

Article

# Precisión de las Recomendaciones de Entrenamiento Basadas en una Prueba de Ejercicio Incremental de Varias Etapas en Treadmill

Hendrik Mugele, Ashley Plummer, Omar Baritello, Maggie Towe, Pia Brecht y Frank Mayer

## RESUMEN

Los corredores de competición se someterán ocasionalmente a ejercicios en un laboratorio para obtener información predictiva y prescriptiva sobre su rendimiento. El objetivo de la presente investigación fue evaluar si las demandas fisiológicas de la carrera en treadmill (TM) basada en laboratorio pueden simular las de la carrera sobre el suelo (OG) utilizando un protocolo de uso común. Quince voluntarios sanos con un kilometraje semanal de  $\geq 20$  km en los últimos 6 meses y experiencia en treadmill participaron en este estudio transversal. Se realizaron dos pruebas incrementales progresivas hasta el agotamiento volitivo en un orden fijo dentro de una semana en un laboratorio de investigación de una Clínica para Pacientes Ambulatorios y en una pista de atletismo al aire libre. Las variables principales de evaluación fueron la velocidad de carrera ( $IAT_{speed}$ ), la frecuencia cardíaca ( $IAT_{HR}$ ) y la concentración de lactato en el umbral anaeróbico individual ( $IAT_{bLa}$ ). Además, se analizó la distancia recorrida (DIST), la frecuencia cardíaca máxima ( $HR_{max}$ ), la concentración máxima de lactato en sangre ( $bLa_{max}$ ) y el índice de esfuerzo percibido (RPE) al  $IAT_{speed}$ . El  $IAT_{speed}$ , la DIST y la  $HR_{max}$  no fueron estadísticamente diferentes entre las condiciones, mientras que la  $bLa_{max}$  y el RPE en  $IAT_{speed}$  mostraron significación estadística ( $p < 0,05$ ). Aparte del RPE a  $IAT_{speed}$ , el  $IAT_{speed}$ , la DIST, la  $HR_{max}$  y la  $bLa_{max}$  se correlacionan fuertemente entre las condiciones ( $r = 0,815-0,988$ ). La alta fiabilidad entre las condiciones proporciona pruebas sólidas que sugieren que la carrera en una treadmill es fisiológicamente comparable a la OG y que las recomendaciones de entrenamiento deben hacerse con seguridad.

## INTRODUCCIÓN

Los exámenes de ejercicio general, como las pruebas de ejercicio incremental de varias etapas (IET), son una práctica común para evaluar a los deportistas profesionales y recreativos [1]. La IET puede utilizarse para identificar el estado actual del entrenamiento, predecir la capacidad de rendimiento y ayudar a dar recomendaciones de entrenamiento [1,2]. Existen varios protocolos de campo y de laboratorio que están actualmente implementados y que consisten en muchas variables diferenciadoras, incluyendo la duración de las etapas, el número de etapas, los incrementos de velocidad, las velocidades iniciales y las inclinaciones [3,4]. En la ciencia del ejercicio clínico, el uso de treadmills en el laboratorio es un método ampliamente aceptado, ya que está bien estandarizado, es reproducible y facilita la medición de parámetros de rendimiento específicos, por ejemplo, la frecuencia cardíaca, la ventilación y el lactato sanguíneo ( $bLa$ ) [5].

Es de interés tanto para los deportistas como para los entrenadores poder identificar la capacidad de resistencia general,

que se ha definido como la mayor intensidad de ejercicio constante que se puede mantener en un tiempo sostenido sin un aumento continuo de la bLa [1]. Los umbrales relacionados con el lactato están fuertemente correlacionados con el rendimiento de la resistencia y por lo tanto pertenecen directamente a las recomendaciones de entrenamiento [1,3,6]. Como describe Dickhuth (1999), el umbral anaeróbico individual (IAT) es uno de los muchos conceptos que pueden estimar la mayor intensidad a la que se mantiene el equilibrio del lactato [7]. Debido a la estrecha relación entre los valores de umbral de lactato y el máximo estado estable de lactato (MLSS) [1], la definición de la velocidad de carrera a la que se alcanza el IAT ( $IAT_{speed}$ ) es un indicador útil no sólo porque proporciona una velocidad de referencia cuantificable a la que los deportistas de resistencia pueden entrenar de forma óptima, sino que también puede servir como predictor de los tiempos de rendimiento de resistencia [8]. Con un  $IAT_{speed}$  definido, los deportistas de diversas destrezas pueden entrenar de forma eficiente para mejorar continuamente el rendimiento de resistencia sin excederse ni entrenar demasiado [9]. Además, prescribir intervenciones de ejercicio tolerables y seguras en varios grupos de pacientes evaluando la bLa también puede ser una herramienta útil [5,10-13].

Debe tenerse en cuenta, sin embargo, que proporcionar recomendaciones de entrenamiento basadas en el IET de laboratorio sólo puede ser válido si las condiciones simulan con precisión las de la carrera sobre el suelo (OG). Existen algunas pruebas que sugieren diferencias biomecánicas inherentes entre la OG y la carrera en una treadmill [14,15]. Por ejemplo, la OG resulta en un aumento de la flexión máxima de cadera y del ángulo de flexión en la pisada; a su vez, esto puede ser atribuible a la menor longitud de zancada observada en una treadmill [15]. Estos factores afectan invariablemente la eficiencia de la carrera y, por lo tanto, influyen en el costo metabólico de la carrera. Además, mientras se corre a velocidades superiores a 10,5 km/h durante la OG, la resistencia del viento y del aire puede ser un factor de confusión importante en las pruebas de campo [16-18]. Se ha demostrado que la aplicación de una pendiente del 1% en la treadmill compensa la reducción de los costos metabólicos debido a la falta de resistencia del aire y del viento en un entorno de laboratorio [2]. Sin embargo, las características de cada treadmill dependen de las especificaciones del fabricante (es decir, la magnitud de la fricción de la correa y las fluctuaciones en las velocidades) por lo que esta pendiente puede no ser necesariamente aplicable universalmente. Además, el uso a largo plazo de la treadmill puede provocar la degradación o el "desgaste por uso" de sus componentes. Si las diferencias entre las treadmills pueden ser razonablemente asumidas, entonces se hace necesario revalidar el dispositivo comúnmente utilizado en la práctica diaria y, a su vez, apoyar la validez de las recomendaciones de entrenamiento. La treadmill utilizada en el laboratorio aplicará regularmente una ligera pendiente predefinida para compensar estos factores de confusión potenciales. Esta noción fue apoyada por trabajos internos inéditos obtenidos en cumplimiento parcial del Programa de Ciencia del Ejercicio Clínico de la Universidad, que determinó que una pendiente del 0,4% era una inclinación más adecuada frente a la propuesta por Jones y Doust (1996) [2]. Sin embargo, la validación periódica con la OG es obligatoria para evaluar la precisión de las recomendaciones de entrenamiento en treadmill. Específicamente, determinar si la pendiente de 0,4% sobreestima o subestima el verdadero rendimiento de resistencia expresado por el  $IAT_{speed}$ .

