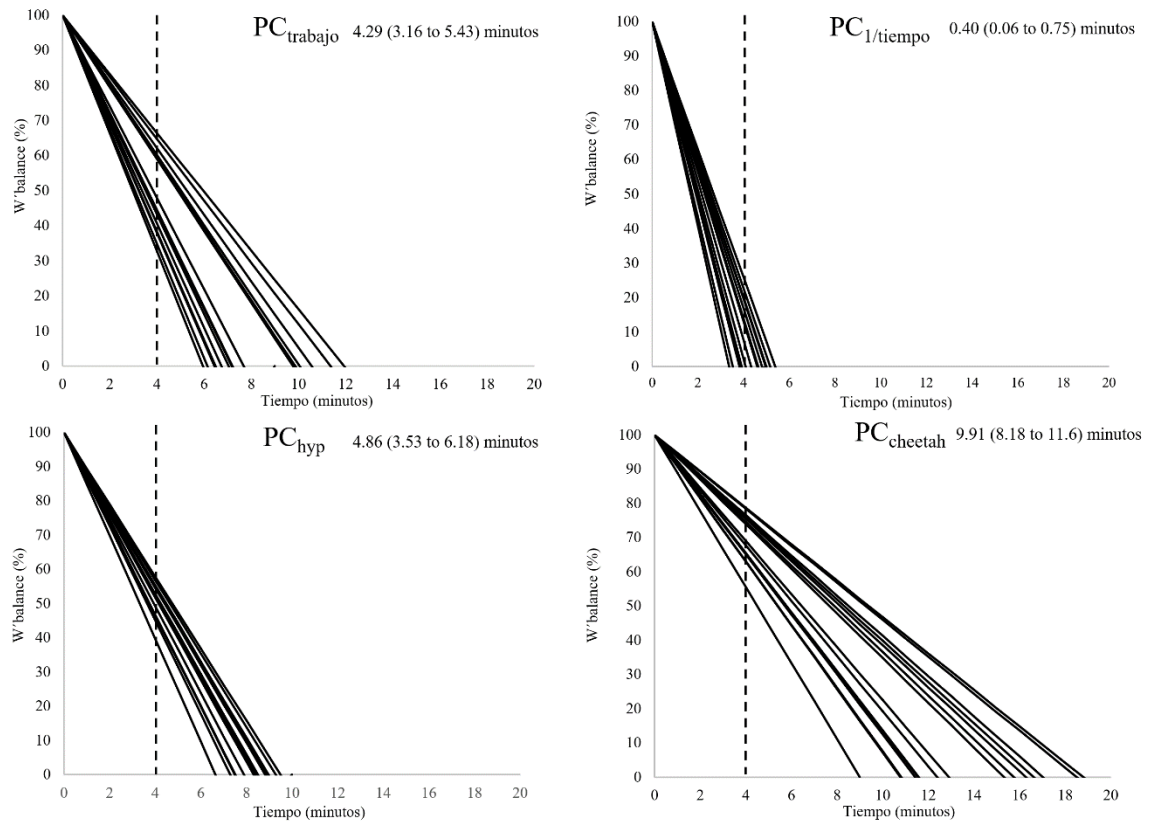
### Balance de $W'$ .

La **figura 15** proporciona la PTA real y estimado en la PT de 4 minutos según los valores de PC y  $W'$  informados por cada modelo. Hubo diferencias significativas en la PTA asociada con la tasa de trabajo de 4 minutos ( $F_{(4, 14)} = 75.3$ ,  $p < 0.001$ ). El PC<sub>1/tiempo</sub> fue el único modelo de PC que reveló diferencias no significativas con el PTA real ( $p = 0.233$ , error: 0.22 minutos [-0.08 a 0.52 minutos]).

**Tabla 9.** Diferencias entre la potencia crítica (PC) reportada por los diferentes modelos de PC y las tasas reales de trabajo de la curva potencia duración (CPD).

| Tasa de trabajo (W)          |                   | Error (IC 95%)             | R <sup>2</sup> | Pendiente (IC 95%)       |
|------------------------------|-------------------|----------------------------|----------------|--------------------------|
| <b>PC<sub>trabajo</sub></b>  | <b>10 minutos</b> | 13.9*†<br>(9.5 a 18.2)     | 0.25           | -0.06<br>(-0.13 a 0.00)  |
|                              | <b>20 minutos</b> | -2.6<br>(-5.4 a 0.2)       | 0.61#          | -0.06<br>(-0.10 a -0.03) |
|                              | <b>30 minutos</b> | -17.7*†<br>(-24.5 a -10.8) | 0.27#          | -0.11<br>(-0.22 a -0.00) |
|                              | <b>60 minutos</b> | -30.8*†<br>(-39.0 a -22.5) | 0.54#          | -0.19<br>(-0.30 a -0.09) |
| <b>PC<sub>1/tiempo</sub></b> | <b>10 minutos</b> | 26.9*†<br>(23.0 a 30.7)    | 0.01           | -0.01<br>(-0.09 a 0.06)  |
|                              | <b>20 minutos</b> | 10.4*†<br>(8.8 a 12.0)     | 0.10           | -0.01<br>(-0.04 a 0.01)  |
|                              | <b>30 minutos</b> | -4.7<br>(-10.4 a 1.0)      | 0.11           | -0.06<br>(-0.16 a 0.04)  |
|                              | <b>60 minutos</b> | -17.8*†<br>(-24.6 a -11.0) | 0.40#          | -0.14<br>(-0.25 a -0.04) |
| <b>PC<sub>hyp</sub></b>      | <b>10 minutos</b> | 32.9*†<br>(29.4 a 36.5)    | 0.00           | -0.00<br>(-0.07 a 0.06)  |
|                              | <b>20 minutos</b> | 16.5*†<br>(14.3 a 18.6)    | 0.00           | -0.00<br>(-0.07 a 0.06)  |
|                              | <b>30 minutos</b> | 1.4<br>(-4.8 a 7.6)        | 0.05           | -0.05<br>(-0.16 a 0.07)  |
|                              | <b>60 minutos</b> | -11.7*†<br>(-18.8 a -4.7)  | 0.32#          | -0.13<br>(-0.25 a -0.01) |
| <b>PC<sub>stryd</sub></b>    | <b>10 minutos</b> | 28.0*†<br>(24.3 a 31.7)    | 0.01           | -0.01<br>(-0.08 a 0.06)  |
|                              | <b>20 minutos</b> | 11.5*†<br>(9.9 a 13.1)     | 0.05           | -0.01<br>(-0.04 a 0.02)  |
|                              | <b>30 minutos</b> | -3.5<br>(-9.2 a 2.1)       | 0.09           | -0.05<br>(-0.16 a 0.05)  |
|                              | <b>60 minutos</b> | -16.7*†<br>(-23.4 a -9.9)  | 0.39#          | -0.14<br>(-0.24 a -0.03) |
| <b>PC<sub>cheetah</sub></b>  | <b>10 minutos</b> | 6.3*†<br>(2.1 a 10.6)      | 0.24           | -0.06<br>(-0.13 a 0.00)  |
|                              | <b>20 minutos</b> | -10.1*†<br>(-12.9 a -7.3)  | 0.56#          | -0.07<br>(-0.10 a -0.03) |
|                              | <b>30 minutos</b> | -25.2*†<br>(-32.2 a -18.2) | 0.25           | -0.11<br>(-0.22 a 0.00)  |
|                              | <b>60 minutos</b> | -38.3*†<br>(-46.6 a -30.0) | 0.51#          | -0.19<br>(-0.30 a -0.08) |

IC 95%: Intervalo de confianza del 95%; R<sup>2</sup>: Coeficiente de determinación; (\*): Los valores medios difieren significativamente en el nivel de significancia de 0.05; (†): El error fijo está presente si el IC del 95% no incluye 0; (#): El error proporcional está presente si la pendiente de la línea de regresión es diferente de 0.



**Figura 15.** Pruebas de tiempo hasta el agotamiento (PTA) estimada al ritmo de trabajo que se asocia a la prueba de tiempo (PT) de 4 minutos, según los valores de potencia crítica (PC) y el trabajo por encima de PC ( $W'$ ) reportados por cada modelo de PC, utilizando el balance de  $W'$ . Media  $\pm$  IC 95%.





### **Estudio 4:**

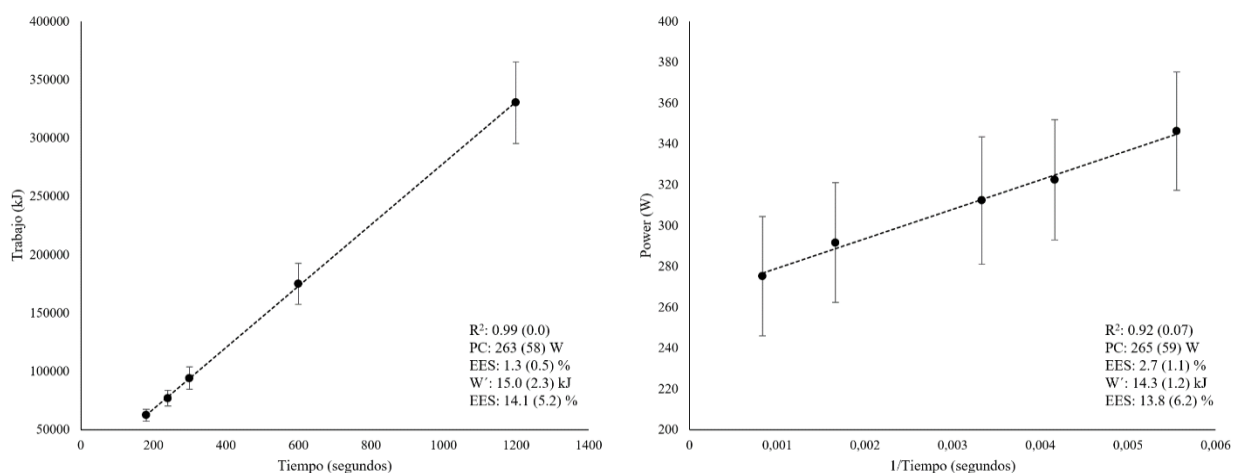
***Determinación de la potencia crítica y la  $W'$  en carrera: Precisión de los diferentes modelos de dos puntos al usar métricas de potencia.***



*Determining critical power and  $W'$  in running:  
Accuracy of different two-point models using the  
power metric.*

Los valores de la PC y el  $W'$  obtenidos de las cinco PT utilizando la  $PC_{\text{trabajo}}$  y  $PC_{1/\text{tiempo}}$  se indican en la **figura 16**. Los atletas reportaron un esfuerzo similar en todas las PT (3 minutos: 8.5 [0.5]; 4 minutos: 8.4 [0.5]; 5 minutos: 8.3 [0.5]; 10 minutos: 8.6 [0.5]; 20 minutos: 8.1 [0.3]), observándose diferencias no significativas entre ellos ( $\chi^2_{(2, N=15)} = 8.1$ ;  $P = 0.09$ ). La linealidad del  $PC_{\text{trabajo}}$  ( $R^2 = 0.99$ ) y  $PC_{1/\text{tiempo}}$  ( $R^2 = 0.92$ ) también revelaron una implicación similar en las cinco PT realizadas.

Los niveles de acuerdo de las diferentes combinaciones de prueba de dos tiempos se informan en la **tabla 10**. Las combinaciones de dos puntos más cercanas (es decir, 3-4, 3-5, 4-5, 4-10, 5-10) no alcanzaron los criterios de validez establecidos. Se requirió una diferencia mínima de 7 minutos entre la PT de corta y larga duración, para obtener una combinación válida de dos puntos (es decir, 3-10, 3-20, 4-20, 5-20, 10-20). Los 3-10 minutos fue la combinación válida más corta para  $PC_{\text{trabajo}}$  (error: 9.2 [4.3 a 14] W; EES: 9.0 W; CCI: 0.99 [0.87 a 0.99];  $R^2$ : 0.98) y  $PC_{1/\text{tiempo}}$  (error: 3.3 [-0.2 a 6.9] W; EES: 6.4 W; CCI: 0.99 [0.99 a 1.00];  $R^2$ : 0.99). En cuanto a  $W'$ , ninguna de las combinaciones de dos tiempos cumplió con los criterios de validez establecidos en ambos modelos lineales de PC.



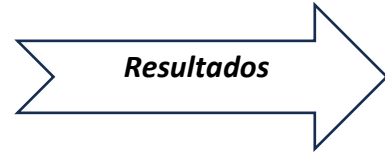
**Figura 16.** Valores de potencia crítica (PC) y la capacidad de trabajo por encima de la PC ( $W'$ ) obtenidos de cinco pruebas de tiempo (PT) (es decir, 3, 4, 5, 10, 20 minutos) usando  $PC_{\text{trabajo}}$  y  $PC_{1/\text{tiempo}}$ . EES: Error estándar de la estimación;  $R^2$ : Coeficiente de determinación.

**Tabla 10.** Nivel de acuerdo de la potencia crítica (PC) y la capacidad de trabajo por encima de la PC ( $W'$ ) obtenido a través de diferentes combinaciones de dos pruebas de tiempo (PT), con respecto al obtenido de cinco PT (es decir, 3, 4, 5, 10, 20 minutos).

|                                   | PC                   |         |                    |       | $W'$               |          |                      |       |
|-----------------------------------|----------------------|---------|--------------------|-------|--------------------|----------|----------------------|-------|
|                                   | Error (IC 95%)       | EES (W) | CCI (IC 95%)       | $R^2$ | Error (IC 95%)     | EES (kJ) | CCI (IC 95%)         | $R^2$ |
| <b><math>PC_{trabajo}</math></b>  |                      |         |                    |       |                    |          |                      |       |
| 3-4                               | -14.7 (233.6 a 4.1)  | 35.3    | 0.91 (0.72 a 0.97) | 0.73  | 30.5 (20.4 a 40.5) | 16.6     | 0.07 (-0.18 a 0.43)  | 0.31  |
| 3-5                               | 5.8 (212.5 a 24.1)   | 30.2    | 0.94 (0.83 a 0.98) | 0.86  | 21.3 (12.3 a 30.2) | 16.0     | -0.04 (-0.37 a 0.40) | 0.03  |
| 3-10                              | 9.2 (4.3 a 14.0)     | 9.0     | 0.99 (0.87 a 0.99) | 0.98  | 19.9 (18.0 a 21.8) | 3.1      | 0.01 (-0.02 a 0.10)  | 0.05  |
| 3-20                              | 3.5 (2.3 a 4.6)      | 1.8     | 0.99 (0.93 a 1.00) | 1.00  | 22.4 (20.2 a 24.6) | 3.7      | 0.06 (-0.03 a 0.31)  | 0.57  |
| 4-5                               | 26.6 (25.3 a 58.5)   | 55.5    | 0.83 (0.50 a 0.94) | 0.74  | 6.1 (-13.1 a 25.3) | 27.6     | -0.20 (-3.00 a 0.61) | 0.46  |
| 4-10                              | 13.1 (5.9 a 20.3)    | 14.6    | 0.97 (0.80 a 0.99) | 0.95  | 14.0 (8.9 a 19.1)  | 7.5      | -0.18 (-0.52 a 0.36) | 0.31  |
| 4-20                              | 4.3 (3.2 a 5.4)      | 1.0     | 0.99 (0.81 a 0.99) | 1.00  | 19.1 (17.3 a 20.9) | 3.1      | 0.03 (-0.02 a 0.16)  | 0.16  |
| 5-10                              | 10.4 (2.0 a 18.8)    | 16.5    | 0.97 (0.89 a 0.99) | 0.92  | 18.0 (8.8 a 27.2)  | 18.7     | 0.07 (-0.46 a 0.55)  | 0.08  |
| 5-20                              | 3.2 (1.6 a 4.8)      | 2.9     | 0.99 (0.98 a 1.00) | 1.00  | 23.5 (17.4 a 29.5) | 7.9      | 0.12 (-0.13 a 0.48)  | 0.63  |
| 10-20                             | -0.6 (25.1 a 3.9)    | 8.3     | 0.99 (0.99 a 1.00) | 0.98  | 34.1 (21.5 a 46.6) | 15.4     | 0.09 (-0.22 a 0.49)  | 0.64  |
| <b><math>PC_{1/tiempo}</math></b> |                      |         |                    |       |                    |          |                      |       |
| 3-4                               | -20.4 (239.4 a 21.4) | 35.3    | 0.89 (0.64 a 0.97) | 0.72  | 3.9 (0.1 a 7.8)    | 5.4      | 0.31 (-0.58 a 0.74)  | 0.53  |
| 3-5                               | -6.5 (225.9 a 12.8)  | 35.4    | 0.93 (0.79 a 0.98) | 0.79  | 0.7 (-3.1 a 3.6)   | 6.2      | 0.21 (-1.6 a 0.74)   | 0.09  |
| 3-10                              | 3.3 (20.2 a 6.9)     | 6.4     | 0.99 (0.99 a 1.00) | 0.99  | -0.3 (-0.8 a 0.2)  | 0.9      | 0.85 (0.56 a 0.95)   | 0.55  |
| 3-20                              | -2.2 (24.4 a 0.06)   | 4.0     | 0.99 (0.99 a 1.00) | 0.99  | 0.7 (0.0 a 1.4)    | 0.9      | 0.84 (0.47 a 0.95)   | 0.83  |
| 4-5                               | 6.7 (218.3 a 31.6)   | 44.5    | 0.90 (0.70 a 0.97) | 0.74  | 0.8 (23.1 a 4.8)   | 6.1      | -0.38 (-3.9 a 0.56)  | 0.18  |
| 4-10                              | 6.3 (21.1 a 13.6)    | 13.7    | 0.99 (0.95 a 0.99) | 0.95  | -2.0 (-4.7 a 0.6)  | 3.9      | -0.49 (-2.7 a 0.47)  | 0.18  |
| 4-20                              | -1.5 (23.7 a 0.7)    | 4.1     | 0.99 (0.99 a 1.00) | 0.99  | -0.2 (-1.3 a 1.0)  | 2.0      | 0.29 (-1.3 a 0.77)   | 0.03  |
| 5-10                              | 6.0 (22.0 a 14.0)    | 14.2    | 0.98 (0.95 a 0.99) | 0.94  | -2.0 (-5.3 a 1.3)  | 6.0      | -0.03 (-1.8 a 0.64)  | 0.00  |
| 5-20                              | -2.2 (25.6 a 1.2)    | 5.9     | 0.99 (0.99 a 1.00) | 0.99  | 0.5 (-1.6 a 2.5)   | 3.7      | 0.44 (-0.77 a 0.81)  | 0.26  |
| 10-20                             | -6.3 (212.1 a 20.5)  | 10.8    | 0.99 (0.96 a 1.00) | 0.97  | 5.4 (0.4 a 10.5)   | 7.4      | 0.23 (-0.68 a 0.71)  | 0.47  |

PC: Potencia Crítica;  $W'$ : Capacidad de trabajo por encima de PC; EES: Error estándar de la estimación;  $R^2$ : Coeficiente de determinación; CCI: Coeficiente de correlación intraclase; IC 95%: Intervalo de confianza del 95%.

