PubliCE, (PubliCE) 2013

Article

Efectos del Entrenamiento de Fuerza de Alta Intensidad sobre el Área de Sección Transversal del Músculo del Muslo, los Determinantes de Rendimiento y el Rendimiento en Ciclistas Bien Entrenados

Bent R. Rønnestad[1], Ernst Albin Hansen[2] y Truls Raastad[2]

[1]*Lillehammer University College, Lillehammer, Norway.*
[2]*Norwegian School of Sport Sciences, Oslo, Norway.*

RESUMEN

El propósito de este estudio fue investigar el efecto del entrenamiento de fuerza de alta intensidad sobre el área de sección transversal del músculo del muslo (CSA), en los determinantes de rendimiento de ciclismo y en el rendimiento en ciclistas altamente entrenados. Veinte ciclistas altamente entrenados fueron asignados o a un grupo que realizó entrenamiento de resistencia usual combinado con entrenamiento con sobrecarga de alta intensidad [E + S; n = 11 (Varones= 11)] o a un grupo que realizó solo el entrenamiento de resistencia usual [E; n = 9 (varones= 7, mujeres= 2)]. El entrenamiento con sobrecarga realizado por el grupo E + S consistió en realizar cuatro ejercicios para la zona inferior del cuerpo [3 x 4-10 repeticiones máximas (RM)], dos veces por semana durante 12 semanas. Antes y después de la intervención se midieron el área de la sección transversal del músculo del muslo (CSA), la fuerza isométrica en media sentadilla, producción de potencia en 30 s en el test de Wingate, consumo de oxígeno máximo (VO_{2max}), producción de potencia en una concentración de lactato sanguíneo de 2 mmol l^{-1} ([la]) y el rendimiento, en forma de producción de potencia media en un test máximo de 40 min. El grupo E + S experimentó un aumento mayor al del grupo E en el CSA del músculo del muslo, la fuerza isométrica máxima y la potencia máxima en el test de Wingate. La producción de potencia en [la] de 2 mmol l^{-1} y la producción de potencia media en la prueba máxima de 40 min aumentaron en el grupo E + S ($P < 0,05$). En el grupo E, sólo se observó una tendencia hacia un aumento en el rendimiento de la prueba máxima de 40 min ($P = 0,057$). Los dos grupos mostraron aumentos similares en VO_{2max} ($P < 0,05$). En conclusión, el agregado de entrenamiento de la fuerza al entrenamiento usual de resistencia, mejoró los determinantes de rendimiento en ciclismo así como también el rendimiento en los ciclistas altamente entrenados. Es importante destacar que el entrenamiento con sobrecarga incorporado incrementó el CSA del muslo sin causar un aumento en la masa corporal.

Palabras Clave: Producción de potencia aeróbica, producción de potencia máxima, entrenamiento simultáneo, entrenamiento con sobrecarga, rendimiento de resistencia

INTRODUCCION

El rendimiento en las pruebas contrarreloj de ciclismo cuya duración es superior a 10-15 min está principalmente determinado por el consumo de oxígeno del rendimiento (el consumo de oxígeno que puede ser mantenido durante un período dado de tiempo) y la economía del ciclismo (Joyner y Coyle 2008). El consumo de oxígeno del rendimiento es nuevamente determinado por el consumo de oxígeno máximo (VO_{2max}) y la capacidad de trabajar a un porcentaje elevado de VO_{2max} durante la competencia (Jones y Carter 2000). El consumo de oxígeno del rendimiento y la economía del ciclismo son determinantes importantes de la potencia crítica. Esta última, en teoría, es la mayor producción de potencia a carga constante que puede ser mantenida durante un tiempo prolongado y está relacionada con la capacidad de resistencia (Poole et al. 1988). Se ha demostrado que la potencia crítica es una medida de aptitud útil para ciclistas entrenados (Smith et al. 1999) y se relaciona con el máximo estado estable de lactato (Jones y Carter, 2000). Además, se ha mostrado que cualquier cambio hacia la derecha de la relación entre producción de potencia y lactato sanguíneo, refleja un mayor umbral de lactato independientemente de como haya sido determinado el umbral de lactato (Tokmakidis et al. 1998). Esto coincide con el hallazgo que seis métodos diferentes de determinación del umbral de lactato presentaron correlaciones significativas con el rendimiento de una prueba contrarreloj de ciclismo de 1 hora (Bishop et al. 1998). El entrenamiento aeróbico de resistencia tiene el potencial de mejorar éstos determinantes del rendimiento (Jones y Carter 2000) y por lo tanto, ha sido el tipo de entrenamiento preferido para aumentar el rendimiento en ciclismo. Sin embargo, la incorporación del entrenamiento de la fuerza en la preparación de ciclistas entrenados también ha recibido un poco de atención durante las últimas dos décadas (Bastiaans et al. 2001; Bishop et al. 1999; Hickson et al. 1988).

El efecto del entrenamiento con sobrecarga en el rendimiento de ciclismo de resistencia y en los indicadores tradicionales de rendimiento en ciclismo, como el umbral del lactato y la economía del ciclismo, no ha sido establecido con detalle. La incorporación de entrenamiento con sobrecarga al entrenamiento de resistencia usual no parece afectar el VO_{2max} en los individuos entrenados en resistencia (Bishop et al. 1999; Hausswirth et al. 2009; Hoff et al. 1999; Millet et al.. 2002; Paavolainen et al. 1999; Støren et al. 2008). Se ha demostrado que el entrenamiento con sobrecarga aumenta el umbral del lactato en individuos desentrenados (Izquierdo et al. 2003; Marcinik et al. 1991) pero no en los individuos entrenados en resistencia (Bishop et al. 1999; Hausswirth et al. 2009; Millet et al. 2002; Støren et al. 2008). También se ha demostrado que individuos desentrenados mejoran la economía del ciclismo después de un período de entrenamiento con sobrecarga (Loveless et al. 2005), un hallazgo que coincide con lo observado en corredores entrenados en resistencia (Millet et al. 2002; Støren et al. 2008), pero contradice lo observado en ciclistas bien entrenados (Aagaard et al. 2007).

El rendimiento en carreras de ciclismo de ruta depende de varios factores además de los mencionados anteriormente. Uno de estos factores es la capacidad de generar una elevada producción de potencia durante un período corto de tiempo. Esta capacidad es esencial cuando el ciclista necesita alcanzar una fuga, alejarse del pelotón, o ganar un esprint final. La W_{max} y la producción de potencia media y máxima en un test de Wingate son factores que reflejan la capacidad de generar una elevada producción de potencia durante un período corto de tiempo. Se ha informado que la producción de potencia máxima en los individuos con entrenamiento de sobrecarga es mayor que en los individuos desentrenados (Häkkinen et al. 1987) y que el entrenamiento de la fuerza en sujetos que no son ciclistas aumenta la producción de potencia máxima (Beck et al. 2007; Chromiak et al. 2004). Los últimos hallazgos se explican supuestamente por el hecho que la producción de potencia máxima en ciclismo es afectada por el área de sección transversal del musculo de la pierna (CSA) y que el entrenamiento con sobrecarga aumenta esta CSA (Izquierdo et al. 2004). Sin embargo, se ha demostrado que el entrenamiento con sobrecarga junto con entrenamiento de resistencia perjudican el desarrollo de producción de potencia en comparación con el entrenamiento con sobrecarga solo (Häkkinen et al. 2003; Kraemer et al. 1995). También se ha demostrado que entrenar la fuerza y la resistencia de manera simultánea interfiere con el desarrollo de la hipertrofia muscular (Kraemer et al. 1995; Putman et al. 2004). Bastiaans et al. (2001) observaron que remplazando una parte del entrenamiento de resistencia con entrenamiento de la fuerza explosiva con carga liviana producía un aumento mayor en la producción de potencia máxima a corto plazo que el entrenamiento de resistencia solo. Sin embargo, no se han investigado los efectos sobre el CSA muscular, producción de potencia máxima en el test de Wingate y W_{max}, que produce agregar entrenamiento con sobrecarga de alta intensidad al entrenamiento de resistencia usual de ciclismo, en ciclistas altamente entrenados.

El objetivo principal del estudio presente fue investigar cómo afectaría el agregado de entrenamiento con sobrecarga de alta intensidad al entrenamiento de resistencia usual durante 12 semanas, al CSA del músculo del muslo, la fuerza del músculo y a los determinantes de rendimiento que reflejan los aspectos más importantes de una carrera de ciclismo, como la producción de potencia en un test Wingate y W_{max} en ciclistas bien entrenados. Además, también investigamos los efectos del entrenamiento con sobrecarga sobre los determinantes de rendimiento de ciclismo de resistencia a largo plazo, entre los que se incluye la economía del ciclismo y producción de potencia en una concentración de lactato de 2 mmol l^{-1}, y así como también el rendimiento de resistencia real a largo plazo (producción de potencia media en un test máximo de 40 min). Planteamos la hipótesis que el agregado de entrenamiento de fuerza de alta intensidad al entrenamiento de

resistencia usual aumentaría el CSA del músculo del muslo, la fuerza isométrica máxima en media sentadilla, la producción de potencia máxima en el test de Wingate, W_{max}, la economía de ciclismo, la producción de potencia en [la] de 2 mmol l^{-1} y la producción de potencia media en una prueba máxima de 40 min.

