

Article

Perfil Fisiológico de un Múltiple Campeón de Ciclismo en el Tour de Francia

Bell Phillip¹, Matthew Furber¹, Kenvan Someren¹, Ana Antón-Solanas¹ y Jeroen Swart²¹GSK Human Performance Laboratory, Brentford, United Kingdom²Sports & Exercise Medicine Clinic and Clinical Research Centre, The Sports Science Institute of South Africa, Cape Town, South Africa

RESUMEN

Introducción: Este estudio de caso describirá una serie de características fisiológicas de un doble campeón del Tour de Francia. **Métodos:** Después de la evaluación de composición corporal (DEXA), se realizaron dos tests de ciclismo submáximo con etapas en dos condiciones diferentes; a temperatura ambiente (20 °C, 40%) y en un ambiente caliente y húmedo (30 °C, 60% [HH]) a partir de los cuales se realizaron mediciones de eficiencia bruta: (GE) y se calcularon los puntos de referencia de lactato -potencia y las respuestas de frecuencia cardiaca. Además, se determinaron las respuestas de termorregulación y de sudor. Además se determinó el VO_{2max} y la producción de potencia máxima (PPO) con un test incremental con rampas hasta el agotamiento que se realizó por separado. **Resultados:** EL VO_{2max} y la PPO fueron $5,91 L min^{-1}$ ($84 ml kg^{-1} min^{-1}$) y 525 W respectivamente, mientras que la GE media fue 23,0% y 23,6% para las condiciones de temperatura ambiente y HH respectivamente. Además de una mayor GE se observó que la producción de potencia en 4 mmol L⁻¹ de lactato sanguíneo fue mayor en la condición HH que en la condición de temperatura ambiente (429,6 W vs. 419,0 W) lo que coincide con los informes anecdóticos de que el participante tenía un buen rendimiento en condiciones de calor. La temperatura máxima del core y de la piel, la tasa de sudoración y el contenido de electrolitos fueron mayores en la condición HH. El porcentaje de grasa corporal fue de 9,5%, mientras que la masa grasa total, masa magra y el contenido mineral óseo fue de 6,7, 61,5 y 2,8 kg, respectivamente. **Conclusión:** La fisiología aeróbica y los valores observados de producción de potencia se encuentran entre los más altos reportados para los ciclistas profesionales de ruta. Cabe destacar que el participante mostró un elevado VO_{2max} y una elevada GE, algo poco común entre los ciclistas de élite, y esto podría ser un factor beneficioso para su éxito en el ciclismo de élite. Además, el rendimiento en condiciones HH fue sólido, lo que sugiere una fisiología de termorregulación eficaz. En resumen, este es el primer estudio que describe las características fisiológicas de un múltiple campeón del Tour de Francia que se encontraba cerca de condiciones máximas y sugiere cuáles pueden ser las capacidades fisiológicas y de regulación térmica necesarias para el éxito en este nivel.

Palabras Clave: Ciclismo, Fisiología, Resistencia, Rendimiento de Elite

INTRODUCCION

Los límites de la capacidad de resistencia humana y la naturaleza de la fatiga han sido ampliamente debatidos (1, 23, 25, 31, 32, 40) y los ciclistas que compiten en el Tour de Francia (TdF) se ubican en los extremos de las características de rendimiento de resistencia. Esto puede ser atribuido a las características fisiológicas y morfológicas únicas desarrolladas a

partir de extensas adaptaciones inducidas por el entrenamiento (21). Hasta la fecha tenemos información limitada sobre las características fisiológicas de los ciclistas del TdF, y menos aún sobre los ganadores de la carrera, que representan a la élite de los atletas de resistencia de elite. Los determinantes ampliamente reconocidos de rendimiento de resistencia en ciclismo incluyen; eficiencia bruta (GE), consumo de oxígeno máximo (VO_{2max}), producción de potencia máxima (PPO), y numerosos puntos de referencia de lactato que representan distintos cambios en el metabolismo aeróbico.

El Tour de Francia (TdF) es una carrera con etapas de 3 semanas que se realiza en terreno variable en la que el ganador es aquel ciclista que complete todas las etapas en el tiempo acumulado total más bajo. Las etapas clave que han sido identificados como las más relevantes para los rendimientos globales son las etapas contrarreloj (TT) y etapas que finalizan con ascensos (20). Durante las etapas de pruebas contrarreloj (TT), los ciclistas deben producir una producción de potencia absoluta alta, por lo general por encima de 400 W, durante períodos prolongados (≤ 1 hora) (35). La potencia máxima en TT de 40 kilómetros se ha correlacionado positivamente con la producción de potencia que se produce en una concentración de lactato sanguínea de 4 $mmol \cdot L^{-1}$ y, además, se ha demostrado que coincide con la producción de potencia media sostenida durante el registro por horas (2, 33). A pesar de que esta relación no es universal, la medición de la producción de potencia máxima sostenida durante 1 hora (también conocida como potencia de umbral funcional [FTP]) se correlaciona con una concentración de lactato sanguíneo de 4 $mmol \cdot L^{-1}$ cuando se realiza un test de ejercicio incremental en el laboratorio. De manera similar, las etapas que finalizan con ascensos (escaladas) requieren producciones de potencia muy altas sostenidas pero, además, requieren una elevada relación potencia:peso. Las subidas finales de estos tipos de etapas pueden variar de 5-20 km de longitud, lo que requiere producciones de potencia máxima durante periodos de 10 minutos hasta 1 hora, durante los cuales el ciclista deberá sostener una producción de potencia continua superior a 6 $W \cdot kg^{-1}$ (20). Por consiguiente, una relación potencia:peso superior a 6 $W \cdot kg^{-1}$ que coincida con una concentración de lactato sanguíneo de 4 $mmol \cdot L^{-1}$ es un requisito para los mejores rendimientos durante las etapas que culminan en ascensos en el TdF.

La eficiencia bruta (GE) es una medida de trabajo efectivo y se expresa en forma de porcentaje de la energía total gastada que produce trabajo externo (12). En ciclistas varones bien entrenados, se han encontrado valores de GE que van desde 10-25% (14), pero en los ciclistas profesionales, se observaron valores mas altos de GE que iban de 22,0 a 28,1% (22). Paradójicamente, en los ciclistas de nivel profesional, se ha observado que el VO_{2max} y la eficacia de pedaleo están inversamente relacionados y se ha planteado la hipótesis de que una alta eficiencia puede compensar un VO_{2max} relativamente bajo (22). Los ciclistas del TdF presentan valores típicamente altos de GE y los mejores ciclistas del TdF (los 10 primeros ganadores generales y en las etapas) tienen valores de GE de ~ 24% alcanzando valores de 25 % en el caso del ganador (39).

En un estudio realizado sobre un múltiple ganador del TdF se midió el consumo máximo de oxígeno en cinco ocasiones diferentes, cuatro antes de que el atleta obtuviera la primera victoria en el TdF y una en el año de su primera victoria en el TdF (8). Estas pruebas demostraron grandes fluctuaciones en el consumo de oxígeno máximo que iban de 5,29 a 6,10 $L \cdot min^{-1}$ entre las pruebas. El valor más alto registrado fue de 6,10 $L \cdot min^{-1}$ (81,2 $ml \cdot kg^{-1} \cdot min^{-1}$) y también se registró seis años antes de la primera victoria en el TdF. El consumo de oxígeno en el umbral de lactato en relación con VO_{2max} fue también muy variable, y osciló entre 76-85%. Curiosamente, la GE aumentó progresivamente de 21,2% a 23,1% durante el período de seis años. Sin embargo, ninguno de estos datos fue registrado dentro de los tres meses anteriores o posteriores a las victorias del TdF. Además, los resultados del estudio fueron cuestionados posteriormente por los cálculos realizados para calcular la eficiencia y el equipo utilizado en las investigaciones, planteos que fueron refutados por el autor del estudio (26). Por último, el atleta fue retrospectivamente despojado de sus títulos, y los resultados de todas las victorias en el TdF fueron anulados en función de la evidencia del consumo de sustancias y métodos prohibidos. Por lo tanto, los resultados observados en este informe deben ser revisados con cautela dado el impacto potencial del abuso de sustancias para mejorar el rendimiento durante este período de prueba.