#### 4.3. Tópico: aplicación práctica de la CPD para estimar rendimiento en carreras de larga distancia.



### **Estudio 5:**

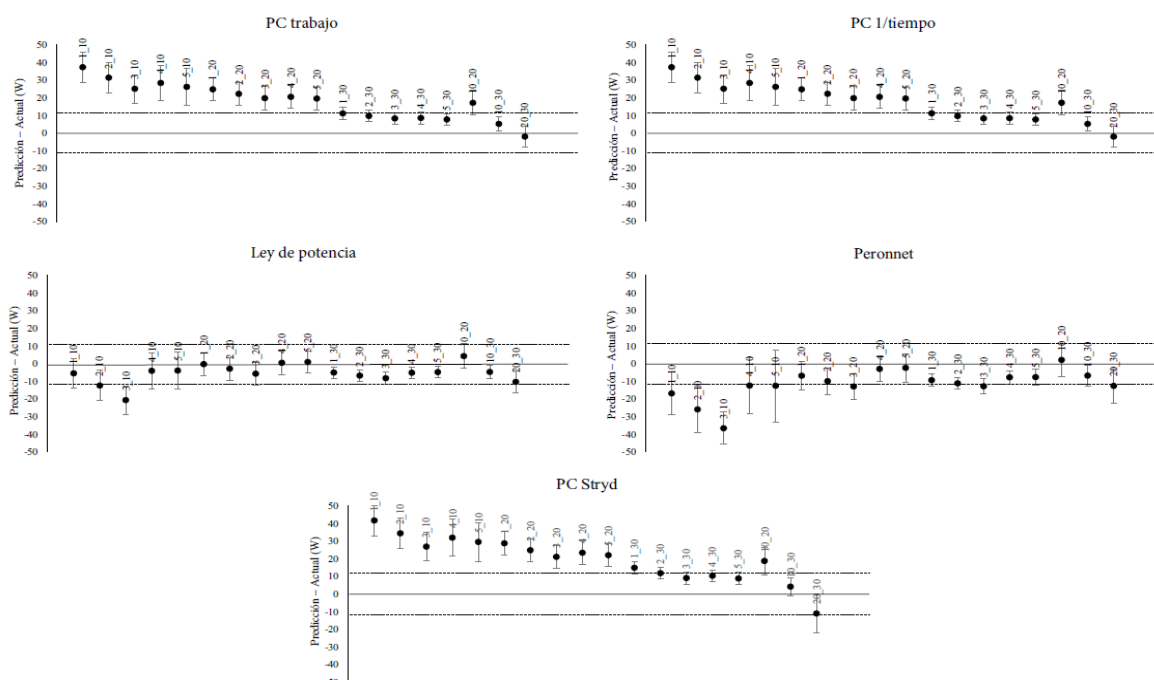
***¿Podemos predecir la carrera de larga duración mediante la producción de potencia? Un asunto de seleccionar las pruebas de predicción y el modelo empírico adecuado.***

-----∞-----

*Can we predict long-duration running power output?  
A matter of selecting the appropriate predicting trials  
and empirical model.*

**Configuraciones de pruebas de dos tiempos.**

La PC<sub>trabajo</sub> y PC<sub>1/tiempo</sub> proporcionaron estimaciones válidas de PPM en 60 minutos, cuando las pruebas de tiempo cortas fueron  $\geq 3$  minutos y se combinaron con la prueba predictiva larga (es decir, 30 minutos) (**figura17**). La configuración válida para pruebas cortas fue de 3 a 30 minutos (error: 8.3 [4.9 a 11.7] W) y se observó un error proporcional positivo (IC del 95 % > 0) (**tabla 11**). La PC<sub>stryd</sub> solo proporcionó una estimación válida de PPM en 60 minutos con la configuración de 10 a 30 minutos (error: 4.2 [- 1.0 a 9.4] W) y no se observó ningún error proporcional. El modelo de ley de potencia proporcionó estimaciones válidas de PPM en 60 minutos, cuando las pruebas de tiempo más cortas y más largas diferían en más de 10 minutos (IC del 95 % < 12.3 W). La configuración corta con mayor validación fue de 1 a 20 minutos (error: - 0.3 [- 7.4 a 6.8] W) y no se observó ningún error proporcional (IC del 95 %  $\neq$  0).



**Figura 17.** Influencia de la duración de las configuraciones de pruebas de dos tiempos aplicadas en diferentes modelos empíricos para la estimación de la producción de potencia media (PPM) en 60 minutos. IC del 95%: Intervalo de confianza del 95%. Las líneas discontinuas indicaron el  $\pm 5\%$  de la PPM en 60 minutos.

**Tabla 11.** Error entre producción de potencia media (PPM) real y estimada en 60 minutos derivada de diferentes modelos empíricos utilizando configuraciones de prueba de dos tiempos.

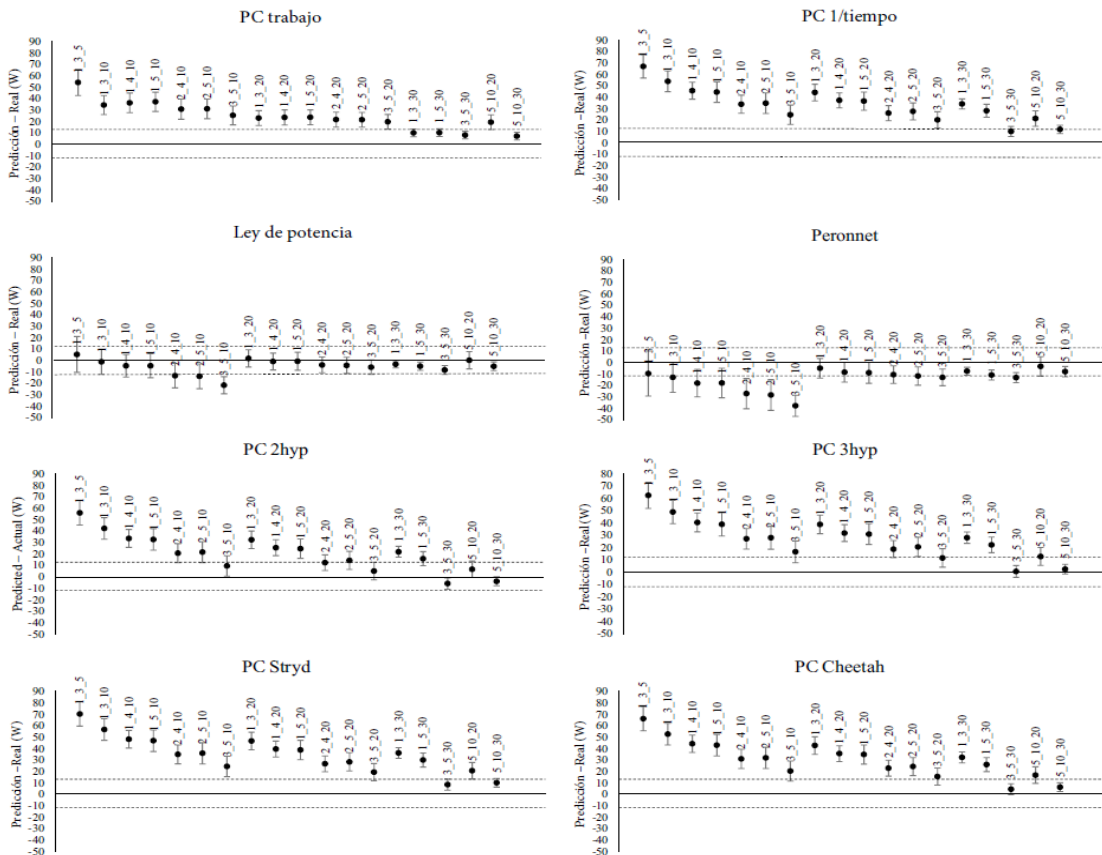
| PT<br>(minutos) | Error (IC 95%)        |                        |                     |                       |                       | Pendiente (IC 95%)    |                      |                      |                      |                      |
|-----------------|-----------------------|------------------------|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
|                 | PC <sub>trabajo</sub> | PC <sub>1/tiempo</sub> | PC <sub>stryd</sub> | Ley de potencia       | Peronnet              | PC <sub>trabajo</sub> | PC <sub>1/time</sub> | PC <sub>stryd</sub>  | Ley de potencia      | Peronnet             |
| 1-10            | 37.3 (28.9 a 45.8)    | 37.3 (28.9 a 45.8)     | 41.7 (33.0 a 50.3)  | -5.5 (-15.5 a 4.5)    | -16.9 (-29.0 a -4.7)  | -0.11 (-0.37 a 0.16)  | -0.11 (-0.37 a 0.16) | -0.12 (-0.40 a 0.15) | -0.14 (-0.54 a 0.25) | -0.13 (-0.65 a 0.38) |
| 1-20            | 24.8 (18.3 a 31.4)    | 24.8 (18.3 a 31.4)     | 28.7 (22.0 a 35.5)  | -0.3 (-7.4 a 6.8)     | -6.8 (-14.9 a 1.2)    | 0.01 (-0.21 a 0.23)   | 0.01 (-0.21 a 0.23)  | 0.00 (-0.22 a 0.23)  | 0.01 (-0.29 a 0.31)  | 0.03 (-0.32 a 0.39)  |
| 1-30            | 11.2 (7.9 a 14.5)     | 11.2 (7.9 a 14.5)      | 14.9 (11.6 a 19.1)  | -5.0 (-8.1 a -1.9)    | -9.4 (-12.9 a -6.0)   | 0.13 (0.04 a 0.23)    | 0.13 (0.04 a 0.23)   | 0.12 (0.03 a 0.21)   | 0.14 (0.03 a 0.25)   | 0.17 (0.04 a 0.30)   |
| 2-10            | 31.5 (22.9 a 40.0)    | 31.5 (22.9 a 40.0)     | 34.4 (25.7 a 43.1)  | -12.4 (-23.2 a -1.6)  | -25.9 (-38.9 a -12.9) | -0.16 (-0.44 a 0.11)  | -0.16 (-0.44 a 0.11) | 0.19 (-0.46 a 0.09)  | -0.35 (-0.75 a 0.04) | -0.45 (-0.92 a 0.09) |
| 2-20            | 22.3 (15.8 a 28.8)    | 22.3 (15.8 a 28.8)     | 24.8 (18.2 a 31.4)  | -2.9 (-9.7 a 3.9)     | -9.9 (-17.5 a -2.3)   | -0.05 (-0.23 a 0.22)  | -0.05 (-0.23 a 0.22) | -0.02 (-0.25 a 0.20) | -0.07 (-0.35 a 0.22) | -0.07 (-0.41 a 0.27) |
| 2-30            | 9.7 (6.5 a 13.0)      | 9.7 (6.5 a 13.0)       | 11.9 (8.7 a 15.0)   | -6.8 (-9.6 a -3.9)    | -11.2 (-14.3 a -8.0)  | 0.13 (0.03 a 0.22)    | 0.13 (0.03 a 0.22)   | 0.11 (0.01 a 0.21)   | 0.10 (-0.00 a 0.21)  | 0.12 (-0.00 a 0.25)  |
| 3-10            | 25.2 (17.1 a 33.3)    | 25.2 (17.1 a 33.3)     | 26.9 (18.7 a 35.0)  | -20.6 (-28.2 a -13.1) | -36.6 (-45.7 a -27.5) | -0.08 (-0.35 a 0.19)  | -0.08 (-0.35 a 0.19) | -0.09 (-0.36 a 0.18) | -0.07 (-0.44 a 0.29) | 0.01 (-0.49 a 0.51)  |
| 3-20            | 19.8 (13.4 a 26.3)    | 19.8 (13.4 a 26.3)     | 21.1 (14.5 a 27.6)  | -5.7 (-12.0 a 0.6)    | -13.0 (-20.3 a -5.6)  | 0.03 (-0.20 a 0.26)   | 0.03 (-0.20 a 0.26)  | 0.03 (-0.21 a 0.26)  | 0.07 (-0.22 a 0.36)  | 0.12 (-0.24 a 0.48)  |
| 3-30            | 8.3 (4.9 a 11.7)      | 8.3 (4.9 a 11.7)       | 9.1 (5.5 a 12.7)    | -8.3 (-12.0 a -4.6)   | -12.8 (-17.1 a -8.5)  | 0.15 (0.05 a 0.25)    | 0.15 (0.05 a 0.25)   | 0.16 (0.05 a 0.26)   | 0.18 (0.05 a 0.31)   | 0.23 (0.08 a 0.38)   |
| 4-10            | 28.4 (18.4 a 38.5)    | 28.4 (18.4 a 38.5)     | 31.9 (21.4 a 42.4)  | -4.1 (-17.7 a 9.6)    | -12.4 (-28.4 a 3.6)   | -0.08 (-0.43 a 0.27)  | -0.08 (-0.43 a 0.27) | -0.09 (-0.46 a 0.27) | -0.06 (-0.61 a 0.49) | -0.01 (-0.68 a 0.66) |
| 4-20            | 20.6 (14.0 a 27.2)    | 20.6 (14.0 a 27.2)     | 23.4 (16.7 a 30.1)  | 0.5 (-6.1 a 7.1)      | -3.0 (-10.2 a 4.3)    | 0.03 (-0.20 a 0.27)   | 0.03 (-0.20 a 0.27)  | 0.03 (-0.20 a 0.27)  | 0.08 (-0.20 a 0.36)  | 0.12 (-0.19 a 0.43)  |
| 4-30            | 8.6 (5.0 a 12.3)      | 8.5 (5.1 a 11.8)       | 10.3 (7.0 a 13.7)   | -5.2 (-8.8 a -1.5)    | -7.8 (-11.6 a -3.9)   | 0.17 (0.07 a 0.27)    | 0.17 (0.07 a 0.27)   | 0.15 (0.06 a 0.24)   | 0.20 (0.10 a 0.30)   | 0.23 (0.13 a 0.33)   |
| 5-10            | 26.2 (15.9 a 36.6)    | 26.2 (15.9 a 36.6)     | 29.5 (18.4 a 40.7)  | -3.9 (-20.6 a 12.7)   | -12.5 (-33.0 a 7.9)   | -0.21 (-0.57 a 0.15)  | -0.21 (-0.57 a 0.15) | -0.24 (-0.63 a 0.15) | -0.35 (-0.95 a 0.25) | -0.42 (-1.16 a 0.31) |
| 5-20            | 19.6 (13.2 a 26.0)    | 19.6 (13.2 a 26.0)     | 22.0 (15.6 a 28.4)  | 0.9 (-6.2 a 8.1)      | -2.4 (-10.4 a 5.6)    | 0.00 (-0.23 a 0.24)   | 0.00 (-0.23 a 0.24)  | -0.00 (-0.24 a 0.22) | 0.00 (-0.29 a 0.29)  | -0.00 (-0.32 a 0.32) |
| 5-30            | 7.8 (4.5 a 11.1)      | 7.8 (4.5 a 11.1)       | 8.9 (5.2 a 12.5)    | -4.8 (-8.7 a -0.9)    | -7.6 (-12.1 a -3.2)   | 0.14 (0.05 a 0.24)    | 0.14 (0.05 a 0.24)   | -0.15 (0.03 a 0.26)  | 0.17 (0.04 a 0.29)   | 0.18 (0.03 a 0.32)   |
| 10-20           | 17.2 (10.2 a 24.2)    | 17.2 (10.2 a 24.2)     | 18.7 (11.0 a 26.5)  | 4.3 (-4.2 a 12.8)     | 2.1 (-7.4 a 11.6)     | 0.08 (-0.19 a 0.35)   | 0.08 (-0.19 a 0.35)  | 0.10 (-0.19 a 0.41)  | 0.15 (-0.20 a 0.51)  | 0.19 (-0.21 a 0.58)  |
| 10-30           | 5.3 (1.3 a 9.2)       | -1.9 (-8.1 a 4.2)      | -11.0 (-22.0 a 0.0) | -4.7 (-10.2 a 0.7)    | -6.8 (-12.7 a -0.8)   | 0.19 (0.08 a 0.30)    | 0.19 (0.08 a 0.30)   | 0.24 (0.08 a 0.40)   | 0.25 (0.09 a 0.42)   | 0.28 (0.11 a 0.45)   |

PT: Prueba de tiempo; IC 95%: Intervalo de confianza del 95%.

### Configuraciones prueba de tres tiempos.

El uso de pruebas de tres tiempos no mejoró la precisión observada cuando se usaron solo pruebas de dos tiempos para  $PC_{trabajo}$  (IC 95% de las mejores configuraciones: 3.9 a 10.6 W frente a -8.1 a 4.2 W),  $PC_{1/tiempo}$  (IC 95% de las mejores configuraciones: 8.3 a 15.5 W frente a -8.1 a 4.2 W),  $PC_{Stryd}$  (IC 95 % de las mejores configuraciones: 3.6 a 13.3 W frente a -1.0 a 9.4 W) y modelo de Peronnet (IC 95 % de las mejores configuraciones: -11.1 a -4.1 W frente a -10.2 a 4.3 W) (**tabla 12**).

El modelo de ley de potencia proporcionó varias estimaciones válidas de PPM en 60 minutos (13 de las 18 configuraciones calculadas) (**figura 18**). La combinación válida más corta fue de 1-3-10 minutos (-1.0 [-11.9 a 9.9] W). Cabe destacar que la suma de las duraciones de las PT predictivas fue menor que la configuración de prueba de dos tiempos más corta (es decir, 1-20 minutos). No se observó error proporcional (IC 95%  $\neq$  0). Para la  $PC_{2hyp}$ ,  $PC_{3hyp}$  y la  $PC_{cheetah}$ , 3-5-30 y 5-10-30 minutos fueron las únicas configuraciones válidas (IC 95 % < 12.3 W). Se observó un error proporcional positivo para la configuración de 3-5-30 minutos.



**Figura 18:** Influencia de las duraciones en las configuraciones de tres tiempos, aplicadas en diferentes modelos empíricos para la estimación de la producción de potencia media (PPM) de 60 minutos. IC 95%: Intervalo de confianza del 95%. Las líneas discontinuas indicaron el  $\pm$  5% de la PPM de 60 minutos.

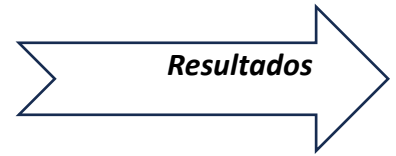
**Tabla 12.** Error entre la producción de potencia media (PPM) real y estimada en 60 minutos, derivada de diferentes modelos empíricos utilizando configuraciones de prueba de tres tiempos.