METODOS

Participantes

Veintitrés ciclistas bien entrenados, que se encontraban compitiendo a nivel nacional, participaron voluntariamente en este estudio que fue aceptado por la división regional de Southern Norway del Comité Nacional de Ética para las Investigaciones. Todos los ciclistas firmaron un formulario de consentimiento informado antes de participar. Ninguno de los ciclistas había realizado entrenamiento con sobrecarga en los 6 meses previos al estudio. Tres de los ciclistas no completaron el estudio debido a enfermedad durante el período de intervención y sus datos fueron excluidos.

Diseño Experimental

Las pruebas fueron realizadas al comienzo (pre-intervención) y al final (post-intervención) de una intervención de 12 semanas. Los ciclistas fueron divididos en un grupo de prueba y un grupo control. El grupo de prueba [E + S; n = 11 (11 varones), edad 27 ± 2 años] realizaron un entrenamiento con sobrecarga de alta intensidad además del entrenamiento de resistencia usual. Los ciclistas del grupo control [E; n = 9 (7 varones y 2 mujeres), edad 30 ± 2 años] simplemente continuaron su entrenamiento de resistencia usual. La intervención fue realizada durante la fase de preparación previa a la temporada de competición.

Entrenamiento

El entrenamiento de resistencia consistió principalmente en ejercicios de ciclismo, pero también se incorporó algo de esquí campo traviesa (hasta un 10% de la duración total del entrenamiento). La duración e intensidad del entrenamiento se calcularon sobre la base de registros de los monitores de frecuencia cardíaca (HR) (Polar, Kempele, Finlandia). El entrenamiento de resistencia fue dividido en cinco zonas de HR: (1) 60-72%, (2) 73-82%, (3) 83-87%, (4) 88-92%, y (5) 93-100% de HR máxima. En la Tabla 1 se puede observar una apreciación global de la distribución del entrenamiento de resistencia en cinco zonas de intensidad en ambos grupos. La duración del entrenamiento de resistencia y la distribución de este entrenamiento dentro de las cinco zonas de entrenamiento fueron similares entre los grupos. No se observó ninguna diferencia significativa entre E + S y E al comparar la duración de entrenamiento total, que incluyó el entrenamiento con sobrecarga así como el entrenamiento de estabilidad del centro del cuerpo (core) y los estiramientos (151 ± 13 y 138 ±13 h, respectivamente (P = 0,47). Esto se debió principalmente a que el grupo E realizó un volumen de entrenamiento de resistencia mayor pero no significativo.

Zona de intensidad (en relación a $HR_{máx}$) (%)	E + S (n = 11)	E (n = 9)
60-72	80,2 ± 12,3	81,4 ± 15,5
73-82	24,7 ± 8,2	28,1 ± 9,4
83-87	9,4 ± 1,4	13,4 ± 3,6
88-92	4,2 ± 1,0	5,2 ± 2,3
93-100	0,8 ± 0,2	1,7 ± 1,0
Tiempo total de entrenamiento	151 ± 13	138 ± 13

Tabla 1. *Duración (en horas) del entrenamiento de resistencia y del entrenamiento total realizados durante el período de intervención de 12 semanas en el grupo que agregó entrenamiento con sobrecarga de alta intensidad a su entrenamiento de resistencia (E + S) y en el grupo que realizó sólo entrenamiento de resistencia usual (E). Los valores se expresan en forma de Media ± SE.* HR_{max}=

Frecuencia cardíaca máxima.

El entrenamiento con sobrecarga de alta intensidad realizado por los ciclistas en el grupo E+S fue focalizado en los músculos de las piernas y se realizó dos veces por semana. En los días en que correspondía realizar tanto el entrenamiento de la fuerza como el de la resistencia, se sugirió a los ciclistas que realizaran el entrenamiento con sobrecarga en la primera sesión de entrenamiento del día y el entrenamiento de la resistencia en la segunda sesión. Una revisión de los diarios de entrenamiento de los ciclistas confirmó que los ciclistas obedecieron mucho esta sugerencia. La adhesión al programa de fuerza fue alta, y los ciclistas del grupo E + S completaron el 97 ± 1% de las sesiones de entrenamiento con sobrecarga establecidas. La meta del programa de entrenamiento de la fuerza era mejorar el rendimiento en ciclismo utilizando ejercicios específicos de ciclismo siempre que fuera posible. Dado que la fuerza máxima durante el pedaleo se produce aproximadamente en un ángulo de la rodilla de 90° (Coyle et al. 1991), los ejercicios del entrenamiento de la fuerza fueron realizados con un ángulo de la rodilla fijado entre 90° y la extensión casi completa. Además, dado que cuando los ciclistas pedalean trabajan cada pierna alternadamente, en casos en que fuera viable se seleccionaron ejercicios para una sola pierna. Aunque se ha informado que no existe un déficit de fuerza significativo durante la extensión de rodillas bilateral en comparación con la extensión de rodilla unilateral en ciclistas (Howard y Enoka 1991), otros estudios han encontrado un déficit de fuerza en los ejercicios bilaterales de piernas (Cresswell y Ovendal 2002; Schantz et al. 1989). Suponiendo que es la velocidad intencional y no la velocidad real la que determina la respuesta al entrenamiento específico de la velocidad (Behm y Sale 1993), el entrenamiento con sobrecarga de alta intensidad fue realizado centrando su foco en la movilización máxima en la fase concéntrica (aprox. 1 seg. de duración), mientras que la fase excéntrica no específica del ciclismo fue realizada más despacio (con una duración aprox. de 2-3 s).

Al comienzo de cada sesión de entrenamiento con sobrecarga, los ciclistas realizaron una entrada en calor de 10 min con una intensidad seleccionada por ellos mismos en una bicicleta ergométrica, seguida por dos o tres series de entrada en calor de media sentadillas efectuadas con cargas que se incrementaban gradualmente. Los ejercicios de fuerza realizados fueron: media sentadilla, press de piernas con una pierna por vez, flexión de cadera con una sola pierna y flexión de plantar de tobillo. Todos los ciclistas fueron supervisados por un investigador en todos los entrenamientos durante las primeras 2 semanas y después de esto por lo menos una vez cada dos semanas a lo largo del período de intervención. Durante las primeras 3 semanas, los ciclistas entrenaron con series de 10 repeticiones máximas (RM) en la primera sesión semanal y series de 6RM en la segunda sesión semanal. Durante las siguientes 3 semanas, las series fueron ajustadas a 8RM y 5RM para la primera y segunda sesiones semanales, respectivamente. Durante las 6 semanas finales, las series se ajustaron a 6RM y 4RM, respectivamente. Los ciclistas fueron animados a aumentar las cargas de sus RM continuamente a lo largo del período de intervención y se les permitió recibir ayuda en la última repetición. El número de series en cada ejercicio siempre fue tres.

Pruebas

Los tests pre y post intervención fueron divididos en cuatro sesiones de evaluación separadas en días separados de la siguiente manera: (Día 1) medición del CSA del músculo del muslo; (Día 2) prueba de fuerza máxima; (Día 3) test de ciclismo incremental para la determinación del perfil de lactato sanguíneo y el consumo de oxígeno máximo; y (Día 4) test de Wingate de 30 s y prueba máxima de 40 min. Se solicitó a los ciclistas que no realizaran ejercicio de alta intensidad el día previo a las pruebas, para prepararse como lo harían para una competencia y que consumieran el mismo tipo de alimento antes de cada prueba. No se les permitió comer durante la hora previa a una prueba o consumir café u otros productos que contuvieran cafeína durante las últimas 3 h previas a una prueba. Los ciclistas fueron refrescados con un ventilador durante los tests de ciclismo. Todas las pruebas fueron realizadas en condiciones medioambientales similares (20-22°C). Las pruebas pre y post intervención fueron realizadas en el mismo momento del día para evitar influencia de ritmo circadiano. Todas las pruebas de ciclismo se realizaron en la misma bicicleta ergométrica con freno electomagnético (*Lode Excalibur Sport, Lode B. V., Groningen Países Bajos*) la cual fue ajustada según las preferencias de cada ciclista para la altura del asiento, distancia entre el asiento y manubrio, y distancia horizontal entre la punta de asiento y el eje de pedalier. Se permitió que los ciclistas seleccionaran su cadencia preferida durante todas las pruebas de ciclismo y utilizaron sus propios zapatos y pedales.