Aunque limitado en su alcance, un estudio describió los datos fisiológicos relativos a los parámetros de lactato en sangre de un ganador del TdF prácticamente en óptimas condiciones (33). Las pruebas se llevaron a cabo dentro de los 2 meses de la cuarta victoria del atleta en el Tour de Francia y poco antes de un exitoso rendimiento de Récord Mundial de la Hora. Durante una prueba de esfuerzo progresiva en bicicleta ergométrica (incrementos de 35 W cada 4 minutos) hasta el agotamiento, se registró una producción de potencia máxima de 572 W (7,06 $W \cdot kg^{-1}$). La producción de potencia registrada en la concentración de lactato sanguínea equivalente a 4 $mmol \cdot L^{-1}$ fue 505 W (6,23 $W \cdot kg^{-1}$). Estos autores también demostraron que la potencia asociada a una concentración de lactato sanguínea de 4 $mmol \cdot L^{-1}$ era altamente predictiva del esfuerzo máximo que el atleta era capaz de mantener durante una hora durante el rendimiento récord de la hora.

Un estudio realizado en un finalista regular que se posicionaba dentro de los primeros diez finalistas del Tour de Francia describió cargas de entrenamiento y datos de rendimiento obtenidos en el campo durante un período de 6 años (37). Las producciones de potencia más altas registradas durante eventos con una duración de 45 min y 60 min (que corresponden estrechamente a las producciones de potencia asociadas con concentración de lactato sanguíneas de 4 $mmol \cdot L^{-1}$) fueron 5,9 $W \cdot kg^{-1}$ y 5,7 $W \cdot kg^{-1}$, respectivamente. Estas son considerablemente más bajas que los valores de potencia relativa

registrados por un ganador anterior del TdF en concentración de lactato sanguíneo de 4 mmol L⁻¹ antes de un intento de récord mundial de la hora (33).

A pesar de la amplia investigación sobre las demandas fisiológicas del ciclismo profesional y de las características fisiológicas de los corredores, hay una cantidad limitada de datos que puedan identificar las características potencialmente únicas de los ganadores del Tour. En función de esto, realizamos la evaluación fisiológica de un doble campeón del TdF y analizamos variables como; consumo de oxígeno máximo, producción de potencia submáxima y máxima, respuesta del lactato sanguíneo, composición corporal y respuestas de termorregulación, durante un período en el cual el atleta se encontraba cerca de su nivel de entrenamiento máximo. Estas pruebas nos aportaron información clave sobre los requisitos fisiológicos para ganar una carrera de esta magnitud.

MÉTODOS

Participante

El participante fue un ciclista de 30 años de edad de sexo masculino de élite, que competía en *UCI World Tour Series*. En el momento de la prueba, era el campeón reinante y había ganado dos veces el TdF. Las pruebas se realizaron una semana antes de competir en la final de un Grand Tour de la temporada de ciclismo de ruta 2015 (La Vuelta de España).

Consentimiento Informado y Declaración de Ética

Antes de la realización de cualquier prueba el participante firmó el consentimiento informado luego de recibir una explicación detallada de todos los procedimientos de recopilación de datos. Dentro del consentimiento informado se incluyó una declaración que establecía el permiso para la publicación de todos los datos recogidos y la probabilidad de que su identidad sea conocida independientemente del anonimato de los resultados publicados en el trabajo. La aprobación de un comité de ética independiente no se consideró necesaria por diferentes razones, entre ellas; el participante se acercó al laboratorio y solicitó que le realicen las pruebas y por lo tanto se comportó como participante voluntario sin proceso de reclutamiento; el participante solicitó específicamente que los resultados de las pruebas se publicarán en una revista científica revisada por pares, debido al interés general y científico que estos resultados generan; los datos se obtuvieron como una observación en un solo día y sin intervención, se aplicó un método experimental de naturaleza prospectiva.

Procedimientos Previos a las Evaluaciones (Pre-test)

Al arribar al laboratorio, se comunicaron verbalmente los procedimientos de prueba y los horarios antes de que se obtuviera el consentimiento informado por escrito y se realizara un cuestionario previo de análisis de salud. La secuencia de las pruebas fue; determinación de composición corporal y contenido mineral óseo, perfil aeróbico submáximo en condiciones de temperatura ambiente, perfil aeróbico máximo en condiciones de temperatura ambiente y un perfil aeróbico submáximo en condiciones de calor y humedad (HH). Todas las pruebas y procedimientos se llevaron a cabo en el mismo día y siguiendo la regulación del *GSK Medical Governance* y los procedimientos operativos estándar del Laboratorio de Rendimiento Humano de GSK (GSK Human Performance Lab).

Composición Corporal y el Contenido Mineral Óseo

La composición corporal se determinó por medio de absorciometría dual de rayos X (DXA) (*GE Lunar iDXA, GE Healthcare, Bucks, Reino Unido*). El análisis se realizó después de una noche de ayuno (> 8 horas), el participante debió orinar completamente para vaciar completamente la vejiga y se le quitaron todos los objetos metálicos que pudiera portar. A continuación, se midió la masa corporal en ayunas utilizando una balanza digital de columna (*Seca 704, Seca Ltd., Hamburgo, Alemania*). El análisis DXA se realizó siguiendo las recomendaciones del fabricante sobre la ubicación del paciente y los datos se analizaron con el software *Encore*, versión 14.10 (*GE Healthcare, Bucks, Reino Unido*). En función del tamaño del participante, el análisis se llevó a cabo usando el modo "espesor estándar". Además de realizar la calibración regular del equipo, antes del análisis se realizó un procedimiento de control de calidad estándar (QA) (el coeficiente de variación de laboratorio (CV) para este procedimiento de control de calidad fue 0,07%).

Perfil Aeróbico y Protocolo de Respuesta de Regulación Térmica (Condición de Temperatura Ambiente)

El perfil aeróbico (intercambio gaseoso pulmonar, frecuencia cardíaca, lactato sanguíneo) se llevó a cabo en un estado postprandial (el participante seleccionó todos los alimentos que consumió) con el fin de controlar la respuesta de la glucosa en sangre y fue subdividido en dos partes; submáximo y máximo. Además del perfil aeróbico, se midieron durante la prueba una serie de respuestas termorreguladoras (temperatura del core, temperatura de la piel, tasa de sudoración y

contenido de electrolitos en el sudor de contenido [sodio, Na⁺]). Los valores de temperatura antes del ejercicio (grados Celsius; °C), humedad relativa (HR) y la presión barométrica (milibares; mb) fueron 19,5 °C, 49,3% de HR y 1016,2 mb, respectivamente. Durante todo el test de ciclismo el participante fue refrescado con un ventilador de piso que fue colocado en el suelo en la parte delantera derecha del participante en un ángulo de 45 ° y ajustado a una velocidad del aire de 5,8 m s⁻¹.

Para la prueba se utilizó un rodillo electrónico, (*CompuTrainer™, RacerMate® Inc, Seattle, EE.UU.*), en el cual se colocó la bicicleta personal del participante (*Pinarello Dogma F8, Pinarello, Treviso, Italia*). Se eligió el sistema *CompuTrainer™* porque permitía que el participante utilizara su propia bicicleta y no requería una cadencia fija para obtener una potencia constante, lo que permite que el participante pedaleara con cadencia auto seleccionada. La longitud del brazo de manivela fue de 175 mm y se utilizó un plato ovalado (*Osymetric EE.UU., Carolina del Norte, EE.UU.*). Después de 10 minutos, de entrada en calor auto-seleccionada se calibró la resistencia del rodillo de modo que reflejara una carga generada por los neumáticos de 0,93 kg. El software del rodillo (*RacerMate® Uno, RacerMate® Inc, Seattle, EE.UU.*) fue programado para simular una prueba incremental en etapas (escalones) que se inició con 250 W y cuya tasa de trabajo se incrementaba 25 W cada cuatro minutos. Se utilizó un analizador de gases en línea (i.e. medición continua/en tiempo real) (*Metalyzer 3B, Cortex, Leipzig, Alemania*) durante todo el protocolo para medir las fracciones de oxígeno y dióxido de carbono, y el volumen de gases en el aire inspirado y expirado. El analizador fue calentado y calibrado para determinar las fracciones de oxígeno (17%) y dióxido de carbono (5%) y el volumen de gas (jeringa de 3 L) siguiendo las recomendaciones establecidas por el fabricante. Durante las pruebas, el participante respiró través de una mascarilla con poco espacio muerto (70 ml) con una turbina de baja resistencia (<0.1 kPa.L⁻¹ s⁻¹ a 16 L s⁻¹), mientras se tomaban muestras continuamente a 50 Hz del gas inspirado y expirado. Los tiempos de ascenso de la señal analizador y el retardo de visualización para O₂ y CO₂ fueron <100 ms y 800-1200 ms respectivamente, utilizando un cálculo dinámico para cada respiración.