| PT<br>(minutos) | Error (IC 95%)              |                             |                       |                              |                             |                             |                            |                             | Pendiente (IC 95%)         |                            |                            |                            |                            |                            |                            |                               |
|-----------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------|------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|-------------------------------|
|                 | PC <sub>trabajo</sub>       | PC <sub>1/tiempo</sub>      | PC <sub>2hyp</sub>    | PC <sub>3hyp</sub>           | PC <sub>stryd</sub>         | PC <sub>cheetah</sub>       | Ley de potencia            | Peronnet                    | PC <sub>trabajo</sub>      | PC <sub>1/tiempo</sub>     | PC <sub>2hyp</sub>         | PC <sub>3hyp</sub>         | PC <sub>stryd</sub>        | PC <sub>cheetah</sub>      | Ley de potencia            | Peronnet                      |
| 1-3-5           | 54.1<br>(42.7<br>a<br>65.6) | 66.9<br>(56.8<br>a<br>77.0) | 56.1 (45.5<br>a 66.8) | 62.4<br>(51.8<br>to<br>73.0) | 70.3<br>(59.7<br>a<br>80.9) | 66.1<br>(55.6<br>a<br>76.7) | 5.5 (-10.3<br>a 21.2)      | -9.6<br>(-29.3 a<br>10.0)   | 0.03<br>(-0.31<br>a 0.37)  | -0.07<br>(-0.36<br>a 0.22) | -0.03<br>(-0.36<br>a 0.29) | -0.04<br>(-0.36<br>a 0.27) | -0.05<br>(-0.36<br>a 0.25) | -0.05<br>(-0.36<br>a 0.26) | 0.05<br>(-0.67<br>a 0.57)  | 0.01<br>(-0.80<br>a<br>0.83)  |
| 1-3-10          | 34.4<br>(26.1<br>a<br>42.7) | 53.9<br>(44.8<br>a<br>63.0) | 42.5 (33.1<br>a 51.8) | 48.9<br>(39.4<br>to<br>58.5) | 56.7<br>(47.2<br>a<br>66.1) | 52.6<br>(43.1<br>a<br>62.1) | -1.0<br>(-11.9 a<br>9.9)   | -13.0<br>(-26.0 a<br>0.1)   | -0.10<br>(-0.37<br>a 0.16) | -0.15<br>(-0.44<br>a 0.14) | -0.11<br>(-0.42<br>a 0.20) | -0.11<br>(-0.42<br>a 0.19) | -0.15<br>(-0.44<br>a 0.15) | -0.14<br>(-0.44<br>a 0.16) | -0.18<br>(-0.60<br>a 0.23) | -0.16<br>(-0.70<br>a<br>0.28) |
| 1-3-20          | 23.0<br>(16.5<br>a<br>29.5) | 44.1<br>(36.8<br>a<br>51.5) | 32.5 (24.8<br>a 40.3) | 38.8<br>(31.2<br>to<br>46.4) | 46.6<br>(38.9<br>a<br>54.3) | 42.7<br>(35.0<br>a<br>50.4) | 2.0 (-5.5<br>a 9.5)        | -5.0<br>(-13.6 a<br>3.6)    | 0.02<br>(-0.21<br>a 0.24)  | -0.06<br>(-0.30<br>a 0.16) | -0.01<br>(-0.27<br>a 0.24) | -0.03<br>(-0.28<br>a 0.21) | -0.05<br>(-0.29<br>a 0.19) | -0.04<br>(-0.28<br>a 0.21) | -0.01<br>(-0.32 a<br>0.30) | 0.01<br>(-0.36<br>a<br>0.38)  |
| 1-3-30          | 10.1<br>(6.7<br>a<br>13.4)  | 34.2<br>(29.8<br>a<br>38.5) | 22.1 (17.4<br>a 26.8) | 28.0<br>(23.4<br>to<br>32.6) | 36.1<br>(31.5<br>a<br>40.8) | 32.3<br>(27.5<br>a<br>37.0) | -3.1 (-6.3<br>a 0.0)       | -7.6<br>(-11.1<br>a -4.1)   | 0.14<br>(0.05 a<br>0.23)   | 0.02<br>(-0.12<br>a 0.17)  | 0.07<br>(0.08 a<br>0.22)   | 0.06<br>(-0.09<br>a 0.21)  | 0.04<br>(-0.10<br>a 0.19)  | 0.06<br>(-0.09<br>a 0.21)  | 0.12<br>(-0.00<br>a 0.23)  | 0.14<br>(0.01<br>a<br>0.28)   |
| 1-4-20          | 23.6<br>(17.0<br>a<br>30.1) | 37.3<br>(30.7<br>a<br>43.9) | 25.6 (18.7<br>a 32.5) | 31.7<br>(24.9<br>to<br>38.6) | 39.6<br>(32.7<br>a<br>46.5) | 35.6<br>(28.7<br>a<br>42.5) | -0.7 (-8.1<br>a 6.6)       | -8.5<br>(-17.1 a<br>0.2)    | 0.02<br>(-0.21<br>a 0.24)  | -0.06<br>(-0.27<br>a 0.15) | -0.02<br>(-0.26<br>a 0.22) | -0.03<br>(-0.26<br>a 0.20) | -0.04<br>(-0.26<br>a 0.17) | -0.05<br>(-0.27<br>a 0.17) | -0.02<br>(-0.34<br>a 0.29) | 0.00<br>(-0.38<br>a<br>0.39)  |
| 1-4-30          | 10.3<br>(3.7<br>a<br>16.8)  | 28.3<br>(24.4<br>a<br>32.3) | 16.3 (12.0<br>a 20.5) | 22.3<br>(18.0<br>to<br>26.7) | 30.3<br>(26.0<br>a<br>34.5) | 26.1<br>(21.9<br>a<br>30.4) | -4.9 (-8.1<br>a -1.7)      | -10.6<br>(-14.4<br>a -6.8)  | 0.14<br>(0.05 a<br>0.23)   | 0.02<br>(-0.11<br>a 0.15)  | 0.06<br>(-0.08<br>a 0.21)  | 0.05<br>(-0.09<br>a 0.20)  | 0.04<br>(-0.10<br>a 0.17)  | 0.05<br>(-0.08<br>a 0.18)  | 0.10<br>(-0.02<br>a 0.23)  | 0.13<br>(-0.03<br>a<br>0.30)  |
| 1-5-10          | 37.2<br>(28.8<br>a<br>45.7) | 44.5<br>(35.5<br>a<br>53.4) | 32.9 (23.5<br>a 42.3) | 38.9<br>(29.3<br>to<br>48.4) | 46.9<br>(37.5<br>a<br>56.3) | 43.0<br>(33.6<br>a<br>52.4) | -4.4<br>(-14.9 a<br>6.1)   | -17.9<br>(-30.9<br>a -5.0)  | -0.11<br>(-0.38<br>a 0.15) | -0.05<br>(-0.31<br>a 0.22) | -0.00<br>(-0.31<br>a 0.30) | -0.01<br>(-0.31<br>a 0.29) | -0.03<br>(-0.31<br>a 0.25) | -0.02<br>(-0.30<br>a 0.26) | -0.11<br>(-0.54<br>a 0.32) | -0.06<br>(-0.63<br>a<br>0.51) |
| 1-5-20          | 23.7<br>(17.2<br>a<br>30.2) | 36.6<br>(28.7<br>a<br>44.5) | 24.8 (16.4<br>a 33.2) | 30.9<br>(22.6<br>to<br>39.3) | 38.8<br>(30.4<br>a<br>47.2) | 34.8<br>(26.4<br>a<br>43.2) | -0.6 (-8.4<br>to 7.2)      | -8.9<br>(-18.1 a<br>0.3)    | 0.01<br>(-0.22<br>a 0.23)  | 0.02<br>(-0.22<br>a 0.26)  | 0.07<br>(-0.22<br>a 0.36)  | 0.05<br>(-0.22<br>a 0.33)  | 0.04<br>(-0.22<br>a 0.30)  | 0.05<br>(-0.22<br>a 0.31)  | -0.00<br>(-0.34<br>a 0.33) | 0.05<br>(-0.36<br>a<br>0.47)  |
| 1-5-30          | 10.2<br>(6.9<br>a<br>13.5)  | 28.2<br>(22.5<br>a<br>33.8) | 16.1 (9.9<br>a 22.2)  | 22.2<br>(15.9<br>to<br>28.5) | 30.0<br>(23.8<br>a<br>36.2) | 26.0<br>(19.8<br>a<br>32.2) | -4.8 (-8.5<br>a -1.2)      | -10.8<br>(-15.2<br>a -6.4)  | 0.14<br>(0.04 a<br>0.23)   | 0.09<br>(-0.06<br>a 0.26)  | 0.14<br>(-0.05<br>a 0.34)  | 0.14<br>(-0.05<br>a 0.33)  | 0.12<br>(-0.05<br>a 0.29)  | 0.13<br>(-0.05<br>a 0.30)  | 0.12<br>(-0.03<br>a 0.27)  | 0.17<br>(-0.02<br>a<br>0.36)  |
| 2-4-10          | 30.8<br>(22.0<br>a<br>39.6) | 33.9<br>(25.9<br>a<br>41.8) | 20.9 (12.5<br>a 29.2) | 27.1<br>(18.7<br>a<br>35.5)  | 34.9<br>(26.6<br>a<br>43.2) | 31.0<br>(22.5<br>a<br>39.5) | -13.1<br>(-23.8<br>a -2.4) | -27.2<br>(-40.4<br>a -14.0) | -0.15<br>(-0.43<br>a 0.14) | -0.23<br>(-0.47<br>a 0.00) | -0.20<br>(-0.48<br>a 0.08) | -0.21<br>(-0.48<br>a 0.05) | -0.22<br>(-0.48<br>a 0.23) | -0.23<br>(-0.49<br>a 0.03) | -0.38<br>(-0.76<br>a 0.01) | -0.45<br>(-0.96<br>a<br>0.05) |



| PT<br>(minutos) | Error (IC 95%)        |                        |                        |                        |                       |                       |                          |                          |                         |                         |                         |                         |                         |                         |                         |                         |
|-----------------|-----------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
|                 | PC <sub>trabajo</sub> | PC <sub>1/tiempo</sub> | PC <sub>2hyp</sub>     | PC <sub>3hyp</sub>     | PC <sub>stryd</sub>   | PC <sub>cheetah</sub> | Ley de potencia          | Peronne                  | PC <sub>trabajo</sub>   | PC <sub>1/tiempo</sub>  | PC <sub>2hyp</sub>      | PC <sub>3hyp</sub>      | PC <sub>stryd</sub>     | PC <sub>cheetah</sub>   | Ley de potencia         | Peronnet                |
| 2-4-20          | 21.7<br>(15.2 a 28.2) | 26.1<br>(19.5 a 32.6)  | 12.5 (5.7 a 19.4)      | 18.7<br>(11.7 to 25.6) | 26.7<br>(19.7 a 33.6) | 22.9<br>(15.9 a 29.8) | -3.7<br>(-10.6 a 3.1)    | -10.6<br>(-18.4 a -2.9)  | 0.01<br>(-0.22 a 0.24)  | -0.09<br>(-0.32 a 0.13) | -0.06<br>(-0.33 a 0.20) | -0.08<br>(-0.33 a 0.18) | -0.09<br>(-0.33 a 0.15) | -0.09<br>(-0.33 a 0.16) | -0.08<br>(-0.37 a 0.21) | -0.09<br>(-0.43 a 0.25) |
| 2-5-10          | 31.1<br>(22.5 a 39.6) | 34.8<br>(31.5 a 38.0)  | 21.7 (12.6 a 30.9)     | 28.0<br>(18.7 to 37.3) | 35.9<br>(26.6 a 45.2) | 31.9<br>(22.6 a 41.2) | -13.7<br>(-24.6 a -2.8)  | -28.4<br>(-41.8 a -15.0) | -0.17<br>(-0.44 a 0.11) | -0.14<br>(-0.42 a 0.15) | -0.09<br>(-0.42 a 0.23) | -0.11<br>(-0.43 a 0.20) | -0.13<br>(-0.43 a 0.17) | -0.13<br>(-0.43 a 0.18) | -0.35<br>(-0.76 a 0.06) | -0.41<br>(-0.96 a 0.13) |
| 2-5-20          | 21.5<br>(15.1 a 28.0) | 27.6<br>(20.2 a 35.1)  | 14.5 (6.6 a 22.5)      | 20.5<br>(12.7 to 28.3) | 28.3<br>(20.4 a 36.3) | 24.3<br>(16.4 a 32.2) | -4.1<br>(-11.2 a 2.9)    | -11.8<br>(-19.8 a -3.8)  | -0.02<br>(-0.23 a 0.22) | -0.02<br>(-0.27 a 0.22) | 0.03<br>(-0.27 a 0.33)  | -0.00<br>(-0.28 a 0.28) | -0.02<br>(-0.29 a 0.25) | -0.01<br>(-0.29 a 0.26) | -0.07<br>(-0.38 a 0.23) | 0.09<br>(-0.45 a 0.27)  |
| 3-5-10          | 25.4<br>(17.1 a 33.6) | 24.6<br>(16.2 a 33.1)  | 9.7 (0.7 a 18.6)       | 16.5<br>(7.7 to 25.4)  | 24.3<br>(15.4 a 33.3) | 20.3<br>(11.5 a 29.2) | -21.5<br>(-28.9 a -14.0) | -37.8<br>(-47.0 a -28.6) | -0.10<br>(-0.38 a 0.17) | -0.01<br>(-0.30 a 0.28) | 0.01<br>(-0.34 a 0.36)  | 0.02<br>(-0.31 a 0.35)  | 0.01<br>(-0.30 a 0.32)  | 0.02<br>(-0.30 a 0.33)  | -0.06<br>(-0.43 a 0.31) | 0.03<br>(-0.48 a 0.55)  |
| 3-5-20          | 19.8<br>(13.3 a 26.2) | 20.1<br>(13.0 a 27.3)  | 5.2 (-2.5 a 12.9)      | 11.5<br>(4.0 to 19.1)  | 19.4<br>(11.9 a 26.9) | 15.5<br>(8.0 a 23.1)  | -5.8<br>(-12.1 a 0.5)    | -13.0<br>(-20.3 a -5.6)  | 0.02<br>(-0.21 a 0.25)  | 0.06<br>(-0.19 a 0.32)  | 0.12<br>(-0.19 a 0.44)  | 0.11<br>(-0.18 a 0.41)  | 0.09<br>(-0.19 a 0.36)  | 0.10<br>(-0.19 a 0.38)  | 0.07<br>(-0.22 a 0.36)  | 0.12<br>(-0.24 a 0.48)  |
| 3-5-30          | 8.1 (4.8 a 11.5)      | 10.0<br>(5.6 a 14.4)   | -5.7<br>(-10.7 a -0.8) | 0.6<br>(-4.2 to 5.4)   | 8.5 (3.6 a 13.3)      | 4.4<br>(-0.4 a 9.2)   | -8.1<br>(-11.9 a -4.3)   | -13.2<br>(-17.7 a -8.8)  | 0.15<br>(0.05 a 0.24)   | 0.17<br>(0.03 a 0.30)   | 0.24<br>(0.06 a 0.42)   | 0.22<br>(0.06 a 0.38)   | 0.20<br>(0.05 a 0.25)   | 0.21<br>(0.06 a 0.36)   | 0.19<br>(0.06 a 0.33)   | 0.23<br>(0.08 a 0.39)   |
| 5-10-20         | 19.4<br>(13.0 a 25.8) | 21.3<br>(14.6 a 28.1)  | 6.7 (-0.5 a 13.9)      | 12.7<br>(5.5 to 19.9)  | 20.6<br>(13.4 a 27.8) | 16.8<br>(9.5 a 24.1)  | 0.3 (-7.2 a 7.9)         | -3.3<br>(-11.8 a 5.2)    | 0.01<br>(-0.22 a 0.25)  | -0.05<br>(-0.29 a 0.19) | -0.01<br>(-0.29 a 0.27) | -0.02<br>(-0.29 a 0.25) | -0.04<br>(-0.30 a 0.22) | -0.02<br>(-0.29 a 0.24) | -0.03<br>(-0.33 a 0.27) | -0.04<br>(-0.38 a 0.30) |
| 5-10-30         | 7.2 (3.9 a 10.6)      | 11.9<br>(8.3 a 15.5)   | -3.8<br>(-7.7 a 0.1)   | 2.4<br>(-1.5 to 6.3)   | 10.1<br>(6.2 a 13.9)  | 6.2 (2.4 a 10.0)      | -4.9 (-8.7 a -1.1)       | -7.9<br>(-12.4 a -3.4)   | 0.15<br>(0.06 a 0.25)   | 0.06<br>(-0.06 a 0.19)  | 0.12<br>(-0.02 a 0.27)  | 0.10<br>(-0.05 a 0.24)  | 0.09<br>(-0.04 a 0.22)  | 0.09<br>(-0.04 a 0.22)  | 0.12<br>(-0.00 a 0.26)  | 0.14<br>(-0.01 a 0.30)  |

PT: Pruebas de tiempo; PC: Potencia crítica; IC 95%: Intervalo de confianza del 95%.



## **Estudio 6:**

***¿Podemos predecir mediante la producción de potencia las carreras de larga duración? Validación de la potencia crítica, ley de potencia y modelos logarítmicos.***

-----∞-----

*Can we predict long durations running power output?  
Validity of the critical power, power law, and  
logarithmic models.*

La PC y W' de los modelos de asintota, factores K y g del modelo de ley de Potencia, y el factor E y PAM del modelo Peronnet se indican en la **tabla 13**.

**30 minutos.**

La PPM real en 30 minutos fue de 260 (55) W. Los modelos de PC<sub>1/tiempo</sub> (12.80 W [6.89–18.71 W], 4.85 %), PC<sub>trabajo</sub> (11.53 W [6.02–17.04 W], 4.42 %), PC<sub>stryd</sub> (5.27 W [2.79–7.74 W], 1.99 %) y PC<sub>cheetah</sub> (1.33 W [0.59–2.08 W], 0.49 %) sobreestimaron la PPM en 30 minutos ( $p \leq 0.002$ ; **tabla 12**). Los modelos de PC<sub>2hyp</sub> (26.27 W [27.82 a 24.71 W], 22.56 %) y la PC<sub>3hyp</sub> (23.13 W [25.68 a -0.59 W], -1.36 %) subestimaron la PPM en 30 minutos ( $p \leq 0.019$ ). Los modelos de ley de potencia (-0.07 W [-5.66 a 5.53 W], -0.20 %) y Peronnet (-3.24 W [-8.94 a 2.46 W], 21.56 %) no mostraron un error fijo ( $P \leq 0.243$ ). No se observó error proporcional en ninguno de los modelos.

**Tabla 13.** Nivel de acuerdo entre la producción de potencia media (PPM) prevista y real de 30 minutos y 60 minutos. \*

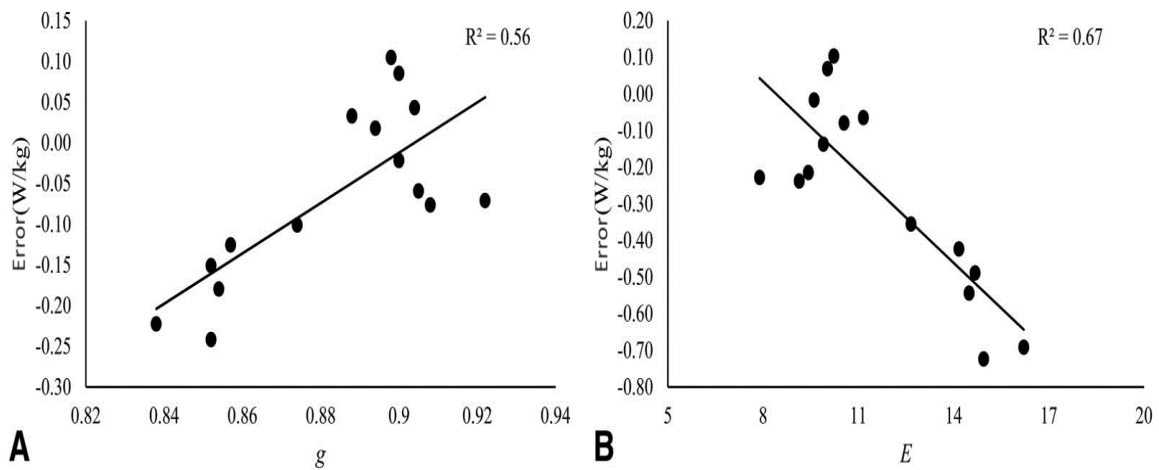
|                        | Factores | 30 minutos  |        |                        | 60 minutos          |        |                         |                     |
|------------------------|----------|-------------|--------|------------------------|---------------------|--------|-------------------------|---------------------|
|                        |          |             | p      | Error (IC 95%)         | Pendiente (IC 95%)  | p      | Error (IC 95%)          | Pendiente (IC 95%)  |
| PC <sub>1/tiempo</sub> | PC (W)   | 265 (59)    | 0.001  | 12.80† (6.89 a 18.71)  | 0.06 (-0.04 a 0.17) | <0.001 | 21.92† (14.99 a 28.85)  | 0.14‡ (0.01 a 0.04) |
|                        | W' (kJ)  | 14.3 (1.19) |        |                        |                     |        |                         |                     |
| PC <sub>trabajo</sub>  | PC (W)   | 263 (58)    | 0.001  | 11.53† (6.02 a 17.04)  | 0.05 (-0.06 a 0.14) | <0.001 | 20.47† (13.99 a 26.95)  | 0.12‡ (0.02 a 0.23) |
|                        | W' (kJ)  | 15.0 (2.32) |        |                        |                     |        |                         |                     |
| PC <sub>stryd</sub>    | PC (W)   | 264 (58)    | <0.001 | 5.27† (2.79 a 7.74)    | 0.03 (-0.01 a 0.07) | 0.007  | 6.13† (1.95 a 10.31)    | 0.06 (-0.02 a 0.13) |
|                        | W' (kJ)  | —           |        |                        |                     |        |                         |                     |
| PC <sub>cheetah</sub>  | PC (W)   | 263 (58)    | 0.002  | 1.33† (0.59 a 2.08)    | 0.01 (-0.00 a 0.02) | 0.021  | 0.93† (0.16 a 1.70)     | 0.00 (-0.01 a 0.02) |
|                        | W' (kJ)  | 28.1 (1.90) |        |                        |                     |        |                         |                     |
| PC <sub>3hyp</sub>     | PC (W)   | 259 (58)    | 0.019  | -3.13† (-5.68 a -0.59) | 0.02 (-0.02 a 0.07) | 0.203  | -2.07 (-5.38 a 1.25)    | 0.03 (-0.03 a 0.10) |
|                        | W' (kJ)  | 29.8 (2.31) |        |                        |                     |        |                         |                     |
| PC <sub>2hyp</sub>     | PC (W)   | 256 (58)    | <0.001 | -6.27† (-7.82 a -4.71) | 0.01 (-0.01 a 0.04) | 0.015  | -4.13† (-7.33 a -0.93)  | 0.03 (-0.04 a 0.09) |
|                        | W' (kJ)  | 21.9 (2.48) |        |                        |                     |        |                         |                     |
| Ley potencia           | K (W)    | 612 (51)    | 0.980  | -0.07 (-5.66 a 5.53)   | 0.04 (-0.06 a 0.15) | 0.052  | -6.20 (-12.47 a 0.07)   | 0.11‡ (0.01 a 0.22) |
|                        | G        | 0.88 (0.03) |        |                        |                     |        |                         |                     |
| Peronnet               | PAM (W)  | 307 (58)    | 0.243  | -3.24 (-8.94 a 2.46)   | 0.05 (-0.05 a 0.16) | 0.001  | -14.08 (-21.12 a -7.03) | 0.14‡ (0.03 a 0.25) |
|                        | E        | 11.7 (2.60) |        |                        |                     |        |                         |                     |

\*PC: Potencia crítica; IC 95%: Intervalo de confianza del 95%; PC<sub>trabajo</sub>: Modelo de PC trabajo-tiempo; PC<sub>1/tiempo</sub>: Modelo de PC 1/tiempo; PC<sub>2hyp</sub>: Modelo de PC hiperbólica de 2 parámetros; PC<sub>3hyp</sub>: Modelo de PC hiperbólica de 3 parámetros; PC<sub>stryd</sub>: Modelo de PC no revelada por Stryd; PC<sub>cheetah</sub>: Modelo de PC de Golden Cheetah. †: El error fijo está presente si el IC del 95 % no incluye el 0. ‡: El error proporcional está presente si la pendiente de la línea de regresión es ≠ de 0.

