

Monograph

Test Máximo de 3 Minutos para Determinar el Máximo Consumo de Oxígeno y el Máximo Estado Estable

Mark Burnley¹, Jonathan H Doust² y Anni Vanhatalo¹

¹Department of Sport and Exercise Science, University of Wales, Aberystwyth, Ceredigion, Reino Unido.

²Chelsea School Research Centre, University of Brighton, Eastbourne, East Sussex, Reino Unido.

RESUMEN

Objetivo: Analizamos la hipótesis que un test máximo de ciclismo de 3-min nos proporcionaría una medida del consumo de oxígeno máximo ($\text{VO}_{2\text{max}}$) y una estimación de la producción de potencia máxima en estado estable. **Métodos:** Once sujetos que realizaban actividad habitualmente realizaron un test incremental, tres tests máximos de 3-min contra una resistencia fija, y dos tests submáximos adicionales de hasta 30 min, 15 W por debajo o por encima de la producción de potencia alcanzada en los últimos 30 s del test de 3-min (potencia del final del test). **Resultados:** El $\text{VO}_{2\text{max}}$ medido durante el test máximo de 3-min (Media \pm DS: $3,78\pm 0,68 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$) no fue diferente del $\text{VO}_{2\text{max}}$ del test incremental ($3,84\pm 0,79 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$; $p=0,75$). La potencia al final del test ($257\pm 49 \text{ W}$) fue significativamente más baja que la potencia al final del test incremental ($368\pm 73 \text{ W}$) y significativamente mayor que la potencia en el umbral del intercambio de gases ($169\pm 55 \text{ W}$; $p<0,001$). Nueve sujetos pudieron completar 30 min de ejercicio a 15 W por debajo de la potencia del final del test y siete de ellos lo hicieron con un perfil de respuesta de concentración de lactato sanguíneo y VO_2 correspondientes al estado estable. En contraste, cuando los sujetos realizaron los ejercicios 15 W por encima de la potencia del final del test, la concentración de lactato sanguíneo y VO_2 subieron inexorablemente hasta el agotamiento, el cual se manifestó en aproximadamente $13\pm 7 \text{ min}$. **Conclusiones:** Estos datos sugieren que un test de ejercicio máximo de 3 min puede ser utilizado para establecer el $\text{VO}_{2\text{max}}$ y para estimar el máximo estado estable.

Palabras Clave: dominios de intensidad del ejercicio, potencia crítica, resistencia fija, ciclismo

INTRODUCCION

Sobre la base de las respuestas de consumo de oxígeno pulmonar (VO_2) y del lactato sanguíneo frente a un ejercicio de ciclismo realizado a una tasa de trabajo constante, se han identificado tres dominios de intensidad (11, 26, 28): moderada, fuerte y severa. El dominio de intensidad moderada abarca a aquellas tasas de trabajo en las cuales el VO_2 aumenta con cinéticas finitas para alcanzar un estado estable dentro de 2-3 min. El dominio de intensidad fuerte, se define como aquellas tasas de trabajo que producen un aumento de la concentración de lactato sanguíneo que se estabiliza después de los 5-10 min iniciales. También puede necesitar 5-15 min para alcanzar el VO_2 en estado estable en estas tasas de trabajo como consecuencia del componente lento de la respuesta de VO_2 que surge después de la fase inicialtransitoria (20, 23), que produce un costo de O_2 mayor que el estimado a partir de tasas de trabajo moderadas (26). Finalmente, en el dominio de intensidad severa, tanto el lactato sanguíneo como el VO_2 aumentan con el tiempo hasta que el VO_2 alcanza su valor máximo ($\text{VO}_{2\text{max}}$); y a partir de allí la fatiga aparece pronto (pero predeciblemente) (14). Cada uno de los tres

dominios de intensidad de ejercicio tiene sus demarcaciones específicas (16). El límite entre los dominios moderado y fuerte está señalado por el umbral del lactato, el límite entre los dominios fuerte y severo está señalado por el estado estable máximo o por la asíntota de la curva de potencia-duración (potencia crítica) y se ha sugerido que el límite superior del dominio severo sería la mayor tasa de trabajo en la que se puede alcanzar el VO_2max antes de que se presente la fatiga (14).

A menudo para evaluar la función aeróbica se usa un protocolo incremental en rampa de 10-15 min de duración (27) o un protocolo escalonado de mayor duración, para valorar la respuesta del lactato sanguíneo (20). La utilidad de estos tests es que el umbral del lactato (que normalmente se identifica mediante el criterio de intercambio de gases, esto es, el umbral de intercambio de gases (GET)) (3), la relación VO_2 -tasa de trabajo y VO_2max puede ser valorado en un test de 10 a 15 min (27). De este modo, se establece el límite entre los dominios de intensidad moderado y fuerte y el límite superior de la función aeróbica. El límite entre los dominios de intensidad fuerte y severa escapa a la detección durante el ejercicio incremental, porque la definición del límite se basa, ya sea en la conducta del VO_2 y/o del lactato de sanguíneo durante el ejercicio prolongado (estado estable máximo) (4) o en la tolerancia para realizar ejercicio exclusivamente en el dominio severo (potencia crítica) (20, 21). Ambos enfoques requieren pruebas físicas repetidas y, en el caso de la potencia crítica, también exhaustivas. La tasa de trabajo que representa el límite entre los dominios de intensidad fuerte y severa es importante práctica y experimentalmente: separa tasas de trabajo para las cuales es posible alcanzar un estado estable de aquellas en las cuales no lo es (20), y se ha demostrado que la velocidad máxima de carrera en estado estable está estrechamente asociada con el rendimiento en carreras de fondo (15). Por lo tanto sería útil que metodologías válidas y confiables para establecer los límites de este dominio estuvieran disponibles en un solo test.

Hay numerosos informes en la literatura sobre las respuestas fisiológicas frente al ejercicio máximo de aproximadamente 90 s de duración (6, 8, 13, 29, 30). Aunque estos estudios demostraron que la producción de potencia caía por debajo de la asociada con el VO_2max , Dekerle et al. (8) demostraron que la producción de potencia era todavía considerablemente más alta que la potencia crítica previamente establecida al final de un esfuerzo máximo de 90 s. Adicionalmente Williams et al. (29) establecieron en adolescentes que un esfuerzo máximo 90-s produjo un VO_2 máximo similar al determinado a través de un protocolo de rampa más convencional. Es posible que en un test máximo más largo, la producción de potencia continuara disminuyendo hasta alcanzar una potencia, al final del test, que igualara a la asociada con la transición del dominio fuerte al severo (máximo estado estable). Esta posibilidad se basa en el carácter hiperbólico de la curva de potencia-duración definida por:

$$t = W'/(P - CP) [1]$$

Donde t es tiempo hasta el agotamiento, P es la producción de potencia de la tarea y W' es la constante de curvatura que define una cantidad fija de trabajo que puede ser realizado por encima de la potencia crítica, CP (19). Se ha demostrado que la potencia crítica es similar a la producción de potencia máximo en estado estable (20). La fórmula lineal de esta relación es la siguiente:

$$P = (W'/t) + CP [2]$$

Donde W' es la pendiente y CP es la ordenada al origen (10, 20). En teoría, si los ejercicios máximos se realizaran durante un período de tiempo más largo, el valor de W' se reduciría a cero, y en ese punto la mayor producción de potencia posible que podría alcanzarse igualaría la potencia crítica dado que la ecuación 2 se reduciría a $P = CP$. Por consiguiente, el ejercicio realizado por debajo de esta producción de potencia de final del test produciría perfiles en estado estable de concentración de lactato y VO_2 , mientras que el ejercicio por encima de la misma no. Nosotros decidimos investigar un test máximo de 3 min porque los datos recientes (8) sugieren que los tests de 90-s de duración no son lo suficientemente largos para producir reducciones en la producción de potencia asociadas con la potencia crítica, y un trabajo piloto nuestro demostró que luego de que transcurren aproximadamente 2,5 min se produce una nivelación reproducible de la producción de potencia. Por lo tanto, nosotros evaluamos las siguientes hipótesis experimentales: 1) un ejercicio máximo de 3 min proporcionaría un perfil reproducible de producción de potencia; 2) el test produciría un VO_2 máximo que no sería diferente del producido en un test incremental; y 3) la respuesta fisiológica al ejercicio prolongado realizado a 15 W por debajo de la potencia alcanzada en los últimos 30 s del test máximo, produciría un VO_2 y concentración de lactato sanguíneo de estado estable indicativos de ejercicios fuertes, mientras que el ejercicio realizado a 15 W por encima de la producción de potencia del final del test produciría un aumento continuo en VO_2 y en la concentración de lactato sanguíneo con el tiempo, indicativo de ejercicios realizados en el dominio de intensidad severa.

MÉTODOS

Once sujetos recreativamente activos (nueve varones con valores de Media \pm DS de edad 27 \pm 7 años; talla 1,76 \pm 0,10 m; masa corporal 68,4 \pm 12,0 kg) dieron su consentimiento informado por escrito para participar en este estudio que fue aprobado por el comité de ética de la Universidad de Wales Aberystwyth. Se solicitó a los sujetos que arribaran al laboratorio descansados (ningún ejercicio activo en las 24 h previas) y adecuadamente hidratados sin haber consumido comida o cafeína 3 h antes de cada test. Los sujetos estaban acostumbrados al ejercicio de alta intensidad y entre ellos habíaciclistas de competición, corredores y otros sujetos que participaban en entrenamiento de aptitud física general.

Diseño Experimental

Los sujetos visitaron el laboratorio en seis ocasiones, con un mínimo de 24 h de recuperación entre cada test y todos los tests fueron realizados en un lapso de 14 días. Los sujetos realizaron un protocolo incremental para la determinación del VO₂max y GET. Durante la segunda visita, los sujetos realizaron una serie de ejercicios de ciclismo máximo de 3-min que sirvió como prueba de familiarización para reducir el efecto de la práctica asociado con pruebas múltiples que involucran esfuerzo máximo (24) y no fue incluida en el análisis posterior de los datos. En cada una de las siguientes dos visitas, los sujetos realizaron un test máximo de 3-min. En las últimas dos visitas, los sujetos pedalearon durante 30 min o hasta el agotamiento, en orden aleatorio, en tasa de trabajo constante 15 W por encima o por debajo de la potencia obtenida al final del test de 3-min.

Determinación de VO₂max y GET

Todos los tests de ejercicios fueron realizados utilizando una bicicleta ergométrica con freno electromagnético (*Lode Excalibur Sport, Groningen, the Netherlands*) en un laboratorio correctamente ventilado a una temperatura de 21-25°C. Cada sujeto ajustó la bicicleta ergométrica para estar cómodo, y si era necesario llevaban sus propios pedales; estos ajustes fueron registrados y se repitieron durante los tests subsiguientes. El VO₂max y GET fueron determinados mediante un protocolo de incrementos que consistió en un pedaleo inicial (línea de base) de 3 min sin carga y luego un incremento de 30-W \cdot min⁻¹ en la tasa de trabajo hasta el agotamiento volitivo. Se solicitó a los sujetos que mantuvieran su cadencia de pedaleo preferida (80 rpm, n=3; 90 rpm, n=8) a lo largo del test. El test finalizaba cuando la cadencia disminuía más de 5 rpm por debajo de la cadencia escogida durante más de 10 seg, a pesar del fuerte estímulo verbal. Durante el test, se midió, el intercambio de gases pulmonares respiración por respiración siguiendo la metodología descrita a continuación. El VO₂max se determinó como el mayor VO₂ medio en un período de 30 seg. Los datos fueron reducidos obteniéndose los valores promedios de 10s, para estimar el umbral de intercambio de gases (GET) por medio del método de la pendiente V (2).

Test de Tres-minutos

Antes de cada test, los sujetos realizaron una entrada en calor de 5-min a 100 W y luego 5 min de descanso. Los sujetos realizaron tres tests en el total. Cada test empezó con 3 min de ciclismo sin carga a 90 rpm, seguidos por un esfuerzo máximo de 3-min. Se solicitó a los sujetos que aumentaran su cadencia a aproximadamente 120 rpm durante los últimos 5 s de ciclismo sin carga. La resistencia de pedaleo durante el esfuerzo máximo se fijó para que los sujetos lograran una producción de potencia del 50% de la diferencia entre GET y VO₂max al alcanzar su cadencia preferida (80-90 rpm), usando el factor lineal de la bicicleta ergométrica *Lode* (factor lineal = potencia/cadencia²). Durante los tests se brindó estímulo verbal, pero los sujetos no tenían información del tiempo transcurrido, para evitar que regularan el ritmo. En el esfuerzo máximo, se instruyó y animó fuertemente a los sujetos para que mantuvieran la cadencia tan alta como les fuera posible en todo momento del test. El intercambio pulmonar de gases fue monitoreado respiración por respiración a lo largo del test, y la concentración de lactato sanguíneo fue inmediatamente medida al final del test, y 3 y 5 min después. El VO₂ máximo se tomó como el VO₂ más alto medido por 30 s durante el test y la concentración de lactato más alta fue registrada como la concentración de lactato máxima. La potencia al finalizar el test fue determinada como la producción de potencia media durante los 30 s finales del test. También se calculó la integral de producción de potencia-tiempo por encima de la potencia del final del test, la cual nos permite obtener una estimación de W' (8).

Tests con Tasa de Trabajo Constante

Estos tests fueron realizados después de una entrada en calor de 5 min a 100 W y 5 min de descanso. Los sujetos realizaron hasta 30 min de ejercicio con tasa de trabajo constante a 15 W por encima o por debajo de la potencia del final del test medida en el test de 3 min. El intercambio de gases pulmonares se midió respiración por respiración a lo largo de los tests y fue registrado en intervalos de 30 seg. Durante el test se recolectaron muestras de sangre capilar de la yema de los dedos cada 5 minutos y las mismas fueron analizadas para determinar la concentración de lactato en la sangre completa. Los sujetos pedalearon a su cadencia preferida y se les comunicó que el tiempo establecido eran 30 min. Ellos no

tenían información sobre si el test era realizado por encima o por debajo de la potencia del final del test. Así los sujetos realizaron ejercicio hasta el agotamiento (la prueba finalizaba cuando la cadencia caía mas de 5 rpm por debajo de la cadencia escogida durante un período superior a 10 s, a pesar de la fuerte estimulación verbal) o durante 30 min, cualquiera sea la situación que ocurriera primero. El estado estable se definió como un aumento <1,0 mM en la concentración de lactato sanguíneo desde 10 a 30 min de ejercicio (3, 15).