Por lo tanto, el objetivo del presente estudio fue revalidar el IET de uso frecuente en una treadmill que se utiliza durante el examen deportivo pre-participación y la evaluación anual de salud, así como el diagnóstico del rendimiento. Se planteó la hipótesis de que el protocolo de la treadmill podría reproducirse con éxito en la pista. Además, una pendiente del 0,4% explicaría la resistencia del aire y del viento; por lo tanto, no se observaría ninguna diferencia entre las condiciones.

## MÉTODOS

### Sujetos

Se determinó un tamaño de muestra de 12 utilizando un análisis de potencia a priori bilateral (G\*Power (software 3.1; Düsseldorf, Alemania) que alcanzaría el 80% de potencia con un nivel de significación de 0,05). Una revisión de la bibliografía relevante reveló una fuerte relación entre la velocidad de la carrera y el IAT (es decir,  $r = 0,91$ ) [1]. Para explicar los posibles abandonos, se reclutó un total de 15 participantes para el estudio. Los criterios de inclusión fueron: (i) corredor experimentado con un promedio semanal de kilometraje igual o superior a 20 km de carrera [19], (ii) el kilometraje semanal se viene logrando de manera consistente durante al menos medio año, (iii) experiencia previa y confianza en la carrera en treadmill, (iv) participa activamente en competencias/entrenamientos y (v) no hay lesión que inhiba el rendimiento. El estudio fue aprobado por el comité ético de la Universidad de Potsdam y se obtuvo el consentimiento informado por escrito de todos los participantes.

### Diseño Experimental

Cada participante inicialmente realizó el IET en una treadmill en el entorno de laboratorio (TM) seguido del mismo protocolo en el campo (RT). El orden de los ensayos fue fijo y no aleatorio porque las condiciones climáticas habían sido

controladas en la medida de lo posible. La prueba comenzó a una velocidad de carrera de 6 km/h con un aumento progresivo de la velocidad de 2 km/h cada 3 minutos hasta la finalización volitiva [8]. Inmediatamente después de cada etapa, hubo un período de descanso de 30 segundos para tomar medidas de bLa y medidas subjetivas del índice de esfuerzo percibido (RPE) de los participantes a través de la Escala de RPE de BORG 6-20 [20]. Las medidas de resultado de interés primarias fueron la velocidad de carrera, la frecuencia cardíaca y la concentración de bLa en el IAT (IAT<sub>speed</sub>, IAT<sub>HR</sub> e IAT<sub>bLa</sub> respectivamente). Las variables de resultado secundarias fueron la frecuencia cardíaca máxima (HR<sub>max</sub>), el lactato sanguíneo máximo (bLa<sub>max</sub>), los estadios alcanzados en ambas condiciones en metros, así como la velocidad de carrera final y el RPE. Se animó verbalmente a los participantes a que hicieran su máximo esfuerzo, especialmente hacia el final del protocolo, cuando estaban visiblemente en decadencia. Todos los participantes fueron evaluados en el plazo de una semana (3,2 ± 0,8 días; rango de 2 a 5 días), lo que debería haber permitido una recuperación adecuada. Antes de cada medición, un médico realizó un examen físico con el fin de asegurar que los participantes puedan realizar ejercicio máximo, verificando posibles contraindicaciones ortopédicas y cardiopulmonares para la prueba de ejercicio.

### **Prueba de Laboratorio**

La TM se realizó en una treadmill (Pulsar, h/p/cosmos Sports & Medical, Nussdorf-Traunstein, Alemania; precisión de velocidad ±5%) con una pendiente constante de 0,4% (temperatura ambiente media ± desviación estándar (SD): 25 ± 1°C, rango 23-26°C). Las mediciones de la frecuencia cardíaca (HR) se realizaron 15 segundos antes del final de cada etapa. Las lecturas de BORG y las muestras de sangre capilar del lóbulo de la oreja se tomaron dentro del período de descanso de 30 segundos. La velocidad máxima de carrera se interpoló linealmente cuando se produjo la finalización prematura multiplicando el tiempo empleado en esa etapa por el cociente entre la duración de la etapa y el incremento de velocidad (0,0031 m/s). Por ejemplo, si la finalización ocurrió en la etapa 7 (es decir, 18 km/h) después de 0:38 min, se alcanzó la velocidad máxima de carrera de 18,42 km/h. A los participantes se les había pedido que se abstuvieran de hacer ejercicio el día anterior a la prueba. Además, se les había pedido que no se desviaran de sus hábitos nutricionales habituales y que ayunaran tres horas antes de la prueba. Se les permitió beber ad libitum. Sin embargo, no se permitieron las bebidas con cafeína el día de la prueba. El estado de hidratación no fue controlado.

### **Prueba de Campo**

La RT se realizó dentro de los siete días siguientes a la TM (temperatura ambiente media: 20 ± 4°C, rango: 16-27°C). La preparación de los participantes fue la misma que en la TM. La prueba en sí misma se realizó en una pista de atletismo de 400 metros al aire libre. Para ajustar y mantener la velocidad de carrera de los atletas, se pre-grabó una secuencia de señales acústicas (es decir, pitidos de audio) utilizando un software de edición musical disponible en el mercado (Garage Band (vers. 10.1.6). Apple Inc. California, Estados Unidos de América). El archivo de audio fue reproducido en un teléfono móvil (iPhone 5s, Apple Inc., California, Estados Unidos de América) que estaba conectado a un altavoz multimedia con Bluetooth (JBL charge3+. Harman International Industries, Incorporated. Stamford, Estados Unidos de América). Para garantizar que la velocidad sea la adecuada, se equipó una bicicleta con el altavoz y una computadora de bicicleta calibrada (CUBE RACE TRAIN, CUBE RACE TRAIN, Pending System GmbH & Co. KG. Waldershof, Alemania). La bicicleta se mantuvo sincronizada con los pitidos de audio y circulaba junto al atleta dando instrucciones verbales y estímulos verbales si el participante empezaba a caer por debajo de la velocidad objetivo. La secuencia fue diseñada para sonar cada 50 m indicados con un cono. Si (a través del sonido del pitido de audio) los participantes no lograban alcanzar el cono en dos ocasiones consecutivas debido a la fatiga, la prueba se terminaba. Se registró la distancia desde el inicio hasta el punto de abandono de la última etapa. En este punto, los metros alcanzados podrían convertirse en tiempo completado en la etapa dada. Las muestras de sangre capilar y las lecturas de HR y BORG se tomaron dentro de los 30 segundos de inactividad entre las etapas. Si los participantes no terminaban un incremento, su velocidad máxima de carrera se interpolaba linealmente.

### **IAT**

El IAT se determinó según el método de Dickhuth [7]. Específicamente, los autores propusieron que el IAT se ubicara 1,5 mmol/l por encima del equivalente mínimo de lactato. El cálculo se determinó utilizando el Ergonizer Software (Ergonizer, Friburgo, Alemania) [21].