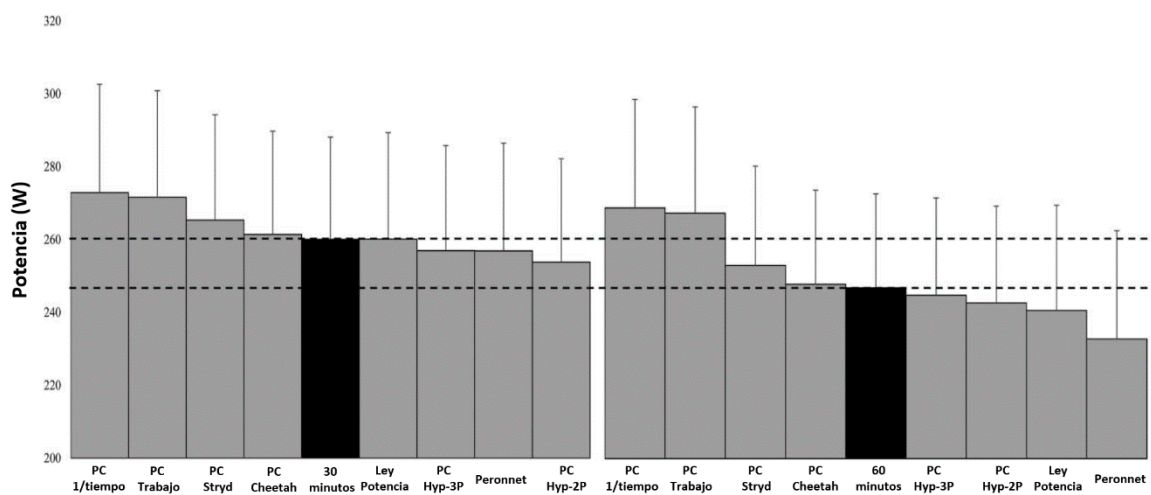
**60 minutos.**

La PPM real de 60 minutos fue de 247 (51) W (**figura 19**). Los modelos de PC<sub>1/tiempo</sub> (21.92 W [14.99–28.85 W], 8.60 %), PC<sub>trabajo</sub> (20.47 W [13.99–26.95 W], 8.07 %) PC<sub>stryd</sub> (6.13 W [1.95–10.31 W], 2.39 %) y PC<sub>cheetah</sub> (0.93 W [0.16–1.70 W], 0.38 %) sobreestimaron la PPM de 60 minutos ( $P \leq 0.021$ ; **figura 20**). Los modelos de PC<sub>2hyp</sub> (-4.13 W [-7.33 W a -0.93

W], -1.84 %) y Peronnet (-14.08 W [-21.12 a -7.03 W], -6.57 %) subestimaron la PPM en 60 minutos ( $p \leq 0.015$ ). Los modelos de  $PC_{3hyp}$  (-2.07 W [-5.38 a 1.25 W], -1.00 %) y la ley de potencia (-6.20 W [-12.47 a 0.07 W], -3.14 %) no mostraron un error fijo ( $P \leq 0.052$ ). Los modelos  $PC_{1/tiempo}$ ,  $PC_{trabajo}$ , ley de potencia y Peronnet revelaron un error proporcional. Los valores de  $g$  más bajos para el modelo de ley de potencia y los valores de  $E$  más altos para el modelo de Peronnet indujeron un mayor error en la estimación de la producción de potencia en 60 minutos (**figura 20**).



**Figura 19:** Relación entre el exponente  $g$  del modelo de ley de potencia (A) y el parámetro  $E$  del modelo de Peronnet (B) con el error entre la producción de potencia media (PPM) prevista y real de 60 minutos.  $R^2$ : Coeficiente de determinación.



**Figura 20:** Producción de potencia media (PPM) prevista y real de 30 minutos y 60 minutos. PC: Potencia crítica.

A photograph of two male athletes standing on a running track. The athlete on the left is shirtless, wearing a blue cap, a black waistband, and black shorts with a white Nike logo. He is wearing orange and blue running shoes. The athlete on the right is wearing a blue long-sleeved jacket, black pants, and blue running shoes. They are both looking towards the camera with their arms slightly out. The background shows a green field, a track, and some trees under a clear sky.

## 5. DISCUSIÓN

A continuación, se discuten los principales resultados encontrados en cada estudio de la presente Tesis Doctoral:



### **Estudio 1:**

***Umbral de potencia funcional versus potencia crítica:***

***Conceptos iguales pero diferentes valores.***

-----∞-----

***Running functional threshold versus critical power:***

***Same concept but different values.***

Este estudio tuvo como objetivo estimar tanto el UPF como la PC a partir de una única PT más corta y determinar la localización de estos en la CPD. Los hallazgos informados aquí revelaron que se pueden obtener estimaciones válidas del UPF, aplicando un factor de corrección de 85%, 90% y 95 % a la PPM desarrollada en las PT10, PT20 y PT30, respectivamente. Asimismo, se puede obtener una estimación válida de PC, aplicando un factor de corrección del 95% a la PPM desarrollada en la PT20. La PC se localizó en la PT30, en consecuencia, difería del UPF en 14 (7.0 a 21) W y 0.2 (0.1 a 0.3) W·kg<sup>-1</sup>.

Utilizando la métrica de potencia en carrera, Cartón-Llorente et al. (2021) proporcionaron por primera vez estimaciones del UPF en carrera, sugiriendo un factor de corrección de 90%, 94% y 95% para los valores de PPM desarrollados en una PT10, PT20 y PT30 (Cartón-Llorente et al., 2021). Los diferentes factores de corrección obtenidos en el presente estudio (PT10: 85% vs. 90 %; PT20: 90% vs. 94 %; PT30: 95% vs. 95 %) podrían deberse a las diferentes versiones de medidores de potencia utilizados, las condiciones establecidas (interiores y exteriores) y los atletas recreativos y altamente entrenados reclutados. Por lo tanto, los atletas y practicantes deben tener en cuenta estos matices al aplicar los FCI antes mencionados.

El “método del FCI” propuesto por Allen et al. (2019) es una práctica común en el campo del ciclismo. Se sugiere aplicar un 95% a la PPM desarrollado en una PT20 para determinar el UPF. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que las estimaciones del UPF se sobrestimarían si no se realiza el esfuerzo máximo de 5 minutos que estos autores sugirieron incluir previamente al PT20. Este procedimiento de evaluación parece estar relacionado con la pérdida de linealidad de la disminución de la potencia con el aumento del tiempo más allá de la PC (Hill, 1993), que disminuiría a un ritmo más rápido o más lento según la capacidad de resistencia del atleta (Zinoubi et al., 2017).

Parece ser, que desafiar la capacidad de resistencia del atleta en el procedimiento de evaluación aumentaría la precisión de la estimación del UPF. En este sentido, nuestros resultados van en la línea de este matiz, reduciéndose progresivamente el EES con el aumento de la duración (PT10: 12.27 W y 0.19 W·kg<sup>-1</sup>; PT20: 9.03 W y 0.15 W·kg<sup>-1</sup>; PT30: 4.03 W y 0.06 W·kg<sup>-1</sup>). Asimismo, Cartón-Llorente et al. (2021) encontraron mayor EES para PT10 (10.4 W) con respecto a PT20 y PT30 (EES = ~8.3 W).

Con respecto a la PC, diferentes estudios han reportado que el modelo de PC y los ensayos predictivos seleccionados condicionan el valor de la PC (Muniz-Pumares et al., 2019., Ruiz-Alias et al., 2023a). Dearing y Paton (2022) han informado recientemente de un fuerte acuerdo entre la PC determinada a través de la plataforma del medidor de potencia Stryd y la PPM asociada con el segundo UV, siendo conceptualmente válida. Cabe señalar que los usuarios del medidor de potencia Stryd obtendrían su valor de PC a través de su historial de entrenamiento de los últimos 90 días, en el que los mejores esfuerzos de



diferentes duraciones (es decir, largo [40-60 minutos], medio [10-20 minutos], cortos [3-5 minutos] y sprint [30-60 segundos]). Si bien este método podría ser un enfoque interesante para determinar la PC, el FCI del 95% de la PPM desarrollado en la PT20 podría ser una alternativa interesante si se requiere una evaluación inmediata.

Con respecto a los conceptos de UPF y PC, nuestros resultados mostraron que la PC estaba localizada en la PT30, y en consecuencia difería de la localización del UPF en la CPD. Estos resultados están en línea con los informados por Ruiz-Alias et al. (2023), donde la PC se determinó utilizando diferentes modelos de PC y a través de cuatro PT, dentro del rango de duración comúnmente recomendado (es decir, de 3 a 20 minutos). Aunque se informaron valores de PC significativamente diferentes, estos se asociaron con la PPM desarrollada en la PT20 y PT30 (Ruiz-Alias et al., 2023a).

Por lo tanto, aunque ambos conceptos han sido concebidos como el mantenimiento de la tasa máxima de trabajo en un estado estable metabólico, existen discrepancias entre ellos. Por un lado, el UPF se ha asociado con el MEEL (Borszcz et al., 2019., Jeffries et al., 2021., Lillo-Bevia et al., 2022). En este sentido, Jones et al. (2019) han aclarado que el MEEL se localiza alrededor de un 7% por debajo de la PC, al igual que la diferencia del 6% observada en nuestro estudio, entre UPF y la PC.

Mattioni-Maturana et al. (2016) han informado de un estado estacionario de  $VO_2$ , lo que indica que existe un estado metabólico estacionario superior. Este hecho podría ser motivo de gran preocupación en la prescripción de la zona de entrenamiento. Por ejemplo, según nuestros resultados, realizar un esfuerzo al 105% del UPF supondría estar en un ritmo de trabajo bajo PC, en el que se alcanzaría una respuesta metabólica y cardiorrespiratoria en estado estacionario, como comportamiento característico del dominio de intensidad pesado (Jones et al., 2010). Por el contrario, al 105% de la PC, los atletas manifestarían una inestabilidad metabólica considerable, como respuesta característica del dominio de intensidad severa (Jones et al., 2010).



## **Estudio 2:**

***Prueba de potencia crítica 9/3 minutos en carrera:  
Localización del umbral mecánico con respecto a los  
umbrales ventilatorios y consumo de oxígeno  
máximo.***

-----∞-----

*9/3-Minute running critical power test: Mechanical  
threshold location with respect to ventilatory  
thresholds and maximum oxygen uptake.*

Este estudio tuvo como objetivo determinar la localización de la PC estimada, a partir de la PT de 9/3 minutos de Stryd, con respecto a los UV (es decir, UA y PCR) obtenidos de una PEG. Los principales hallazgos fueron: (1) El UA, PCR, y la PC se localizaron en 72.86% (6.01%), 86.40% (4.34%), y 88.71% (5.84%) del  $VO_2\text{max}$ , respectivamente y (2) la PC no difiere significativamente del PCR en un grupo de atletas de alto nivel.

La localización de la PC con respecto al  $VO_2\text{max}$  ha sido determinada recientemente a través de una cinta rodante instrumentada (Patoz et al., 2021). Para este fin, Patoz et al. (2021) determinaron 3 potencias diferentes: la potencia externa, calculada a partir de las fuerzas de reacción del suelo; la potencia interna, estimada a partir de la ecuación propuesta por Nardello et al. (2011); y la suma de ambos para obtener la potencia total. Como cada valor de la PC fue cerca de la VC ( $\sim 82\%$  del  $VO_2\text{max}$ ), los autores concluyeron que el concepto de PC representa la misma tasa metabólica independientemente del tipo de métrica utilizada. Esto implica que la PC puede ser derivado de la estimación del trabajo interno, cuyos parámetros predictivos pueden obtenerse de forma válida y precisa a partir de los sensores inerciales (es decir, tiempo de contacto con el suelo, frecuencia de zancada y factor de trabajo) y, en concreto, por parte del dispositivo Stryd (García-Pinillos et al., 2018).

Desde su lanzamiento al mercado, saber qué tipo de potencia informa Stryd ha sido de gran interés entre la comunidad de corredores. Cerezuela-Espejo et al. (2020) determinaron la relación entre la potencia reportada por 5 medidores comerciales y 2 modelos teóricos que varían en velocidad, peso y pendiente. El medidor de potencia Stryd mostró mayor sensibilidad a estos factores entre los medidores evaluados ( $r \geq 0.947$ ), además este dispositivo reportó el trabajo externo (Cerezuela-Espejo, Hernández-Belmonte, Courel-Ibáñez, Conesa-Ros, Martínez-Cava, et al., 2020). Por lo tanto, la PPM (en W por kilogramo) reportada por Stryd ha mostrado una gran relación con el  $VO_2$  (en mililitros por kilogramo por minuto) y velocidad de carrera (en kilómetros por hora) cuando se mide durante una PEG, que varía en velocidad como en el presente estudio ( $r^2 = 0.97$  y  $0.99$ , respectivamente) (Cerezuela-Espejo, Hernández-Belmonte, Courel-Ibáñez, Conesa-Ros, Mora-Rodríguez, et al., 2020., García-Pinillos et al., 2019).

En relación a la localización de la PC con respecto a los UV, pocos estudios han determinado la proximidad al PCR en ciclismo (Galán-Rioja et al., 2020). Sin embargo, debido a la sensibilidad de la estimación de la PC y la localización del PCR, con respecto a los protocolos utilizados, hay una necesidad de resaltar la esencia dependiente de estos resultados, según los ensayos predictivos y PEG utilizadas.

Bishop et al. (1998) afirmaron que los ensayos predictivos utilizados deben durar al menos 3 minutos para no sobreestimar la PC debido a la inercia aeróbica. Jones et al. (2010) también justificó la posible limitación para generar potencia mecánica de las PT que

duran menos de 2 minutos y el componente motivacional de las PT de más de 20 minutos para una estimación adecuada. Además, los resultados de la PEG podrían verse influenciados por la tasa de aumentos, dando diferente PPM para el mismo  $VO_2$  en el PCR (Keir et al., 2015; Leo et al., 2017).

McLellan et al. (1992) y Dekerle et al. (2003) utilizaron 5 ensayos predictivos al 90%–95%–100%–110%–120% del  $VO_2$ max para determinar la PC. El tiempo hasta el agotamiento fue aproximadamente entre 2 y 15 minutos, lo que resultó en valores de PC similares a 82.2% (2.6%) y 85.4% (4.8%) del  $VO_2$ max, respectivamente, en estudiantes regularmente activos. McLellan et al. (1992) determinaron que el UA (72.4% [4.4%] de  $VO_2$ max) se localizó un 10% más bajo que la PC (82.2% [2.6%] del  $VO_2$ max), mientras que Dekerle et al. (2003) afirmaron que la PC (85.4% [4.8%] de  $VO_2$ max) estuvo cerca del PCR (85.3% [5.6%] de  $VO_2$ max), determinado a partir de una PEG con incrementos de 25 W/min, ambos por encima del MEEL (74.3% [4.0%] de  $VO_2$ max).

A pesar de las diferentes disciplinas (es decir, ciclismo y carrera), nuestros resultados están en consonancia con la proximidad entre PC y PCR. Sin embargo, vale la pena señalar que estos umbrales varían sustancialmente entre los hombres jóvenes sanos, que van desde 45% a 73% para el UA y 69% a 96% de  $VO_2$ max para el PCR (Keir et al., 2022). En corredores de alto nivel de media y larga distancia, se ha informado que el UA se sitúa a 69.5% (7.7%) y 74.6% (9.1%) del  $VO_2$ max y el PCR a 88.2% (6.4%) y 88.3% (6.2%) del  $VO_2$ máx, con valores máximos de 65.9 (4.5) y 71.6 (5.0) ml/kg/min, respectivamente (Rabadán et al., 2011).

Las consideraciones metodológicas antes mencionadas deben tener en cuenta el aspecto ecológico de la determinación de la PC y la funcionalidad de una estimación adecuada. Como se señaló anteriormente, los ensayos predictivos de 15 a 20 minutos podrían tener efecto en el componente motivacional, lo que podría influir en la disposición del atleta, y, en consecuencia, conducir a una estimación incorrecta de la PC. Para abordar este problema, algunos protocolos han abogado por inducir el agotamiento en tiempos más cortos.

Vanhatalo et al. (2007) demostraron que en una prueba máxima de 3 minutos, la PPM disminuyó a un nivel de estado estable en ~135 segundos, que no difería significativamente con un valor de PC determinado a partir de 5 tasas de trabajo constantes, que van de 2 a 15 minutos hasta el agotamiento. Sin embargo, es necesario resaltar que este protocolo requiere una PEG realizada en un día separado, para determinar la resistencia de los pedales en la prueba máxima de 3 minutos. Bergstrom et al. (2013) aplicaron este protocolo para determinar la localización de la PC con respecto al PCR, no encontrando diferencias significativas entre los 83% (6%) y 84% (6%) de los valores de  $VO_2$ max obtenidos, respectivamente. Aplicado en carrera, Gama et al. (2018) demostraron

que en los últimos 30 segundos de una prueba máxima de 3 minutos, se alcanzan valores de potencia similares a la PC determinada por 4 esfuerzos máximos, que duran de 2 a 15 minutos. Por lo tanto, es necesario destacar el hándicap de utilizar una cinta rodante no motorizada para correr y una celda de carga específica, para extrapolar los datos obtenidos a través de la prueba propuesta a otros contextos (por ejemplo, correr sobre el suelo).

Otro protocolo alternativo para determinar la PC es el establecido por Morton et al. (1995) donde la PC se determina a partir de la relación entre la Pmax alcanzada en un mínimo de 3 PEG y la raíz cuadrada de las diferentes pendientes incrementales en rampa. Leo et al. (2017) aplicaron este modelo para comparar la estimación de la PC con los valores del PCR obtenidos de 3 PEG, que difieren en sus pendientes de velocidad y trabajo (es decir, lento: 15 W/minutos; medio: 30 W/minutos; rápido: 45 W/minutos). La PC (247 [43] W) fue significativamente diferente del valor del PCR obtenida en lo rápido (292 [41] W) y medio (268 [37] W), la pendiente de trabajo se inclinó, pero no desde el lento (243 [35] W). Keir et al. (2015) encontraron diferencias significativas en la PPM, pero no en el  $VO_2$  de la PC determinada a partir de 5 tasas de trabajo constantes, y una PEG con una pendiente de velocidad de trabajo media (25 W/min). Parece ser que los protocolos incrementales lentos (<30 W/min) implican la manifestación del componente lento del  $VO_2$  en tasas de trabajo por encima del UA, lo que resulta en el logro de PPM más bajas para un  $VO_2$  dado (Leo et al., 2017).

Nuestros resultados mostraron diferencias no significativas entre PC y PCR al aplicar un protocolo de PC de 2 esfuerzos máximos (es decir, PT 9/3) y una PEG con una pendiente de tasa de trabajo de 7 W/min. Esto podría haber implicado el desarrollo del componente lento del  $VO_2$ , lo que resultó en una menor PPM en el PCR. Al respecto, Kuipers et al. (2003) analizaron el efecto de etapas de diferentes duraciones en variables fisiológicas, es decir, PEG con etapas de 1, 3 y 6 minutos, que dieron como resultado valores de  $VO_{2max}$  y velocidades de carrera similares en el punto de quiebre  $VE/VO_2$ , pero la velocidad máxima de carrera aumentó a medida que se redujo la duración de la etapa (Kuipers et al., 2003). Por tal razón, se deben desarrollar más combinaciones de pruebas de PC y PEG, para consolidar esta relación.

Pepper & Housh. (1992) determinaron la VC de un grupo de 10 adultos masculinos (VC: 13.43 [2.04] km/h;  $VO_{2max}$ : 54.4 [6.6] mL/kg/min) en 5 series de ejercicios que van desde 13 a 22 km/h en una cinta rodante. El tiempo de agotamiento a intensidades de 70%–85%–100%–115%–130% de la VC fueron > a 60/55.12 (10.29) /16.43 (6.08) /7.16 (2.84) /3.43 (1.40) minutos. A pesar, de estos tiempos de agotamiento, que corresponden a un valor de VC obtenida de 5 series de ejercicio, en comparación con nuestra PC determinada a partir de 2 PT. Esto podría constituir un cierre de referencia, que es necesario analizar más a fondo de acuerdo con el protocolo utilizado.

Gorostiaga et al. (2022) han ilustrado recientemente que incluir pruebas de predicción más largas en el modelo puede modificar la VC hasta 1 km/h y, en consecuencia, influir en el agotamiento. El MEEL se corrobora a partir de sesiones de ejercicio con una duración de 30 minutos sin un aumento de 1 mmol/L en los últimos 20 minutos (Beneke, 2003). Por lo tanto, la PC podría ser corroborada por el hecho de alcanzar un  $\text{VO}_2$  tardío pero estable en caso de estar a un ritmo de trabajo igual o inferior al mismo, o por el hecho de alcanzar o superar el  $\text{VO}_{2\text{max}}$  (Hill et al., 2002).



### **Estudio 3:**

***Potencia crítica en corredores de resistencia: Una comparación de parámetros estimados y reportados por diferentes modelos teóricos.***

-----∞-----

*Critical power in endurance runners: A comparison of the estimated parameters reported by different theoretical models.*

Este estudio fue diseñado (i) para comparar los parámetros de PC y  $W'$  reportados por los diferentes modelos de PC, disponibles en los paquetes de software de análisis actuales (plataforma Golden Cheetah y Stryd), (ii) para localizar los valores de PC en la CPD, y (iii) para determinar la influencia del modelo PC utilizado en el balance de  $W'$ . Los resultados revelaron que (i) se encontraron diferencias significativas entre los modelos de PC con los parámetros estimados (es decir, PC y  $W'$ ), (ii) la  $PC_{cheetah}$  se localizó entre la tasa de trabajo de 10 y 20 minutos, el  $PC_{cheetah}$  en el trabajo de 20 minutos y el  $PC_{1/tiempo}$ ,  $PC_{hyp}$  y  $PC_{stryd}$  al ritmo del trabajo de 30 minutos, y (iii) la precisión del balance  $W'$  para predecir la PTA en el dominio de intensidad severa estuvo condicionada al modelo de PC utilizado, siendo la  $PC_{1/tiempo}$  la más precisa.