Medición del Área de la Sección Transversal del Músculo del Muslo

Para medir el CSA del musculo del muslo se utilizó tomografía de resonancia magnética (*Magnetom Avanto 1,5 Tesla, Siemens AG, Munich, Alemania*). Los participantes fueron estudiados en posición supina con los pies fijos y subidos en una almohadilla para mantener el músculo de la zona posterior del muslo comprimido contra el banco. La máquina se centró 2/3 distalmente en el fémur y se obtuvieron nueve imágenes transversales comenzando en el borde proximal de la rótula y desplazándose hacia la cresta iliaca, con un espacio de 35 mm entre las láminas. Cada imagen representa una lámina de 5 mm de grosor. Las imágenes fueron subidas subsecuentemente a una computadora para ser analizadas con posterioridad.

Los músculos del muslo fueron divididos en compartimientos de extensor y flexor/aductor utilizando una función de delimitación del software. El CSA de los músculos del muslo se midió en las tres imágenes mas cercanas y para el análisis estadístico se utilizó el valor medio del CSA de las tres imágenes. Usando un método similar, en exámenes repetidos en ocho individuos se informó que el coeficiente de variación era de 2% (Moss. 1997).

Test de Fuerza

La fuerza máxima en extensores de piernas se midió como la fuerza máxima contra una plataforma de fuerza (*SG-9, Advanced Mechanical Technologies, Newton, MA, USA*, frecuencia de muestreo de 1 kHz) durante la realización de un ejercicio de media sentadilla isométrica. Esta prueba fue realizada utilizando un soporte (rack) hecho a medida localizado encima de la plataforma de fuerza y atornillado al suelo. Se estimuló de manera verbal a los participantes durante la prueba. Los sujetos realizaron cuatro media sentadillas isométricas voluntarias máximas con 2 minutos de recuperación entre cada esfuerzo. En el análisis estadístico se utilizó el valor más alto alcanzado de los cuatro esfuerzos. Antes de la prueba pre intervención, se realizaron dos sesiones del familiarización con el propósito de familiarizar a los ciclistas con la técnica adecuada para realizar las sentadillas y probar el procedimiento. Las pruebas de fuerza siempre fueron precedidas por una entrada en calor de 10 min en una bicicleta ergométrica. La profundidad de la media sentadilla fue fijada para que el ángulo de la rodilla fuera 90°. Para asegurar ángulos de rodilla similares durante todas las pruebas, la profundidad de la sentadilla de cada ciclista fue supervisada cuidadosamente y marcada en una escala en el soporte. De manera similar, también se supervisó la ubicación de los pies de cada ciclista para asegurar la misma posición durante todas las pruebas. Las pruebas pre y post intervención fueron realizadas usando el mismo equipo con la misma ubicación del ciclista en relación al equipo, y fueron supervisadas por el mismo investigador. La prueba de fuerza de post intervención se realizó 3 a 5 días después de la última sesión de entrenamiento con sobrecarga.

Test de Determinación del Perfil de Lactato Sanguíneo

El perfil de lactato sanguíneo se determinó en cada participante graficando la concentración de lactato [la] en función de la producción de potencia. El test de ciclismo continuo incremental para medir el perfil del lactato en sangre comenzó sin entrada en calor con 5 min de pedaleo a 125 W. Los sujetos continuaron pedaleando y la producción de potencia fue incrementada 50 W cada 5 min. Se tomaron muestras de sangre de la yema de los dedos al final de cada período de 5 min y éstas fueron analizadas para obtener la concentración de lactato en sangre completa [la] usando un analizador de lactato portátil (*Lactate Pro LT-1710, Arcray Inc., Kyoto, Japón*). La prueba finalizaba cuando se alcanzaba o superaba una concentración de lactato de 4 mmol l^{-1}. El consumo de oxígeno (VO_2) y la frecuencia cardíaca (HR) se midieron durante los últimos 3 min de cada período y para los análisis estadísticos se usaron los valores medios. La HR se midió mediante un monitor de frecuencia cardíaca Polar S610i (*Electro Oy, Kempele, Finlandia*). El VO_2 se determinó (tiempo de muestreo de 30 seg) usando un sistema metabólico informatizado con cámara de mezclado (*Oxycon Pro, Erich Jaeger, Hoechberg, Alemania*). El sistema metabólico ha sido validado contra el método de la bolsa de Douglas y se ha establecido que es un sistema exacto para medir el VO_2 (Foss y Hallén 2005). Los analizadores de gases fueron calibrados con gases de calibración certificados de concentraciones conocidas antes de cada prueba. La turbina de flujo (*Triple V, Erich Jaeger, Hoechberg, Germany)* fue calibrada antes de cada prueba con una jeringa de calibración 3L, serie 5530 (*Hans Rudolph, Kansas, EE.UU.*). El índice de esfuerzo percibido fue registrado a los 4 min y 50 seg en cada período, utilizando la escala de Borg de 6-20 (Borg 1982). A partir de esta prueba de ciclismo incremental continuo, se calculó la producción de potencia en una [la] de 2 mmol l^{-1}. La producción de potencia se calculó a partir de la relación entre la concentración de lactato ([la]) y la producción de potencia mediante regresión lineal entre los puntos de los datos.

Test de VO_{2max}

Después de finalizar la prueba de perfil de lactato, los ciclistas descansaron durante 3 h antes de realizar otra prueba de ciclismo incremental para la determinación del consumo de oxígeno máximo (VO_{2max}). Esta prueba incremental y sus resultados se han descripto en otros trabajos (Rønnestad et al. 2009). Brevemente, los ciclistas realizaron una entrada en calor de 10 min seguida por un breve descanso. Luego comenzaron el test con 1 min de pedaleo a una producción de potencia correspondiente a 3 W kg-1 (aprox. redondeando 50 W). Luego la producción de potencia fue incrementada 25 W cada minuto hasta el agotamiento. Cuando los ciclistas estimaban que no podrían tolerar otro aumento de 25 W en la producción de potencia, se les sugirió que continuaran pedaleando simplemente en la producción de potencia actual tanto tiempo como pudieran (normalmente 30-90 seg.). El VO_{2max} junto con los datos complementarios fueron calculados como el promedio de las dos medidas más altas de VO_2. La producción de potencia aeróbica máxima (W_{max}) fue calculada como la producción de potencia media durante los últimos 2 min del test incremental.

Test de Wingate

El test de Wingate de 30 segundos también se realizó en una bicicleta ergométrica Lode. La resistencia de freno se fijó en 0,8 N.m por kg masa corporal (BM). El protocolo de Wingate se controló desde una computadora personal (por medio del

software *Lode Wingate*, versión 1,0.14) que fue conectada a la bicicleta ergométrica. Después de una de entrada en calor de 10 min y 1 minuto de descanso los ciclistas empezaron a pedalear a ~ 60 rpm sin resistencia de freno. Luego de una cuenta regresiva de 3 seg, se aplicó la resistencia al disco trasero y permaneció constante a lo largo de la serie de pedaleo máximo durante 30 seg. El software calculó la producción de potencia mecánica como fuerza x velocidad. La velocidad de pedaleo fue detectada en línea mediante una computadora y los valores de potencia mecánica fueron obtenidos de manera instantánea. El software *Lode Wingate* presentó la producción de potencia máxima como la mayor producción de potencia alcanzada en cualquier momento durante la serie de pedaleo máximo de 30 segundos La producción de potencia media se presentó como la producción de potencia promedio mantenida a lo largo de los 30 segundos y la potencia mínima fue la menor producción de potencia alcanzada durante el test de Wingate de 30 seg. La producción de potencia máxima y la producción de potencia mínima fueron utilizadas para calcular el índice de fatiga, definido aquí como la disminución en la producción de potencia por segundo desde la producción de potencia máxima a la producción de potencia mínima. Los ciclistas permanecieron sentados a lo largo de la prueba. Se proporcionó un fuerte estímulo verbal durante la prueba. Para conseguir la mayor potencia máxima, se solicitó a los sujetos que pedalearan tan rápido como pudieran desde el principio y que no conservaran la energía para la última parte del test. Después del test de Wingate, los ciclistas se recuperaron pedaleando a aprox. 100 W durante10 min antes de empezar la prueba máxima de 40 min.