### **Mediciones de BLa y HR**

Todas las mediciones del bLa fueron evaluadas de manera estandarizada en las condiciones de RT y TM al inicio, después de cada incremento, inmediatamente después de la finalización, tres y cinco minutos post-prueba. El procedimiento fue el siguiente: (i) la oreja se esterilizó inicialmente con toallitas con alcohol y se secó con un pañuelo de papel, (ii) después de perforar la piel con una lanceta, se descartó la primera gota de sangre y se tomó una muestra de sangre de 20µl con un tubo capilar de plástico de extremo a extremo (>1% de heparina sódica; EKF Diagnostic Sales, Magdeburg, Alemania), (iii) el tubo capilar se colocó en un agente desproteinizante y finalmente (iv) el análisis del lactato sanguíneo se realizó

utilizando el método enzimático-amperométrico (Biosen S-line, EKF Diagnostic Sales, Magdeburg, Alemania; coeficiente de varianza: 1,5%).

La HR se midió continuamente en ambas condiciones utilizando una pulsera transmisora disponible en el mercado (F6, Polar electro, Kempele, Finlandia; precisión  $\pm 1$  pulso por minuto (bpm)). En ambos protocolos, las lecturas se tomaron al final de cada etapa, tres y cinco minutos después de la terminación voluntaria.

### **RPE**

La escala de RPE de BORG 6-20 [20] se utilizó para cada incremento con el fin de obtener una medida subjetiva del esfuerzo percibido del participante. Los participantes debían indicar el número correspondiente al final de cada etapa en ambas condiciones de prueba.

### **Análisis Estadístico**

Los resultados para todos los participantes se presentan como media  $\pm$  SD si no se indica lo contrario. Se verificó la distribución normal de todos los datos utilizando la prueba de Shapiro-Wilk con un nivel de significación establecido en  $p < 0,05$ . Las diferencias entre las condiciones de cada variable primaria y secundaria se compararon mediante el  $t$ -test pareado o una prueba no paramétrica de rangos de Wilcoxon.

Para cuantificar el acuerdo de las medidas de resultado entre la TM y la RT, se realizó un análisis Bland-Altman. Se consideraron relevantes los límites de acuerdo (LoA) definidos con prioridad del 95% de  $\pm 1$  km/h para el  $IAT_{speed}$  [22,23]. La fuerza de la relación entre las medidas de resultado primarias de las dos condiciones de carrera se analizó con la correlación producto-momento de Pearson. La fuerza de la correlación se determinó de la siguiente manera:  $r = 0$  (no),  $r = 0,2$  (débil)  $r = 0,50$  (moderado);  $r = 0,8$  (fuerte) y  $r = 1$  (perfecto) [24]. La entrada de datos primaria y los cálculos descriptivos se realizaron utilizando Microsoft Excel para Mac 2011 (Versión 14.6.1 (160122)). Se realizaron análisis estadísticos adicionales utilizando IBM SPSS Statistics for Macintosh (versión 21.0. Armonk, NY: IBM Corp.).

## **RESULTADOS**

---

### **Sujetos**

Un total de 15 participantes (siete mujeres y ocho hombres) completaron el estudio sin eventos adversos. Las características iniciales, incluidos los datos antropométricos, se muestran en la Tabla 1. Todos los participantes eran atletas recreativos, de los cuales seis eran de deportes de equipo (es decir, fútbol, hockey y volley) y nueve de deportes individuales (es decir, carrera, triatlón, carrera de obstáculos, ciclismo y Cross Fit).

**Tabla 1.** Características iniciales.

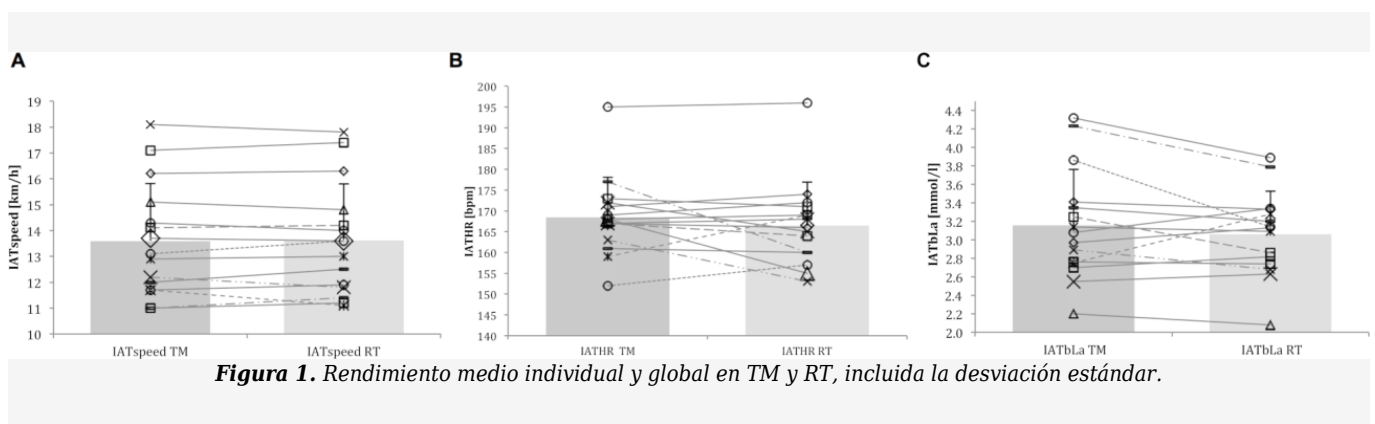
	Gender		
	Total (N = 15)	Males (N = 8)	Females (N = 7)
Age [yrs.]	30 (27–34)	29 (25–30)	36 (31–38)
Height [cm]	180 (± 10)	180 (± 10)	170 (± 10)
Weight [kg]	67.7 (± 9.6)	75.0 (± 4.7)	59.2 (± 5.8)
Body Mass Index [kg/m <sup>2</sup> ]	22.3 (20.4–22.8)	22.7 (21.3–23.2)	21.1 (19.9–22.3)
Training volume [h/wk.]	5 (4–7)	5 (4–6)	5 (4.5–8.5)
Mileage [km/wk.]	25 (20–36)	28 (20–38)	20 (20–30)

Age, Body Mass Index, training volume and mileage are presented as median (interquartile range). Height and weight are presented as mean (± standard deviation).