Además de recolectar el gas expirado y obtener los datos frecuencia cardíaca y de termorregulación permanentemente, en los últimos treinta segundos de cada etapa del ejercicio se determinó la concentración de lactato sanguíneo y el índice de esfuerzo percibido (5). El test submáximo finalizó al finalizar la etapa que arrojó una concentración de lactato sanguíneo > 4 mmol L⁻¹. Luego de haber finalizado el test submáximo, se proporcionó un periodo de descanso de 15 minutos antes de comenzar el test máximo. Durante este periodo, el participante podía consumir agua *ad libitum* y pedalear a <100 W. El rodillo fue re-calibrado y el software fue programado para provocar una prueba incremental en rampas que se iniciaba en 150 W y se incrementaba en una tasa equivalente a 30 W min⁻¹. El participante debía continuar pedaleando durante tanto tiempo como pudiera y mantener una cadencia >70 RPM. El gas espirado y la frecuencia cardíaca se midieron durante toda la prueba. La prueba finalizó cuando el participante no pudo mantener una cadencia > 70 RPM.

Determinación de Consumo Submáximo de Oxígeno (VO₂) y Consumo máximo de oxígeno (VO_{2max})

Con el fin de evaluar el VO₂ y VO_{2max}, los datos de gases expirados fueron promediados en intervalos de 30 segundos utilizando el software de análisis de gases en línea (*MetaSoft® Studio, Cortex, Leipzig, Alemania*) antes de ser descargados para su posterior evaluación. El VO₂ se representó como los últimos 30 s de gas espirado de cada etapa en la prueba submáxima; el VO_{2max} se calculó como el mayor valor promedio obtenido en 30 s registrado durante la prueba máxima (19). Los registros de QA de rutina arrojaron un CV de laboratorio (medio) para los datos de VO₂ de 1,8% dentro del rango 2,05 a 3,94 L min⁻¹.

Eficiencia Bruta

La eficiencia bruta del participante se evaluó mediante el cálculo de la cantidad de trabajo realizado en relación con la cantidad de energía gastada en cada una de las etapas de las pruebas submáximas utilizando la siguiente ecuación:

$$\text{Eficiencia bruta} = \text{GE} (\%) = [\text{tasa de trabajo (W)} / \text{costo energético (J s}^{-1}\text{)}] \times 100$$

La tasa de trabajo fue transformada en joules por segundo para cuantificar la producción de energía y para identificar el gasto energético se utilizaron las tablas de Lusk (24), en función de la tasa de intercambio respiratorio (RER) y VO₂ por etapa (promedio de los últimos 60 s de la etapa (36)). Para expresar GE se utilizó la producción de energía como porcentaje del gasto energético. Se calculó el valor medio de GE por etapa y una GE general (8, 9) para las pruebas submáximas realizadas a temperatura ambiente y en condiciones HH, sin embargo debemos señalar que los datos de GE calculados para producciones de potencia por encima de un ejercicio en estado estable pueden estar influenciados por el componente lento del VO₂ y por lo tanto deben ser interpretados con cuidado.

Producción de Potencia Máxima

La producción de potencia máxima (PPO) se calculó a partir de los datos obtenidos en la prueba aeróbica máxima. La PPO se determinó como el promedio mas alto en 30 s del test incremental en rampa y posteriormente se expresó en relación a la masa corporal. Se realizó una comparación entre los datos de producciones de potencia registrados con el software

RacerMate® y los datos obtenidos con el medidor de potencia personal del atleta (*Stages Cycling, Kirchzarten, Alemania*) y la potencia fijada en el test con rampas en el CompuTrainer™. Este análisis demostró que la producción de potencia estaba dentro de $0,7 \pm 2,2\%$ de acuerdo con el medidor de potencia y dentro de $0,7 \pm 0,8\%$ de la potencia programada durante la prueba máxima de acuerdo con el software RacerMate®.

Muestreo del Lactato Sanguíneo

Se obtuvieron muestras de sangre capilar del lóbulo de la oreja antes de la entrada en calor y durante los últimos 30 s de cada etapa de la prueba aeróbica submáxima. Brevemente, 20 µl de sangre se recogieron en un tubo capilar para ser analizados luego usando un analizador de lactato en sangre automatizado (*Biosen C-Line, EKF Diagnóstico, Cardiff, Reino Unido*). El coeficiente de variación para la medición en el laboratorio de lactato sanguíneo fue 0,27% para el rango de 2 a 18 mmol L⁻¹.

Frecuencia Cardíaca

La frecuencia cardíaca se registró de manera continua a través de un sistema de telemetría inalámbrica (*T34 Polar, Polar Electro (UK) Ltd, Warwick, Reino Unido*). En la prueba aeróbica submáxima se utilizaron los datos de frecuencia cardíaca de los últimos 30 s de cada etapa para su posterior análisis, pero en la prueba máxima el registro de datos de frecuencia cardíaca fue incompleto debido a una caída de la señal en la mitad de la prueba.

Valores de Potencia y Frecuencia Cardíaca en Puntos de Referencia Asociados con los Umbrales de Lactato Sanguíneo

Debido a la falta de una medición "de referencia" y de las conjeturas que rodean el uso de un único punto de referencia para definir los umbrales de lactato (3), se calcularon una serie de puntos de referencia. Las concentraciones sanguíneas de lactato y la frecuencia cardíaca determinadas durante las pruebas submáximas realizadas en condiciones de temperatura ambiental y HH se ingresaron en el software validado (*Lactate-E (29)*), y posteriormente se calcularon las estimaciones de frecuencia cardíaca y potencia en los siguientes puntos de referencia informados; 1 mmol L⁻¹ por encima de la línea de base, DMAX (6), DMAX Modificado (3), 2 mmol L⁻¹ y 4 mmol L⁻¹. Posteriormente, la potencia estimada en estos puntos de referencia se expresó en relación a la masa corporal actual y estimada para la carrera ($W \text{ kg}^{-1}$).

Temperatura del Core

La temperatura del core (Tc) se registró utilizando una técnica no invasiva. Durante el desayuno, el participante abrió un paquete sellado que contenía una píldora con un sensor de temperatura central (*CorTemp®, Palmetto, Florida, Estados Unidos*) y la consumió junto con agua después de la extracción del imán que activa la píldora. Un registrador de datos *CorTemp®* (*CorTemp®, Palmetto, Florida, Estados Unidos*) recibió de forma inalámbrica la señal de la pastilla (la frecuencia de muestreo fue de 0,1 Hz) y la convirtió a un formato digital, lo que permitió tener un registro de la temperatura en tiempo real y guardarlo para su posterior análisis. Según la documentación aportada por el fabricante el sensor *CorTemp®* tiene una precisión de $\pm 0,1$ °C. El sensor se consumió dos horas antes de la sesión de perfil aeróbico para garantizar que la píldora se ubicara en el tracto digestivo del participante, lo que minimiza la influencia del consumo de líquidos.

Temperatura de la Piel

La temperatura de la piel (Ts), se controló en un único sitio de medición mediante un sistema de validación térmica de grado médico (*E-Val Flex, Ellab, Hileroed, Dinamarca*) con una velocidad de muestreo de 60 Hz y una resolución de 0,01 °C (la precisión informada por el fabricante fue $\pm 0,05$ °C). Luego de que el participante se posicionara cómodamente en la bicicleta, se colocó un termómetro para piel (*MHD flexible Plast Foil, Ellab, Hileroed, Dinamarca*) en el centro de la región escapular izquierda usando una cinta quirúrgica (*Micropore, 3M, Loughborough, Reino Unido*), y luego de ello se registró la Ts continuamente hasta el final de cada prueba de ciclismo. Se prefirió realizar la medición en un solo sitio debido a la logística de colocación de cables y a la comodidad del participante. La ubicación del termómetro también permitió proteger el termómetro de flujo de aire del ventilador utilizado para refrigeración.