Prueba máxima de 40 min

En esta prueba se solicitó a los ciclistas que pedalearan a la producción de potencia promedio más alta que pudieran. El rendimiento se midió como la producción de potencia media durante los 40 min de ciclismo. Se les permitió ajustar la producción de potencia a lo largo de la prueba por medio de una unidad controlada electrónicamente fijada en el manillar. Los ciclistas no recibieron ninguna retroalimentación sobre la HR y cadencia, pero eran conscientes del tiempo restante y de la producción de potencia instantánea. Se les permitió colocarse de pie de vez en cuando en los pedales durante la prueba y beber agua cuando lo desearan.

Análisis Estadísticos

Todos los datos en los textos, figuras y tablas se presentan en forma de Media ± SE. Para analizar las diferencias entre los grupos antes de la intervención (pre intervención), se utilizó el Test t de Student de muestras desapareadas. Las mediciones pre y post intervención para cada grupo se compararon mediante el Test t de Student para muestras apareadas. Para evaluar las diferencias en los cambios relativos (pre vs post intervención) entre los grupos, se aplicó el test t de Student para muestras desapareadas. Para evaluar las diferencias dentro de los grupos (valores pre vs post) en las respuestas en el test de perfil del lactato se aplicó un ANOVA de mediciones repetidas de dos vías (con momento del período de intervención y producción de potencia como factores) con el test post hoc de Bonferroni. Además, se aplicó ANOVA de mediciones repetidas de dos vías (grupo y producción de potencia como factores) y el test post hoc de Bonferroni para analizar las diferencias en los cambios relativos (valores pre vs post) entre los grupos. Los análisis de ANOVA fueron realizados mediante el software *GraphPad Prisma 5 (GraphPad Software, Inc. CA, EE.UU.).* El análisis de correlación (Coeficiente de correlación producto-momento de Pearson) y el Test t fueron realizados con Excel 2003 (*Microsoft Corporattion, Redmond, WA, EE.UU.*). Todos los análisis que arrojaran un valor de $P<0,05$ fueron considerados estadísticamente significativos.

RESULTADOS

Pre-intervención

No se observaron diferencias significativas entre los grupos E + S y E antes del período de intervención en las mediciones de BM, CSA del músculo del muslo, fuerza máxima en media sentadilla isométrica, VO_{2max}, ni en las pruebas de rendimiento de ciclismo.

Masa Corporal, Área de Sección Transversal del Músculo del Muslo y Fuerza Máxima

En el grupo E + S se observó una tendencia de aumento en la masa corporal (BM) de 76,0 ± 2,8 kg antes de la intervención a 76,7 ± 2,5 kg después del período de intervención (1,0 ± 0,5%; $P = 0,066$), pero no se observó ningún cambio significativo en el grupo E (el valor pre-intervención fue 75,2± 3,2 kg). No se encontró ninguna diferencia significativa entre los grupos en los cambios relativos en BM pre vs post intervención. Los cambios relativos en el CSA del músculo del muslo pre vs post intervención fueron mayores en el grupo E + S que en E ($P <0,01$, Figura 1), dado que el grupo E + S aumentó el CSA del músculo del muslo 4,6 ± 0,5% ($P <0,01$), mientras que no se observó ningún cambio en E. La fuerza máxima en media sentadilla isométrica se incrementó en E + S un 21,2 ± 4,9% ($P <0,01$, Figura 2), pero

permaneció sin cambios en E. En consecuencia, el aumento en la fuerza en el período de intervención (pre vs post intervención) fue mayor en el grupo E + S que en E (P <0,01).

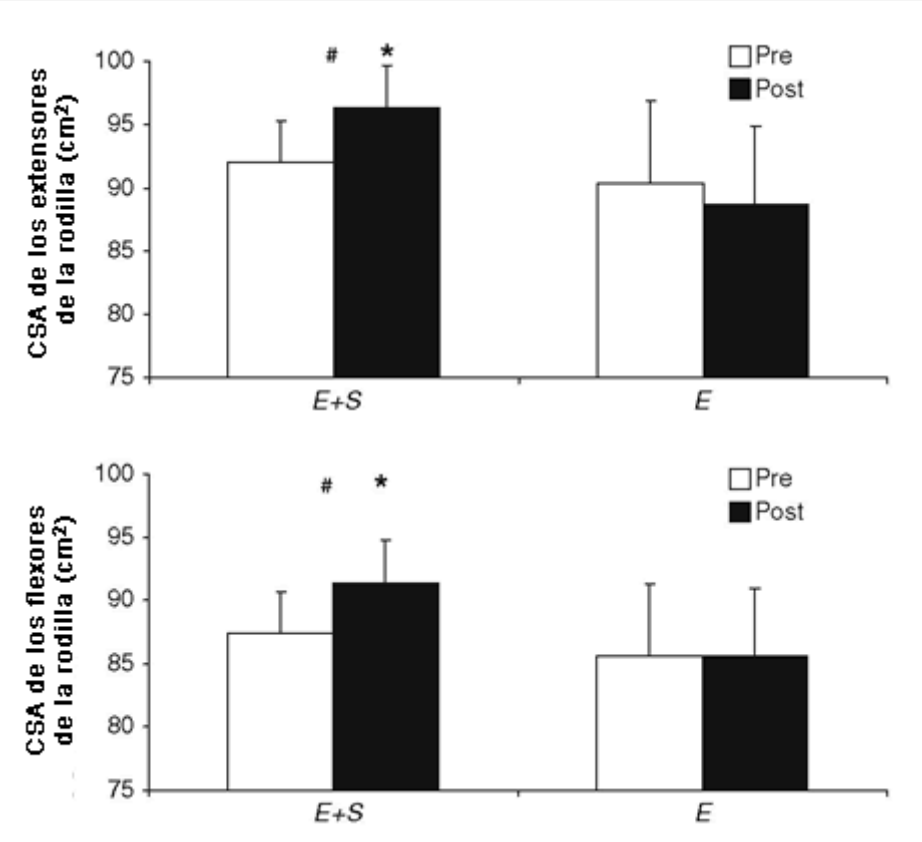

Figura 1. *Área transversal (CSA) de extensores de la rodilla (panel superior) y flexores de la rodilla (panel inferior) antes (Pre) y después (Post) del período de intervención de 12 semanas en el que un grupo de ciclistas agregó entrenamiento con sobrecarga de alta intensidad a su entrenamiento de resistencia (E + S; n = 11), mientras que el otro grupo de ciclistas realizó solo entrenamiento de resistencia (E; n = 9). * Se observan diferencias respecto a la condición Pre (P <0,05). #El cambio relativo entre Pre y Post fue mayor en el grupo E + S que en el grupo E (P <0,01)*

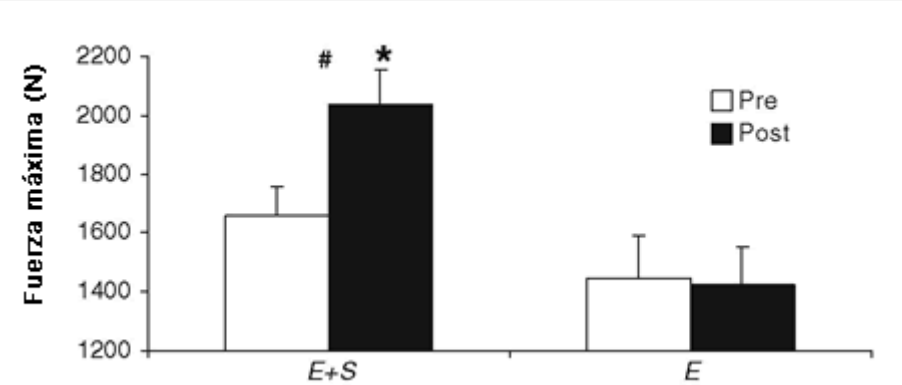

Figura 2. *Fuerza máxima en media sentadilla isométrica antes (Pre) y después (Post) del período de intervención de 12 semanas en el que un grupo de ciclistas agregó entrenamiento con sobrecarga de alta intensidad a su entrenamiento de resistencia (E + S; n = 11), mientras que el otro grupo de ciclistas realizó su entrenamiento de resistencia habitual (E; n = 9). *Se observan diferencias con Pre (P <0,01). #El cambio relativo entre Pre y Post fue mayor en el grupo E + S que en el grupo E (P <0,01)*

Producción de Potencia en el Test de Wingate

El aumento en la producción de potencia máxima durante el test de Wingate de 30 s fue mayor en E + S que en E (P <0,05, Figura 3), dado que la producción de potencia máxima aumentó en E + S (9,4 ± 2,9%, P <0,01), pero no se observó ningún cambio significativo en E. En los datos correspondientes a pre-intervención, los datos agrupados de ambos grupos de la fuerza máxima en media sentadilla isométrica y del CSA de los extensores de la rodilla se correlacionaron con la producción de potencia máxima en Wingate (r = 0,70 y 0,69 respectivamente, P <0,001). Además, el aumento en CSA de extensores de la rodilla se correlacionó con el aumento en la producción de potencia máxima en el test de Wingate (r = 0,47, P <0,05). Debido a un aumento no significativo en la producción de potencia media durante el test de Wingate de 30 segundos en E + S (1,2 ± 1,1%) y una disminución no significativa en E (1,8± 1,1%), el cambio relativo en la producción de potencia media pre vs post intervención presentó una tendencia a ser diferente entre los grupos (P = 0,065, Tabla 2). El índice de fatiga aumentó en E + S (20 ± 7%, P <0,05), mientras que en el grupo E no se observó ninguna diferencia significativa, lo que produjo una diferencia significativa entre los grupos (P <0,05, Tabla 2). No se observaron cambios significativos para ningún grupo en la producción de potencia mínima durante el Test de Wingate de 30 seg.