Los diferentes valores de PC reportados por cada modelo están en línea con los resultados obtenidos en estudios previos (Gaesser et al., 1995., Housh et al., 2001., Mattioni-Maturana et al., 2018). Mattioni-Maturana et al. (2018) informaron recientemente que el rango de PC oscila entre 252 y 275 W cuando se usan los diferentes modelos de PC en ciclismo (Mattioni-Maturana et al., 2018). Asimismo, Gaesser et al. (1995) informó una amplia gama entre modelos (197 a 242 W). Al correr, Housh et al. (2001) observaron una diferencia de hasta 2.5 km/h (12.8 a 15.3 km/h). Estas diferencias podrían ser de relevancia dependiendo de su magnitud. En el presente estudio, tales diferencias resultaron en distintas asociaciones de la PC con el ritmo de trabajo realizado en la PT de 20 y 30 minutos, según el modelo utilizado. De acuerdo, al 5.7 % de diferencia observadas entre estas PT, se esperan diferentes respuestas fisiológica (Hill et al., 2002., Jones et al., 2008., Poole et al., 1988).

Hill et al. (2002) observaron que la cinética del oxígeno de un grupo de ciclistas adultos entrenados recreativamente en PC y 5% por encima diferían significativamente, alcanzando el  $VO_2max$  solo en este último (Hill et al., 2002). Poole et al. (1988) también informaron un  $VO_2max$  cercano cuando los ciclistas reclutados realizaron una PTA a una tasa de trabajo del 5 % por encima de la PC, alcanzando el agotamiento en ~18 minutos en comparación con los 24 minutos completados sin una coacción apreciable en la PC. Asimismo, Jones et al. (2008) observaron un detrimento de la homeostasis celular al realizar una extensión de rodilla con una sola pierna al 10% por encima de la PC. Por lo tanto, los atletas y practicantes deben ser conscientes que las diferencias obtenidas entre modelos pueden implicar diferentes respuestas fisiológicas.

Con respecto a  $W'$ , los modelos de PC de tres parámetros reportaron valores mayores que los modelos de PC de dos parámetros, lo que está en línea con los resultados observados en estudios previos (Bergstrom et al., 2014., Gaesser et al., 1995). Como se muestra en el presente estudio, la estimación del PTA de 4 minutos solo se logró con la  $PC_{1/tiempo}$ , sobrestimándose a medida que aumentaba  $W'$  en los diferentes modelos de PC. Artículos anteriores, informaron estimaciones precisas del rendimiento de carrera



utilizando el balance  $W'$ , a través de los valores medios de la PC y la  $W'$  informados por los modelos lineales (Kirby et al., 2021). Kirby et al. (2021) estimaron el mejor tiempo posible de finalización de los atletas de élite en los campeonatos del mundo de 10000 metros, usando su mejor desempeño histórico de 1500 a 10000 metros (es decir,  $\sim 3$  a 30 minutos), obteniendo una diferencia  $\sim 4$  segundos. Por lo tanto, parece que el  $W'$  derivado de los modelos de PC lineales representaría mejor el rendimiento de carrera real.

Con base en lo anterior, el atractivo de estos parámetros está condicionado a la precisión de las estimaciones. Sin embargo, también vale la pena considerar la viabilidad del protocolo utilizado para determinar PC y  $W'$ . Al respecto, Ruiz-Alias et al. (2022) han confirmado recientemente que la determinación de la PC a través de dos PT de 9 y 3 minutos de duración, con 30 minutos de descanso dentro de la misma sesión de prueba, es un protocolo simplificado válido debido a sus diferencias no significativas con el PCR.

Mattioni-Maturana et al. (2018) compararon la  $W'$  de diferentes modelos de PC, utilizando pruebas de cinco tiempos (es decir,  $\sim 2, 3, 7, 12$  y 20 minutos), con diferentes protocolos simplificados de cuatro, tres y dos PT, tomando como referencia el único modelo de PC válido obtenido en el presente estudio (es decir,  $PC_{1/\text{tiempo}}$ ). Los 16.1 kJ derivados de las cinco PT podrían alcanzarse a través de la combinación de dos PT de 2 y 12 minutos (es decir, 16.3 kJ). Sin embargo, la validez de  $W'$  debe probarse a través del balance de  $W'$  para interpretar si tales diferencias son relevantes en la estimación de PTA en el dominio de intensidad severa.

Cabe mencionar que la PC y el  $W'$  también son susceptibles de variar, no solo por el modelo aplicado, sino también por los ensayos predictores seleccionados o por ligeros cambios en el rendimiento. Triska et al. (2018) observaron que el uso de diferentes duraciones dentro del rango recomendado (es decir, 12, 7, 3 minutos, frente a 10, 5, 2 minutos) da como resultado pequeñas diferencias significativas para la PC ( $p = 0.026$ ; tamaño del efecto = 0.305) y ninguna diferencia significativa en correlaciones con  $W'$  ( $p = 0.884$ ;  $r = 0.053$ ). Asimismo, Triska et al. (2017) reportaron un error típico de 3.8% y 18.7% para PC y  $W'$  respectivamente, cuando se realizaron los mismos ensayos de predicción en condiciones de laboratorio y de campo. Por lo tanto, además de las diferencias entre los modelos, estos deben tenerse en cuenta.



### **Estudio 4:**

***Determinación de la potencia crítica y la  $W'$  en carrera: Precisión de los diferentes modelos de dos puntos al usar métricas de potencia.***

-----∞-----

*Determining critical power and  $W'$  in running:  
Accuracy of different two-point models using the  
power metric.*

El propósito de este estudio fue determinar el nivel de acuerdo de los valores de PC y  $W'$  obtenidos en carrera, a través de diferentes combinaciones de dos PT, con los derivados de cinco PT, utilizando los modelos lineales de PC. Los resultados obtenidos confirmaron que la PC se puede estimar con precisión a partir de dos PT, con una diferencia mínima de 7 minutos entre ellas. Los 3-10 minutos fue la combinación válida más corta, mientras que 3-20, 4-20 y 5-20 minutos mostraron el mayor nivel de acuerdo.  $W'$  presentó un EES alto en ambos modelos lineales de PC al utilizar las cinco PT. Por lo tanto, ninguna de las combinaciones de dos tiempos alcanza un nivel aceptable de precisión para determinar  $W'$ .

El  $PC_{trabajo}$  y  $PC_{1/tiempo}$  alcanzaron una adecuada bondad de ajuste para la PC en base a los criterios establecidos en estudios previos (EES < 5%) (Black et al., 2015, 2017., Jones et al., 2019). Asimismo, el criterio de validez para aceptar una combinación de dos tiempos se estableció en este umbral del 5%, debido a las diferentes respuestas metabólicas y PTA, reportadas a dichas intensidades por encima de la PC (Hill et al., 2002., Poole et al., 1988). Hill et al. (2002) compararon la cinética del oxígeno de un grupo de ciclistas adultos entrenados recreativamente, en PC y 5% por encima, en comparación con el  $VO_2$  logrado en una PEG. El  $VO_2$  alcanzado en la prueba de PC fue significativamente menor, pero no a la tasa de trabajo superior al 5 % (Hill et al., 2002). Poole et al. (1988) también mostraron resultados similares, encontrando un pico de  $VO_2$  cercano al máximo en los ciclistas reclutados, al realizar una PTA a una tasa de trabajo 5% por encima de la PC, alcanzando el agotamiento ~18 minutos en comparación con los 24 minutos completados, sin coacción apreciable en la PC. Por lo tanto, las combinaciones de prueba de dos tiempos, que informaron una diferencia de PC, por encima de este umbral del 5%, se consideraron inválidas.

Teniendo en cuenta la naturaleza exhaustiva de las PT, la combinación válida de 3 a 10 minutos podría aumentar el interés de los atletas y practicantes para determinar la PC. Los resultados informados por Ruiz-Alias et al. (2022) también refuerzan la factibilidad de simplificar el protocolo de prueba, al observar que la PC obtenida de la combinación 9-3 minutos, resulta en una diferencia no significativa con la tasa de trabajo asociada con el PCR. En este sentido, los resultados aportados por Figueiredo et al. (2021) en un grupo de corredores recreativos, también apoya que se pueden obtener valores de VC similares de tres (es decir, 2.600 metros; 1.800 metros; 1.000 metros) y dos distancias (es decir, 2600 metros y 1000 metros) realizadas en la misma sesión de prueba, con 30 minutos de descanso entre ellas.

Resultados proporcionados por Kordi et al. (2019) y Smith et al. (2011) también apoyan que un modelo de dos puntos reporta valores similares de VC con los modelos de tres o cuatro puntos. Sin embargo, cabe destacar que la duración de las dos PT seleccionadas, podría condicionar la precisión de las estimaciones de PC y VC. En este

sentido, la combinación de 3-10 minutos sobrestimó ligeramente la PC, aunque en un tamaño aceptable ( $< 5\%$ ). Por lo tanto, las PT realizadas en la misma sesión de prueba (Figueiredo et al., 2021., Ruiz-Alias et al., 2022) o de mayor duración podrían mejorar la precisión de la estimación de la PC, que está en línea con reducido error y EES observado en las combinaciones válidas más largas (es decir, 3-20, 4-20, 5-20 y 10-20 minutos).

El  $PC_{trabajo}$  y  $PC_{1/tiempo}$  no alcanzaron la bondad de ajuste adecuada establecida para  $W'$  en estudios previos (EES  $< 10\%$ ) (Black et al., 2015, 2017., Jones et al., 2019). Sin embargo, vale la pena resaltar que este parámetro presenta una alta sensibilidad, reportándose un EES de 9 a 25% (Black et al., 2015, 2017., Triska et al., 2017), lo que podría limitar la aplicabilidad de los modelos de balance en  $W'$  (Skiba et al., 2021). Al respecto, Triska et al. (2017) determinaron la VC y  $D'$  a partir de tres carreras de  $\sim 3.5$ - 6.7 y 17 minutos, realizadas en condiciones de laboratorio y campo, obteniendo un EES de  $\sim 14$  y  $\sim 25\%$  para el  $D'$ , respectivamente. Los ligeros cambios en el rendimiento observados en las tres carreras (es decir,  $\sim 1.6$ - 37 y 27 minutos) dieron como resultado un cuestionable nivel de acuerdo de  $D'$  entre las condiciones (EES:  $\sim 18\%$ ).

Triska et al. (2018) también observaron diferencias moderadas en la  $D'$  para dos protocolos realizados dentro del rango de duración recomendado (es decir, 12, 7, 3 minutos vs. 10, 5, 2 minutos). Asimismo, Galbraith et al. (2015) usaron el mismo protocolo para determinar VC y  $D'$  (es decir, 12, 7, 3 minutos), para estimar el PTA de diferentes protocolos de intervalo, usando los modelos de recuperación del balance en  $D'$  lineales y no lineales, obteniendo una precisión baja con el PTA real. Según Skiba et al. (2015) en el modelo de balance  $W'$ , una diferencia del 10% en el valor  $W'$  obtenido en el presente estudio, hubiera supuesto una diferencia estimada de  $\sim 90$  segundos en la PTA, de un esfuerzo sostenido al 105% de la PC ( $\sim 10$  minutos). Por lo tanto, las combinaciones de prueba de dos tiempos que informaron una diferencia de  $W'$  por encima de este umbral del 10% se consideraron inválidas. Los estudios actuales sugieren, que para alcanzar un nivel apropiado de precisión en la  $W'$ , se deben agregar más ensayos de predicción al modelo, hasta que el EES se encuentre dentro del umbral aceptable del 10% (Muniz-Pumares et al., 2019). Sin embargo, con las cinco PT utilizadas en el presente estudio, ninguno de los modelos lineales de PC logró tal nivel de precisión.

Los atletas y los practicantes deben ser conscientes que el uso de un modelo de dos puntos no proporcionaría el EES asociado a cada parámetro. Esto implica, que la validez de las citadas combinaciones está condicionada a la implicación de los atletas, siendo necesario asegurar el máximo esfuerzo en cada PT. Asimismo, estas combinaciones válidas sólo deben extrapolarse a deportistas de un nivel similar al reclutado en el presente estudio, por lo tanto, es necesario determinarlo sobre otras poblaciones. Finalmente, los atletas y practicantes, también deben ser conscientes que los resultados de una prueba de PC realizada en una cinta rodante, pueden no ser extrapolables a correr al aire libre.



### **Estudio 5:**

***¿Podemos predecir la carrera de larga duración  
mediante la producción de potencia? Un asunto de  
seleccionar las pruebas de predicción y el modelo  
empírico adecuado.***

-----∞-----

*Can we predict long-duration running power output?  
A matter of selecting the appropriate predicting trials  
and empirical model.*

Este estudio tuvo como objetivo determinar la validez de diferentes modelos empíricos para predecir la PPM de larga duración (es decir, 60 min), cuando se utilizan configuraciones de prueba de dos o tres tiempos. Los resultados revelaron que los modelos de PC basados en evidencia (es decir,  $PC_{\text{trabajo}}$ ,  $PC_{1/\text{tiempo}}$ ,  $PC_{2\text{hyp}}$  y  $PC_{3\text{hyp}}$ ), los modelos patentados de PC no revelados (es decir,  $PC_{\text{cheetah}}$  y  $PC_{\text{stryd}}$ ), así como los modelos no asintóticos (es decir, la ley de potencia y Peronnet) proporcionaron estimaciones válidas de PPM en 60 minutos, pero se requieren diferentes configuraciones de prueba para su predicción.

Los modelos lineales de PC (es decir,  $PC_{\text{trabajo}}$  y  $PC_{1/\text{tiempo}}$ ) proporcionaron estimaciones válidas de PPM en 60 minutos, cuando las pruebas de tiempo más cortas fueron  $\geq 3$  min y se combinaron con la prueba de predicción más larga (es decir, 30 minutos). Además, el uso de pruebas de tres tiempos no mejoró la precisión observada cuando se usaron solo pruebas de dos tiempos. Estos resultados revelan varios problemas con la  $PC_{\text{trabajo}}$  y  $PC_{1/\text{tiempo}}$ .

Primero, la linealidad observada para estos modelos a lo largo del dominio de intensidad severa (Hill, 1993) no se mantiene para los dominios de menor intensidad. Por lo tanto, se requirió una PT prolongada que probó la capacidad de resistencia de los atletas, para modelar la disminución de la potencia con el aumento del tiempo. Girardi et al. (2022) informaron necesidades similares donde el rendimiento real de 60 minutos en los corredores de élite analizados (20787 [525] metros) solo se estimó correctamente a través de la  $PC_{\text{trabajo}}$ , cuando se agregó la media maratón a las diferentes configuraciones de predicción de distancia. Este hecho también se refleja en el campo del ciclismo, en la estimación de llamado UPF. Allen et al. (2019) sugirieron que este punto puede estimarse válidamente mediante la aplicación de un factor de corrección del 95 % de la PPM desarrollada en 20 minutos. Sin embargo, cabe señalar que el protocolo de prueba incluye un esfuerzo total de 5 minutos antes de realizar la PT de 20 minutos, por lo que parece que esta relación lineal no sobreestima el rendimiento real.

En segundo lugar, los modelos lineales de PC están fuertemente influenciados por las pruebas de predicción localizadas en las regiones extremas de la línea de regresión, como lo revelaron las duraciones cortas y largas de las configuraciones de prueba de dos tiempos, y no se requiere una tercera duración para mejorar más la precisión de la prueba de estimación de PPM de 60 minutos. Se observaron influencias similares para los ensayos de predicción, localizados en regiones extremas de las líneas de regresión para estimar la PC, donde a lo largo del rango recomendado de 3 a 20 minutos (Bishop et al., 1998; Jones et al., 2010), se pueden obtener estimaciones válidas de PC, a través de la configuración de PT de 9-3 minutos (Ruiz-Alias et al., 2022). Así como valores de PC similares, cuando se usan dos PT predictivas (es decir, 3-10, 3-20, 4-20, 5-20 minutos), en comparación con cinco ensayos predictivos (3-4-5-10-20 minutos) (Ruiz-Alias et al., 2023b)

El modelo  $PC_{\text{stryd}}$  no revelado sigue una tendencia similar a las configuraciones de las PT de modelos de PC lineales. Estudios previos también han sugerido que este software aplica un modelo Lineal de PC, ya sea por su función de calculadora de PC (Ruiz-Alias et al., 2022) o su valor de PC automático informado en el sitio web del usuario (Dearing et al., 2022). Según el conocimiento de los autores, este es el primer estudio que analiza su función de calculadora de carrera, donde se requerían las mismas necesidades que los modelos lineales de PC para obtener estimaciones válidas de potencia en 60 minutos. Debe tenerse en cuenta para los atletas y practicantes que solo se introdujeron en el software las configuraciones de prueba de dos o tres tiempos, con el fin probar su capacidad de predicción.

La función estándar del software de Stryd es seleccionar los mejores rendimientos de las diferentes sesiones de entrenamiento realizadas en los 90 días anteriores (Dearing et al., 2022). Por lo tanto, este método podría introducir en su modelo varios esfuerzos submáximos que potencialmente limitarían la precisión de las estimaciones. Para resolver esta limitación de ajuste, el software Golden Cheetah aplica en su  $PC_{\text{cheetah}}$  un método de ajuste envolvente, que busca los mejores rendimientos en diferentes rangos de duración a lo largo de la CPD, y se denominan anaeróbica corta (20–90 s), anaeróbica (2–5 min), aeróbica (7-30 min) y aeróbica prolongado (> 30 min) (Liversedge, 2023a, b). Por otro lado, los atletas y practicantes también deben ser conscientes que no deben realizar varias pruebas dentro de cada rango de duración.

Los modelos de PC no lineales (es decir,  $PC_{2\text{hyp}}$  y  $PC_{3\text{hyp}}$ ) proporcionaron estimaciones válidas de PPM en 60 minutos, a través de las configuraciones de PT de 3-5-30 minutos y 5-10 y 30 minutos. De acuerdo con el concepto de PC, la PPM disminuiría con el aumento del tiempo hasta la asíntota horizontal (es decir, PC), que tiende al infinito (Hill, 1927). Cuando las pruebas de predicción se limitaron a la mayor duración recomendada para determinar la PC (es decir, < 20 minutos) (Bishop et al., 1998; Jones et al., 2010), la extrapolación de la línea de regresión a los 60 minutos resultó en una sobreestimación de PPM.

Sin embargo, Gorostiaga et al. (2022), encontró que la asíntota horizontal es muy sensible al ensayo de predicción más largo incluido en el modelo. Aunque agregar distancias más largas podría resultar en una subestimación de la PC, esto permitió acercar la asíntota al rango de PPM en 60 minutos. El modelo  $PC_{\text{cheetah}}$  no revelado proporcionó estimaciones válidas de PPM en 60 minutos, a través de las configuraciones de PT de 3-5-30 minutos y 5-10 y 30 minutos. De acuerdo con la información del fabricante (Liversedge, 2023a, b), la  $PC_{\text{cheetah}}$  se basa en un modelo bioenergético hidráulico (Morton, 2006), por lo que su modelado requiere aquellos ensayos de predicción que representen las capacidades anaeróbicas y aeróbicas máximas, así como el uso fraccionado de la PAM en tiempos más largos (Morton, 2006). En este sentido, parece que cuando las pruebas de tres tiempos

están dentro del dominio de intensidad severa (3-20 min), solo se exhiben las capacidades anaeróbicas y aeróbicas máximas (es decir, se alcanzaría el  $VO_2\text{max}$  y la  $W'$  se vaciaría con el agotamiento); la falta de una PT que represente el uso fraccional de la PAM hace que el modelo sea inexacto (no válido: 3-5-20 min o 5-10-20 min; válido: 3-5-30 min). Asimismo, cuando se incluye una PT dentro del dominio de intensidad extrema, no se exhiben las capacidades aeróbicas máximas (es decir, se alcanza el agotamiento antes del  $VO_2\text{max}$ ), el modelo se vuelve inexacto (por ejemplo, cualquier configuración de prueba de tres tiempos, incluyendo la PT de 1 minuto).

El otro modelo empírico probado en el presente estudio, que también se basa en la bioenergética y su construcción conceptual permite su cálculo a través de dos ensayos de tiempo, es el modelo de Peronnet (1989). Este modelo proporcionó estimaciones válidas de la PPM en 60 minutos, cuando la PT más corta duró entre 4 y 10 minutos; esto se combinó con las pruebas de predicción más largas (es decir, 20 y 30 minutos). Resolviendo la limitación de los modelos de asíntota (es decir, la PPM tiende al infinito), la incorporación de un factor de corrección (es decir, E) que modela el uso fraccionario de la PAM hacia 0, con el aumento del tiempo, ha permitido una estimación precisa en largas distancias como desempeño en maratón (Peronnet., 1989; Vandewalle., 2018). Por lo tanto, entre las diferentes configuraciones, el modelo Peronnet tendió a subestimar la PPM en 60 minutos, en comparación con la sobreestimación de los modelos de PC. Parece que esas configuraciones válidas estaban condicionadas a la proximidad del tiempo máximo sostenible, asumido en la PAM de 7 minutos establecida por Peronnet (1989).