Tasas de Sudor y Contenido de Electrolitos

Durante las sesiones de evaluación del perfil aeróbico, se recogió el sudor del participante para el análisis del contenido de electrolito usando parches absorbentes. Los parches (*Tegaderm, 3M, Loughborough, Reino Unido*) se fijaron en cuatro zonas en el lado derecho del cuerpo del participante; antebrazo (dorsal medio), pecho (arriba del pezón, ~5 cm hacia el costado del esternón), espalda (espina de la escápula y ~7 cm de la columna vertebral,) y muslo (medio-ventral). Antes de colocar los parches, los sitios de colocación se limpiaron con agua destilada y se secaron con una gasa y guantes libres de látex, con el fin de evitar la contaminación de la zona de recolección. Luego de las pruebas, se retiraron los parches con

pinzas estériles descartables y fueron colocados en un vial para la extracción posterior. El sudor se extrajo a partir del parche mediante centrifugación (*Heraeus Multifuge 3S-R, Thermo Scientific, Waltham, Estados Unidos*) a 3600 rpm durante 10 minutos. La concentración de electrolitos presentes en el sudor (Na⁺) se midió utilizando fotometría de llama (*Sherwood Scientific Model 420, Fotómetro de llama con doble canal, Cambridge, Reino Unido*). Posteriormente, se calcularon las pérdidas absolutas de electrolitos por sudor multiplicando la concentración de cada electrolito (mmol L⁻¹) por el volumen de fluido perdido (L) durante la sesión y se realizó una corrección del tiempo para obtener la pérdida de electrolitos por hora. Con el fin de determinar la tasa de sudor, los cambios de masa corporal antes y después del ejercicio fueron medidos y corregidos para el consumo de líquidos. El participante se duchó después de completar el perfil aeróbico en la prueba realizada a temperatura ambiente, y antes y después de la sesión de prueba HH se repitieron los mismos procesos de colocación de parches y de análisis.

Perfil Aeróbico Submáximo y Respuesta de Regulación de la Temperatura (Condición HH, con Calor y Humedad)

Con el fin de determinar las respuestas del participante en condiciones de calor y humedad (HH) similares a las que se presentan regularmente durante las carreras de ciclismo de UCI World Tour, se repitió la prueba aeróbica submáxima en una cámara con ambiente controlado (*TIS Services, Alton, Reino Unido*). La prueba se completó dos horas después de haber consumido alimentos (estado post-prandial) y se realizaron exactamente los mismos procedimientos que se describieron previamente. La cámara fue ajustada para proporcionar condiciones ambientales de 30,0 °C, 60,0% de HR y 1015,0 mb. Al igual que durante la prueba submáxima previa, se realizó la medición continua de frecuencia cardíaca, del gas espirado y de los datos de termorregulación, y la concentración de lactato sanguíneo y el índice de esfuerzo percibido se determinaron en los últimos 30 s de cada etapa del ejercicio. Se tuvo en cuenta el mismo criterio de finalización de la prueba.

RESULTADOS

Composición Corporal y Contenido Mineral Óseo

La masa corporal en ayunas fue de 70,0 kg, medida con la balanza de columna digital y el porcentaje de grasa corporal del participante fue de 9,5%. El total de grasa, masa magra y contenido mineral óseo (BMC) fue de 6,7, 61,5 y 2,8 kg, respectivamente (Los valores de la composición corporal se calcularon en base a la masa corporal estimada por el GE Lunar iDXA [71,0 kg]). La composición corporal de los tejidos blandos se analizó adicionalmente en tres regiones corporales distintas, brazos, piernas y tronco. La masa grasa regional fue de 0,9, 2,0 y 3,0 kg y la masa magra fue de 7,0, 20,6 y 30,7 kg para brazos, piernas y tronco, respectivamente.

VO₂ Submáximo y Eficiencia Bruta

El VO₂ aumentó linealmente con el aumento en las etapas de potencia durante las pruebas submáximas, tanto en la condición de temperatura ambiente ($R^2 = 0,99$; [$y = 0.0122x + 0.1473$]) como en la condición HH ($R^2 = 0,99$; [$y = 0,0132x - 0.2217$]), y en cada etapa se registraron valores absolutos similares de VO₂. El VO_{2max} fue de 5,91 L min⁻¹, y cuando se expresó en relación a la masa corporal fue 85 ml kg⁻¹ min⁻¹. No se pudo determinar la frecuencia cardíaca pico debido a la pérdida de la señal a los 11 min 31 s de la prueba en el punto donde la frecuencia cardíaca era 154 lat/min (la frecuencia cardíaca máxima informada para el participante durante una competencia fue ~170 lat/min). La GE media fue 23,0% y 23,6% para la condición de temperatura ambiental (rango; 22,3% -23,3%) y la condición HH (rango; 22,7% -24,2%) respectivamente (Figura 1). Las cadencias promedio observadas fueron 95,9±2,2 y 96,3±1,9 revoluciones por minuto para la condición temperatura ambiente y HH respectivamente.

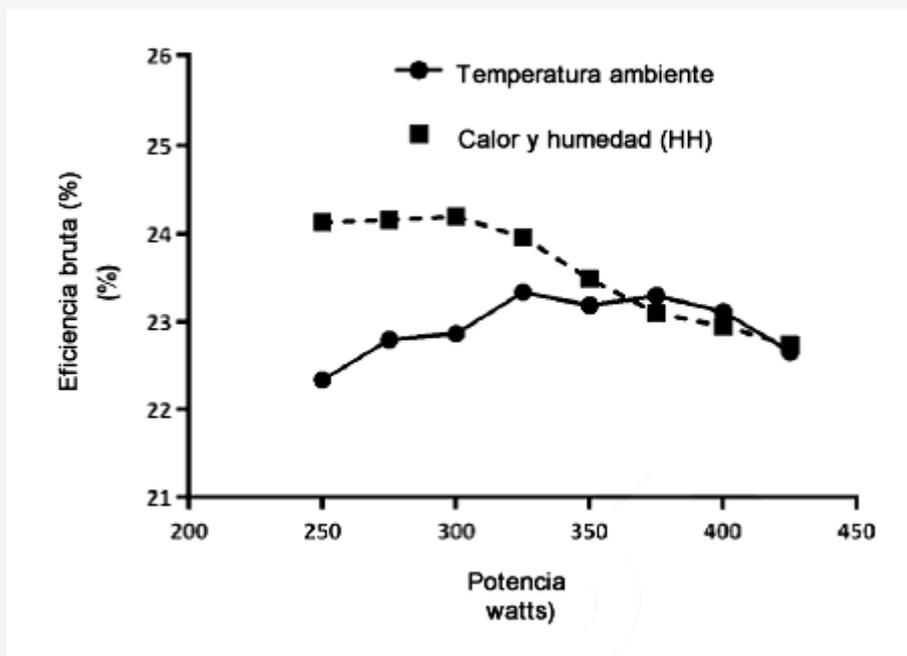


Figura 1. Comparación de la eficiencia bruta durante la prueba aeróbica submáxima en la condición temperatura ambiente (19,5°C, 49,5% HR, 1016,2 mb) y en la condición HH (30°C, 60,0% HR, 1015,0 mb).

Producción de Potencia Máxima

La PPO, la mayor producción de potencia en 30 s de la prueba aeróbica máxima, fue 525 W lo que equivale a 7,5 W kg⁻¹ cuando se expresa en relación a la masa corporal (69,9 kg inmediatamente antes de la prueba). Los valores de cadencia promedio (\pm DE), mínima y máxima fueron 97(\pm 2,9), 62 y 104 revoluciones por minuto, respectivamente.

Perfil de Lactato Submáximo y Valores Asociados de Frecuencia Cardíaca y de Potencia

Se calcularon los valores de producción de potencia absoluta, producción de potencia relativa y producción de potencia en relación a la masa en competencia en los siguientes puntos de referencia de lactato sanguíneo; 1 mmol L⁻¹ por encima de la línea de base, DMAX (6), DMAX Modificado (3), 2 mmol L⁻¹ y 4 mmol L⁻¹ para las pruebas submáximas realizadas a temperatura ambiente y HH (Tabla 1). Además, se presentan las frecuencias cardíacas asociadas y los valores de lactato sanguíneo. Una representación gráfica del perfil de lactato submáximo se presenta en la Figura 2.