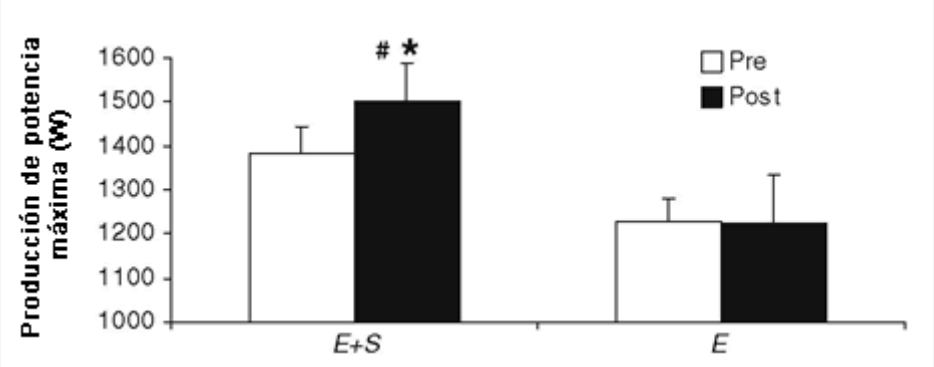

Figura 3. *Producción de potencia máxima en el Test de Wingate antes (Pre) y después (Post) del período de intervención de 12 semanas en el que un grupo de ciclistas agregó entrenamiento con sobrecarga de alta intensidad a su entrenamiento de resistencia (E + S; n = 11), mientras que el otro grupo de ciclistas realizó su entrenamiento de resistencia habitual (E; n = 9). *Se observan diferencias con Pre (P <0,01). #El cambio relativo entre Pre y Post fue mayor en el grupo E + S que en el grupo E (P <0,01)*

	E + S (n= 11)		E (n = 9)	
	Pre	Post	Pre	Post
Potencia máxima (W)	1382 ± 63	1502 ± 55*,#	1230 ± 98	1223 ±110
Potencia máxima ajustada por la masa corporal (W kg^{-1})	18,1 ±0,6	19,6 ± 0,6*,#	16,2 ± 0,9	16,2 ± 1,0
Potencia media (W)	794 ± 21	803 ± 20	724 ± 53	710 ± 52
Potencia media ajustada por la masa corporal (W kg^{-1})	10,4 ± 0,2	10,5 ± 0,2	9,6 ± 0,5	9,5 ± 0,4
Potencia mínima (W)	572 ±18	558 ± 13	524 ± 30	531 ± 34
Índice de Fatiga (W s^{-1})	31,0 ±2,0	36,3 ±1,8*,#	27,1 ± 2,8	26,7 ± 3,1

Tabla 2. *Datos del Test de Wingate antes (Pre) y después de (Post) el período de intervención de 12 semanas en cual un grupo de ciclistas agregó entrenamiento con sobrecarga de alta intensidad a su entrenamiento de resistencia habitual (E + S), mientras que el otro grupo de ciclistas realizó solamente el entrenamiento de resistencia habitual (E). Los valores se expresan en forma de Media ±SE. * Presenta diferencias respecto al valor Pre (P<0,01); # El cambio relativo del valor Pre al valor Post es mayor en el grupo E + S que en el grupo E (P<0,05).*

VO_{2max} y W_{max}

Tanto E + S como E aumentaron el VO_{2max} durante el período de intervención (P <0,05). El aumento en VO_{2max} ajustado según la masa corporal (BM) presentó un valor promedio de 3,3 ± 1,4% para E + S y de 6,0 ± 2,0% para E, y no se observó

una diferencia estadística entre los grupos (Tabla 3). W_{max} aumentó 4,3 ±1,1% en E + S (P <0,05), pero en E no se observó ningún cambio significativo (Tabla 3).

	E + S (« = 11)		E (n = 9)	
	Pre	*Post*	*Pre*	*Post*
W_{max} (W)	407 ±10	425 ± 14*	403 ± 25	411 ± 24
VO_{2max}				
$L.min^{-1}$	5,10 ± 0,17	5,28 ± 0,22*	5,10 ± 0,33	5,20 ± 0,33*
$mL.kg^{-1}.min^{-1}$	66,8 ± 1,6	69,0 ± 1,6*	65,9 ± 2,0	69,8 ± 2,5*
RER	1,10 ± 0,01	1,10 ± 0,01	1,08 ± 0,01	1,07 ± 0,01
HR_{max} ($lat.min^{-1}$)	188 ±3	188 ±3	185 ±3	184 ±3
$[La^-]$ ($mmol.L^{-1}$)	13,0 ± 0,6	14,0 ± 0,5	12,2 ± 0,9	12,6 ± 0,6
RPE	18,9 ± 0,2	19,1 ± 0,2	19,0 ± 0,2	18,9 ± 0,2

Tabla 3. *Resultados del test incremental para medir el consumo de oxígeno máximo antes (Pre) y después (Post) de las 12 semanas de entrenamiento con sobrecarga de alta intensidad junto con entrenamiento de la resistencia (E+S) y de entrenamiento de la resistencia solo (E). Los valores se expresan en forma de Media ±SE. BM= Masa Corporal; VO_{2max}= Consumo de oxígeno máximo; RER=Tasa de intercambio respiratorio; HR_{max}= Frecuencia cardíaca máxima; [La-]= Concentración de lactato; RPE= Índice de esfuerzo percibido. * Presenta diferencias respecto al valor Pre (P <0,05).*

Perfil de lactato Sanguíneo

En el grupo E + S se observó un aumento en la producción de potencia en una concentración de lactato de 2 mmol l^{-1} pasando de 242 ± 10 a 251 ± 10 W (P <0,05), mientras que no se observaron cambios significativos en el grupo E (el valor inicial era 246 ± 20 W). En consecuencia, el perfil de la concentración de lactato en el grupo E + S presentó una variación hacia la derecha debido a la menor [la] en la producción de potencia más alta (275 W; P <0,05), mientras que no se observó ningún cambio en E. El análisis de ANOVA mostró que durante el test incremental continuo, la economía de ciclismo, determinada como el consumo de oxígeno ajustado por la masa corporal, permaneció inalterada durante el período de intervención para E + S y E en diferentes producciones de potencia(125, 175, 225, y 275 W). La frecuencia cardíaca (HR) fue en promedio 6 ± 1 lat.min-1 más baja en las cuatro producciones de potencia post-intervención en comparación con los valores pre-intervención en el grupo E + S, mientras que el grupo E tenía una HR que en promedio era 7 ± 2 lat min-1 más baja en las tres producciones de potencia más bajas (P <0,05). Una comparación de los cambios relativos pre vs post intervención entre E+S y E no arrojó ninguna diferencia significativa entre los grupos en los parámetros medidos durante la prueba de perfil de lactato.

Producción de Potencia Media en el Test Máximo de 40 min

La producción de potencia media durante el test máximo de 40 min aumentó 6,0 ± 1,7% (P <0,01) pre vs post intervención en E + S (de 281 ± 8 a 297 ± 9 W, respectivamente) y presentó una tendencia hacia un aumento de 4,6 ± 2,0% (P = 0,054) en el grupo E (el valor inicial fue 281 ± 16 W). No se observó ninguna diferencia significativa entre los grupos entre los valores pre y post intervención.

Cadencia Seleccionada Libremente

La cadencia seleccionada libremente se mantuvo sin cambios desde el inicio hasta el final de la intervención en ambos grupos. Las cadencias seleccionadas libremente durante los tests del perfil de lactato, VO_{2max}, y prueba máxima de 40 min fueron 87 ± 2, 94 ± 2, y 94 ± 1 rpm, respectivamente (como media en los grupos del estudio, puntos de tiempo y momentos del período de intervención).