Equipamiento

A lo largo de todos los tests, los sujetos tuvieron colocado un broche en la nariz y respiraban a través de un montaje de máscara facial con poco espacio muerto (90 mL), baja resistencia ($0,75 \text{ mmHg}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ a $15 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$) y rotor de turbina (*Jaeger Triple V*). El volumen de gas inspirado y expirado y las señales de concentración de gas fueron muestreados de manera continua a 100 Hz, el último a través de analizadores paramagnéticos (O_2) e infrarrojos (CO_2) (*Jaeger Oxycon Pro, Hoechberg, Germany*) a través de una línea capilar conectada a la boquilla. Estos analizadores fueron calibrados antes de cada test con gases de concentración conocida y la turbina de transducción de volumen fue calibrado con una jeringa de 3L (*Hans Rudolph, MO*). Las señales de volumen y concentración fueron sincronizadas con el tiempo considerando el retraso en el tránsito capilar del gas y el aumento del tiempo del analizador en relación a la señal de volumen. El consumo de oxígeno, producción de anhídrido carbónico y ventilación por minuto, fueron calculados a través de fórmulas estándar (1) y presentados respiración por respiración. La frecuencia cardíaca fue medida cada 5 s utilizando radio telemetría de corto rango (*Polar S610, Polar Electro Oy, Kempele, Finland*). Se tomaron muestras de sangre por punción de la yema de los dedos (~25 μl) en tubos capilares y fueron analizadas para determinar la concentración de lactato sanguíneo mediante un analizador automático de lactato (*YSI Stat 2300, Yellow Springs, OH*) que fue calibrado cada hora, siguiendo los procedimientos establecidos por el fabricante (*YSI 2747*).

Análisis Estadísticos

La confiabilidad de la producción de potencia al final del test se determinó mediante el coeficiente de correlación intraclase y el error estándar de la medida. El análisis de Bland-Altman se realizó para establecer los límites de confianza entre la producción de potencia al final del test de 3-min y entre las mediciones de VO_2max obtenidas durante los ejercicios incrementales y el ejercicio máximo. Se utilizó un ANOVA de mediciones repetidas de una vía para determinar los efectos principales entre el VO_2max del test con incrementos y los valores de VO_2 más altos alcanzados en los dos tests máximos de 3-min y para establecer los cambios de VO_2 en el tiempo y de la concentración de lactato sanguíneo en los tests de 30 min. La significancia estadística fue fijada en un nivel de $p < 0,05$. Luego las diferencias específicas fueron establecidas usando intervalos de confianza de 95% de muestras pareadas. Los datos se presentan en forma de $\text{Media} \pm \text{DS}$ a menos que se indique otra cosa.

RESULTADOS

Sujeto	$\text{VO}_{2\text{max}}$ ($\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$)	$\text{VO}_{2\text{max}}$ Porcentual del test de incremental	Producción n de Potencia Final (W)	Potencia Final Porcentual del test de incremental	%GET	% Δ	Concentra- ción máxima de Lactato sanguíneo (mM)	Producción de Potencia Máxima (W)	Potencia Final Porcentual del test de incremental
1	4,18	103	258	72	169	51	12,0	737	205
2	2,83	112	199	75	166	54	8,4	434	164
3	3,66	94	234	70	120	28	10,3	918	275
4	3,96	99	277	70	135	38	9,1	943	239
5	3,93	98	263	66	164	44	12,4	811	205
6	2,52	101	187	78	208	65	8,0	310	129
7	3,28	97	200	62	174	41	15,0	871	268
8	4,71	102	329	71	150	45	11,9	860	186
9	3,76	99	270	70	135	38	13,5	815	211
10	4,51	89	338	70	147	42	8,2	734	152
11	4,27	101	269	68	125	30	12,7	977	246
Media	3,78	99	257	70	154	43	11,0	764	207
DS	0,68	6	49	4	25	10	2,4	207	47

Tabla 1. Respuesta de los individuos al ejercicio de ciclismo máximo de 3 minutos. GET=umbral de intercambio de gases;

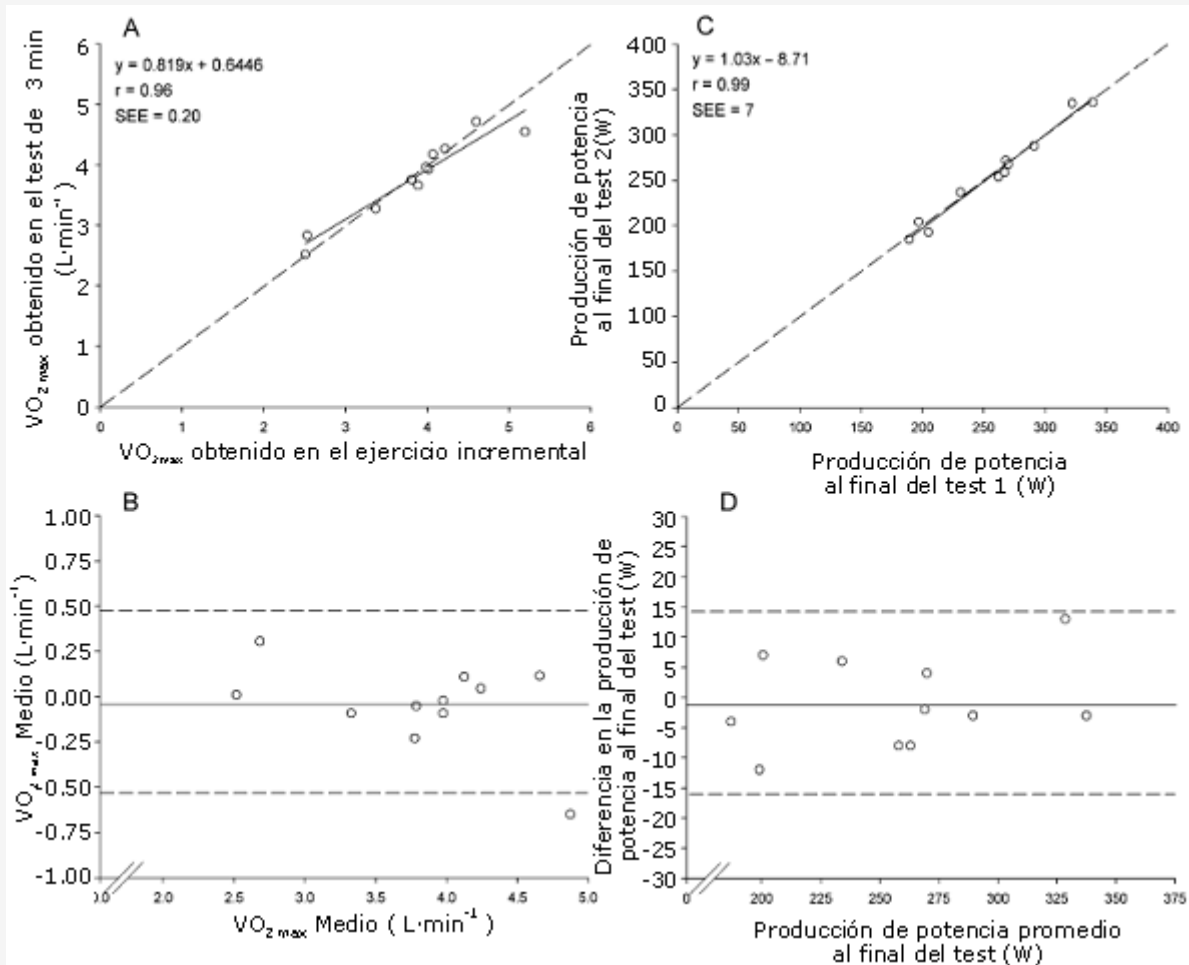


Figura 1. Análisis de correlación y de puntos de Bland-Altman para la diferencia entre el VO_2 determinado en con incrementos y VO_{2max} medidos durante el ejercicio máximo (Paneles A y B) y la producción de potencia durante el test máximo (Paneles C y D). En los Paneles A y C, la línea continua es la regresión de mejor ajuste, y la línea discontinua es la línea de identidad. En los Paneles B y D (gráficos de puntos de Bland-Altman), la línea horizontal continua representa la diferencia media entre las dos medidas, y las líneas discontinuas representan los límites de confianza de 95% entre las medidas.