Vandewalle (2018) informó diferencias significativas en los parámetros de PAM y E para el rango de distancias seleccionadas (es decir, 1500-10000 m vs 1500-5000 m vs 3000-10000 m). Se informaron valores de E más altos (es decir, una disminución más rápida de la PPM con el aumento del tiempo), cuando los 5000 m eran la distancia de predicción más larga (Vandewalle, 2018), lo que está en línea con el rendimiento subestimado aquí, cuando se usaron las duraciones más cortas ( es decir, < 10 minutos).

El modelo de ley de potencia proporcionó estimaciones válidas de PPM en 60 minutos para 24 de las 36 configuraciones calculadas. Estos resultados están en consonancia con la independencia del exponente g y el parámetro Pmax, según el rango de duraciones seleccionado (Girardi et al., 2022; Vandewalle, 2018; Zinoubi et al., 2017). Al respecto, Zinoubi et al. (2017) reportaron ligeros cambios en ambos parámetros según el rango de distancia seleccionado (1.500–5.000 m vs 1.500–10.000 m). Vandewalle (2018) no observó efectos significativos del rango de distancias introducido (1.500–5.000 m vs 1.500–10.000 m vs 3.000–10.000 m) en ambos parámetros. Asimismo, Girardi et al. (2022) informaron estimaciones válidas de la velocidad de carrera en 60 minutos, independientemente de las pruebas de predicción utilizadas (es decir, diferentes configuraciones de tres distancias usando 3000, 5000, 10000, media maratón y maratón).



Esta independencia de la duración de las pruebas de predicción da lugar a un protocolo de prueba válido y factible para estimar una PPM de 60 minutos, como la obtenida aquí (es decir, 1–3-10 minutos). En este sentido, se debe tener en cuenta que la duración de la configuración de prueba de dos tiempos válida más corta (es decir, 1-20 minutos) fue más larga que la configuración de prueba de tres tiempos más corta (es decir, 1-3-10 minutos). Por lo tanto, parece que se podrían derivar estimaciones válidas de aquellas configuraciones que ilustran la gran disminución de potencia inicial que modela la curva de la función en la ley de potencia, o de aquellas configuraciones que ilustran la progresiva disminución de potencia con el aumento del tiempo.



**Estudio 6:**

***¿Podemos predecir mediante la producción de potencia las carreras de larga duración? Validación de la potencia crítica, ley de potencia y modelos logarítmicos.***

-----∞-----

*Can we predict long durations running power output?  
Validity of the critical power, power law, and  
logarithmic models.*

Este estudio tuvo como objetivo determinar la validez de diferentes modelos para predecir la PPM de larga duración (es decir, 30 y 60 minutos). Los resultados revelaron que la selección del modelo es un tema importante que condiciona la precisión de las estimaciones de la PPM. Aunque, algunos modelos proporcionan estimaciones válidas (es decir,  $PC_{2hyp}$ ,  $PC_{3hyp}$ ,  $PC_{stryd}$  y  $PC_{cheetah}$ ), otros están condicionados a la duración de la estimación (es decir,  $PC_{trabajo}$  y  $PC_{1/tiempo}$ ) o al nivel del atleta (es decir, ley de potencia y Peronnet).

Los modelos de PC lineales mostraron un gran error de predicción par a los 30 minutos ( $\geq 4.4\%$ ), que aumentó progresivamente para los 60 minutos ( $\geq 8.1\%$ ). La relación entre el trabajo-tiempo y la potencia-1/tiempo presenta una alta linealidad a lo largo del dominio de intensidad severa, lo que permite determinar válidamente la PC a través de solo 2 pruebas de tiempo (Ruiz-Alias et al., 2022). Sin embargo, esta linealidad no se mantiene en los dominios de menor intensidad, lo que se refleja en la sobrestimación progresiva aquí obtenida. Resultados similares fueron reportados por Gamelin et al. (2006), donde se obtuvieron sobreestimaciones mayores del rendimiento en la carrera de 60 minutos con la  $PC_{trabajo}$  y  $PC_{1/tiempo}$ , en comparación con la  $PC_{2hyp}$  y  $PC_{3hyp}$ .

Girardi et al. (2022) observaron que la  $PC_{trabajo}$  sobrestimó el rendimiento de la carrera de 60 minutos, cuando las pruebas de predicción utilizadas no superaban los 10000 m. El rendimiento real de carrera en 60 minutos, de los corredores de élite analizados (20787 [525] m), solo se estimó correctamente cuando se agregó el medio maratón al modelo (Girardi et al., 2022), lo que destaca la necesidad de que los modelos lineales tengan pruebas de predicción cercanas al rendimiento real, para considerar la disminución de la potencia con el aumento del tiempo.

Los modelos de PC no lineales subestimaron ligeramente el rendimiento de 30 y 60 minutos, aunque en un rango aceptable ( $\leq -2.6\%$ ). Estos resultados están en línea con los valores más bajos de PC reportados por los modelos de  $PC_{2hyp}$  y  $PC_{3hyp}$ , consistentemente entre el resto de los modelos asintóticos (Bull et al., 2000; Gaesser et al., 1995). Gaesser et al. (1995) observaron que, entre los modelos de PC, el  $PC_{3hyp}$  reportó el valor de PC más bajo, que no difería con la tasa de trabajo del llamado UV para el ejercicio a largo plazo (es decir, la PPM más alta que podría mantenerse durante 40 minutos, sin aumento de la ventilación a partir del minuto 20). Esto posiciona a la PC a tasas de trabajo cercanas a los 30 minutos ( $PC_{2hyp}$ : 98 [4]%;  $PC_{3hyp}$ : 99 [4]%) y 60 minutos ( $PC_{2hyp}$ : 103 [5]%;  $PC_{3hyp}$ : 104 [5]%) de PPM, lo que en consecuencia mejora la precisión de las estimaciones.

Se observó una buena predicción de la PPM de 30 minutos para los modelos de Peronnet (-1.6%), y ley de la potencia (-0.2%). Sin embargo, se observó un error proporcional de ambos modelos para los 60 minutos, lo que indica que los atletas con niveles más bajos tendían a cometer errores mayores. Este problema parece estar

relacionado con la capacidad de resistencia de los atletas, reflejada en el exponente  $g$  y la pendiente ( $E$ ) de la ley de potencia y las ecuaciones de Peronnet, respectivamente. La relación potencia-tiempo sería perfectamente lineal si  $g$  fuera igual a 1. Se ha observado que los deportistas de élite presentan un valor de  $g$  de  $\sim 0.95$ , mientras que los varones activos sanos oscilan entre 0.62 y 0.87 (Zinoubi et al., 2017). Para el grupo de atletas altamente entrenados reclutados aquí, osciló entre 0.84 y 0.92, lo que determinó la tasa de caída de potencia y, en consecuencia, la precisión de la extrapolación de la ley de potencia (30 minutos: -0.2%; 60 minutos: -3.1%) y modelos de Peronnet (30 minutos: -1.6%; 60 minutos: -6.6%).

Los modelos de PC patentados no revelados (es decir,  $PC_{cheetah}$  y  $PC_{stryd}$ ), alcanzaron un nivel adecuado de precisión para predecir la PPM a los 30 y 60 minutos ( $< 2.4\%$ ). Estos resultados son de gran aplicación práctica para atletas y practicantes, ya que las distancias largas que aún no se han intentado, pueden predecirse con precisión a partir de algunas pruebas de tiempo más cortas.

En este estudio se utilizaron pruebas de cinco tiempos que van de 3 a 20 minutos, de acuerdo con las recomendaciones establecidas para los modelos de PC (Jones et al., 2010). En este sentido, el modelo de ley de potencia parece ser consistente con el rango de distancias seleccionado (Girardi et al., 2022; Vandewalle, 2018; Zinoubi et al., 2017). Zinoubi et al. (2017) observaron que el exponente  $g$  de los corredores de élite analizados no cambiaba con el rango de distancias seleccionado (1.500-5.000 m vs 1.500-10.000 m). Vanderwalle (2018) tampoco reportó efectos significativos del rango de distancias seleccionadas en el exponente  $g$  para los corredores de élite analizados.

Girardi et al. (2022) observaron una precisión similar del modelo de ley de potencia para predecir el rendimiento de la carrera de 60 minutos, independientemente de las pruebas de predicción utilizadas. Por el contrario, la  $PC_{2hyp}$  y el  $PC_{trabajo}$  fueron condicionados hasta este punto, siendo el rendimiento real de la carrera de 60 minutos de los corredores de élite analizados (20787 [525] m), solo estimado correctamente, cuando se agregó el medio maratón al modelo (Girardi et al., 2022). Asimismo, Vandewalle (2018) reportó diferencias significativas en los valores de PAM y  $E$  de la ecuación de Peronnet, según el rango de distancias seleccionado. Por tanto, debe abordarse el análisis de la validez de los diferentes modelos, cuando se utilizan diferentes ensayos predictivos.

## 6. CONCLUSIONES

La conclusión general de la presente Tesis Doctoral en relación con el primer tópico **“delimitación conceptual de la PC en corredores de distancia”** (estudio 1 y 2) explica que tanto la PC como el UPF son conceptos derivados del ciclismo a la carrera de distancia. Además, es importante tener en consideración al utilizar los conceptos de PC y UPF que no se refieren a la misma intensidad de entrenamiento y, por lo tanto, no se pueden usar indistintamente. Aunque se sugiere animar a los entrenadores y atletas a utilizar la PC con la PT de 9-3 minutos porque con esta PT se observó que la PC se localizó más próxima al PCR, pero si el atleta o entrenador opta por utilizar el UPF, se recomienda la PT20 con su respectivo FCI de 95%. También se recomienda utilizar los FCI propuestos para la PC con el objetivo de aproximarse a cada hito fisiológico.

Con respecto al segundo tópico, **“análisis metodológico de la CPD para determinación de  $W'$  y la PC en corredores de distancia”** (estudio 3 y 4) se puede concluir que mediante el uso de la CPD se puede obtener la PC y el  $W'$ , pero requiere de una sumatoria de esfuerzos máximos de diferentes duraciones para una mayor precisión. Por tal razón, los resultados de los estudios presentados explican que la PC se puede obtener mediante diferentes modelos empíricos y comerciales propuestos en la literatura científica ( $PC_{1/\text{tiempo}}$ ,  $PC_{\text{hyp}}$ ,  $PC_{\text{cheetah}}$  y  $PC_{\text{stryd}}$ ). Además, se debe considerar que el  $W'$  es muy susceptible al cambio de protocolo y modelo y, por ende, no presenta validez con los modelos empíricos y comerciales propuestos. De acuerdo a esto, se sugiere tomar las siguientes consideraciones antes de estimar la PC. En primer lugar, la PC es dependiente del modelo empírico seleccionado. En segundo lugar, la PC es dependiente de los parámetros seleccionados (2, 3, 4 y 5 parámetros). Basado a todo lo anterior, se sugiere a los practicantes utilizar modelos de PC con 2 parámetros, como el 3-10 minutos, por ser una combinación corta con validación y si se opta por otro modelo, se recomienda quedarse con uno solo y no intercambiar resultados.

Finalmente, en referencia al último tópico de la presente Tesis Doctoral, la **“aplicación práctica de la CPD para estimar el rendimiento en carreras de larga distancia”** (estudio 5 y 6), se puede mencionar que la precisión presentada por la CPD para predecir rendimiento en carreras de larga distancia depende del número de PT ejecutadas y de la variación en la duración de estas PT. En este sentido, los estudios de la presente Tesis Doctoral analizaron el nivel de precisión para predecir rendimiento en 30 y 60 minutos. En primer lugar se encontró que los modelos empíricos (lineales [ $PC_{\text{trabajo}}$  y  $PC_{1/\text{tiempo}}$ ], los no lineales [ $PC_{2\text{hyp}}$  y  $PC_{3\text{hyp}}$ ], los no asintóticos [ley de potencia y Peronnet] y los patentados [aún no revelados] de la PC [ $PC_{\text{cheetah}}$  y  $PC_{\text{stryd}}$ ]) encontraron que la precisión depende de varios factores como: el tiempo de duración de la PT localizadas en los extremos (duración más larga y duración más corta), el nivel atlético de los corredores y la cantidad de configuraciones de las PT que se utilicen para estimar PC.

De acuerdo a lo mencionado, los entrenadores y corredores deben considerar que la selección inadecuada de un modelo como también de su configuración, aumentará el error, por lo tanto, será más impreciso al momento de estimar el rendimiento.

Las conclusiones específicas para cada uno de los estudios que componen la presente Tesis Doctoral fueron:

**Estudio 1: *Umbral de potencia funcional versus potencia crítica: Conceptos iguales pero diferentes valores.***

**Study 1: *Running functional threshold versus critical power: Same concept but different values.***

- Se obtuvieron estimaciones aceptables del UPF y la PC mediante la aplicación de FCI en la PPM desarrollada en una sola PT más corta.
- El UPF se estimó con precisión mediante la aplicación de un FCI de 85%, 90% y 95% a la PPM, desarrollada en la PT10, PT20 y PT30. El EES se redujo con el aumento de la duración de la PT.
- La PC se estimó con precisión mediante la aplicación de un FCI del 95% de la PPM desarrollada en la PT20.
- Se alienta a los atletas y practicantes a determinar el UPF y la PC a través de un protocolo de prueba de alta precisión, como realizar una PT20 y aplicar un FCI de 90% y 95%, respectivamente.

**Estudio 2: *Running functional threshold versus critical power: Same concept but different values.***

**Study 2: *9/3-minute running critical power test: Mechanical threshold location with respect to ventilatory thresholds and maximum oxygen uptake.***

- Los resultados obtenidos en este estudio muestran que la PC estimada a partir del test Stryd 9/3 minutos, se localizó en el 88.71% (5.84%) del  $VO_2$ máx, lo que no difiere significativamente del PCR (86.40% [4.34%] de  $VO_2$ max), determinado a partir de una PEG con una pendiente de tasa de trabajo lenta (es decir, 0.33 km/h/min  $\approx$  7 W/min).

**Estudio 3: *Potencia crítica en corredores de resistencia: Una comparación de parámetros estimados y reportados por diferentes modelos teóricos.***

**Study 3: *Critical power in endurance runners: A comparison of the estimated parameters reported by different theoretical models.***

- Los resultados revelaron diferencias significativas entre los modelos de PC, en los parámetros PC y  $W'$ .
- $PC_{cheetah}$  se localizó entre el ritmo de trabajo de 10 y 20 minutos, pero más próximo al ritmo de trabajo de 20 minutos.
- $PC_{1/tiempo}$ ,  $PC_{hyp}$  y  $PC_{stryd}$  se localizaron en un ritmo de trabajo de 30 minutos.
- La precisión del balance en  $W'$  para predecir la PTA en el dominio de intensidad severa, estuvo condicionada al modelo de PC utilizada, siendo el  $PC_{1/tiempo}$  el más preciso.

**Estudio 4: *Determinación de la potencia crítica y la  $W'$  en carrera: Precisión de los diferentes modelos de dos puntos al usar métricas de potencia.***

**Study 4: *Determining critical power and  $W'$  in running: Accuracy of different two-point models using the power metric.***

- Los resultados obtenidos confirmaron que, el parámetro de PC se puede estimar con precisión a partir de dos PT.
- Para los modelos lineales de PC, los 3-10 minutos fueron la combinación válida más corta, mientras que los 3-20, 4-20 y 5-20 minutos mostraron el mayor nivel de acuerdo con la PC derivada de cinco PT (es decir, 3, 4, 5, 10 y 20 minutos).
- $W'$  presentó un EES alto en ambos modelos lineales de PC, al utilizar las cinco PT. Por lo tanto, ninguna de las combinaciones de dos tiempos alcanzó un nivel aceptable de precisión para la determinación de  $W'$ .

**Estudio 5: *¿Podemos predecir mediante la producción de potencia la carrera de larga duración? Un asunto de seleccionar las pruebas de predicción y el modelo empírico adecuado.***

**Study 5: *Can we predict long-duration running power output? A matter of selecting the appropriate predicting trials and empirical model.***

- Al enfrentarse a una carrera de larga distancia, los atletas y los practicantes podrían desarrollar una estrategia de ritmo eficiente y ritmos de entrenamiento, si se logra una estimación precisa del rendimiento en la distancia objetivo.
- Los modelos de PC basados en evidencia (es decir,  $PC_{trabajo}$ ,  $PC_{1/tiempo}$ ,  $PC_{2hyp}$  y  $PC_{3hyp}$ ), los modelos patentados de PC no revelados (es decir,  $PC_{cheetah}$  y  $PC_{stryd}$ ), así como los modelos no asintóticos (es decir, ley de potencia y Peronnet), proporcionaron estimaciones válidas de PPM en 60 minutos, cuando las dos o tres pruebas de predicción seleccionadas, atendían las necesidades de ajuste de cada modelo.



- La  $PC_{\text{trabajo}}$  lineal y el  $PC_{1/\text{tiempo}}$  (configuración válida más corta: 3–30 minutos),  $PC_{2\text{hyp}}$  y  $PC_{3\text{hyp}}$  no lineales (configuración válida más corta: 3–5-30 minutos), así como el  $PC_{\text{stryd}}$  no revelado (configuración válida más corta: 10–30 minutos) requerían una prueba de predicción lo suficientemente larga para ajustar la caída de potencia más allá de PC.
- Los modelos de  $PC_{\text{cheetah}}$  (configuración válida más corta: 3-5-30 minutos) y Peronnet (configuración válida más corta: 4-20 minutos) requerían una configuración de prueba predictiva representativa de las capacidades anaeróbicas y aeróbicas máximas de los atletas, así como el uso fraccionado de la PAM en tiempos más largos.
- El modelo de la ley de potencia (configuración válida más corta: 1-3-10 minutos) proporcionó varias estimaciones válidas, a través de esas configuraciones de PT que se ajustan a la gran caída de potencia inicial, o la progresiva con el aumento del tiempo.

**Estudio 6: ¿Podemos predecir mediante la producción de potencia las carreras de larga duración? Validación de la potencia crítica, ley de potencia y modelos logarítmicos.**

**Study 6: *Can we predict long durations running power output? Validity of the critical power, power law, and logarithmic models.***

- Los resultados revelaron que la selección del modelo es un tema importante, que determina la precisión de las estimaciones de PPM.
- La  $PC_{2\text{hyp}}$ ,  $PC_{3\text{hyp}}$ ,  $PC_{\text{stryd}}$  y  $PC_{\text{cheetah}}$  proporcionaron estimaciones válidas de PPM en 30 minutos y 60 minutos ( $\leq 2.6\%$ ).
- La  $PC_{\text{trabajo}}$  y  $PC_{1/\text{tiempo}}$  presentaron un gran error de predicción para 30 minutos ( $\geq 4.4\%$ ), que aumentó para 60 minutos ( $\geq 8.1\%$ ).
- Los modelos de ley de potencia y Peronnet, aumentaron progresivamente su error de predicción en la mayor duración (30 minutos:  $\leq -1.6\%$ ; 60 minutos:  $\leq -6.6\%$ ), lo que está condicionado por la capacidad de resistencia de los atletas.
- Por lo tanto, los atletas y practicantes deben aplicar a su CPD, los modelos antes mencionados para lograr estimaciones válidas de PPM a largo plazo.



## **7. LÍMITACIONES Y PERSPECTIVAS FUTURAS DE ESTUDIO**

Los estudios que componen la Tesis Doctoral en primer lugar presentan una serie de limitaciones que deben ser reconocidas. La principal limitación fue el tamaño de muestra seleccionada y la variabilidad de la población. Solo se evaluaron deportistas altamente entrenados con dominio de sus ritmos de carrera y variables fisiológicas (UL y  $VO_2\text{max}$ ), por tanto, los atletas comprendieron de forma rápida las instrucciones y no se presentaron errores en la elección de las velocidades de carrera.

Otra limitación general en los estudios fue, la elección de zapatillas porque utilizaron sus modelos de preferencia y no se realizó cambio en ningún momento, por tanto, no se pudo evaluar el efecto de zapatillas en la PPM de los deportistas. Además, se puede mencionar como limitación, la superficie del terreno seleccionada para los estudios, ya que presentaba poca variabilidad (se ejecutaron las pruebas en la pista atlética y la cinta rodante). Para finalizar, una última limitación encontrada fue, el desconocimiento del modelo matemático utilizado en los softwares comerciales ( $PC_{\text{cheetah}}$  y  $PC_{\text{stryd}}$ ).

En segundo lugar, la presente Tesis Doctoral, ha determinado la importancia del uso de potencia mecánica en carrera y su obtención a través de dispositivos portátiles con validación científica (es decir, Stryd). A su vez, se han reportado los modelos empíricos y comerciales que presentan mayor validación para la estimación de la PC y el  $W'$ , por lo tanto, se han propuesto aplicaciones prácticas de la PC en carrera de distancia y su relación con los principales hitos fisiológicos.