DISCUSION

Un nuevo hallazgo del presente estudio fue que la producción de potencia máxima del test de Wingate, W_{max}, la producción de potencia en una concentración de lactato de 2 mmol l^{-1} y la producción de potencia media durante un test máximo de 40

min aumentaron en ciclistas bien entrenados que agregaron entrenamiento con sobrecarga de alta intensidad al entrenamiento de resistencia usual. Ambos grupos aumentaron su VO_{2max}. Para los ciclistas en el grupo control que realizaron solo el entrenamiento de resistencia usual; el único cambio observado entre las variables medidas fue una tendencia hacia arriba en la producción de potencia promedio en el test máximo de 40 min.

El aumento del 21% observado en la fuerza máxima durante la media sentadilla isométrica fue ligeramente menor al 27-38% de aumento observado en las investigaciones anteriores de 1RM en atletas de resistencia que realizan entrenamiento de la fuerza y de resistencia juntos a lo largo de 12 semanas (Bishop et al. 1999; Guglielmo et al. 2009; Hickson et al. 1988). En esos estudios, los tests de 1RM se realizaron usando uno de los ejercicios de entrenamiento, pero los ejercicios utilizados en nuestras pruebas de fuerza eran diferentes de los usados durante la intervención con entrenamiento de la fuerza, de modo que la falta de especificidad de los ejercicios podría ser probablemente responsable del menor aumento. De hecho, normalmente se observa un menor aumento en la fuerza después de un período de entrenamiento con sobrecarga cuando se evalúa la fuerza de una manera diferente a los ejercicios de entrenamiento (Murphy y Wilson 1996; Wilson et al. 1996). Así, el protocolo de entrenamiento de la fuerza en el estudio presente tuvo éxito en aumentar la fuerza de las piernas hasta una magnitud esperable cuando se agrega entrenamiento de la fuerza al entrenamiento de resistencia.

Los resultados del estudio presente sugieren que un aumento sustancial en la fuerza de los músculos de las piernas puede lograrse con un pequeño o sin un aumento en el peso corporal, lo que es muy importante para los atletas que compiten en deportes en los cuales para el rendimiento es importante tener una baja BM (por ejemplo ciclismo de ascenso o carreras). Observaciones similares han sido informadas en estudios realizados con triatletas y esquiadores a campo traviesa (Hoff et al. 1999; Millet et al. 2002). Notablemente, sin medir el CSA del músculo, los autores concluyen a menudo que en ausencia de un aumento en la BM, el aumento en la fuerza probablemente se deba principalmente a adaptaciones neurales. De hecho, durante un período corto de entrenamiento de la fuerza, la contribución relativa de las adaptaciones neurales con la mejora de fuerza puede ser mayor que durante un período de entrenamiento de la fuerza mas largo. La mayoría de las intervenciones que se realizan con atletas de resistencia con entrenamiento de sobrecarga y de resistencia simultáneos se realizan al comienzo de la fase de preparación para la temporada siguiente después de la fase de recuperación de la temporada de competencia anterior. Por consiguiente, es posible que, aunque los atletas tengan un porcentaje de grasa corporal bajo, algo de la masa grasa podría ser reemplazada por masa muscular durante un período donde se realizan entrenamiento de sobrecarga y de resistencia simultáneos, lo que produciría un aumento en la masa muscular y una disminución en la masa grasa, sin cambio neto en BM. En el estudio presente, el CSA del músculo del muslo aumentó aproximadamente un 4,5%. Este cambio es aproximadamente la mitad del aumento del 9-11% en CSA observado en estudios que emplearon entrenamiento con sobrecarga similar, pero sin entrenamiento de resistencia (McCarthy et al. 2002; Rønnestad et al. 2007). Por consiguiente, el hallazgo presente parece apoyar la hipótesis que realizar entrenamiento de sobrecarga junto con entrenamiento de resistencia compromete adaptaciones del entrenamiento de la fuerza (Hickson 1980). Sin embargo, nuestros resultados contradicen la hipótesis que las adaptaciones neurales solas pueden explicar todos los aumentos de fuerza en atletas de resistencia que realizan entrenamiento de la fuerza y de la resistencia simultáneamente sin aumento en BM.

Los resultados de una mayor producción de potencia máxima de Wingate después de un período de entrenamiento de sobrecarga combinado con entrenamiento de resistencia de ciclismo son similares a resultados obtenidos después de un período entrenamiento de la fuerza solo (Beck et al. 2007; Chromiak et al. 2004). El hecho que la capacidad de generar producción de potencia alta durante un período corto de tiempo sea un factor importante para el rendimiento de ciclismo resalta la importancia práctica del resultado presente (Atkinson et al. 2003). La producción de potencia máxima ocurre a menudo durante los primeros 5 seg de un esprint máximo. Así, la producción de potencia máxima depende principalmente del tamaño de la masa muscular que participa y de la fuerza máxima de las piernas (Izquierdo et al. 2004; Van Praagh 2007). Por consiguiente, la mayor producción de potencia máxima observada en E + S probablemente se deba a un aumento en el CSA del músculo del muslo y de la fuerza de piernas. La correlación entre el aumento en CSA de extensores de la rodilla y el aumento en la producción de potencia máxima en Wingate apoya esta teoría, y se corrobora adicionalmente por los resultados del grupo E: no se observaron cambios en la CSA del músculo del muslo o fuerza de piernas y ningún aumento en la producción de potencia máxima. No se observaron cambios significativos en la producción de potencia media durante el test de Wingate de 30 s en ningún grupo. Dado que el sistema de energía glucolítico anaeróbico es un contribuyente de energía mayor en un esprint máximo de 30 seg. (Spriet et al. 1989), y que se ha observado que el entrenamiento con sobrecarga solo afecta mínimamente a este sistema (Minahan y Wood 2008; Tesch et al. 1987), este hallazgo no era sorprendente.

Lo mas importante es que la adición de entrenamiento con sobrecarga de alta intensidad dos veces por semana durante un período de intervención de 12 semanas no afectó negativamente el desarrollo de VO_{2max}. Otros estudios tampoco encontraron ningún deterioro en el desarrollo de VO_{2max} para individuos entrenados o desentrenados durante un período similar de entrenamiento con sobrecarga y de resistencia juntos (Balabinis et al. 2003; McCarthy et al. 1995). De hecho, el VO_{2max} aumentó en E y E + S, un hallazgo que contradice otros estudios en que los esquiadores a campo traviesa altamente

entrenados y triatletas no mejoraron el VO_{2max} después de un período de entrenamiento con sobrecarga suplemental (Hoff et al. 1999, 2002,; Millet et al. 2002). Sin embargo, el aumento de VO_{2max} en el estudio presente no fue sorprendente dado que los tests pre-intervención fueron realizados aproximadamente 1 mes después del fin de la temporada de competencia, un momento del año en el cual el volumen de entrenamiento de resistencia típicamente disminuye. Durante la fase preparatoria, cuyo comienzo coincidió con el test pre-intervención, ambos grupos aumentaron sustancialmente el volumen de entrenamiento de resistencia lo que probablemente explique el mayorVO_{2max}

Si bien W_{max} es un buen estimador del rendimiento de ciclismo (Hawley y Noakes 1992), en lo que se refiere a VO_{2max}, no hay ninguna diferencia mayor entre los ciclistas altamente entrenados y ciclistas de élite (Lucía et al. 1998). En otros términos, aunque hay una relación conocida entre VO_{2max} y W_{max}, parecería que W_{max} es el indicador clave que distingue a los ciclistas altamente entrenados de los ciclistas de élite (Lucía et al. 1998). Por consiguiente, es interesante destacar que aunque ambos grupos aumentaron VO_{2max}, sólo E + S aumentó W_{max}. La producción de potencia determina la velocidad durante el pedaleo y por lo tanto tiene un gran efecto sobre el rendimiento. Sin embargo los resultados son ambiguos. Mientras que nuestros resultados pueden ser corroborados por un estudio de entrenamiento con sobrecarga realizado con personas desentrenadas (Loveless et al. 2005), los mismos no coinciden con lo observado en otro estudio en el cual los ciclistas entrenados reemplazaron una porción de entrenamiento de resistencia por entrenamiento de la fuerza explosiva (Bastiaans et al. 2001). Las causas de estos resultados divergentes no han sido establecidas, pero podrían deberse a las diferencias en los programas de entrenamiento de fuerza, cumplimiento o circunstancias relacionadas a las evaluaciones.