El VO_{2max} de los sujetos fue de $3,84 \pm 0,79$ L·min⁻¹ y se asoció con una producción de potencia máxima de 368 ± 73 W durante el test incremental. El GET se produjo en $2,45 \pm 0,66$ L·min⁻¹ (169 ± 55 W). La Tabla 1 muestra las respuestas individuales en forma de promedio de los tests de esfuerzo máximo de 3 min. En la Figura 1 se observan los resultados del análisis de Bland-Altman para la comparación del VO_{2max} entre el tests incremental y de esfuerzo máximo. El VO_2 máximo alcanzado en estos tests de 3 min fue similar ($3,77 \pm 0,73$ y $3,78 \pm 0,73$ L·min⁻¹ para los tests 1 y 2), y éstos no fueron significativamente diferentes del obtenido durante el test incremental (diferencia entre las medias $0,06$ L·min⁻¹, límites confianza de 95% $0,22, -0,11$ L·min⁻¹; $F_{2,10} = 0,11$; $P = 0,75$). Es necesario destacar que con un efecto tan pequeño y un tamaño muestral pequeño, la potencia asociada con estas comparaciones era baja ($1-\beta = 10,9\%$). El VO_2 en los últimos 30 s del test máximo fue $3,74 \pm 0,69$ L·min⁻¹, y fue sólo ligeramente menor, que el valor máximo (diferencia entre medias $0,04$ L·min⁻¹, límite de confianza de 95% $0,07, 0,01$ L·min⁻¹) pero la diferencia fue estadísticamente significativa. El hallazgo de una diferencia estadísticamente significativa en este caso es meramente una reflexión del hecho que VO_{2max} fue seleccionado como el mayor VO_2 registrado. Por lo tanto, el VO_2 del final del test era igual (tres casos) o menor que el VO_{2max} . La producción de potencia máxima para el test de 3 min, en la mayoría de los casos alcanzada dentro de los 5 seg de haber comenzado el test, fue 764 ± 207 W, o 207 ± 47 % de la producción de potencia máxima alcanzada en el test incremental (Tabla 1). Las producciones de potencia al final del test no fueron significativamente diferentes unas de otras (256 ± 48 W para el test 1 vs. 257 ± 55 W para el test 2, límites de confianza de 95% $8-5$ W). El coeficiente de correlación intraclase

para la potencia al final del test entre los dos tests fue $r=0,99$ ($p<0,001$), y el error estándar entre los dos test fue ± 7 W, o 3 % del valor de la media presentada en la Tabla 1 (Figura 1D). La potencia al final del test fue significativamente menor que la potencia máxima medida durante el test incremental ($F_{2,10}=156,2$, $p<0,001$) y significativamente mayor que la potencia en GET (Tabla 1), equivalente a aproximadamente 70% de la potencia máxima al final del test incremental, aproximadamente 154% de la producción de potencia en GET o aproximadamente 43% de la diferencia (Δ) entre VO_{2max} y GET (es decir, 43% Δ , Tabla 1). Las respuestas medias del grupo a los tests máximos de 3-min se presentan en la Figura 2. La producción de potencia disminuyó rápidamente a lo largo de los primeros 60 s en todos los tests pero se mantuvo relativamente estable en los últimos 60 s (Panel A). Cuando los datos de tiempo fueron expresados como promedios obtenidos cada 30-s y comparados (Panel B), todos los puntos de tiempo fueron significativamente diferentes de cada intervalo de tiempo de 30 s subsiguiente ($F_{5,10}=97,2$, $p<0,001$), con la excepción de los intervalos de 120-150 s y 150-180 s que difirieron en sólo 5 W (límite de confianza de 95% 11, -1 W). La Figura 3 muestra la producción de potencia (Panel A) y los perfiles de respuesta de VO_2 (Panel B) durante el test máximo de 3-min en un sujeto representativo. Como también se observa en la Tabla 1, la potencia al final del test se ubicó debajo de VO_{2max} pero por encima de GET. La cadencia alcanzada durante el test alcanzó un máximo de 150 ± 14 rpm y cayó a 88 ± 5 rpm al final del test. El trabajo total realizado durante el test de 3-min fue $60,2 \pm 12,8$ kJ. El trabajo total realizado por encima de la potencia del final del test, el componente que idealmente representa W, fue $14,3 \pm 4,7$ kJ.

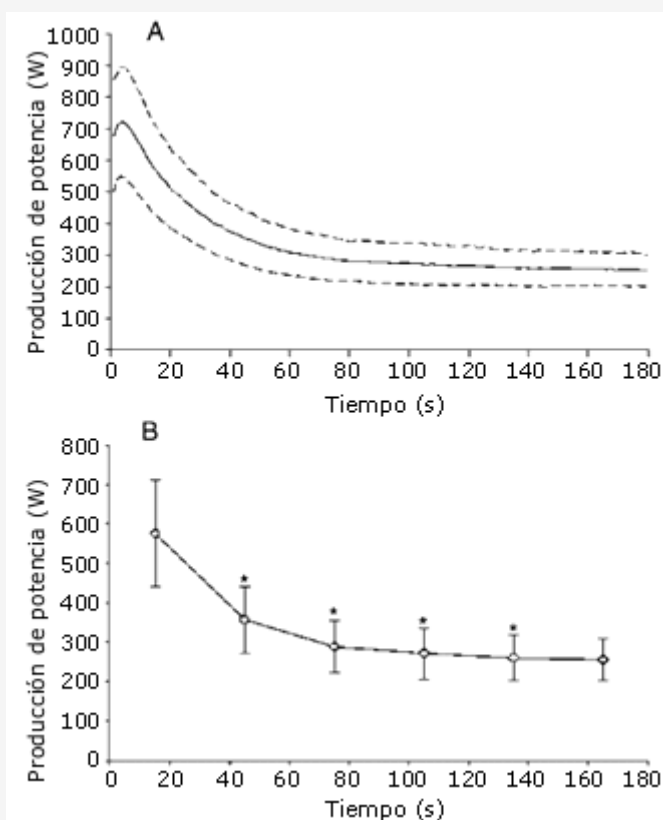


Figura 2. Producción de potencia media de grupo durante el test máximo de 3-min (Panel A). Las líneas discontinuas (punteadas) representan la desviación estándar. El Panel B muestra la producción de potencia media de grupo promediada cada 30 s. Los asteriscos indican que existen diferencias significativas en la producción de potencia con el periodo de tiempo anterior. Note que la producción de potencia alcanza un plateau (meseta) en aproximadamente 120 s en el Panel A, y que la producción de potencia del final del test no es significativamente diferente de la producción de potencia precedente en el Panel B, en contraste con todos los otros puntos de tiempo..