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0204696.t001>

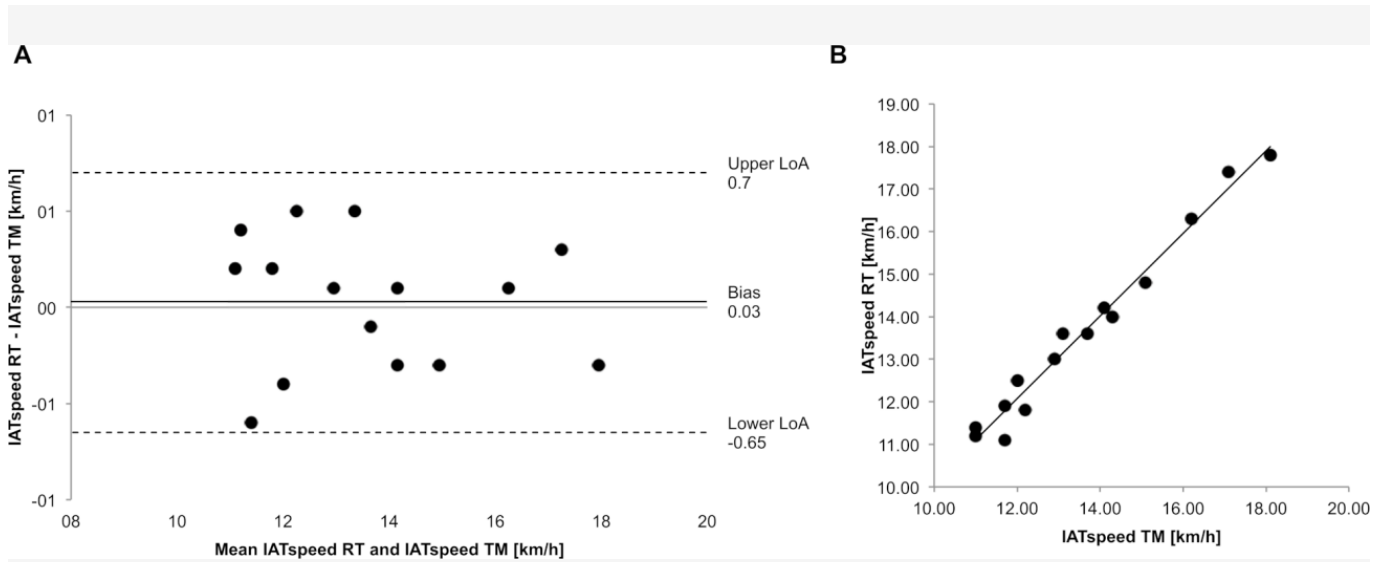
### IAT<sub>speed</sub>

La prueba de Shapiro-Wilk mostró que los datos se distribuyen normalmente ( $\Delta$ RT & TM:  $p = 0,389$ ). Un  $t$ -test pareado de dos variables no reveló diferencias estadísticamente significativas entre la TM (media ± SD, intervalo de confianza [IC] del 95%:  $13,61 \pm 2,21$ ;  $12,39$ - $14,83$  km/h) y la RT ( $13,64 \pm 2,17$ ; IC del 95%:  $12,43$ - $14,84$  km/h;  $p = 0,768$ ; Fig 1A). Seis y nueve participantes lograron un cambio correcto de su IAT<sub>speed</sub> en TM y RT, respectivamente. El gráfico de Bland-Altman (Fig. 2A) mostró un sesgo sistemático de  $0,03$  km/h con un error aleatorio de  $0,67$  km/h (LoA superior:  $0,7$ , LoA inferior:  $-0,65$  km/h). El análisis de correlación (Fig. 2B) mostró una fuerte asociación positiva ( $r = 0,988$ ;  $p < 0,001$ ) con el 97,6% de la variabilidad del IAT<sub>speed</sub> de la condición RT que se explica por el IAT<sub>speed</sub> alcanzado en la TM.



1. IAT<sub>speed</sub>, (B) IAT<sub>HR</sub> y (C) IAT<sub>bLa</sub>.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0204696.g001>

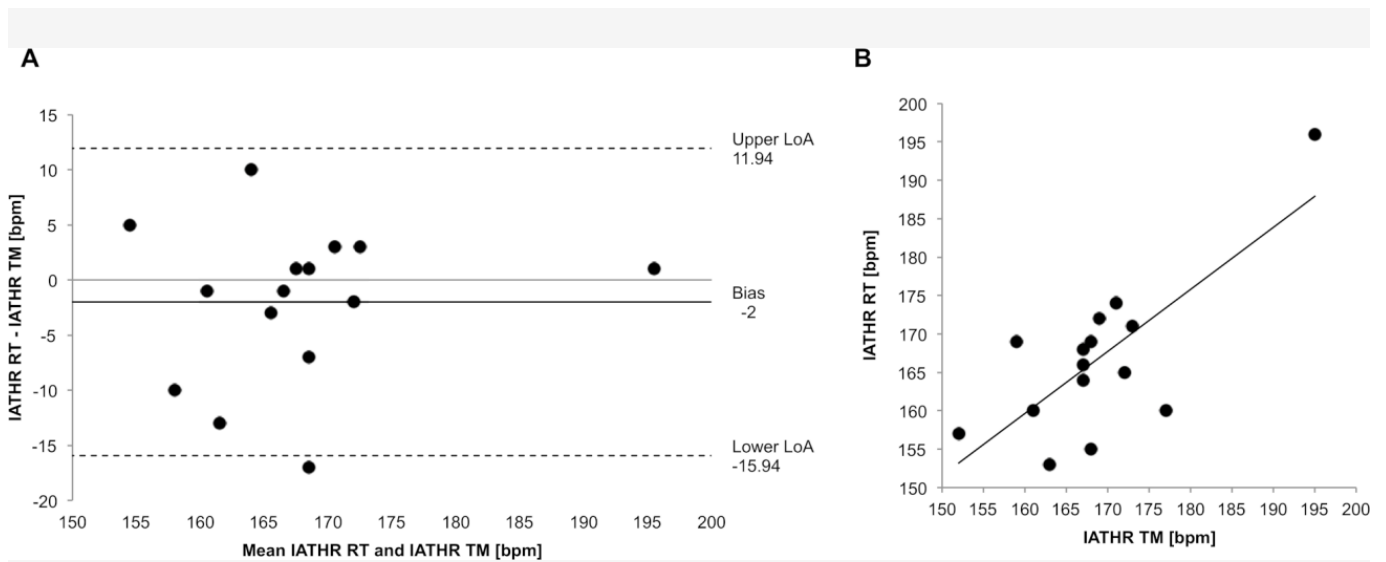


**Figura 2.** Acuerdo y fuerza de la relación entre TM y RT.

1. Gráfico de Bland-Altman para mostrar el acuerdo del  $IAT_{speed}$  y (B) Gráfico de dispersión del  $IAT_{speed}$  logrado para RT (eje y) versus TM (eje x) para mostrar la fuerza de la relación.

### $IAT_{HR}$

El  $IAT_{HR}$  se distribuía normalmente ( $\Delta RT$  &  $TM$ :  $p = 0,453$ ). El  $t$ -test no reveló diferencias estadísticamente significativas entre la TM ( $169 \pm 10$ , IC del 95%: 163-174 bpm) y la RT ( $167 \pm 10$ , IC del 95%: 161-172 bpm;  $p = 0,294$ ; Fig 1B). El gráfico de Bland-Altman (Fig. 3A) mostró un sesgo sistemático de -2 bpm con un error aleatorio de 13,9 bpm (LoA superior: 11,9, LoA inferior: -15,9 bpm). El análisis de correlación (Fig. 3B) mostró una asociación moderada ( $r = 0,746$ ;  $p = 0,001$ ) con el 55,6% de la variabilidad del  $IAT_{HR}$  de la condición RT explicada por el  $IAT_{HR}$  logrado en la TM.