En el estudio presente, agregar entrenamiento con sobrecarga al entrenamiento usual de resistencia mejoró la producción de potencia en una [la] de 2 mmol l^{-1} en los ciclistas entrenados en sobrecarga, pero no se observaron cambios en los ciclistas que realizaron solo el entrenamiento de resistencia usual. Este hallazgo coincide con un estudio previo realizado con personas desentrenadas (Marcinik et al. 1991), pero contradice lo observado en un estudio con ciclistas mujeres entrenadas (Bishop et al. 1999). La diferencia entre los sexos, la falta de especificidad del entrenamiento con sobrecarga o un volumen de entrenamiento de la fuerza bajo son las posibles explicaciones para la falta de aumento en el umbral del lactato en el estudio de Bishop et al. (1999). Se ha sugerido que la producción de potencia que corresponde a una [la] establecida o el punto de inflexión obtenido durante un test de ejercicio incremental continuo, sería un determinante de rendimiento de resistencia de ciclismo mas importante que el VO_{2max} (Bishop et al.. 2000; Coyle et al. 1991). Por lo tanto, la mejor producción de potencia a una [la] de 2 mmol l^{-1} potencialmente refleja un rendimiento de resistencia en ciclismo superior. Los mecanismos que explican este hallazgo no se conocen, aunque se han sugerido algunos. Por ejemplo, se ha demostrado que las fibras musculares de tipo I son más eficaces que las fibras de tipo II cuando se realiza ejercicio a una producción de potencia dada durante el ejercicio submáximo (Coyle et al. 1992; Hansen et al. 2002; Krustrup et al. 2008; Mogensen et al. 2006). Un aumento en la fuerza de fibras tipo I puede retardar la activación de las fibras de tipo II menos económicas, produciendo una producción de potencia más alta en la concentración de lactato de 2 mmol l^{-1}.

El rendimiento en el test máximo de 40 min se determina principalmente por el consumo de oxígeno del rendimiento y por la economía de ciclismo (Joyner y Coyle 2008). Sobre la base de los resultados de los mayores valores de VO_{2max}, W_{max} y producción de potencia a una [la] de 2 mmol l^{-1} no fue sorprendente que el grupo E + S también aumentara el rendimiento en el test máximo de 40 min. Sin embargo, el grupo E también mostró una tendencia hacia la mejora en el test máximo de 40 min, sin cambios significativos en W_{max} o en la producción de potencia en una [la] de 2 mmol l^{-1}. El mayor VO_{2max} probablemente provoque un mayor rendimiento del consumo de oxígeno durante el test máximo de 40-min en los grupos y así probablemente explique la tendencia hacia el aumento en el grupo E. La adición de una mayor producción de potencia en la [la] de 2 mmol l^{-1} en el grupo E + S podría haber producido una aumento adicional en el rendimiento del consumo de oxígeno y de esta manera, podría explicar la mejora significativa en el rendimiento del test máximo de 40-min en este grupo. Dado que la economía de ciclismo no mejoró en ningún grupo, no explicaría el cambio en el test máximo de 40 min. Cuando la producción de potencia media durante el test máximo de 40-min se expresó como porcentaje de W_{max}, no se observó ningún cambio en los grupos. Sin embargo, el mayor W_{max} en E + S podría haber contribuido con el aumento significativo en la producción de potencia media durante el test máximo de 40-min.

Bastiaans et al. (2001) observaron mejoras similares en una prueba contrarreloj de 1-h en ciclistas entrenados que remplazaron una porción de su entrenamiento de resistencia con entrenamiento de fuerza explosiva y en ciclistas entrenados que continuaron solo con el entrenamiento de resistencia. Sin embargo, las mejoras en las pruebas contrarreloj en ese estudio pueden ser explicadas por una mayor W_{max} en ambos grupos. El aumento observado en el rendimiento del test máximo de 40-min no concuerda con lo observado en un estudio que observó que ciclistas de sexo femenino entrenadas no mejoraron el rendimiento en una prueba contrarreloj de 1-h después de un período en el cual realizaron entrenamiento de fuerza y resistencia en conjunto (Bishop et al.. 1999). Sin embargo, en el estudio presente se incluyeron cuatro ejercicios para la parte inferior del cuerpo, pero en el estudio por Bishop et al. (1999) solo se incluyó ejercicios de sentadillas. Las diferencias en el régimen de entrenamiento de fuerza, sexo y tests de rendimiento pueden explicar las diferencias en los resultados. En el estudio presente se observaron aumentos mayores significativos en el grupo E + S en la fuerza, CSA y producción de potencia máxima de Wingate lo que potencialmente mejora la capacidad de los ciclistas de

generar una producción de potencia alta durante un período corto de tiempo. El hecho que no observáramos ninguna diferencia significativa entre los grupos con respecto a los cambios en W_{max}, producción de potencia en [la] de 2 mmol l^{-1} y producción de potencia media en el test máximo de 40-min puede ser interpretado como que agregar entrenamiento de la fuerza no mejora el rendimiento de resistencia a largo plazo. Sin embargo, sólo el grupo E + S obtuvo aumentos significativos en estas medidas, y teniendo en cuenta el elevado estatus de entrenamiento y de rendimiento de los ciclistas, podríamos sugerir que los aumentos observados en E + S son de importancia fisiológica pertinente. Se ha sugerido que los atletas de resistencia altamente entrenados tienen un margen estrecho de mejora en la capacidad aeróbica después de varios años de entrenamiento (Paavolainen et al. 1999).

En conclusión, incorporar entrenamiento con sobrecarga de alta intensidad al entrenamiento de resistencia usual dos veces por semana aumentó el CSA del músculo del muslo y la fuerza de piernas en ciclistas altamente entrenados sin comprometer el desarrollo de VO_{2max}. De mayor importancia práctica para los ciclistas es el hecho que el entrenamiento de la fuerza provocó aumentos en los parámetros relevantes para el rendimiento en las partes más vigorosas de una carrera de ciclismo, entre las que se incluyen la producción de potencia de Wingate y W_{max}. Además, los ciclistas que agregaron entrenamiento de la fuerza aumentaron la producción de potencia en [la] de 2 mmol l^{-1}, un parámetro tradicionalmente relacionado con el rendimiento de ciclismo de resistencia a largo plazo, así como el rendimiento (producción de potencia media) en un test máximo de 40 min. El único aumento aparente para los ciclistas que realizaron sólo entrenamiento de resistencia usual fue el aumento en VO_{2max} y una tendencia hacia un aumento en el rendimiento en un test máximo de 40-min

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento a los participantes por su tiempo y esfuerzo.

Conflicto de Declaración de Interés

Los autores declaran que no poseen conflicto de intereses.

REFERENCIAS

1. Aagaard P, Bennekou M, Larsson B, Andersen JL, Olesen J, Crameri R, Magnusson PS, Kjaer M (2007). Resistance training leads to altered fiber type composition and enhanced long-term cycling performance in elite competitive cyclists. *Med Sci Sports Exerc 39:S448–S449 abstract*
2. Atkinson G, Davison R, Jeukendrup A, Passfield L (2003). Science and cycling: current knowledge and future directions for research. *J Sports Sci 21:767–787*
3. Balabinis CP, Psarakis CH, Moukas M, Vassiliou MP, Behrakis PK (2003). Early phase changes by concurrent endurance and strength training. *J Strength Cond Res 17:393–401*
4. Bastiaans JJ, van Diemen AB, Veneberg T, Jeukendrup AE (2001). The effects of replacing a portion of endurance training by explosive strength training on performance in trained cyclists. *Eur J Appl Physiol 86:79–84*
5. Beck TW, Housh TJ, Johnson GO, Coburn JW, Malek MH, Cramer JT (2007). Effects of a drink containing creatine, amino acids, and protein combined with ten weeks of resistance training on body composition, strength, and anaerobic performance. *J Strength Cond Res 21:100–104*
6. Behm DG, Sale DG (1993). Velocity specificity of resistance training. *Sports Med 15:374–388*
7. Bishop D, Jenkins DG, Mackinnon LT (1998). The relationship between plasma lactate parameters, Wpeak and 1-h cycling performance in women. *Med Sci Sports Exerc 30:1270–1275*
8. Bishop D, Jenkins DG, Mackinnon LT, McEniery M, Carey MF (1999). The effects of strength training on endurance performance and muscle characteristics. *Med Sci Sports Exerc 31:886–891*
9. Bishop D, Jenkins DG, McEniery M, Carey MF (2000). Relationship between plasma lactate parameters and muscle characteristics in female cyclists. *Med Sci Sports Exerc 32:1088–1093*
10. Borg GA (1982). Psychophysical bases of perceived exertion. *Med Sci Sports Exerc 14:377–381*
11. Chromiak JA, Smedley B, Carpenter W, Brown R, Koh YS, Lamberth JG, Joe LA, Abadie BR, Altorfer G (2004). Effect of a 10-week strength training program and recovery drink on body composition, muscular strength and endurance, and anaerobic power and capacity. *Nutrition 20:420–427*
12. Coyle EF, Feltner ME, Kautz SA, Hamilton MT, Montain SJ, Baylor AM, Abraham LD, Petrek GW (1991). Physiological and biomechanical factors associated with elite endurance cycling performance. *Med Sci Sports Exerc 23:93–107*
13. Coyle EF, Sidossis LS, Horowitz JF, Beltz JD (1992). Cycling efficiency is related to the percentage of type I muscle fibers. *Med Sci Sports Exerc 24:782–788*
14. Cresswell AG, Ovendal AH (2002). Muscle activation and torque development during maximal unilateral and bilateral isokinetic knee extensions. *J Sports Med Phys Fitness 42:19–25*