De acuerdo a lo mencionado, en un futuro se podría aumentar la población y comparar los datos de PPM obtenidos entre deportistas recreativos, amateurs, profesionales y de alto rendimiento, para poder clasificarlos. Con esta clasificación, los entrenadores y atletas podrán identificar con solo una PT, la PC y de esta forma podrán conocer el perfil de sus deportistas y predecir con mayor precisión los resultados en competencias y entrenamientos.

# 8. BIBLIOGRAFÍA

- Abbiss, C. R., & Laursen, P. B. (2008). Describing and understanding pacing strategies during athletic competition. *Sports Medicine*, *38*(3), 239–252.
- Allen, H., Coggan, A. R., & McGregor, S. (2019). Training and racing with a power meter. VeloPress.
- Aubry, R. L., Power, G. A., & Burr, J. F. (2018). An assessment of running power as a training metric for elite and recreational runners. *Journal of Strength and Conditioning Research*, *32*(8), 2258–2264.
- Beneke, R. (2003). Methodological aspects of maximal lactate steady state—implications for performance testing. *European Journal of Applied Physiology*, *89*(1), 95–99.
- Bergstrom, H. C., Housh, T. J., Zuniga, J. M., Traylor, D. A., Camic, C. L., Lewis Jr, R. W., Schmidt, R. J., & Johnson, G. O. (2013). The relationships among critical power determined from a 3-min all-out test, respiratory compensation point, gas exchange threshold, and ventilatory threshold. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, *84*(2), 232–238.
- Bergstrom, H. C., Housh, T. J., Zuniga, J. M., Traylor, D. A., Lewis Jr, R. W., Camic, C. L., Schmidt, R. J., & Johnson, G. O. (2014). Differences among estimates of critical power and anaerobic work capacity derived from five mathematical models and the three-minute all-out test. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, *28*(3), 592–600.
- Bishop, D., Jenkins, D. G., & Howard, A. (1998). The critical power function is dependent on the duration of the predictive exercise tests chosen. *International Journal of Sports Medicine*, *19*(02), 125–129.
- Black, M. I., Jones, A. M., Bailey, S. J., & Vanhatalo, A. (2015). Self-pacing increases critical power and improves performance during severe-intensity exercise. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, *40*(7), 662–670.
- Black, M. I., Jones, A. M., Blackwell, J. R., Bailey, S. J., Wylie, L. J., McDonagh, S. T. J., Thompson, C., Kelly, J., Sumners, P., & Mileva, K. N. (2017). Muscle metabolic and neuromuscular determinants of fatigue during cycling in different exercise intensity domains. *Journal of Applied Physiology*, *122*(3), 446–459.
- Bland, J. M., & Altman, D. (1986). Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement. *The Lancet*, *327*(8476), 307–310.
- Borg, G. (1998). *Borg's perceived exertion and pain scales*. Human kinetics.
- Borszcz, F. K., Tramontin, A. F., & Costa, V. P. (2019). Is the functional threshold power interchangeable with the maximal lactate steady state in trained cyclists? *International Journal of Sports Physiology and Performance*, *14*(8), 1029–1035.

- Bull, A. J., Housh, T. J., Johnson, G. O., & Perry, S. R. (2000). Effect of mathematical modeling on the estimation of critical power. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 32(2), 526.
- Burnley, M., & Jones, A. M. (2016). Power–duration relationship: Physiology, fatigue, and the limits of human performance. *European Journal of Sport Science*, 18(1), 1–12.
- Cartón-Llorente, A., García-Pinillos, F., Royo-Borrueal, J., Rubio-Peiretén, A., Jaén-Carrillo, D., & Roche-Seruendo, L. E. (2021). Estimating functional threshold power in endurance running from shorter time trials using a 6-axis inertial measurement sensor. *Sensors*, 21(2).
- Cerezuela-Espejo, V., Hernández-Belmonte, A., Courel-Ibáñez, J., Conesa-Ros, E., Martínez-Cava, A., & Pallarés, J. G. (2020). Running power meters and theoretical models based on laws of physics: Effects of environments and running conditions. *Physiology & Behavior*, 223, 112972.
- Cerezuela-Espejo, V., Hernández-Belmonte, A., Courel-Ibáñez, J., Conesa-Ros, E., Mora-Rodríguez, R., & Pallarés, J. G. (2020). Are we ready to measure running power? Repeatability and concurrent validity of five commercial technologies. *European Journal of Sport Science*, 21 (3) 341-350.
- Chorley, A., & Lamb, K. L. (2020). The application of critical power, the work capacity above critical power ( $W'$ ), and its reconstitution: a narrative review of current evidence and implications for cycling training prescription. *Sports*, 8(9), 123.
- Coquart, J.B., Albery, M., & Bosquet, L. (2009). Validity of a nomogram to predict long distance running performance. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 23(7), 2119–2123.
- Coquart, J.B., & Bosquet, L. (2010). Precision in the prediction of middle distance-running performances using either a nomogram or the modeling of the distance-time relationship. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 24(11), 2920–2926.
- Dearing, C. G., & Paton, C. D. (2022). Is Stryd critical power a meaningful parameter for runners? *Biology of Sport*, 40(3), 657–664.
- Dekerle, J., Baron, B., Dupont, L., Vanvelcenaher, J., & Pelayo, P. (2003). Maximal lactate steady state, respiratory compensation threshold and critical power. *European Journal of Applied Physiology*, 89(3–4), 281–288.
- Drake, J., Finke, A., & Ferguson, R. (2023). Modelling human endurance: Power laws vs critical power. *European Journal of Applied Physiology*, 10.1007/s00421-023-05274-5. Advance online publication.
- Figueiredo, D. H., Figueiredo, D. H., Manoel, F. de A., & Machado, F. A. (2021). Peak running velocity or critical speed under field conditions: Which best predicts 5-km running

- performance in recreational runners? *Frontiers in Physiology*, 12, 680790.
- Fitts R. H. (1994). Cellular mechanisms of muscle fatigue. *Physiological reviews*, 74(1), 49–94.
- Foster, C., de Koning, J. J., Hettinga, F. J., Barroso, R., Boullosa, D., Casado, A., Cortis, C., Fusco, A., Gregorich, H., Jaime, S., Jones, A. M., Malterer, K. R., Pettitt, R., Porcari, J. P., Pratt, C., Reinschmidt, P., Skiba, P., Splinter, A., Clair-Gibson, A., van Tunen, J. (2023). Competition between desired competitive result, tolerable homeostatic disturbance, and psychophysiological interpretation determines pacing strategy. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 18(4), 335–346.
- Gaesser, G. A., Carnevale, T. J., Garfinkel, A., Walter, D. O., & Womack, C. J. (1995). Estimation of critical power with nonlinear and linear models. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 27(10), 1430–1438.
- Galán-Rioja, M. Á., González-Mohíno, F., Poole, D. C., & González-Ravé, J. M. (2020). Relative proximity of critical power and metabolic/ventilatory thresholds: Systematic review and meta-analysis. *Sports Medicine*, 50(10), 1771–1783.
- Galbraith, A., Hopker, J., & Passfield, L. (2015). Modeling intermittent running from a single-visit field test. *International Journal of Sports Medicine*, 36(5), 365–370.
- Gama, M. C., Dos Reis, I. G., Sousa, F. A., & Gobatto, C. A. (2018). The 3-min all-out test is valid for determining critical power but not anaerobic work capacity in tethered running. *PLoS One*, 13(2), e0192552.
- Gamelin, F. X., Coquart, J. M., Ferrari, N., Vodougnon, H., Matran, R., Leger, L., & Bosquet, L. (2006). Prediction of one-hour running performance using constant duration tests. *Journal of strength and conditioning research*, 20(4), 735–739.
- García-Pinillos, F., Latorre-Román, P. Á., Roche-Seruendo, L. E., & García-Ramos, A. (2019). Prediction of power output at different running velocities through the two-point method with the Stryd™ power meter. *Gait & Posture*, 68, 238–243.
- García-Pinillos, F., Roche-Seruendo, L. E., Marcén-Cinca, N., Marco-Contreras, L. A., & Latorre-Román, P. A. (2018). Absolute reliability and concurrent validity of the stryd system for the assessment of running stride kinematics at different velocities. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 35(1), 78–84.
- Gerry Purdy, J. (1975). Computer generated track and field scoring tables: Theoretical foundation and development of a model. *Medicine and Science in Sports*, 7(2), 111–115.
- Girardi, M., Gattoni, C., Sponza, L., Marcora, S. M., & Micklewright, D. (2022). Performance prediction, pacing profile and running pattern of elite 1-h track running events. *Sport*

*Sciences for Health*, 18(4), 1457–1474.

Gorostiaga, E. M., Sánchez-Medina, L., & Garcia-Tabar, I. (2022). Over 55 years of critical power: Fact or artifact? *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 32(1), 116–124.

Hill, A. V. (1927). *Muscular movement in man: The factors governing speed and recovery from fatigue* (Vol. 3). McGraw-Hill.

Hill, D. W. (1993). The critical power concept. A review. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 16(4), 237–254.

Hill, D. W., Poole, D. C., & Smith, J. C. (2002). The relationship between power and the time to achieve VO<sub>2</sub>max. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 34(4), 709–714.

Hill, D. W., & Smith, J. C. (1999). Determination of critical power by pulmonary gas exchange. *Canadian Journal of Applied Physiology = Revue Canadienne de Physiologie Appliquee*, 24(1), 74–86.

Hill, A. V. (1925). *The physiological basis of athletic records*. 21(4), 409–428.

Honert, E. C., Mohr, M., Lam, W.K., & Nigg, S. (2020). Shoe feature recommendations for different running levels: A Delphi study. *PLoS One*, 15(7), e0236047.

Hopkins, W. G. (2000). Measures of reliability in sports medicine and science. *Sports Medicine*, 30(1), 1–15.

Hopkins, W. G., Marshall, S. W., Batterham, A. M., & Hanin, J. (2009). Progressive statistics for studies in sports medicine and exercise science. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 41(1), 3–12.

Housh, D. J., Housh, T. J., & Bauge, S. M. (1990). A methodological consideration for the determination of critical power and anaerobic work capacity. *Research quarterly for exercise and sport*, 61(4), 406–409.

Housh, T. J., Cramer, J. T., Bull, A. J., Johnson, G. O., & Housh, D. J. (2001). The effect of mathematical modelling on critical velocity. *European Journal of Applied Physiology*, 84(5), 469–475.

Imbach, F., Candau, R., Chailan, R., & Perrey, S. (2020). Validity of the stryd power meter in measuring running parameters at submaximal speeds. *Sports (Basel, Switzerland)*, 8(7), 103.

Jeffries, O., Simmons, R., Patterson, S. D., & Waldron, M. (2021). Functional threshold power is not equivalent to lactate parameters in trained cyclists. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 35(10), 2790–2794.

Jones, A. M., Burnley, M., Black, M. I., Poole, D. C., & Vanhatalo, A. (2019). The maximal



- metabolic steady state: Redefining the 'gold standard'. *Physiological Reports*, 7(10), e14098.
- Jones, A. M., Vanhatalo, A., Burnley, M., Morton, R. H., & Poole, D. C. (2010). Critical power: implications for determination of VO<sub>2</sub>max and exercise tolerance. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 42(10), 1876–1890.
- Jones, A. M., Wilkerson, D. P., DiMenna, F., Fulford, J., & Poole, D. C. (2008). Muscle metabolic responses to exercise above and below the “critical power” assessed using 31P-MRS. *American Journal of Physiology - Regulatory Integrative and Comparative Physiology*, 294(2), 585–593.
- Karsten, B., Petrigna, L., Klose, A., Bianco, A., Townsend, N., & Triska, C. (2021). Relationship between the critical power test and a 20-min functional threshold power test in cycling. *Frontiers in Physiology*, 11, 613151.
- Keir, D. A., Fontana, F. Y., Robertson, T. C., Murias, J. M., Paterson, D. H., Kowalchuk, J. M., & Pogliaghi, S. (2015). Exercise Intensity Thresholds: Identifying the Boundaries of Sustainable Performance. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 47(9), 1932–1940.
- Keir, D. A., Iannetta, D., Mattioni-Maturana, F., Kowalchuk, J. M., & Murias, J. M. (2022). Identification of non-invasive exercise thresholds: Methods, strategies, and an online app. *Sports Medicine*, 52(2), 237–255.
- Kennelly, A. E. (1906). An approximate law of fatigue in the speeds of racing animals. *Proceedings of the American Academy of Arts and Sciences*, 42(15), 275-331.
- Kirby, B. S., Winn, B. J., Wilkins, B. W., & Jones, A. M. (2021). Interaction of exercise bioenergetics with pacing behavior predicts track distance running performance. *Journal of Applied Physiology*, 131(5), 1532–1542.
- Koo, T. K., & Li, M. Y. (2016). A guideline of selecting and reporting intraclass correlation coefficients for reliability research. *Journal of Chiropractic Medicine*, 15(2), 155–163.
- Kordi, M., Menzies, C., & Galbraith, A. (2019). Comparison of critical speed and D' derived from 2 or 3 maximal tests. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 14(5), 685–688.
- Kuipers, H., Rietjens, G., Verstappen, F., Schoenmakers, H., & Hofman, G. (2003). Effects of stage duration in incremental running tests on physiological variables. *International Journal of Sports Medicine*, 24(07), 486–491.
- Leo, J. A., Sabapathy, S., Simmonds, M. J., & Cross, T. J. (2017). The respiratory compensation point is not a valid surrogate for critical power. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 49(7), 1452–1460.

- Lerebourg, L., Guignard, B., Racil, G., Jlid, M. C., Held, E., & Coquart, J. B. (2022). Prediction of distance running performances of female runners using nomograms. *International Journal of Sports Medicine*, 43(09), 773–782.
- Lillo-Bevia, J. R., Courel-Ibanez, J., Cerezuela-Espejo, V., Moran-Navarro, R., Martinez-Cava, A., & Pallares, J. G. (2022). Is the functional threshold power a valid metric to estimate the maximal lactate steady state in cyclists? *Journal of Strength and Conditioning Research*, 36(1), 167–173.
- Liversedge, M. (2023a). *GoldenCheetah*. Retrieved August 14, 2023, from <https://www.goldencheetah.org/#section-tutorials>
- Liversedge, M. (2023b). *GoldenCheetah*. Retrieved August 14, 2023, from <https://www.goldencheetah.org/>
- Ludbrook, J. (2002). Statistical techniques for comparing measurers and methods of measurement: A critical review. *Clinical and Experimental Pharmacology and Physiology*, 29(7), 527–536.
- Ludbrook, J. (2010). Linear regression analysis for comparing two measurers or methods of measurement: but which regression? *Clinical and Experimental Pharmacology and Physiology*, 37(7), 692–699.
- Mattioni-Maturana, F., Fontana, F. Y., Pogliaghi, S., Passfield, L., & Murias, J. M. (2018). Critical power: How different protocols and models affect its determination. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 21(7), 742–747.
- Mattioni Maturana, F., Keir, D. A., McLay, K. M., & Murias, J. M. (2016). Can measures of critical power precisely estimate the maximal metabolic steady-state? *Applied physiology, nutrition, and metabolism = Physiologie appliquee, nutrition et metabolisme*, 41(11), 1197–1203.
- Mcgrath, E., Mahony, N., Fleming, N., Raleigh, C., & Donne, B. (2021). Do critical and functional threshold powers equate in highly-trained athletes? *International Journal of Exercise Science*, 14(4), 45–59.
- Mckay, A. K., Stellingwerff, T., Smith, E. S., Martin, D. T., Mujika, I., Goosey-Tolfrey, V. L., Sheppard, J., & Burke, L. M. (2022). Defining Training and Performance Caliber: A Participant Classification Framework. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 17(2), 317–331.
- McLellan, T. M., & Cheung, K. S. (1992). A comparative evaluation of the individual anaerobic threshold and the critical power. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 24(5), 543–550.
- Monod, H., & Scherrer, J. (1965). The work capacity of a synergic muscular group.

- Ergonomics, 8(3), 329-338.
- Moritani, T., Nagata, A., Devries, H. A., & Muro, M. (1981). Critical power as a measure of physical work capacity and anaerobic threshold. *Ergonomics*, 24(5), 339-350.
- Morton, R. H. (1995). Critical power test for ramp exercise. *European journal of applied physiology and occupational physiology*, 71(4), 379–380.
- Morton, R. H. (1996). A 3-parameter critical power model. *Ergonomics*, 39(4), 611–619.
- Morton, R. H. (2006). The critical power and related whole-body bioenergetic models. *European Journal of Applied Physiology*, 96(4), 339–354.
- Muniz-Pumares, D., Karsten, B., Triska, C., & Glaister, M. (2019). Methodological approaches and related challenges associated with the determination of critical power and curvature constant. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 33(2), 584–596.
- Murgatroyd, S. R., Wylde, L. A., Cannon, D. T., Ward, S. A., & Rossiter, H. B. (2014). A ‘ramp-sprint’ protocol to characterise indices of aerobic function and exercise intensity domains in a single laboratory test. *European journal of applied physiology*, 114, 1863-1874.
- Nardello, F., Ardigò, L. P., & Minetti, A. E. (2011). Measured and predicted mechanical internal work in human locomotion. *Human Movement Science*, 30(1), 90–104.
- Noakes T. D. (2011). Time to move beyond a brainless exercise physiology: the evidence for complex regulation of human exercise performance. *Applied physiology, nutrition, and metabolism = Physiologie appliquee, nutrition et metabolisme*, 36(1), 23–35.
- Pallarés, J. G., Cerezuela-Espejo, V., Morán-Navarro, R., Martínez-Cava, A., Conesa, E., & Courel-Ibáñez, J. (2019). A new short track test to estimate the VO<sub>2</sub>max and maximal aerobic speed in well-trained runners. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 33(5), 1216–1221.
- Patoz, A., Blokker, T., Pedrani, N., Spicher, R., Borrani, F., & Malatesta, D. (2021). Oxygen uptake at critical speed and power in running: Perspectives and practical applications. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 17(3), 400–406.
- Pepper, M. L., Housh, T. J., & Johnson, G. O. (1992). *The accuracy of the critical velocity test for predicting time to exhaustion during treadmill running*. 13(2), 121–124.
- Péronnet, F., & Thibault, G. (1989). Mathematical analysis of running performance and world running records. *Journal of applied physiology*, 67(1), 453–465.
- Poole, D. C., & Jones, A. M. (2012). Oxygen uptake kinetics. *Comprehensive Physiology*, 2(2), 933–996.

- Poole, D. C., Ward, S. A., Gardner, G. W., & Whipp, B. J. (1988). Metabolic and respiratory profile of the upper limit for prolonged exercise in man. *Ergonomics*, 31(9), 1265–1279.
- Rabadán, M., Díaz, V., Calderón, F. J., Benito, P. J., Peinado, A. B., & Maffulli, N. (2011). Physiological determinants of speciality of elite middle-and long-distance runners. *Journal of Sports Sciences*, 29(9), 975–982.
- Ruiz-Alias, S. A., Ñancupil-Andrade, A. A., Pérez-Castilla, A., & García-Pinillos, F. (2023a). Critical power in endurance runners: A comparison of the estimated parameters reported by different theoretical models. *International Journal of Sports Medicine*. Online ahead of print.
- Ruiz-Alias, S. A., Ñancupil-Andrade, A. A., Peréz-Castilla, A., & García-Pinillos, F. (2023b); Determination critical power and  $W'$  in running: Accuracy of different two-point models using the power metric. Part P: *Journal of Sports Engineering and Technology*. Online ahead of print.
- Ruiz-Alias, S. A., Ñancupil-Andrade, A. A., Pérez-Castilla, A., & García-Pinillos, F. (2023). Can we predict long duration running power output? Validity of the critical power, power law and logarithmic models. *Journal of Strength and Conditioning Research*. Online ahead of print.
- Ruiz-Alias, S. A., Olaya-Cuartero, J., Ñancupil-Andrade, A. A., & García-Pinillos, F. (2022). 9/3-Minute running critical power test: Mechanical threshold location with respect to ventilatory thresholds and maximum oxygen uptake. *International Journal of Sports Physiology and Performance*. Online ahead of print. DOI: 10.1123/IJSP.2022-0069.
- Sinclair, J., Fau-Goodwin, J., Richards, J., & Shore, H. (2016). The influence of minimalist and maximalist footwear on the kinetics and kinematics of running. *Footwear Science*, 8(1), 33–39.
- Skiba, P. F., & Clarke, D. C. (2021). The  $W'$  balance model: Mathematical and methodological considerations. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 16(11), 1561–1572.
- Skiba, P. F., Fulford, J., Clarke, D. C., Vanhatalo, A., & Jones, A. M. (2015). Intramuscular determinants of the ability to recover work capacity above critical power. *European Journal of Applied Physiology*, 115(4), 703–713.
- Smith, A. E., Kendall, K. L., Fukuda, D. H., Cramer, J. T., & Stout, J. R. (2011). Determination of aerobic and anaerobic performance: a methodological consideration. *Physiological Measurement*, 32(4), 423-31.
- Spiriev, B., Spiriev, A., & Kovács, G. (2022). *Scoring tables of indoor athletics*. IAAF.
- Stryd. (2023). *Stryd PowerCenter*. 2023. Retrieved August 14, 2023, from

<https://www.stryd.com/powercenter/athletes/3e1159c2-a82e-5b38-7f1e-2cae4dc4be3f/profile?sid=3e1159c2-a82e-5b38-7f1e-2cae4dc4be3f>

- Taboga, P., Giovanelli, N., Spinazzè, E., Cuzzolin, F., Fedele, G., Zanuso, S., & Lazzer, S. (2021). *Running power: lab based vs. portable devices measurements and its relationship with aerobic power*. *22*(10), 1555–1568.
- Triska, C., Karsten, B., Beedie, C., Koller-Zeisler, B., Nimmerichter, A., & Tschan, H. (2018). Different durations within the method of best practice affect the parameters of the speed–duration relationship. *European Journal of Sport Science*, *18*(3), 332–340.
- Triska, C., Karsten, B., Nimmerichter, A., & Tschan, H. (2017). Iso-duration determination of D' and CS under laboratory and field conditions. *International Journal of Sports Medicine*, *38*(7), 527–533.
- Tsekouras, Y. E., Tambalis, K. D., Sarras, S. E., Antoniou, A. K., Kokkinos, P., & Sidossis, L. S. (2019). Validity and reliability of the new portable metabolic analyzer PNO E. *Frontiers in Sports and Active Living*, *1*, 24.
- Vandewalle, H. (2018). Modelling of running performances: comparisons of power-law, hyperbolic, logarithmic, and exponential models in elite endurance runners. *BioMed Research International*, *2018*, 8203062.
- Vanhatalo, A., Doust, J. H., & Burnley, M. (2007). Determination of critical power using a 3-min all-out cycling test. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, *39*(3), 548–555.
- Wasserman, K., & McIlroy, M. B. (1964). Detecting the threshold of anaerobic metabolism in cardiac patients during exercise. *The American Journal of Cardiology*, *14*(6), 844–852.
- Wasserman, K., Whipp, B. J., Koysl, S. N., & Beaver, W. L. (1973). Anaerobic threshold and respiratory gas exchange during exercise. *Journal of Applied Physiology*, *35*(2), 236–243.
- Whipp, B. J., Huntsman, D. J., Storer, T. W., Lamarra, N., & Wasserman, K. (1982). A constant which determines the duration of tolerance to high-intensity work. *Federation Proceedings*, *41*(5), 1591.
- Zinoubi, B., Vandewalle, H., & Driss, T. (2017). Modeling of running performances in humans: Comparison of power laws and critical speed. *Journal of Strength and Conditioning Research*, *31*(7), 1859–1867.