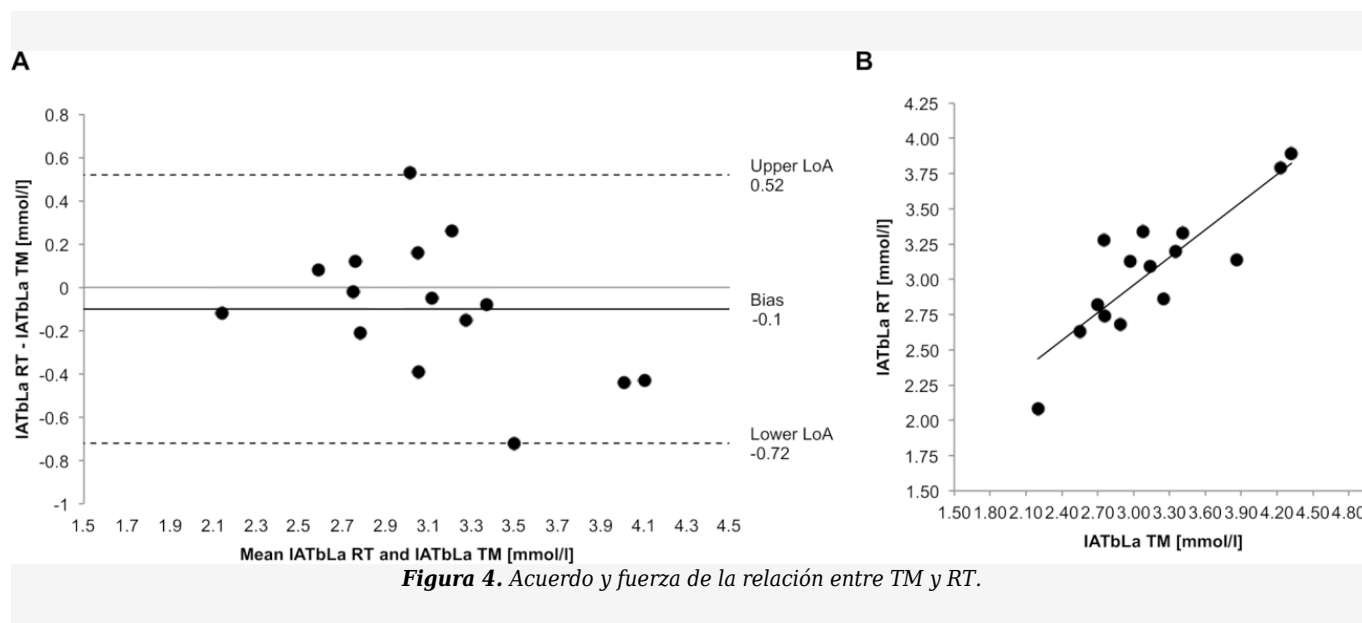


**Figura 3.** Acuerdo y fuerza de la relación entre TM y RT.

1. Gráfico de Bland-Altman para mostrar el acuerdo del  $IAT_{HR}$  y (B) Gráfico de dispersión del  $IAT_{HR}$  logrado para RT (eje y) versus TM (eje x) para mostrar la fuerza de la relación.

### $IAT_{bLa}$

El IATbLa se distribuía normalmente ( $\Delta RT$  &  $TM$ :  $p = 0,563$ ). Un  $t$ -test pareado de dos variables no reveló diferencias estadísticamente significativas entre la  $TM$  ( $3,16 \pm 0,6$ ; IC del 95%: 2,8-3,5 mmol/l) y la  $RT$  ( $3,07 \pm 0,46$ ; IC del 95%: 2,8-3,3 mmol/l);  $p = 0,252$ ; Fig 1C). El gráfico de Bland-Altman (Fig. 4A) mostró un sesgo sistemático de  $-0,1$  mmol/l con un error aleatorio de  $0,62$  mmol/l (LoA superior:  $0,52$ , LoA inferior:  $-0,72$  mmol/l). El análisis de correlación (Fig. 4B) mostró una fuerte asociación ( $r = 0,856$ ;  $p < 0,001$ ) con el 73,2% de la variabilidad del IATbLa de la condición  $RT$  explicada por el IATbLa logrado en la  $TM$ .



1. Gráfico de Bland-Altman para mostrar el acuerdo del IATbLa y (B) Gráfico de dispersión del IATbLa alcanzado para  $RT$  (eje y) versus  $TM$  (eje x) para mostrar la fuerza de la relación.

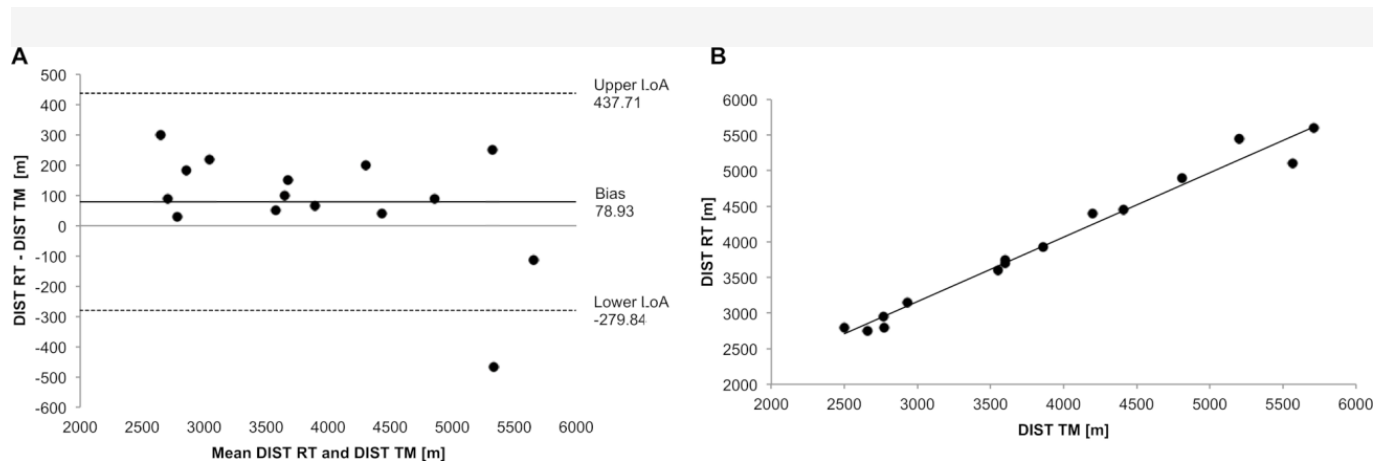
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0204696.g004>