Tabla 1. Valores de potencia y frecuencia cardíaca en los diferentes puntos de lactato sanguíneo establecidos.

*Calculado por medio del software Lactate-E (8); \$Peso en la prueba realizada a temperatura ambiente - 70.8 kg; Peso en la condición HH -71.0 kg; †Valores derivados utilizando un polinomio de 3er orden (Lactato vs. Potencia, Lactato vs. HR).

Puntos de referencia de Lactato sanguíneo	Potencia* (Watts)	Potencia relativa ^s (W/kg)	Potencia relativa Al peso durante La competencia (W/kg)	Frecuencia cardíaca (HR)(lat/min)	Lactato (mmol/L)
Inicio de la Prueba					
Temperatura Ambiente	N/A	N/A	N/A	N/A	1,09
HH	N/A	N/A	N/A	N/A	0,99
1 mmol L ⁻¹ por encima del valor inicial†					
Temperatura ambiente	382	5,4	5,7	128	2,09
HH	390	5,5	5,8	139	1,99
DMAX					
Temperatura ambiente	356	5,0	5,3	121	1,36
HH	357	5,2	5,5	131	1,11
DMAX Modificado					
Temperatura Ambiente	385	5,4	5,8	129	2,22
HH	392	5,5	5,9	139	2,04
Lactato sanguíneo fijado (2 mmol L ⁻¹)					
Temperatura Ambiente	379	5,4	5,7	127	2,00
HH	390	5,5	5,8	139	2,00
Lactato sanguíneo fijado (4 mmol L ⁻¹)					
Temperatura Ambiente	419	5,9	6,3	138	4,00
HH	430	6,1	6,4	149	4,00

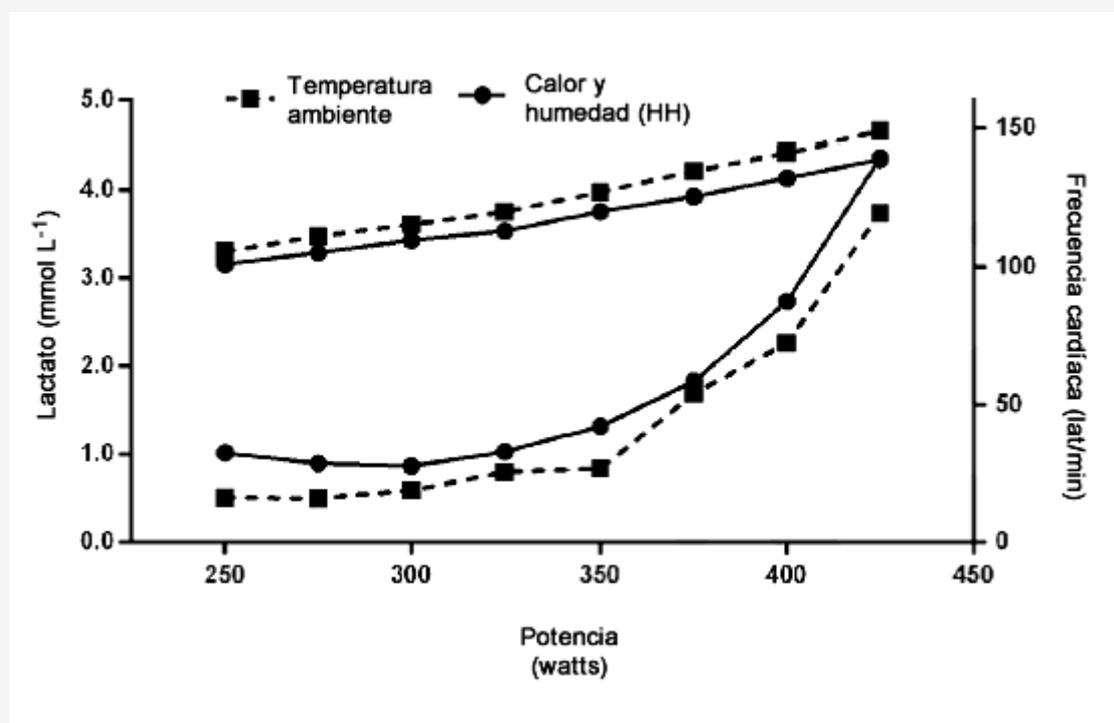


Figura 2. Respuestas de lactato y de frecuencia cardíaca al test submáximo por etapas en condiciones de temperatura ambiente y HH.

Respuestas Submáximas de Temperatura del Core (T_c) y Emperatura de la Piel (T_s)

La Tc aumentó de forma constante a medida que incrementaban las etapas de potencia durante las pruebas submáximas en las dos condiciones estudiadas (Figura 3). La Tc aumentó más rápidamente y alcanzó un pico de temperatura mayor en la condición HH (38,6 °C vs. 38,2 °C).

La Ts inicial fue 1,0 °C más alta en HH que a temperatura ambiente (33,1 °C vs. 34,1 °C) (Figura 3) y se mantuvo por encima de los valores obtenidos a temperatura ambiente durante toda la prueba. La Ts aumentó rápidamente hasta un máximo de 35,4 °C en las primeras etapas de la prueba en HH, mientras que a temperatura ambiente, la Ts alcanzó su punto máximo en la etapa final y a una temperatura más baja (33,5 °C).

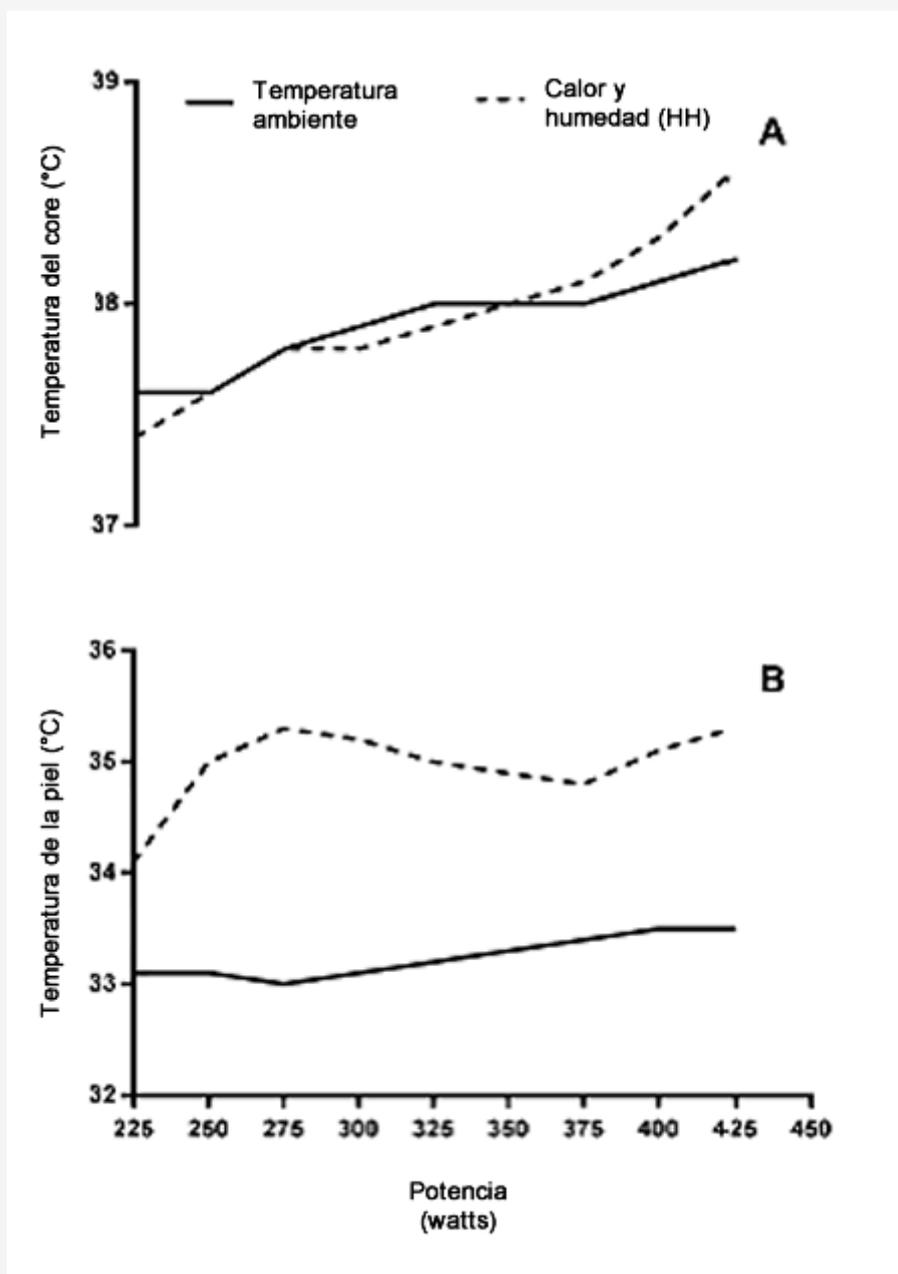


Figura 3. Comparación de la temperatura del core (Panel A) y la temperatura de la piel (Panel B) durante la prueba aeróbica submáxima realizada a temperatura ambiente (19,5°C, 49,5% RH, 1016,2 mb) y en calor y humedad (HH) (30,0°C, 60,0% RH, 1015,0 mb).