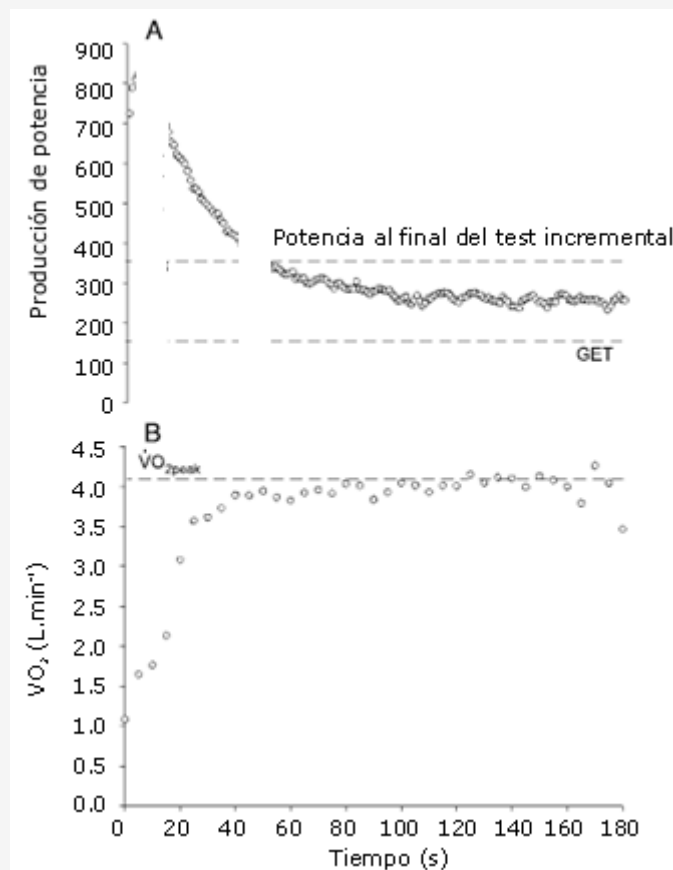


Figura 3. Perfiles de respuesta de la producción de potencia (A) y consumo de oxígeno (B) durante un test máximo de 3-min en un sujeto representativo. En el Panel A se observa que la producción de potencia disminuye a valores considerablemente inferiores a la producción de potencia más alta lograda al final del test incremental, pero permaneciendo substancialmente más altos que la potencia asociada con el umbral de intercambio de gas (GET), y la producción de potencia cambió poco en los últimos 60 s del test. En el Panel B se observa que el VO_2 aumentó rápidamente hacia los valores de $VO_{2,max}$ donde permaneció en los últimos 60 s del test.

En los test de tasa de trabajo constante realizados a $15 W'$ por debajo de la potencia del final del test, 9 de los 11 sujetos pudieron completar los 30 min de ejercicio (Figura 4). De éstos, siete sujetos realizaron el ejercicio cumpliendo el criterio para el perfil de lactato sanguíneo en estado estable ($<1,0$ mM de aumento entre 10 y 30 min) (3), con una concentración de lactato sanguíneo al final del ejercicio de $5,6 \pm 1,6$ mM. Estos sujetos también presentaron una respuesta demorada, de VO_2 en estado estable que alcanzó aproximadamente 85% del $VO_{2,max}$; el cambio medio en la concentración de lactato sanguíneo y VO_2 entre los 10 y 30 min en todos aquellos que realizaron completamente los 30 min fue $0,9 \pm 1,1$ mM (95% límite de confianza 1,2, 0,6) y $0,01 \pm 0,20$ L·min⁻¹ (95% límite de confianza 0,05, -0,05). Los dos sujetos que no pudieron realizar completamente los 30 min de ejercicio por debajo de la potencia del fin del test toleraron 15 y 24 min de ejercicio antes del agotamiento volitivo. Ninguno de los sujetos pudo completar completamente los 30 min en la potencia $15 W$ por encima de la potencia del final del test. El tiempo hasta el agotamiento medio fue 12 min 46 s (los valores variaron de 1 min 50 s a 23 min 57 s), y los perfiles de respuesta para VO_2 y concentración de lactato en sangre fueron indicativos de ejercicio de intensidad severa (Figura 4): el VO_2 alcanzó $3,78 \pm 0,51$ L·min⁻¹ en el punto de agotamiento y no fue significativamente diferente del $VO_{2,max}$ (límite de confianza de 95% 0,29, -0,02). La concentración de lactato sanguíneo se incrementó continuamente en función del tiempo, alcanzando un máximo de $8,3 \pm 2,2$ mM hasta el agotamiento (Figura 4).

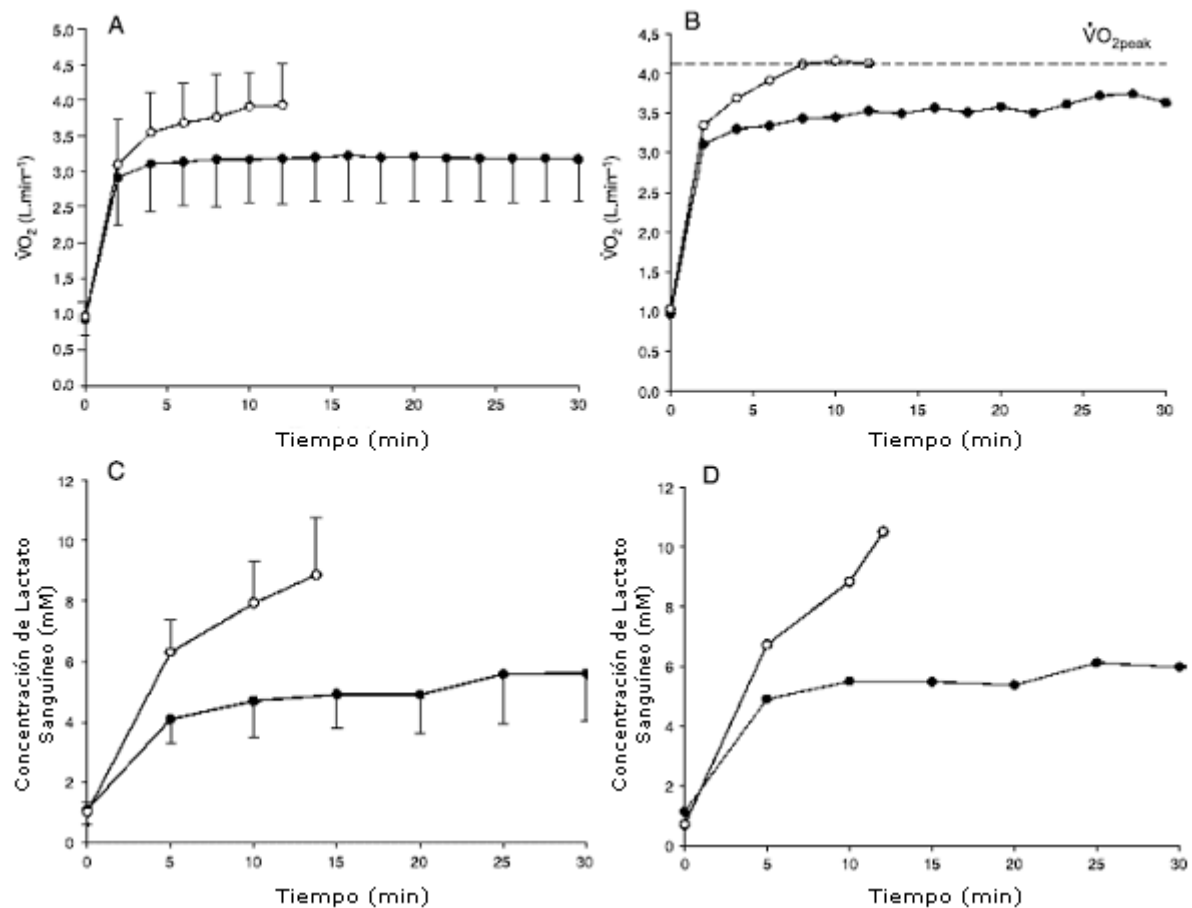


Figura 4. Respuestas del consumo de oxígeno (Panel A) y concentración de lactato sanguíneo (Panel C) frente a ejercicio de producción de potencia constante 15 W por debajo (●) y por encima (○) de la producción de potencia alcanzada en los últimos 30 s del test máximo. En los paneles se presenta la respuesta media (\pm DS) en los nueve sujetos que completaron los 30 min de ejercicio en la menor producción de potencia. Los Paneles B y D muestran estas mismas respuestas obtenidas en el sujeto presentado en la Figura 3. Es importante señalar que el $\dot{V}O_2$ y la concentración de lactato sanguíneo continuaron aumentando hasta el agotamiento en la mayor producción de potencia (alcanzando el $\dot{V}O_{2max}$ en el Panel B) pero se estabilizaron a partir de los 10 min en la producción de potencia más baja.