### **bLa<sub>max</sub> y HR<sub>max</sub>**

No se encontraron diferencias significativas en la  $HR_{max}$  entre la  $TM$  ( $189 \pm 8$ , IC del 95%: 185-193) y la  $RT$  ( $188 \pm 9$ , IC del 95%: 183-193) ( $p = 0,331$ ). Sin embargo, la  $HR_{max}$  mostró una fuerte correlación ( $r = 0,860$ ,  $p < 0,001$ ) con el 74,0% de la variabilidad en la  $RT$  siendo explicada por la  $TM$ . Seis participantes lograron la misma  $HR_{max}$  mientras que cinco tuvieron un valor más alto en la condición de  $TM$ . Por el contrario, cuatro registraron su frecuencia cardíaca más alta en la  $RT$ . Las diferencias individuales variaron de 1 a 11 bpm. La  $HR_{max}$  fue sistemáticamente inferior para la  $RT$  con un sesgo de  $1,13$  bpm y un error aleatorio de  $8,54$  bpm (LoA superior:  $7,41$ , LoA inferior:  $-9,67$  bpm). El  $bLa_{max}$  entre las condiciones fue significativamente diferente ( $TM$ :  $10,38 \pm 2,43$ ; IC del 95%:  $9,03$  a  $11,72$ ;  $RT$ :  $11,45 \pm 2,75$ ; IC del 95%:  $9,92$  a  $12,97$ ;  $p = 0,022$ ) y esto estuvo fuertemente correlacionado ( $r = 0,815$ ;  $p < 0,001$ ;  $R^2 = 0,665$ ). En total, 12 de 15 participantes alcanzaron un  $bLa_{max}$  más alto en la  $RT$ . Las diferencias individuales oscilaron entre  $0,1$  y  $4,2$  mmol/l. Se mostró un sesgo y un error aleatorio de  $1,07$  mmol/l y  $3,14$  mmol/l (LoA superior:  $4,21$ , LoA inferior:  $-2,07$  mmol/l) respectivamente.

### **DIST**

No se cumplió el supuesto de una distribución normal de los resultados para las diferencias en la  $DIST$  ( $p = 0,006$ ). La prueba de rangos de Wilcoxon reveló una diferencia estadísticamente significativa entre la  $TM$  ( $3876 \pm 1077$ , IC del 95%:  $3280$ - $4472$  m) y la  $RT$  ( $3955 \pm 986$ , IC del 95%:  $3409$ - $4501$  m;  $p = 0,036$ ). Sólo dos participantes cubrieron menos metros en la  $RT$ , mientras que 13 más en la  $RT$ . El gráfico de Bland-Altman (Fig. 5A) mostró un sesgo sistemático de  $78,93$  m hacia la  $RT$  con un error aleatorio de  $358,78$  m (LoA superior:  $437,71$ , LoA inferior:  $-279,84$  m). El análisis de correlación (Fig. 5B) reveló una fuerte asociación positiva ( $r = 0,988$ ;  $p < 0,001$ ) con el 97,6% de la variabilidad en  $DIST$  en la  $RT$ , que se explica por la  $DIST$  lograda en la  $TM$ .



**Figura 5.** Acuerdo y fuerza de la relación entre TM y RT.

(A) Gráfico de Bland-Altman para mostrar el acuerdo de DIST y (B) Gráfico de dispersión de la DIST lograda para la RT (eje y) versus la TM (eje x) para mostrar la fuerza de relación.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0204696.g005>

## RPE

Trece participantes (87%) informaron un valor máximo de RPE de 20/20 y los dos restantes (13%) informaron 19/20 después de la finalización volitiva de la TM. En la RT, 10 (67%), cuatro (27%) y un participante (7%) expresaron su nivel de agotamiento con 20/20, 19/20 y 18/20, respectivamente. Sólo cinco lecturas de RPE de los participantes se desviaron entre ambas condiciones. Es decir, cuatro calificaron a la TM como más agotadora, mientras que uno percibió un mayor agotamiento en la RT. Los índices de RPE en el  $IAT_{speed}$  fueron significativamente diferentes (TM:  $15 \pm 1$ , IC del 95%: 14-15; RT:  $13 \pm 1$ , IC del 95%: 13-14,  $p < 0,001$ ) y tuvieron sólo una correlación moderada entre las condiciones ( $r = 0,679$ ,  $p < 0,005$ ).

## Discusión

El objetivo del estudio fue evaluar si la inclinación utilizada en una treadmill era suficiente para dar recomendaciones válidas de entrenamiento. El hallazgo primario demostró que la aplicación de una pendiente de 0,4% está fuertemente correlacionada con la condición sobre el suelo expresada por el  $IAT_{speed}$ . Además, la distancia recorrida por los corredores también estaba altamente correlacionada entre las condiciones. Para el conocimiento de los autores, este estudio representa el primero en comparar el  $IAT_{speed}$  tanto en un laboratorio como al aire libre usando el mismo protocolo incremental gradual.

Los resultados de las mediciones del IAT se encuentran dentro de la LoA definido a priori de  $\pm 1$  km/h. Una diferencia sistemática de 0,03 km/h no sugiere ninguna implicación práctica para el manejo del entrenamiento de los corredores. Los autores plantearon la hipótesis de que al utilizar una pendiente de 0,4% en la treadmill, se podría tener en cuenta la resistencia del viento y del aire ambiente que ocurre durante la OG. Esto podría, a su vez, permitir a los médicos dar recomendaciones creíbles de entrenamiento al aire libre basadas en el rendimiento de los corredores en la treadmill. Los resultados mostraron una consistencia excepcional al comparar el  $IAT_{speed}$  de las dos condiciones. El  $IAT_{HR}$  mostró una asociación más modesta ( $r = 0,746$ ) y por lo tanto, se podría argumentar que sus propiedades prescriptivas basadas en pruebas de laboratorio no son tan confiables como las del  $IAT_{speed}$ . La frecuencia cardíaca durante el ejercicio puede estar influenciada por varios factores que no fueron controlados activamente en el estudio actual, por ejemplo, el estado de hidratación [25]. Los resultados indicarían que es preferible recomendar la velocidad (km/h) a la que una persona debería entrenar en lugar de una HR objetivo, ya que es probable que refleje una carrera en el umbral anaeróbico.