Análisis de Sudor

Las tasas de sudoración durante las pruebas aeróbicas submáximas fueron 1,42 y 1,70 L h⁻¹ en las condiciones

temperatura ambiente y HH respectivamente. Después de análisis de la composición del sudor, la tasa de pérdida de Na⁺ fue 1,64 g h⁻¹ (50,3 mmol L⁻¹) a temperatura ambiente y 1,92 g h⁻¹ (58,9 mmol L⁻¹) en la condición HH

DISCUSIÓN

Según nuestros conocimientos, presentamos los primeros datos de un ganador del TdF que incluyen consumo de oxígeno máximo, producción de potencia máxima, potencia submáxima y datos de lactato sanguíneo, recolectados cuando el atleta estaba cerca de su máximo estado físico. El participante había ganado el TdF 22 días antes de las pruebas y estaba preparándose para la final de la carrera por etapas de 3 semanas del año, que comenzaría 5 días después de la fecha en que realizamos las pruebas y, por lo tanto, sin duda estaba en su máxima condición física, excluyendo el aumento de la masa corporal.

Un hallazgo inesperado fue el porcentaje de grasa mayor al esperado de 9,5%. El trabajo previo en varones atletas de la Federación de Ciclismo de Estados Unidos informó un porcentaje de grasa corporal medio de 4,7% en los ciclistas de ruta varones (44), aunque estas mediciones fueron obtenidas a través de un método alternativo (medición de siete pliegues cutáneos (16)), que se sabe que subestima el porcentaje de grasa corporal en comparación con la DXA (7, 10). Por otra parte, se informó un porcentaje de grasa corporal medio de 10,2% en ciclistas profesionales de ruta (43), pero estas medidas se obtuvieron en la pretemporada, donde es poco probable que el estado de los atletas sea óptimo. Como anécdota, el atleta que participó en este estudio de caso informó que en las tres semanas siguientes al TdF (es decir, inmediatamente antes de la prueba), había aumentado 3-4 kg de masa corporal. Aparte de las potenciales diferencias en masa debidas a los cambios en el estado de hidratación y de las reservas de glucógeno, una gran cantidad de esta masa añadida podría estar representada por la mayor grasa corporal.

La producción de potencia máxima de 525 W es considerablemente mayor que la obtenida en 10 ciclistas varones nivel internacional de competición (445±52 W) (30). Sin embargo, esta cifra es inferior a la registrada en otro ganador del TdF en condiciones óptimas (572 W) (33) y también inferior a la mayor producción de potencia registrada para un grupo de ciclistas profesionales (585 W) que utilizaron un protocolo incremental similar (22). Esto puede ser atribuido principalmente a las grandes variaciones en la masa corporal y en el somatotipo que existen entre los corredores de élite (13). Por lo tanto la estandarización de los datos de potencia se expresa mejor en forma de potencia relativa a la masa corporal. Cuando se expresa en términos relativos, la producción de potencia máxima de 7,5 W kg⁻¹ se encuentra entre las más altas registradas para cualquier ciclista profesional. En relación con otros ganadores del TdF, este valor es considerablemente más alto que los valores registrados previamente (7,06 W kg⁻¹) (33). Sin embargo, los datos comparados fueron obtenidos usando diferentes protocolos, que pueden influir significativamente en estos resultados, por ejemplo, mayores tasas de incrementos arrojan mayores producciones de potencia máxima (39). Sin embargo, el valor es menor que el mejor valor registrado en un grupo de ciclistas profesionales europeos (7,70 W kg⁻¹), obtenido por medio de un protocolo de incrementos similar (22). Si se calcula usando la masa informada por el atleta durante la carrera (67 kg) la potencia máxima relativa de 7,84 W kg⁻¹ sería la mas alta registrada hasta la fecha.

La carga de trabajo en 4 mmol.L⁻¹ ha sido ampliamente correlacionada con el rendimiento profesional en pruebas contrarreloj y pruebas de ascenso de ciclismo en el campo, dos características necesarias para sobresalir en las carreras por etapas (34). La potencia submáxima en 4 mmol.L⁻¹ (6,1 W kg⁻¹) fue significativamente mayor que la reportada para los mejores ciclistas de ruta internacionales que se destacan en pruebas contrarreloj (5,7±0,2 W kg⁻¹) y en pruebas de ascensos (5,7±0,5 W kg⁻¹) (28). Sin embargo, este valor es muy similar al registrado por otro ganador del TdF cuando se evaluó en condiciones óptimas (6,2 W kg⁻¹) (34). Una vez más, si se calcula utilizando la masa de competencia informada por el atleta, la potencia relativa en 4 mmol.L⁻¹ (6,4 W kg⁻¹) sería el valor más alto reportado hasta la fecha. Las comparaciones con otros estudios de cargas de trabajo submáximas en relación con las concentraciones de lactato en sangre son confusas debido al uso de varios métodos diferentes, la falta de especificación de los métodos utilizados y la falta de normalización sobre los métodos utilizados para analizar las concentraciones de lactato sanguíneo.

La media de la eficiencia bruta (GE) a temperatura ambiente y HH (23,3%), así como la GE media de las dos pruebas submáximas a 80% del VO_{2max} (23,2%), se comparan favorablemente con los valores descriptos anteriormente (22). Todos los atletas analizados en este informe que registraron una GE superior a 22%, también registraron valores de VO_{2max} inferiores a 77 ml kg⁻¹ min⁻¹ (22). Por lo tanto, los resultados presentados en este estudio de caso, demostraron que existía un VO₂ particularmente alto junto con una alta GE, dos características que se requieren para mantener una producción de potencia submáxima muy alta necesaria para ganar el TdF (Figura 4).

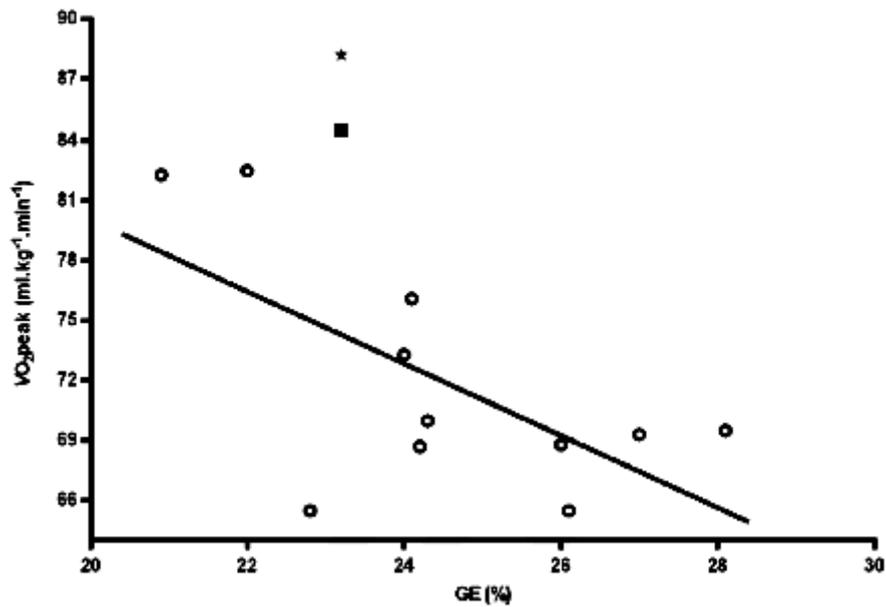


Figura 4. GE (%) a 80% del VO_{2max} (media de la condición temperatura ambiental y HH) vs. VO_{2max} de este estudio de caso. (■ masa registrada; * masa de competencia revelada por el participante) en comparación con los valores de un grupo de ciclistas (o). Extraído y modificado de Lucia et al (22).