## **9. ANEXOS**

Se adjuntan los siguientes anexos:

- ANEXO 1: Documentos presentados y aprobados por el Comité de Ética de Investigación Humana de la Universidad de Granada.
- ANEXO 2: Currículum Vitae del doctorando.

# **ANEXO 1:**

Documentos presentados y aprobados por el Comité de Ética de Investigación Humana de la  
Universidad de Granada



## COMITÉ DE ETICA DE INVESTIGACION HUMANA UNIVERSIDAD DE GRANADA

## SOLICITUD DE INFORME PARA TESIS DOCTORAL

Datos del Investigador/Doctorando:

|  |  |            |
|--|--|------------|
| Nombre y Apellidos: Alberto Ñancupil Andrade |  | [REDACTED] |
| Dpto.: Educación Física y Deportiva          | Centro/Facultad: Ciencias de la Actividad Física y del Deporte |            |
| Puesto/Cargo: Doctorando en Biomedicina      |  |            |
| [REDACTED]                                   |  |            |
| [REDACTED]                                   | [REDACTED]   | [REDACTED] |

Datos del Director/es de la tesis:

|  |  |            |
|--|--|------------|
| Nombre y Apellidos: Felipe García Pinillos |  | [REDACTED] |
| Dpto.: Educación Física y Deportiva        | Centro/Facultad: Ciencias de la Actividad Física y del Deporte |            |
| Puesto/Cargo: Educación Física y Deportiva |  |            |
| [REDACTED]                                 |  |            |
| [REDACTED]                                 | [REDACTED]   | [REDACTED] |

|                     |  |
|---------------------|--|
| Título de la tesis: | <b>Análisis de la potencia mecánica y su aplicación práctica al entrenamiento en corredores de fondo mediante el uso de sensores inerciales.</b> |
|---------------------|--|

**- Características y objetivos**

Es un proyecto de tesis doctoral de corte transversal que busca analizar los protocolos más utilizados para obtener el dato de Functional Threshold Power (FTP) y Critical Power (CP), así como también relacionar estos datos con parámetros fisiológicos de rendimiento deportivo en atletas de fondo.

Los objetivos son:

- Analizar métodos de estimación del FTP y CP en corredores de fondo.
- Relacionar FTP y CP con el rendimiento atlético en pruebas de diferentes distancias o duración.

Los datos obtenidos servirán de soporte para futuras investigaciones sobre protocolos de potencia en corredores de fondo.

**- Hipótesis**

El dato de FTP/CP es altamente dependiente del protocolo empleado para su obtención en corredores de fondo, con lo que el análisis de la fiabilidad de los datos reportados por estos protocolos es clave y los protocolos no deben emplearse indistintamente.

**- Justificación**

La masificación del uso de dispositivos portátiles que estiman la PW en tiempo real, se debe al precio accesible de estos y el aumento exponencial de corredores, tanto noveles

como profesionales que buscan conocer su esfuerzo en carrera. por lo tanto, entrenadores y científicos del deporte se han enfocado en estudiar a fondo los beneficios de estos dispositivos. Estos estudios han comparado los dispositivos con instrumentos fiables y válidos. Cerezuola-Espejo y colaboradores (4) evaluaron fiabilidad y validez que muestran los diferentes dispositivos portátiles para medir la PW en corredores de fondo mediante pruebas incrementales submáximas en diferentes entornos (interiores y exteriores), así como también en diferentes condiciones (inclinación, aumento de peso). Estos autores encontraron que stryd era el dispositivo más repetible para estimación de potencia, además la evaluación de validez concurrente de Stryd para la estimación de PW muestra la relación más cercana con el VO<sub>2</sub>max medido directamente por el carro metabólico.

García-pinillos y colaboradores (1,2) probaron la fiabilidad de stryd para medir parámetros espacio-temporales (Tiempo de contacto, tiempo de vuelo, longitud de paso y frecuencia de paso) con un protocolo de carrera incremental en una cinta rodante y lo compararon con un sistema fiable de celdas fotoeléctricas (Sistema optogait). Los autores encontraron que stryd mide con precisión la longitud y la frecuencia de los pasos, pero subestima ligeramente el tiempo de contacto y sobrevalora el tiempo de vuelo en relación al optogait.

La fiabilidad y validez de Stryd para medir parámetros cinéticos (PW de preferencia) y cinemáticos (espacio-temporales) ha sido reportado por muchos autores, pero todos los estudios previos se han realizado sin la versión actualizada de stryd que incluye detección de viento (<https://www.stryd.com/es/features>) y la gran mayoría se han realizado en cinta rodante que difiere mucho del entorno de competencia y entrenamiento de los deportistas.

La versión actual de stryd como también las anteriores depende del FTP/CP para determinar el estrés del entrenamiento y las zonas de intensidad. Para estimar el FTP/CP existen softwares como el WKO5 y super power calculator (SPC) que a través de múltiples parámetros calculan el dato FTP/CP, pero también se han creado diferentes protocolos manuales para su cálculo. Entre estos protocolos destacan los métodos de dos parámetros de stryd, como el test 9/3 min y 6/3 vueltas (ambos incluyen un esfuerzo máximo corto y otro máximo largo) y los métodos de un parámetro como las pruebas de tiempo (TT) de 60 min (FTP60), 30min (FTP30), 20 min (FTP20) y 10 min (FTP10).

Para estas TT, Cartón-Llorente y colaboradores (Cartón-Llorente et al., 2021) analizaron el acuerdo entre el TT de larga duración FTP60 y las tres TT más cortas FTP30, FTP20 y FTP10 en corredores recreativos. El principal hallazgo de este estudio es que todos los ensayos de FTP simplificados (FTP30, FTP20 y FTP10) mostraron una asociación significativa con el FTP60, tanto en producción de potencia media (MPO) como para MPO normalizada y exhibiendo correlaciones más fuertes con TT más largas. Estos autores realizaron las TT en un ambiente de laboratorio, pero las condiciones de laboratorio no son iguales a las habituales de los atletas, por lo tanto, los resultados podrían ser diferentes al analizarlo con pruebas de campo.

Entre las diferentes pruebas de campo que los entrenadores utilizan para controlar la intensidad del entrenamiento se puede encontrar las pruebas incrementales para estimar la velocidad aeróbica máxima (VAM) (Pallarés et al., 2019) y para determinar el umbral del lactato (LT). Aunque estas pruebas y parámetros obtenidos son utilizados comúnmente para monitorizar el estrés del entrenamiento y rendimiento en competencia, todavía se desconoce, si tienen relación con el FTP/CP en corredores de fondo.

Mencionada la evidencia disponible se puede observar que todavía no existe un consenso que indique cual es el protocolo o software para estimar FTP/CP con mayor fiabilidad y valides científica e incluso se desconoce que método de estimación del FTP/CP se relaciona con los parámetros fisiológicos de rendimiento deportivo en corredores de

fondo. Por lo tanto, el presente proyecto se enfocará en estudiar los protocolos más utilizados para obtener el dato de FTP/CP, así como también relacionar estos datos con parámetros fisiológicos de rendimiento deportivo en atletas de fondo

#### - Bibliografía y Experiencia de investigadores

1. Jaén-Carrillo D, Roche-Seruendo LE, Cartón-Llorente A, Ramírez-Campillo R, **García-Pinillos F**. Mechanical Power in Endurance Running: A Scoping Review on Sensors for Power Output Estimation during Running. *Sensors (Basel)*. noviembre de 2020;20(22).
2. **García-Pinillos F**, Roche-Seruendo LE, Marcén-Cinca N, Marco-Contreras LA, Latorre-Román PA. Absolute Reliability and Concurrent Validity of the Stryd System for the Assessment of Running Stride Kinematics at Different Velocities. *J strength Cond Res*. enero de 2018;35(1):78–84.
3. Cartón-Llorente A, **García-Pinillos F**, Royo-Borrueal J, Rubio-Peiotén A, Jaén-Carrillo D, Roche-Seruendo LE. Estimating Functional Threshold Power in Endurance Running from Shorter Time Trials Using a 6-Axis Inertial Measurement Sensor. *Sensors (Basel)*. enero de 2021;21(2).
4. Cerezuela-Espejo V, Hernández-Belmonte A, Courel-Ibáñez J, Conesa-Ros E, Mora-Rodríguez R, Pallarés JG. Are we ready to measure running power? Repeatability and concurrent validity of five commercial technologies. *Eur J Sport Sci*. abril de 2020;1–10.
5. Pallarés JG, Cerezuela-Espejo V, Morán-Navarro R, Martínez-Cava A, Conesa E, Courel-Ibáñez J. A New Short Track Test to Estimate the VO<sub>2</sub>max and Maximal Aerobic Speed in Well-Trained Runners. *J Strength Cond Res*. 2019;33(5):1216–21.
6. McGrath E, Mahony N, Fleming N, Raleigh C, Donne B. Do Critical and Functional Threshold Powers Equate in Highly-Trained Athletes? *Int J Exerc Sci [Internet]*. 1 de abril de 2021;14(4):45–59. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34055164>

#### - Condiciones de participación

Criterios de inclusión:

- Estar entre 18 y 35 años
- Estar disponible durante todo el estudio
- Ser fondista
- Entrenar un mínimo de 4 veces en la semana

Criterios de exclusión:

- Tomar benzodiazepina, medicamentos neurolépticos o antidepresivos
- Problemas ortopédicos, neurológicos, cardiovasculares o respiratorios
- Presencia de fracturas en EEII o enfermedades psiquiátricas evolutiva conocida que impidan realizar esfuerzos máximos

#### - Métodos y procedimientos

Los participantes serán 15 corredores de fondo al igual que el estudio de McGrath-Eanna y colaboradores (6). Cada uno de los participantes deberán ejecutar 10 pruebas de tiempo máximas o submáximas de diferentes duraciones (corta duración: 1,2,3,4 y 5 min, larga duración: 10,20,30,50 y 60 min). Entre cada una de las pruebas habrá un tiempo de recuperación de 72 horas posterior a la realización de esta, por lo tanto, pasado este tiempo puede realizar la siguiente prueba.

Serán 5 semana de evaluaciones, donde realizarán 2 pruebas de tiempo por semana.

Cada uno de los participantes deberá ser evaluado de la siguiente manera:

#### **Evaluación antropométrica**

- Medición de altura de los sujetos con un tallímetro marca seca
- Medición de masa corporal de los sujetos con balanza marca seca

#### **Evaluación y control de la potencia en carrera**

- Se utilizará el sensor inercial stryd en cada una de las 10 pruebas de tiempo.

#### **Evaluación de parámetros fisiológicos**

- Se usará un monitor de frecuencia cardíaca polar H10
- Sistema metabólico portátil K5 de Cosmed para determinar el consumo máximo de oxígeno (VO2max) y la Velocidad aeróbica máxima (VAM)
- Para medición de los umbrales de lactato se usará el medidor Lactate Pro2, Arkray, Japan.

#### **Protocolo de mediciones**

- Todas las mediciones se realizarán en 10 sesiones, siendo citados previamente por los investigadores: en la primera sesión se evaluará masa corporal y altura de los deportistas para una óptima calibración del sensor inercial Stryd, además se evaluará el VO2max, la VAM y la prueba de tiempo correspondiente a esa sesión.
- El deportista se equipará con su ropa y zapatillas habituales de carrera
- Después, tras un calentamiento estándar de 2km más activación en pista atlética se comenzará con la prueba de tiempo.
- Para todas las sesiones siguientes se mantendrá la medición de masa corporal, calentamiento y la prueba de tiempo que corresponda a esa sesión.

Los protocolos de medición se realizarán de la siguiente forma:

##### **Semana 1**

- Se comenzará con la evaluación de la prueba de tiempo de 60 min, incluyendo todos los pasos previos mencionados y después de 72 horas de recuperación se evaluará la prueba de tiempo de 1 min.

##### **Semana 2**

- Se evaluará la prueba de tiempo de 50 min y de 2 min.

##### **Semana 3**

- Prueba de tiempo de 30 minutos y de 3 minutos

##### **Semana 4**

- Prueba de tiempo de 20 minutos y de 4 minutos

##### **Semana 5**

- Finalmente, se evaluará la prueba de tiempo de 10 min, incluyendo todos los pasos previos mencionados y después de 72 horas de recuperación se evaluará la prueba de tiempo de 5 min.

#### **- Análisis de los resultados**

Los datos de producción de potencia brutos, se extraerán después de terminada las evaluaciones de tiempo en la plataforma web de Stryd (Power center), por lo tanto, posteriormente todos los datos se analizarán detalladamente en el programa Golden Cheetah de acceso gratuito y gracias a este análisis se obtendrá el dato de FTP y CP de los diferentes protocolos.

Ya obtenido FTP y CP se procederá al análisis estadístico mediante el software SPSS versión 23.

**- Lugar de realización del estudio**

El estudio se realizará en la pista atlética de Puerto Montt y los días de evaluación serán pautados por los investigadores y se avisarán con antelación suficiente.

**- Financiación**

La financiación y ejecución del proyecto de tesis será por parte de la Universidad de Los Lagos, Puerto Montt en conjunto con el doctorando y la Facultad de Ciencias de la Actividad Física y Deporte de la Universidad de Granada, España. Esta última colaborará con el análisis y procesamiento de datos de producción de potencia de los diferentes test.

**- Riesgos personales e inconvenientes**

Los riesgos e inconvenientes serán casi nulos, porque son atletas de fondo entrenados y cualquier eventual complicación se traduciría principalmente en fatiga, además las mediciones no son de carácter invasivo y no se modificarán los entrenamientos del deportista. Sin embargo, se tomarán todas las precauciones para garantizar que las pruebas se lleven a cabo de la forma más segura posible.

**- Medidas adoptadas**

En base a la ley 14/2007 de investigación Biomédica, todos los participantes en dicho estudio deberán firmar un consentimiento informado para participar en este proyecto. Toda la información personal obtenida y utilizada será tratada con confidencialidad siguiendo las directrices de la ley Orgánica 3/2018 de protección de datos de carácter personal.

**CONSENTIMIENTO INFORMADO DEL PARTICIPANTE**

**(EN SU CASO, PADRE/MADRE/TUTOR)**

(Los artículos se refieren a la Ley de Investigación Biomédica, BOE 4 de julio de 2007)

D./Dña ..... con D.N.I.  
nº..... y fecha de nacimiento ...../...../.....

**Declaro que:**

**1. He leído (o me han leído) la hoja de información al paciente del proyecto:** Análisis de la potencia mecánica y su aplicación práctica al entrenamiento en corredores de fondo mediante el uso de sensores inerciales.

**2. He comprendido la investigación que se va a realizar con mi participación y he tenido la oportunidad de resolver cualquier duda al respecto.**

**3. Así mismo, se me ha informado de que:**

- Se hace constar que el participante manifiesta expresamente decir la verdad en sus respuestas para garantizar los datos reales sobre su estado físico o salud o los que se le solicitan (art. 23.1. L.I.B.).
- Tengo derecho a no otorgar mi consentimiento a participar y a revocarlo en cualquier momento del estudio (art. 4.3. L.I.B.).

- La falta de consentimiento a iniciar el estudio o su revocación una vez iniciado no me supondrá perjuicio alguno (en cualquier otro derecho) o discriminación (art. 4.4 y 6. L.I.B.).
- Seré informado, si así lo deseo, de los datos que se obtengan durante la investigación (art. 4.5 y 27.2. L.I.B.) y de la forma de obtener dicha información (art. 15.2. L.I.B.).
- Tengo derecho a decidir que no se me comuniquen los datos de la investigación (con las excepciones legales pertinentes) (art. 4.5. L.I.B.).
- Los datos que se obtengan con mi participación en la investigación son anónimos y si al publicarlos hay que mencionar mi nombre será precisa mi autorización (art. 15.2. L.I.B.).

*(Los datos recogidos en esta investigación serán anónimos y su uso se regirá por lo recogido en la legislación vigente en relación a la Protección de Datos de Carácter Personal. Los datos personales del participante serán tratados conforme a los términos establecidos en la Ley Orgánica 15/1999 de Protección de Datos de Carácter Personal, pudiendo ejecutar en cualquier momento los derechos de acceso, rectificación, cancelación u oposición, poniéndose en contacto con el investigador principal según los datos incluidos en el documento de información al participante).*

**4. Acepto participar de forma voluntaria en el proyecto arriba mencionado.**

**Firma del participante**

**Lugar y fecha**

**DOCUMENTO DE INFORMACIÓN AL PARTICIPANTE  
(EN SU CASO, PADRE/MADRE/TUTOR)**

(Los artículos se refieren a la Ley de Investigación Biomédica, BOE 4 de julio de 2007)

**A) DATOS OBLIGATORIOS****1. Datos del investigador responsable del proyecto (art. 15.2. L.I.B.).**

1.1. Nombre y apellidos: Alberto Alejandro Ñancupil Andrade

[REDACTED]

**2. Datos sobre el proyecto (art. 15.2. L.I.B.).**

2.1. Título y fuente de financiación del proyecto:

Análisis de la potencia mecánica y su aplicación práctica al entrenamiento en corredores de fondo mediante el uso de sensores inerciales. Proyecto de tesis financiado por la Universidad de Los Lagos en conjunto con el doctorando y la Facultad de Ciencias de la Actividad Física y Deporte de la Universidad de Granada, España.

2.2. Naturaleza, importancia y beneficios que se esperan en el proyecto:

El presente estudio busca analizar los protocolos más utilizados para obtener el dato de FTP y CP, así como también relacionar estos datos con parámetros fisiológicos de rendimiento deportivo en atletas de fondo. Los resultados que se obtengan permitirán aportar a la comunidad científica y deportiva, claras indicaciones sobre los protocolos de FTP y CP adecuado para la distancia del corredor, así como también conocer los hitos fisiológicos asociados a cada protocolo.

2.3. Las implicaciones y riesgos, si los hubiese, de la investigación que se pretende realizar:

El proyecto de investigación carece de procedimientos invasivos que supongan un riesgo para salud del participante.

2.4. Uso potencial de los resultados de la investigación en el futuro, incluido el comercial:

Los resultados obtenidos tendrán como fin principal aportar datos de los diferentes protocolos de FTP y CP que serán de suma importancia para entrenadores y atletas porque se utilizarán como un instrumento en la planificación del entrenamiento atlético.

**3. Medidas para asegurar una compensación adecuada si sufre algún daño o molestia causada por la investigación (art. 15.2 y art. 18. L.I.B.):**

El proyecto de investigación carece de procedimientos invasivos que supongan un riesgo para la salud participante.

**B) OTROS DATOS** (incluya cualquier otra información que considere necesaria para la correcta información del participante).

La participación en este proyecto no involucra una compensación económica.

# **ANEXO 2:**

Currículum vitae del doctorando.