DISCUSION

El presente estudio ha demostrado que un test de esfuerzo máximo de 3-min en bicicleta ergométrica contra una resistencia fija da como resultado un perfil reproducible de producción de potencia y un alcance de $\dot{V}O_{2max}$, que es consistente con nuestra primera y segunda hipótesis (Figuras 1 y 3B). La producción de potencia del final del test se ubicó por encima de la asociada con el GET pero por debajo de la producción de potencia alcanzada al final del test incremental (Figuras 2 y 3). Nuestra tercera hipótesis era que esta producción de potencia representaría el límite entre los dominios de intensidad fuerte y severa. Por consiguiente, nosotros predijimos que el ejercicio a tasa de trabajo constante realizado por debajo de esta producción de potencia produciría respuestas de concentración de lactato sanguíneo y de $\dot{V}O_2$ de estado estable, mientras que los ejercicios por encima de la producción de potencia del final del test producirían un aumento continuo en estas variables hasta que ocurriera la fatiga. El presente estudio confirma esta hipótesis: 9 de los 11 sujetos pudieron completar los 30 min de ejercicio en la potencia 15 W por debajo de la potencia del final del test y siete de éstos sujetos cumplieron el criterio de perfil de concentración de lactato sanguíneo en estado estable (Figura 4). De manera contraria, ninguno de los sujetos completó los 30 min del ejercicio a 15 W por encima de la producción de potencia del final del test y en todos los casos la concentración de lactato sanguíneo y $\dot{V}O_2$ continuaron subiendo hasta el agotamiento, punto en el cual el $\dot{V}O_2$ no fue significativamente diferente del $\dot{V}O_{2max}$. Estos datos sugieren que es posible establecer el $\dot{V}O_{2max}$ durante un test de esfuerzo máximo de 3-min y que éste test también representa un método prometedor para identificar la producción de potencia máxima en estado estable en un solo test.

Los tests de ejercicios máximo se utilizan generalmente para medir la producción de potencia dinámica máxima. Por lo tanto, la duración del test normalmente se limita a menos de 90 s (30). Algunos informes anteriores han sugerido que pueden usarse tests máximos para establecer el VO_2max en los adultos (12) y adolescentes (29), mientras que otros no (13, 30). Los resultados del presente estudio demuestran que el VO_2max puede ser alcanzado durante el ejercicio máximo aún cuando la producción de potencia disminuye considerablemente por debajo de los niveles asociados con el logro de VO_2max durante el ejercicio incremental (Tabla 1, Figuras 1 y 3). Está bien establecido que la tasa de trabajo no necesita ser máxima para que los sujetos alcancen el VO_2max ; el ejercicio realizado a tasa de trabajo submáxima constante en el dominio de intensidad severa produce un componente lento de VO_2 que conduce al VO_2 hacia VO_2max antes de que se manifieste la fatiga (7, 14, 23). Ahora también queda claro que el ejercicio máximo de 1,5-3 min de duración también produce el VO_2max , con alguna evidencia de que el VO_2 disminuye hacia el final del test en adolescentes o adultos [(29), estudio presente]. Estos datos se suman al cuerpo creciente de evidencia que indica que el VO_2max puede ser establecido utilizando una variedad de funciones de tasa de trabajo-fuerza. Los tests incrementales/rampas, tests máximos que duran 1,5-3 min, y los tests submáximos de tasa de trabajo constante en el dominio de intensidad severa realizados hasta el agotamiento volitivo, todos producen el mismo valor final de VO_2 (es decir, el VO_2max) (7,29).

Una característica común de los trabajos anteriores que han investigado el ejercicio máximo prolongado es que la producción de potencia cae por debajo de la producción de potencia asociada con la producción del VO_2max en un test de ejercicio incremental o en rampa (6, 8, 12, 29, 30). Nuestra discusión original era que si la caída en la potencia fuera continua hasta que pudiera observarse una nivelación, la potencia del fin del test igualaría la producción de potencia que delimita los dominios de intensidad fuerte y severa. Esta discusión proviene del hecho que la relación potencia-duración es hiperbólica (19-21), y la potencia crítica representa la producción de potencia máxima en estado estable (20) y W' representa una cantidad fija de trabajo que puede ser realizada por encima de la potencia crítica (9).

Nosotros planteamos que si la práctica del ejercicio máximo continuara durante el tiempo suficiente para reducir W' a cero, entonces la producción de potencia al final del test necesariamente igualaría el estado estable máximo. Sin embargo, nosotros no establecimos los parámetros de la relación de potencia-duración en el presente estudio. La definición de potencia crítica requiere extrapolación matemática de los resultados de una serie de pruebas de ejercicio exhaustivas a la asíntota en el eje de la potencia (10) que puede (20, 21) o no puede (4, 22) producir la producción de potencia máxima en estado estable. Por lo tanto al establecer la potencia crítica, permanecería sin ser determinado el perfil de respuesta fisiológica por encima y por debajo del hipotético límite entre la intensidad fuerte-severa (la potencia del final del test). En cambio, nosotros elegimos determinar directamente las respuestas fisiológicas al ejercicio por encima y por debajo de la producción de potencia del final del test, usando un criterio previamente establecido para alcanzar una concentración de lactato sanguíneo en estado estable (aumento en la concentración de lactato sanguíneo <1 mM entre 10 y 30 min de ejercicio) (4, 15, 17). Así, si la potencia del final del test definiera con éxito el límite entre ejercicio de intensidad fuerte y ejercicio de intensidad severa, se esperaría una respuesta de concentración de lactato sanguíneo en estado estable inferior, pero no superior a ésta potencia.