La GE en la condición HH disminuyó en función de la tasa de trabajo en concordancia con los datos publicados anteriormente (14), mientras que a temperatura ambiente la eficiencia aumentó inicialmente a bajas tasas de trabajo y disminuyó en las tasas de trabajo superiores a 360 W. La GE a tasas de trabajo más bajas (< 350 W) fue mayor en la condición HH que en la condición de temperatura ambiente, mientras que en tasas de trabajo más altas la GE fue similar en las dos condiciones. Las diferencias entre los valores registrados superaron el error típico de medición de GE (27) por un margen considerable. Esta mayor eficiencia en tasas de trabajo más bajas en la condición HH no coincide con lo observado en el estudio de Hettinga et al (15) en el cual se observó que la GE para un grupo de ciclistas bien entrenados en condiciones de calor (35,5 °C; 15,5% de humedad relativa) fue en promedio 0,9 % menor que en la condición de menor temperatura (15,6 °C; 20,0% de humedad relativa). Del mismo modo, los valores de producción de potencia submáxima registrados en varios puntos de referencia de lactato sanguíneo fueron más altos en la condición HH que en la condición de temperatura ambiente lo que podría ser atribuido directamente a la mejora en la GE. El mecanismo que sustenta una mayor GE en la condición HH es difícil de determinar. Probablemente, una respuesta de termorregulación eficiente permitió mantener la temperatura de los músculos inferiores, algo que se ha demostrado que permite un mayor grado de glucólisis (4) y, posteriormente, podría permitir la producción de energía más eficiente.

El participante expresó anecdóticamente que tenía un buen desempeño en condiciones ambientales calurosas. Las mayor GE y la mayor producción de potencia submáxima en la condición HH parecen apoyar esto, sin embargo hay que señalar que debido a que las pruebas en las dos condiciones se realizaron el mismo día, no fuimos capaces de realizar control sobre el ritmo circadiano y las fluctuaciones asociadas en la fisiología (41). A pesar del porcentaje de grasa corporal mayor de lo previsto para un ciclista de élite, el bajo índice de masa corporal del atleta (19,4 kg m⁻²) y el somatotipo ectomorfo permitirían mantener el rendimiento o reducir la disminución del rendimiento en calor (11, 18, 42). Además, al igual que otros atletas altamente entrenados, la tasa de sudoración del participante fue relativamente alta en ambas condiciones, lo que sugiere una respuesta termorreguladora eficiente frente al ejercicio (38). Curiosamente, las concentraciones de Na⁺ en el sudor en ambas condiciones fueron similares y de magnitud moderada (50-60 mmol L⁻¹), lo que también es indicativo de una aclimatación a ambientes cálidos y húmedos bien desarrollada.

Antes de las pruebas realizadas para este estudio de caso, el participante sólo tenía pruebas de rendimiento en laboratorio realizadas en una ocasión previa en 2007 (un intervalo de 8 años entre las pruebas). Un análisis longitudinal de los dos conjuntos de datos podría prestarse a confusión por el uso de diferentes metodologías y protocolos, y en el momento de la publicación no pudimos establecer los métodos específicos empleados para el registro de los datos en 2007. Sin embargo, teniendo en cuenta estos factores de confusión, algunas diferencias son claras y nos aportan una idea interesante. La masa

del participante registrada en 2007 fue de 75,6 kg. Esto es 4,8 kg mayor que la registrada el día de la prueba (70,8 kg) y aproximadamente 8 kg mayor que la masa durante la carrera informada por el participante (67 kg). Esto equivale a un cambio de 10,5% en la masa. La reducción de la masa correspondería en su mayor parte a la pérdida de masa grasa corporal. El porcentaje de grasa corporal registrado fue de 16,9% en 2007 y de 9,5% en la prueba más reciente, sin embargo diferentes metodologías pueden producir diferencias significativas en la determinación del porcentaje de grasa corporal (17). Por lo tanto, no es posible concluir definitivamente si la masa perdida por el participante era predominantemente masa grasa, masa muscular o una combinación de ambas. Una importante reducción en la masa como la mencionada ejerce un efecto mejorador del rendimiento equivalente o mayor durante las carreras de ascenso, siempre que la capacidad de producir potencia no haya sido afectada negativamente. La PPO de 525 W se compara favorablemente con la PPO de 540 W informada en 2007 cuando se expresa en relación a la masa corporal (7,5 W kg⁻¹ frente a 7,1 W kg⁻¹).

CONCLUSIÓN

En conclusión, presentamos una amplia gama de variables fisiológicas de un dos veces ganador del TdF. Estos valores fueron registrados cuando el atleta se encontraba cerca de las óptimas condiciones físicas y por lo tanto podría decirse que representan los extremos de las características de rendimiento de la resistencia humana. Los valores de producción de potencia máxima, VO_{2max}, producción de potencia submáxima y GE están entre los más altos reportados para ciclistas profesionales de ruta.

La grasa corporal fue mayor que la previamente reportada para ciclistas profesionales, lo que puede ser explicado por el aumento de 4 kg informado por el mismo atleta en la masa corporal desde su segunda victoria del TdF. Cuando se calcularon nuevamente, los valores relativos (utilizando la masa corporal que se informó durante la competencia) de producción de potencia máxima y potencia submáxima en la concentración de lactato sanguíneo de 4 mmol.L⁻¹ fueron los valores más altos publicados hasta la fecha.

Dos características únicas de este informe de caso son la elevada GE en relación con VO_{2max} en comparación con lo reportado por otros ciclistas profesionales, y el potencial de fuerte rendimiento en condiciones de calor y humedad, debido a una mayor GE y menor lactato sanguíneo submáximo en comparación con los valores obtenidos a temperatura ambiente. Esto puede explicarse, en parte, por procesos de termorregulación eficientes, así como por la mayor GE registrada durante la primera mitad de la sesión de ejercicio realizada en condiciones HH. Las características de un elevado VO_{2max} y de alta eficiencia bruta son fundamentales para el mantenimiento de altas producciones de potencia. Tales rasgos son un requisito para sobresalir en pruebas contrarreloj y pruebas finales de etapas con ascensos, dos áreas donde generalmente se saca ventaja a los otros competidores de carreras con etapas. El TdF se lleva a cabo a mediados del verano y por lo general muchas etapas se realizan en altas temperaturas y elevada humedad. Por lo tanto la capacidad de mantener el rendimiento en calor puede ser una característica importante que favorezca el buen rendimiento en esta carrera, y esto se refleja en el desempeño del atleta en el TdF hasta la fecha.

En resumen, estos datos proporcionan una visión única de las características necesarias para tener éxito en el Tour de Francia, el evento deportivo más importante del ciclismo mundial.

Agradecimientos

No se recibió ni se buscó financiación externa para la preparación y realización de este manuscrito. Los autores del estudio declaran no tener conflictos de interés. Los resultados del estudio no necesariamente reflejan la opinión del ACSM.

REFERENCIAS

1. Amann M., Dempsey J.A. (2008). Locomotor muscle fatigue modifies central motor drive in healthy humans and imposes a limitation to exercise performance. *J. Physiol.*586(1):161-73.
2. Amann M., Subudhi A.W., Foster C. (2006). Predictive validity of ventilatory and lactate thresholds for cycling time trial performance. *Scand. J. Med. Sci. Sports.*16(1):27-34.
3. Bishop D., Jenkins D.G., Mackinnon LT. (1998). The relationship between plasma lactate parameters, Wpeak and 1-h cycling performance in women. *Med. Sci. Sports Exerc.*30(8):1270-5.
4. Blomstrand E., Essen-Gustavsson B. (1987). Influence of reduced muscle temperature on metabolism in type I and type II human muscle fibres during intensive exercise. *Acta Physiologica Scandinavica.*131(4):569-74.