15. Foss Ø, Hallén J (2005). Validity and stability of a computerized metabolic system with mixing chamber. *Int J Sports Med 26:569–575*
16. Guglielmo LG, Greco CC, Denadai BS (2009). Effects of strength training on running economy. *Int J Sports Med 30:27–32*
17. Häkkinen K, Kauhanen H, Komi PV (1987). Aerobic, anaerobic, assistant exercise and weightlifting performance capacities in elite weightlifters. *J Sports Med Phys Fitness 27:240–246*
18. Häkkinen K, Alen M, Kraemer WJ, Gorostiaga E, Izquierdo M, Rusko H, Mikkola J, Häkkinen A, Valkeinen H, Kaarakainen E, Romu S, Erola V, Ahtiainen J, Paavolainen L (2003). Neuromuscular adaptations during concurrent strength and endurance training versus strength training. *Eur J Appl Physiol 89:42–52*
19. Hansen EA, Andersen JL, Nielsen JS, Sjøgaard G (2002). Muscle fiber type, efficiency, and mechanical optima affect freely chosen pedal rate during cycling. *Acta Physiol Scand 176:185–194*
20. Hausswirth C, Argentin S, Bieuzen F, Le Meur Y, Couturier A, Brisswalter J (2009). Endurance and strength training effects on physiological and muscular parameters during prolonged cycling. *J Electromyogr Kinesiol. doi:10.1016/j.jelekin.2009.04.008*
21. Hawley JA, Noakes TD (1992). Peak power output predicts maximal oxygen uptake and performance time in trained cyclists. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol 65:79–83*
22. Hickson RC (1980). Interference of strength development by simultaneously training for strength and endurance. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol 45:255–263*
23. Hickson RC, Dvorak BA, Gorostiaga EM, Kurowski TT, Foster C (1988). Potential for strength and endurance training to amplify endurance performance. *J Appl Physiol 65:2285–2290*
24. Hoff J, Helgerud J, WisloV U (1999). Maximal strength training improves work economy in trained female cross country skiers. *Med Sci Sports Exerc 31:870–877*
25. Hoff J, Gran A, Helgerud J (2002). Maximal strength training improves aerobic endurance performance. *Scand J Med Sci Sports 12:288–295*
26. Howard JD, Enoka RM (1991). Maximum bilateral contractions are modified by neurally mediated interlimb effects. *J Appl Physiol 70:306–316*
27. Izquierdo M, Häkkinen K, Ibanez J, Anton A, Garrues M, Ruesta M, Gorostiaga EM (2003). Effects of strength training on submaximal and maximal endurance performance capacity in middle-aged and older men. *J Strength Cond Res 17:129–139*
28. Izquierdo M, Ibáñez J, Häkkinen K, Kraemer WJ, Ruesta M, Gorostiaga EM (2004). Maximal strength and power, muscle mass, endurance and serum hormones in weightlifters and road cyclists. *J Sports Sci 22:465–478*
29. Jones AM, Carter H (2000). The effect of endurance training on parameters of aerobic fitness. *Sports Med 29:373–386*
30. Joyner MJ, Coyle EF (2008). Endurance exercise performance: the physiology of champions. *J Physiol 586:35–44*
31. Kraemer WJ, Patton JF, Gordon SE, Harman EA, Deschenes MR, Reynolds K, Newton RU, Triplett NT, Dziados JE (1995). Compatibility of high-intensity strength and endurance training on hormonal and skeletal muscle adaptations. *J Appl Physiol 78:976–989*
32. Krustrup P, Secher NH, Relu MU, Hellsten Y, Söderlund K, Bangsbo J (2008). Neuromuscular blockade of slow twitch muscle fibres elevates muscle oxygen uptake and energy turnover during sub-maximal exercise in humans. *J Physiol 586:6037–6048*
33. Loveless DJ, Weber CL, Haseler LJ, Schneider DA (2005). Maximal leg-strength training improves cycling economy in previously untrained men. *Med Sci Sports Exerc 37:1231–1236*
34. Lucía A, Pardo J, Durántez A, Hoyos J, Chicharro JL (1998). Physiological differences between professional and elite road cyclists. *Int J Sports Med 19:342–348*
35. Marcinik EJ, Potts J, Schlabach G, Will S, Dawson P, Hurley BF (1991). Effects of strength training on lactate threshold and endurance performance. *Med Sci Sports Exerc 23:739–743*
36. McCarthy JP, Agre JC, Graf BK, Pozniak MA, Vailas AC (1995). Compatibility of adaptive responses with combining strength and endurance training. *Med Sci Sports Exerc 27:429–436*
37. McCarthy JP, Pozniak MA, Agre JC (2002). Neuromuscular adaptations to concurrent strength and endurance training. *Med Sci Sports Exerc 34:511–519*
38. Millet GP, Jaouen B, Borrani F, Candau R (2002). Effects of concurrent endurance and strength training on running economy and VO2 kinetics. *Med Sci Sports Exerc 34:1351–1359*
39. Minahan C, Wood C (2008). Strength training improves supramaximal cycling but not anaerobic capacity. *Eur J Appl Physiol 102:659–666*
40. Mogensen M, Bagger M, Pedersen PK, Fernström M, Sahlin K (2006). Cycling efficiency in humans is related to low UCP3 content and to type I fibers but not to mitochondrial efficiency. *J Physiol 571:669–681*
41. Moss BM, Refsnes PE, Abildgaard A, Nicolaysen K, Jensen J (1997). Effects of maximal effort strength training with different loads on dynamic strength, cross-sectional area, load-power and load-velocity relationships. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol 75:193–199*
42. Murphy AJ, Wilson GJ (1996). Poor correlations between isometric tests and dynamic performance: relationship to muscle activation. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol 73:353–357*
43. Paavolainen L, Häkkinen K, Hamalainen I, Nummela A, Rusko H (1999). Explosive-strength training improves 5-km running time by improving running economy and muscle power. *J Appl Physiol 86:1527–1533*
44. Poole DC, Ward SA, Gardner GW, Whipp BJ (1988). Metabolic and respiratory profile of the upper limit for prolonged exercise in man. *Ergonomics 31:1265–1279*
45. Putman CT, Xu X, Gillies E, MacLean IM, Bell GJ (2004). Effects of strength, endurance and combined training on myosin heavy chain content and fiber-type distribution in humans. *Eur J Appl Physiol 92:376–384*
46. Rønnestad BR, Egeland W, Kvamme NH, Refsnes PE, Kadi F, Raastad T (2007). Dissimilar effects of one- and three-set strength

training on strength and muscle mass gains in upper and lower body in untrained subjects. *J Strength Cond Res 21:157–163*
47. Rønnestad BR, Hansen, EA, Raastad T (2009). Strength training improves 5-min all-out performance following 185 min of cycling.
48. Schantz PG, Moritani T, Karlson E, Johansson E, Lundh A (1989). Maximal voluntary force of bilateral and unilateral leg extension. *Acta Physiol Scand 136:185–192*
49. Smith JC, Dangelmaier BS, Hill DW (1999). Critical power is related to cycling time trial performance. *Int J Sports Med 20:374–378*
50. Spriet LL, Lindinger MI, McKelvie RS, Heigenhauser GJ, Jones NL (1989). Muscle glycogenolysis and H + concentration during maximal intermittent cycling. *J Appl Physiol 66:8–13*
51. Støren O, Helgerud J, Støa EM, Hoff J (2008). Maximal strength training improves running economy in distance runners. *Med Sci Sports Exerc 40:1087–1092*
52. Tesch PA, Komi PV, Häkkinen K (1987). Enzymatic adaptations consequent to long-term strength training. *Int J Sports Med 8 (Suppl 1):66–69*
53. Tokmakidis SP, Léger LA, Pilianidis TC (1998). Failure to obtain a unique threshold on the blood lactate concentration curve during exercise. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol 77:333–342*
54. Van Praagh E (2007). Anaerobic Fitness tests: what are we measuring? . *Med Sport Sci 50:26–45*
55. Wilson GJ, Murphy AJ, Walshe A (1996). The specificity of strength training: the effect of posture. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol 73:346–352*

Cita Original

Bent R. Rønnestad, Ernst Albin Hansen and Truls Raastad. Effect of heavy strength training on thigh muscle cross sectional area, performance determinants, and performance in well trained cyclists. Eur J Appl Physiol 108:965–975 (2010).