Al final del test máximo de 3-min, la producción de potencia había disminuido aproximadamente 70% con respecto a la producción de potencia medida al final del test incremental y la producción de potencia mostró sólo una pequeña disminución (y estadísticamente insignificativa) en los últimos 60 s del test (de aproximadamente 5 W). Por lo tanto, pudimos realizar con éxito un test de ejercicio máximo en donde la producción de potencia alcanzó un nivel relativamente estable (potencia del final del test, Figuras. 2 y 3). Los resultados medios para la producción de potencia al final del test respecto a los otros parámetros de función aeróbica mostrados en la Tabla 1 son notablemente similares a los datos de potencia crítica presentados por Poole et al. (20) (ver su Tabla 2). Por ejemplo, la potencia al final del test ocurrió a aproximadamente el 43% Δ , mientras que Poole et al. (20) informaron que la potencia crítica ocurrió a aproximadamente el 46% Δ . Otros investigadores han informado resultados similares para la intensidad del ejercicio en el máximo estado estable (22, 25). Los resultados presentes demuestran que el ejercicio por encima de la potencia del final del test se sitúa en el dominio del ejercicio de intensidad severa donde el VO_2 y la concentración de lactato sanguíneo aumentaron hasta que se presentó el agotamiento. El ejercicio por debajo de la potencia del final del test se ubicó en la mayoría de los sujetos, en el dominio de intensidad fuerte donde la concentración de lactato sanguíneo y VO_2 eventualmente se estabilizaron. En este dominio de intensidad, el ejercicio puede ser mantenido durante un período de tiempo considerable, pero finito, con la fatiga probablemente mediada por las limitaciones en la tasa de uso de sustratos o capacidad para utilizar los sustratos y/o por la hipertermia (11). Estos resultados demuestran que un test de ejercicio máximo de 3-min puede ser utilizado para estimar una producción de potencia en el límite fisiológicamente importante entre el dominio de ejercicios de intensidad fuerte y el de intensidad severa en más de 60% de los sujetos evaluados. Si bien no es perfecto, creemos que éste es un resultado prometedor a la luz de la observación que la producción de potencia al final del test ocurrió en la región correcta del espectro de intensidades de ejercicio para provocar el máximo estado estable (o potencia crítica) en todos los sujetos (es decir, aproximadamente a medio camino entre la producción de potencia del GET y la del final del test incremental).

Los resultados de la presente investigación tienen implicancias potencialmente importantes para la relación potencia-duración. Asumiendo que la potencia crítica y el máximo estado estable pueden usarse recíprocamente [(16, 20, 25), pero también consultar (4,22)], los presentes resultados sugieren que la fórmula actual de la relación potencia-duración (ecuaciones 1 y 2) es fundamentalmente correcta y puede ser generalizada al ejercicio extremo máximo. La producción de potencia durante el ejercicio máximo de 3 min disminuyó hasta, o por lo menos hacia, una producción de potencia por debajo de la cual se puede observar un perfil de respuesta de concentración de lactato y de VO_2 en estado estable (Figuras 3 y 4). Esto se esperaría si \dot{W} se redujera a cero durante el ejercicio, punto en el cual la potencia más alta que podría mantenerse teóricamente sería el estado estable máximo (5, 10). Actualmente no hay ningún método estándar para establecer \dot{W} durante el ejercicio máximo (8). Sin embargo, el trabajo total realizado por encima de la potencia del final del test fue $14,3 \pm 4,7$ kJ, que es del mismo orden de magnitud que las estimaciones de \dot{W} presentadas en la bibliografía (5, 8, 10, 20, 21), lo que sugiere que \dot{W} también podría ser estimada a partir de un test máximo de 3-min. Así, el gasto de \dot{W} aporta la explicación más simple para el alcance de la potencia del final del test, en lo que se refiere a su proximidad con otros hitos fisiológicos (producciones de potencia al final del protocolo incremental y GET) y los perfiles de respuestas fisiológicas por encima y por debajo de la potencia del final del test. Sin embargo, es necesario realizar investigaciones adicionales para abordar cuantitativamente esta noción.

Aunque la mayoría de sujetos en este estudio pudieron alcanzar un estado estable por debajo de la potencia del final del test, cuatro sujetos no pudieron hacerlo. Nosotros no realizamos evaluaciones adicionales para establecer la magnitud de la diferencia entre la potencia del final del test y el verdadero límite del dominio de intensidad fuerte-severa en estos sujetos, aunque parecería que en dos de los cuatro casos la diferencia habría sido pequeña porque estos sujetos realizaron 30 min de ejercicio. Por consiguiente, nosotros sólo podemos especular acerca de por qué el test de 3-min no estableció el límite del dominio en estos sujetos. En primer término, es importante destacar que en ningún caso se subestimó el máximo estado estable: o el test de 3-min fue exitoso para identificar el límite o lo sobreestimó. Por consiguiente, el fracaso del test no fue causado por la fatiga muscular que inducía una caída continua en la producción de potencia hasta una producción de potencia al final del test debajo del máximo estado estable. Es posible que 3 min de ejercicio máximo, en algunos sujetos, no sea la duración suficiente para alcanzar la \dot{W} completa. Sin embargo, esto es improbable porque Medbø et al. (18) informaron que un déficit máximo de O_2 (teóricamente análogo a \dot{W}) (11) podría acumularse en aproximadamente 2 min de ejercicio de potencia constante, y Gatin y Lawson (13) informaron que el déficit de O_2 acumulado durante el ejercicio máximo no fue diferente de los ejercicios de 60 s o 90 s de duración. Quizás más probablemente, promediar la producción de potencia en los últimos 30 s de ejercicio, aunque aparentemente justificado porque la producción de potencia en los últimos 60 s no estaba disminuyendo significativamente, podría haber producido una sobrestimación del límite del dominio fuerte-severa en esos sujetos en los cuales la producción de potencia estaba todavía disminuyendo durante los últimos 60 s. En estos sujetos, un test de mayor duración (por ejemplo, 4 min) o un período de promedio de datos más corto (15 contra 30 s) habrían permitido la correcta identificación del límite entre los dominios. Sin embargo es posible, que prolongar la duración del test más allá de 3 min, produjera una caída continua en la producción de potencia en el tiempo, haciendo parecer como casual el éxito aparente del test de 3-min para estimar el estado estable máximo, aunque no menos útil. Así, se eligió una duración de test de 3 min como un compromiso entre un test que sería demasiado corto para que la producción de potencia se nivele y uno que podría ser inútilmente largo, como un test de 5 min en el que los sujetos podrían realizar ejercicios máximos con un pequeño cambio o sin cambio en la producción de potencia durante los 3 min finales. Nosotros no afirmamos, ni tenemos alguna manera de demostrar, que 3 min es la duración óptima del test.

La bicicleta ergométrica *Lode Excalibur Sport* que usamos en el presente estudio no funcionaba isocinéticamente, a diferencia de las bicicletas ergométricas utilizadas en los informes recientes (8, 29). Por consiguiente, nosotros fijamos el factor lineal de la bicicleta ergométrica, de modo que cuando (si) los sujetos alcanzaran su cadencia preferida, ellos estarían alcanzando una producción de potencia a medio camino entre GET y $\text{VO}_{2\text{max}}$. Nosotros adoptamos esta metodología dando prioridad a normalizar la resistencia al pedaleo sobre la base de la masa corporal (12,13) porque intentábamos establecer el máximo estado estable, y no el rendimiento anaeróbico. No sabemos si la metodología adoptada en el estudio presente es la estrategia óptima para alcanzar una potencia al final del tests válida en todos los sujetos. Sin embargo, la cadencia al final del test de 3-min era similar a la cadencia preferida de los sujetos de 80-90 rpm, a pesar de la variación en la producción de potencia en la muestra (187-338 W). Con una resistencia equivalente a 7,5% de la masa corporal, que ha sido normalmente utilizada para fijar la resistencia en la bicicleta ergométrica *Monark* para los tests máximos (12,13), los sujetos habrían alcanzado su producción de potencia del final del test a aproximadamente 50 rpm, aproximadamente 30-40 rpm por debajo de su cadencia preferida. Es necesario realizar investigaciones adicionales para establecer si otras resistencias (basadas en el estado fisiológico o la masa corporal) o el uso de una bicicleta ergométrica isocinética (8, 29) modificarían los resultados del test.