5. Borg G. (1970). Perceived exertion as an indicator of somatic stress. *Scandinavian journal of rehabilitation medicine*. 2(2):92-8.
6. Cheng B., Kuipers H., Snyder A.C., Keizer H.A., Jeukendrup A., Hesselink M. (1992). A new approach for the determination of ventilatory and lactate thresholds. *Int. J. Sports Med*. 13(7):518-22.
7. Clark R.R., Kuta J.M., Sullivan J.C. (1993). Prediction of percent body fat in adult males using dual energy x-ray absorptiometry, skinfolds, and hydrostatic weighing. *Medicine and science in sports and exercise*. 25(4):528-35.
8. Coyle E.F. (2005). Improved muscular efficiency displayed as Tour de France champion matures. *J. Appl. Physiol.* (1985).98(6):2191-6.
9. Coyle E.F., Sidossis L.S., Horowitz J.F., Beltz J.D. (1992). Cycling efficiency is related to the percentage of type I muscle fibers. *Medicine and science in sports and exercise*. 24(7):782-8.
10. Duz S., Kocak M., Korkusuz F. (2009). Evaluation of body composition using three different methods compared to dual-energy X-ray absorptiometry. *European Journal of Sport Science*.9(3):181-90.
11. Epstein Y., Shapiro Y., Brill S. (1983). Role of surface area-to-mass ratio and work efficiency in heat intolerance. *Journal of applied physiology: respiratory, environmental and exercise physiology*. 54(3):831-6.
12. Faria E.W., Parker D.L., Faria I.E. (2005). The science of cycling: factors affecting performance -part 2. *Sports medicine (Auckland, N.Z.)*.35(4):313-37.
13. Foley J.P., Bird S.R., White J.A. (1989). Anthropometric comparison of cyclists from different events. *British Journal of Sports Medicine*.23(1):30-3.
14. Gaesser G.A., Brooks G.A. (1975). Muscular efficiency during steady-rate exercise: effects of speed and work rate. *J. Appl. Physiol*.38(6):1132-9.
15. Hettinga F.J., De Koning J.J., de Vrijer A., Wust R.C., Daanen H.A., Foster C. (2007). The effect of ambient temperature on gross-efficiency in cycling. *European journal of applied physiology*.101(4):465-71.
16. Jackson A.S., Pollock M.L. (1978). Generalized equations for predicting body density of men. *Br. J. Nutr.* 40(3):497-504.
17. Johansson A.G., Forslund A., Sjodin A., Mallmin H., Hambraeus L., Ljunghall S. (1993). Determination of body composition--a comparison of dual-energy x-ray absorptiometry and hydrodensitometry. *Am. J. Clin. Nutr.*57(3):323-6.
18. Kakitsuba N., Mekjavic I.B., Katsuura T. (2009). Individual variability in the core interthreshold zone as related to body physique, somatotype, and physical constitution. *Journal of physiological anthropology*.28(6):275-81.
19. Lamberts R.P., Lambert M.I., Swart J., Noakes T.D. (2012). ;Allometric scaling of peak power output accurately predicts time trial performance and maximal oxygen consumption in trained cyclists. *Br. J. Sports Med*. 46(1):36-41.
20. Lucia A., Earnest C., Arribas C. (2003). The Tour de France: a physiological review. *Scand. J. Med. Sci. Sports*.13(5):275-83.
21. Lucia A., Hoyos J., Chicharro J.L. (2001). Physiology of professional road cycling. *Sports medicine (Auckland, N.Z.)*.31(5):325-37.
22. Lucia A., Hoyos J., Perez M., Santalla A., Chicharro J.L. (2002). Inverse relationship between VO2max and economy/efficiency in world-class cyclists. *Medicine & Science in Sports & Exercise*. 34(12):2079-84.
23. Lundby C., Robach P. (2015). Performance Enhancement: What Are the Physiological Limits? *Physiology (Bethesda, Md.)*. 30(4):282-92.
24. Lusk G. Animal Calorimetry: (1924). Analysis of the oxidation of mixtures of carbohydrate and fat. *Journal of Biological Chemistry*.59:41-2.
25. Marcora S.M., Staiano W. (2010). The limit to exercise tolerance in humans: mind over muscle? *European journal of applied physiology*. 109(4):763-70.
26. Martin D.T., Quod M.J., Gore C.J., Coyle E.F. (2005). Has Armstrong's cycle efficiency improved? *Journal of applied physiology (Bethesda, Md.: 1985)*. 99(4):1628-9; author reply 9.
27. Moseley L., Jeukendrup A.E. (2001). The reliability of cycling efficiency. *Med. Sci. Sports Exerc*.33(4):621-7.
28. Mujika I., Padilla S. (2001). Physiological and performance characteristics of male professional road cyclists. *Sports medicine (Auckland, N.Z.)*.31(7):479-87.
29. Newell J., Higgins D., Madden N. et al. (2007). Software for calculating blood lactate endurance markers. *J. Sports Sci.* 25(12):1403-9.
30. Nimmerichter A., Eston R.G., Bachl N., Williams C. (2011). Longitudinal monitoring of power output and heart rate profiles in elite cyclists. *Journal of sports sciences*.29(8):831-40.
31. Noakes T.D. (1998). Maximal oxygen uptake: "classical" versus "contemporary" viewpoints: a rebuttal. *Med. Sci. Sports Exerc*.30(9):1381-98.
32. Noakes T.D. (2006). The limits of endurance exercise. *Basic research in cardiology*. 101(5):408-17.
33. Padilla S., Mujika I., Angulo F., Goiriena J.J. (2000). Scientific approach to the 1-h cycling world record: a case study. *J. Appl. Physiol.* (1985).89(4):1522-7.
34. Padilla S., Mujika I., Cuesta G., Goiriena J.J. (1999). Level ground and uphill cycling ability in professional road cycling. *Med. Sci. Sports Exerc*.31(6):878-85.
35. Padilla S., Mujika I., Orbananos J., Santisteban J., Angulo F., Jose Goiriena J. (2001). Exercise intensity and load during mass-start stage races in professional road cycling. *Med. Sci. Sports Exerc*.33(5):796-802.
36. Passfield L., Doust J.H. (2000). Changes in cycling efficiency and performance after endurance exercise. *Med. Sci. Sports Exerc*. 32(11):1935-41.
37. Pinot J., Grappe F. (2015). A six-year monitoring case study of a top-10 cycling Grand Tour finisher. *Journal of sports sciences*.33(9):907-14.
38. Reilly T., Drust B., Gregson W. (2006). Thermoregulation in elite athletes. *Curr. Opin. Clin. Nutr. Metab. Care*. 9(6):666-71.
39. Santalla A., Earnest C.P., Marroyo J.A., Lucia A. (2012). The Tour de France: an updated physiological review. *Int. J. Sports Physiol. Perform*.7(3):200-9.
40. Swart J., Lamberts R.P., Lambert M.I et al. (2009). Exercising with reserve: evidence that the central nervous system regulates prolonged exercise performance. *British journal of sports medicine*.43(10):782-8.
41. Teo W., Newton M.J., McGuigan M.R. (2011). Circadian rhythms in exercise performance: implications for hormonal and muscular

- adaptation. *Journal of sports science & medicine*.10(4):600-6.
42. Tilkens M.J., Wall-Scheffler C., Weaver T.D., Steudel-Numbers K. (2007). The effects of body proportions on thermoregulation: an experimental assessment of Allen's rule. *Journal of human evolution*.53(3):286-91.
43. Vogt S., Heinrich L., Schumacher Y.O. et al. (2005). Energy intake and energy expenditure of elite cyclists during preseason training. *Int. J. Sports Med*. 26(8):701-6.
44. Wilber R.L., Zawadzki K.M., Kearney J.T., Shannon M.P., Disalvo D. (1997). Physiological profiles of elite off-road and road cyclists. *Med Sci Sports Exerc*.29(8):1090-4.

Cita Original

Phillip Bell, Matthew Furber, Kenvan Someren, Ana Antón-Solanas, and Jeroen Swart. The Physiological Profile of a Multiple Tour de France Winning Cyclist *Medicine & Science in Sports & Exercise*, Publish Ahead of Print DOI: 10.1249/MSS.0000000000001068