En general, el uso de umbrales de lactato (por ejemplo, el IAT) es ampliamente aceptado como un criterio apropiado en comparación con otros indicadores de rendimiento, por ejemplo,  $VO_{2max}$  y HR. El  $IAT_{speed}$  fue elegido como el parámetro fisiológico más importante debido a sus fuertes propiedades prescriptivas y fiabilidad [8,26-28]. El IAT, calculado según Dickhuth (1999) [7], es uno de los aproximadamente 25 conceptos propuestos para estimar el MLSS [1] y se ha utilizado previamente para el diagnóstico del rendimiento y el control del entrenamiento [26,29]. Se ha observado repetidamente una fuerte correlación (rango:  $r = 0,91-0,96$ ) al determinar indirectamente el  $IAT_{speed}$  comparando la velocidad media de carrera en la pista de más de 3 km con el MLSS obtenido en el laboratorio [30-32]. Sin embargo, el uso del  $IAT_{speed}$  obtenido mediante muestreo directo de la bLa en una prueba de campo debe ser validado de forma cruzada utilizando el mismo



protocolo en un entorno de laboratorio. Se puede especular razonablemente que si la pendiente del 0,4% en la treadmill sobreestimara o subestimara las condiciones de entrenamiento de OG, entonces se habría visto un cambio en el  $IAT_{speed}$ . En los presentes hallazgos no se comunicó ninguna diferencia de este tipo. Por lo tanto, una pendiente de 0,4% puede considerarse precisa y el  $IAT_{speed}$  como un importante marcador fisiológico cuando se realizan estudios de validez y se hacen recomendaciones válidas de entrenamiento.

En un entorno práctico, es muy frecuente que los corredores opten por la OG como su modalidad preferida de entrenamiento de resistencia. Siendo este el caso, cualquier información proporcionada basada en los resultados de la TM debe ser válida y simular las condiciones del mundo real, así como tener una aplicación práctica. Muchos estudios que emplean el uso de una treadmill a menudo utilizan arbitrariamente una pendiente del 1% sin ninguna explicación [33-35]. Aunque no se ha declarado, podría basarse en los resultados de Jones (1996) [2], quien concluyó que de cuatro pendientes diferentes (0%, 1%, 2% y 3%), la carrera con una pendiente del 1% reflejaba con mayor precisión las condiciones de la OG en términos de consumo de oxígeno a velocidades entre 10,5 km/h y 18 km/h.

La inclinación del 0,4% utilizada en el presente estudio pareció ser lo suficientemente pronunciada como para simular las condiciones de un protocolo de OG que contenía velocidades de carrera que oscilaban entre 6 y 22 km/h. Para apoyar esta noción, no sólo eran insignificantes las diferencias calculadas en el  $IAT_{speed}$  y el  $IAT_{HR}$ , sino que el rendimiento general expresado por DIST estaba altamente correlacionado entre la TM y la RT. Teniendo en cuenta los factores mencionados anteriormente, la precisión de las recomendaciones de entrenamiento se ve bien respaldada por los presentes hallazgos.

Quizás la mayor limitación del estudio puede atribuirse a la no aleatorización del diseño en sí. Esto permite un sesgo de motivación potencial, por el cual los participantes tratan de superar la etapa previa lograda en la TM. Hay que decir, sin embargo, que aunque se observó un sesgo de 79 m a favor de la OG, podría haber otras varias explicaciones para exponer estas diferencias sistemáticas. Se podría argumentar que los corredores perciben la misma carga de trabajo como una mayor facilidad para correr al aire libre, tal y como sugiere el RPE significativamente menor al  $IAT_{speed}$  en la condición RT ( $p < 0,001$ ). Sin embargo, los intervalos de confianza entre las condiciones cuestionan la significación de esa diferencia significativa en el RPE de 1 AU. El menor RPE podría deberse a que los corredores se sienten más cómodos y familiarizados con la OG en comparación con los entornos inusuales de la treadmill, especialmente cuando se corre a máxima velocidad. En términos de aplicación práctica y recomendaciones de entrenamiento del  $IAT_{speed}$ , opera bajo el supuesto de que la carrera de OG será realizada constantemente en un terreno nivelado. En la práctica, un atleta no sería capaz de mantener su  $IAT_{speed}$  mientras corre cuesta arriba.

La metodología también podría cuestionarse, ya que los criterios de terminación utilizados para este estudio podrían haber dado lugar a una ligera sobreestimación de la DIST. A los corredores del presente estudio se les dio cierto margen de maniobra para alcanzar la siguiente marca de 50 m, mientras que esto no habría sido prácticamente posible para la TM. Además, a altas velocidades de la treadmill el temor de caerse o lesionarse debido a la fatiga volitiva podría haber culminado en la finalización prematura de la prueba. Otra causa potencial de variabilidad entre las condiciones podría haber sido el propio analizador de lactato, ya que según el fabricante, el coeficiente de variación es  $\leq 1,5\%$ . Por último, los factores ambientales y metodológicos no pueden controlarse en la RT. Sin embargo, se ha informado que las grandes diferencias de temperatura no son un factor significativo a la hora de investigar el tiempo hasta el agotamiento y el  $IAT_{speed}$  de los corredores de resistencia [36]. Por lo tanto, es probable que las diferencias de temperatura en el estudio actual (TM: 25°C; RT: 20°C) no confundan la validez de los resultados.

## Conclusión

Los resultados reafirman que las prescripciones basadas en pruebas de laboratorio son precisas debido a la alta fiabilidad del  $IAT_{speed}$  entre las condiciones de TM y RT. Aunque no es generalizable, el presente estudio muestra que la revalidación de los protocolos e instalaciones utilizados es obligatoria para prescribir recomendaciones de entrenamiento válidas y actualizadas tanto a los atletas como a los pacientes. Este estudio ofrece un enfoque metodológico mediante el cual las instituciones pueden revalidar rutinariamente sus propias recomendaciones basadas en la treadmill.

## REFERENCIAS

1. Faude O, Kindermann W, Meyer T. (2009). Lactate threshold concepts: how valid are they? *Sports Medicine*. 2009;39: 469-490. [pmid:19453206](#)
2. Jones AM, Doust JH. (1996). A 1% treadmill grade most accurately reflects the energetic cost of outdoor running. *Journal of Sports Sciences*. 1996;14: 321-327. [pmid:8887211](#)