En síntesis, nosotros hemos aportado evidencia que indica que el perfil de potencia en un test máximo de 3-min contra una resistencia fija es reproducible, y que el test puede ser utilizado para establecer el $\text{VO}_{2\text{max}}$ en adultos, extendiendo los resultados recientes de Williams et al. (29) en adolescentes. El presente estudio ha demostrado por primera vez, que durante el ejercicio máximo, la producción de potencia cae hacia, y en más del 60% de los casos alcanza, una producción

de potencia por debajo de la cual, generalmente se producen las respuestas de concentración de lactato sanguíneo y VO₂ pulmonares de estado estable, pero por encima de la cual estas variables suben inexorablemente hasta que se produce la fatiga. Por consiguiente el presente trabajo sugiere que una serie de ejercicio máximo de 3-min es un método prometedor para estimar el máximo estado estable, que anteriormente, para ser identificado requería series repetidas ejercicios prolongado y/o exhaustivo.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer a los Profesores Andrew M. Jones y David C. Poole por los consejos y estímulo respecto al presente trabajo. Al primer autor le gustaría agradecer al Profesor Brian J. Whipp por preguntar, al pasar, si el ejercicio máximo puede ser utilizado para establecer el límite entre los dominios fuerte y severo. Nosotros esperamos que los resultados aporten el comienzo de una respuesta.

REFERENCIAS

1. BEAVER, W. L., K. WASSERMAN, and B. J. WHIPP (1973). On-line computer analysis and breath-by-breath display of exercise function tests. *J. Appl. Physiol.* 34:128-132
2. BEAVER, W. L., K. WASSERMAN, and B. J. WHIPP (1986). A new method for detecting anaerobic threshold by gas exchange. *J. Appl. Physiol.* 60:2020-2027
3. BENEKE, R., and S. P. VON DUVILLARD (1996). Determination of maximal lactate steady state response in selected sports events. *Med. Sci. Sports Exerc.* 28:241-246
4. BRICKLEY, G., J. DOUST, and C. A. WILLIAMS (2002). Physiological responses during exercise to exhaustion at critical power. *Eur. J. Appl. Physiol.* 88:146-151
5. COATS, E. M., H. B. ROSSITER, J. R. DAY, A. MIURA, Y. FUKUBA, and B. J. WHIPP (2003). Intensity-dependent tolerance to exercise alter attaining V O₂max in humans. *J. Appl. Physiol.* 95:483-490
6. DAVIES, C. T. M., and E. R. SANDSTROM (1989). Maximal mechanical power output and capacity of cyclists and young adults. *Eur. J. Appl. Physiol.* 58:838-844
7. DAY, J. R., H. B. ROSSITER, E. M. COATS, A. SKASICK, and B. J. WHIPP (2003). The maximally attainable VO₂ during exercise in humans: the peak vs. max issue. *J. Appl. Physiol.* 95:1901-1907
8. DEKERLE, J., G. BRICKLEY, A. J. P. HAMMOND, J. S. M. PRINGLE, and H. CARTER (2006). Validity of the two-parameter model in estimating the anaerobic work capacity. *Eur. J. Appl. Physiol.* 96:257-264
9. FUKUBA, Y., A. MIURA, M. ENDO, A. KAN, K. YANAGAWA, and B. J. WHIPP (2003). The curvature constant parameter of the power-duration curve for varied-power exercise. *Med. Sci. Sports Exerc.* 35:1413-1418
10. FUKUBA, Y., and B. J. WHIPP (1999). A metabolic limit on the ability to make up for lost time in endurance events. *J. Appl. Physiol.* 87:853-861
11. GAESSER, G. A., and D. C. POOLE (1996). The slow component of oxygen uptake kinetics in humans. *Exerc. Sport Sci. Rev.* 24:35-70
12. GASTIN, P. B., D. L. COSTILL, D. L. LAWSON, K. KRZEMINSKI, and G. K. MCCONELL (1995). Accumulated oxygen deficit during supramaximal all-out and constant intensity exercise. *Med. Sci. Sports Exerc.* 27:255-263
13. GASTIN, P. B., and D. L. LAWSON (1994). Variable resistance all-out test to generate accumulated oxygen deficit and predict anaerobic capacity. *Eur. J. Appl. Physiol.* 69:331-336
14. HILL, D. W., D. C. POOLE, and J. C. SMITH (2002). The relationship between power and the time to achieve VO₂max. *Med. Sci. Sports Exerc.* 34:709-714
15. JONES, A. M., and J. H. DOUST (1998). The validity of the lactate minimum test for determination of the maximal lactate steady state. *Med. Sci. Sports Exerc.* 30:1304-1313
16. JONES, A. M., and D. C. POOLE (2005). Introduction to oxygen uptake kinetics and historical development of the discipline. In: *Oxygen Uptake Kinetics in Sport, Exercise and Medicine*, A. M. Jones and D. C. Poole (Eds.). London: Routledge, pp. 4-35
17. KILDING, A. E., and A. M. JONES (2005). Validity of a single-visit protocol to estimate the maximum lactate steady state. *Med. Sci. Sports Exerc.* 37:1734-1740
18. MONOD, H., and J. SCHERRER (1965). The work capacity of a synergic muscular group. *Ergonomics* 8:329-338
19. POOLE, D. C., S. A. WARD, G. W. GARDNER, and B. J. WHIPP (1988). Metabolic and respiratory profile of the upper limit for prolonged exercise in man. *Ergonomics* 31:1265-1279
20. POOLE, D. C., S. A. WARD, and B. J. WHIPP (1990). The effects of training on the metabolic and respiratory profile of high-intensity cycle ergometer exercise. *Eur. J. Appl. Physiol.* 59:421-429
21. PRINGLE, J. S. M., and A. M. JONES (2002). Maximal lactate steady state, critical power and EMG during cycling. *Eur. J. Appl. Physiol.* 88:214-226
22. ROSTON, W. L., B. J. WHIPP, J. A. DAVIES, D. A. CUNNINGHAM, R. M. EFFROS, and K. WASSERMAN (1987). Oxygen uptake kinetics and lactate production during exercise in humans. *Am. Rev. Respir. Dis.* 135:1080-1084
23. SMITH, J. C., and D. W. HILL (1993). Stability of parameter estimates derived from the power/time relationship. *Can. J. Appl. Physiol.* 18:43-47

24. SMITH, C.G.M., and A. M. JONES (2001). The relationship between critical velocity, maximal lactate steady-state velocity and lactate turn point velocity in runners. *Eur. J. Appl. Physiol.* 85:19-26
25. WHIPP, B. J (1994). The slow component of O₂ uptake during heavy exercise. *Med. Sci. Sports Exerc.* 26:1319-1326
26. WHIPP, B. J., J. A. DAVIS, F. TORRES, and K. WASSERMAN (1981). A test to determine parameters of aerobic function during exercise. *J. Appl. Physiol.* 50:217-221
27. WHIPP, B. J., and M. MAHLER (1980). Dynamics of pulmonary gas exchange during exercise. In: Pulmonary Gas Exchange, Vol. II. *Organism and Environment*, J. B. West (Eds.). London: Academic Press, pp. 33-96
28. WILLIAMS, C. A., S. RATEL, and N. ARMSTRONG (2005). Achievement of peak VO₂ during a 90-s maximal intensity cycle sprint in adolescents. *Can. J. Appl. Physiol.* 30:157-171
29. WITHERS, R. T., G. VAN DER PLOEG, and J. P. FINN (1993). Oxygen deficits incurred during 45, 60, 75 and 90-s maximal cycling on an air-braked ergometer. *Eur. J. Appl. Physiol.* 67:185-191

Cita Original

Burnley, M., J. H. Doust, And A. Vanhatalo. A 3-min All-Out Test to Determine Peak Oxygen Uptake and the Maximal Steady State. *Med. Sci. Sports Exerc.*, Vol. 38, No. 11, pp. 1995-2003, 2006.