3. Bourdon P. (2013). Blood lactate thresholds: concepts and applications. In: *Tanner R, Gore C, editors. Physiological tests for elite athletes. 2nd ed. Champaign Human Kinetics; 2013. pp. 77-102.*
4. Fernandez-Fernandez J, Ulbricht A, Ferrauti A. (2014). Fitness testing of tennis players: How valuable is it? *Br J Sports Med. 2014;48: i22-i31. PMID:24668375*
5. Cooper CB, Storer TW. (2004). Exercise Testing and Interpretation A Practical Approach. *Cambridge University Press; 2004. pp. 1-278. https://doi.org/10.1017/CBO9780511545689*
6. Jones AM. (2006). The Physiology of the World Record Holder for the Women's Marathon. *International journal of Sports Science and Coaching. 2006;1: 101-116.*
7. Dickhuth H, Yin L, Niess A, Röcker K, Mayer F, Heitkamp HC, et al. (1999). Incremental Treadmill Running: Relationship and Reproducibility. *Int J Sports Med. 1999;20: 122-127.*
8. Roecker K, Schotte O, Niess AM, Horstmann T, Dickhuth H-H. (1998). Predicting competition performance in long-distance running by means of a treadmill test. *Med Sci Sports Exerc. 1998;30: 1552-1557. PMID:9789858*
9. Bosquet L, Léger L, Legros P. (2001). Blood lactate response to overtraining in male endurance athletes. *European Journal of Applied Physiology. 2001;84: 107-114. PMID:11394238*
10. West MA, Loughney L, Lythgoe D, Barben CP, Sripadam R, Kemp GJ, et al. (2015). Effect of prehabilitation on objectively measured physical fitness after neoadjuvant treatment in preoperative rectal cancer patients: a blinded interventional pilot study †. *British Journal of Anaesthesia. 2015;114: 244-251. PMID:25274049*
11. Brunet J, Burke S, Grocott MPW, West MA, Jack S. (2017). The effects of exercise on pain, fatigue, insomnia, and health perceptions in patients with operable advanced stage rectal cancer prior to surgery: a pilot trial. *BMC Cancer; 2017;17: 153. PMID:28228123*
12. Binder RK, Wonisch M, Corra U, Cohen-Solal A, Vanhees L, Saner H, et al. (2008). Methodological approach to the first and second lactate threshold in incremental cardiopulmonary exercise testing. *European Journal of Cardiovascular Prevention & Rehabilitation. 2008;15: 726-734. PMID:19050438*
13. Zatloukal B, Toman J, Homolka P, Novotný J, Špinar J. (1995). Anaerobic threshold determination and its importance in chronic heart failure patients. *Sports Medicine, Training and Rehabilitation. 1995;5: 255-272.*
14. Nigg BM, De Boer RW, Fisher V. (1995). A kinematic comparison of overground and treadmill running. *Medicine & Science in Sports & Exercise. 1995;27: 98-105.*
15. Sinclair J, Richards J, Taylor PJ, Edmundson CJ, Brooks D, Hobbs SJ. (2013). Three-dimensional kinematic comparison of treadmill and overground running. *Sports Biomechanics. 2013;12: 272-282. PMID:24245052*
16. Barnes KR, Kilding AE. (2015). Running economy: measurement, norms, and determining factors. *Sports Medicine—Open. 2015;1: 8. PMID:27747844*
17. Davies CTM. (1980). Effects of wind assistance and resistance on the forward motion of a runner. *Journal of Applied Physiology. 1980;48: 702-709. PMID:7380693*
18. Saunders PU, Pyne DB, Telford RD, Hawley JA. (2004). Factors affecting running economy in trained distance runners. *Sports medicine (Auckland, NZ). 2004;34: 465-480.*
19. Clermont CA, Phinyomark A, Osis ST, Ferber R. (2017). Classification of higher- and lower-mileage runners based on running kinematics. *Journal of Sport and Health Science. Elsevier B.V; 2017;: 1-9.*
20. Borg G. (1970). Perceived exertion as an indicator of somatic stress. *Scandinavian journal of rehabilitation medicine. 1970;2: 92-98. doi:S/N PMID:5523831*
21. Roecker K, Niess AM, Horstmann T, Striegel H, Mayer F, Dickhuth HH. (2002). Heart rate prescriptions from performance and anthropometrical characteristics. *Medicine & Science in Sports & Exercise. 2002;34: 881-887.*
22. Cerda-Kohler H, Burgos-Jara C, Ram i rez-Campillo R, Valdés-Cerda B, Báez E, Zapata-Gómez D, et al. (2016). Analysis Of Agreement Between Four Lactate Threshold Measurements Methods In Professional Soccer Players. *Journal of Strength and Conditioning Research. 2016;30: 2864-2870. PMID:26849788*
23. Hecksteden A, Heinze T, Faude O, Kindermann W, Meyer T. (2015). Validity of lactate thresholds in inline speed skating. *The Journal of Strength & Conditioning Research. 2015;29: 2497-2502. PMID:23439347*
24. Zou KH, Tuncali K, Silverman SG. (2003). Correlation and simple linear regression. *Radiology. 2003;227: 617-622. PMID:12773666*
25. Casa DJ, Stearns RL, Lopez RM, Ganio MS, McDermott BP, Walker Yeargin S, et al. (2010). Influence of Hydration on Physiological Function and Performance During Trail Running in the Heat. *Journal of Athletic Training. 2010;45: 147-156. PMID:20210618*
26. Coen B, Urhausen A, Kindermann W. (2001). Individual anaerobic threshold: methodological aspects of its assessment in running. / *Seuil anaérobie individuel: aspects méthodologiques de son évaluation en course. Int J Sports Med. 2001;22: 8-16. PMID:11258646*
27. Heck H, Mader A, Hess G, Mücke S, Müller R, Hollmann W. (1985). Justification of the 4-mmol/l lactate threshold. *Int J Sports Med. 1985;6: 117-130. PMID:4030186*
28. Pfitzinger P, Freedson PS. (1998). The reliability of lactate measurements during exercise. *Int J Sports Med. 1998;19: 349-357. PMID:9721059*
29. Urhausen A, Coen B, Weiler B, Kindermann W. (1993). Individual anaerobic threshold and maximum lactate steady state. *Int J Sports Med. 1993;14: 134-139. PMID:8509241*
30. Campbell CSG, Sakuma KC, da Cunha RR, Moreira SR, Fontes EB, Lima RM, et al. (2014). Individual anaerobic threshold prediction through 1 km and 3 km running performance in young soccer players. *International SportMed Journal. 2014;15.*
31. Motoyama YL, Pereira PE de A, Esteves G de J, Duarte JMP, Carrara VCP, Rissato GM, et al. (2014). Alternative methods for estimating maximum lactate steady state velocity in physically active young adults. *Revista Brasileira de Cineantropometria e Desempenho Humano. 2014;16: 419-426.*
32. Simões HG, Grubert Campbell CS, Kokubun E, Denadai BS, Baldissera V. (1999). Blood glucose responses in humans mirror lactate responses for individual anaerobic threshold and for lactate minimum in track tests. *European Journal of Applied*

- Physiology and Occupational Physiology. 1999;80: 34-40. pmid:10367721*
33. Da Silva JF, Guglielmo LGA, Carminatti LJ, De Oliveira FR, Dittrich N, Paton CD. (2011). Validity and reliability of a new field test (Carminatti's test) for soccer players compared with laboratory-based measures. *Journal of Sports Sciences. 2011;29: 1621-1628. pmid:22098562*
  34. Legaz-Arrese A, Mungu i a-Izquierdo D, Carranza-Garc i a L, Reverter-Mas i a J, Torres-Dávila C, Medina-Rodr i guez R. (2011). The validity of incremental exercise testing in discriminating of physiological profiles in elite runners. *Budapest Acta Physiologica Hungarica. 2011;98: 147-156. pmid:21616773*
  35. Panasc i M, Lepers R, La Torre A, Bonato M, Assadi H. (2017). Physiological responses during intermittent running exercise differ between outdoor and treadmill running. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism. 2017;: apnm-2017-0132. pmid:28549220*
  36. Renberg J, Sandsund M, Wiggen ØN, Reinertsen RE. (2014). Effect of ambient temperature on female endurance performance. *Journal of Thermal Biology. Elsevier; 2014;45: 9-14. pmid:25436945*