

Article

Efectos del Entrenamiento de Fuerza Pesado sobre el Rendimiento de la Carrera y Determinantes del Rendimiento de la Carrera en Atletas de Resistencia Mujeres

Olav Vikmoen, Truls Raastad, Olivier Seynnes, Kristoffer Bergstrøm, Stian Ellefsen y Bent R. Rønnestad

RESUMEN

Propósito

El propósito del presente estudio fue investigar los efectos de agregar el entrenamiento de la fuerza al entrenamiento de la resistencia normal sobre el rendimiento de la carrera y la economía de carrera en atletas femeninas bien entrenadas. Nosotros supusimos que el entrenamiento de la fuerza agregado mejoraría el rendimiento y la economía de la carrera a través de la rigidez alterada del complejo músculo-tendón de los músculos extensores de la pierna.

Métodos

Diecinueve atletas de resistencia femeninas [consumo máximo de oxígeno (VO_{2max}): 53 ± 3 ml·kg⁻¹·min⁻¹, 5.8 hs de entrenamiento de la resistencia semanal] se asignaron al azar a ya sea a un entrenamiento de la resistencia normal (R, n = 8) o a un entrenamiento de la resistencia normal combinado con un entrenamiento de la fuerza (R+F, n = 11). El entrenamiento de la fuerza consistió en cuatro ejercicios de piernas [3 x 4-10 de una máxima repetición (MR)], dos veces por semana, durante 11 semanas. La fuerza muscular, la distancia de una carrera extrema de 40 minutos, determinantes del rendimiento de la carrera y la rigidez del tendón rotular, fueron medidos antes y después de la intervención.

Resultados

R+F aumentó el test de 1MR en los ejercicios de pierna ($40 \pm 15\%$) y en la altura de salto máxima en el salto con contra movimiento ($6 \pm 6\%$) y en el salto desde sentadilla ($9 \pm 7\%$, $p < 0.05$). Esto fue acompañado por la mayor área del corte transversal de la fibra muscular de las fibras tipo I ($13 \pm 7\%$) y de las fibras tipo II ($31 \pm 20\%$) en el músculo vasto externo ($p < 0.05$), sin ningún cambio en la densidad capilar en el músculo vasto externo o en la rigidez del tendón rotuliano. Ni R+F ni R cambiaron la economía de carrera, la utilización fraccional del VO_{2max} o el VO_{2max} . No hubo ningún cambio también en la distancia de carrera durante un test de 40 minutos de carrera extrema en ninguno de los grupos.

Conclusión

Sumar un entrenamiento de la fuerza pesado al entrenamiento de la resistencia no afectó el rendimiento de carrera extrema de 40 minutos o la economía de carrera comparado al entrenamiento de la resistencia sólo.

INTRODUCCIÓN

Se han examinado los efectos del entrenamiento de la fuerza sobre el rendimiento de la carrera en varios estudios con la mayoría reportando un rendimiento de la carrera mejorado [1-6]. Sin embargo, la literatura está lejos de ser conclusiva, ya que algunos estudios reportan ningún efecto beneficioso del entrenamiento de la fuerza sobre el rendimiento de la carrera [7-10]. El rendimiento de la carrera está principalmente determinado por el consumo máximo de oxígeno ($VO_{2m\acute{a}x}$), la utilización fraccional del $VO_{2m\acute{a}x}$ y la economía de carrera [11]. La suma de entrenamiento de la fuerza no tiene ni un efecto negativo ni un efecto positivo sobre el $VO_{2m\acute{a}x}$ (por ejemplo, [2, 6, 12]). El efecto de combinar entrenamiento de la fuerza y de la resistencia sobre la utilización fraccional del $VO_{2m\acute{a}x}$ no se ha investigado directamente, pero la medida indirecta del VO_2 en el umbral de lactato, expresado como porcentaje del $VO_{2m\acute{a}x}$, parece estar sin cambios [2, 12]. La economía de carrera parece ser afectada positivamente por el entrenamiento de la fuerza por otro lado (por ejemplo, [2, 6, 12-14]). Un rendimiento de la carrera mejorado luego de un entrenamiento de la fuerza, por lo tanto, se sugiere que se relaciona principalmente a una economía de carrera mejorada [2, 6].

Uno de los mecanismos propuestos más frecuente detrás de una mejorada economía de carrera después del entrenamiento de la fuerza, es el cambio en la rigidez de los músculos y tendones del tren inferior [2, 14, 15]. Durante la primera parte de la fase de contacto en la zancada de la carrera, la energía elástica es guardada en los músculos, tendones y ligamentos que actúan a lo largo de las articulaciones [16]. Un retorno parcial de esta energía guardada durante la segunda parte de la fase de contacto, limita el gasto energético muscular y amplifica la producción mecánica del complejo músculo-tendón [16]. De ahí, la rigidez del componente elástico en serie, principalmente los tendones, puede afectar tanto la utilización de esta energía elástica como la mecánica de la contracción muscular durante la zancada de la carrera. De hecho, los tendones de Aquiles más tiesos han sido asociados con una economía de carrera mejor [17]. Es intrigante saber que los tendones rotuliano más dóciles eran asociados con una economía de carrera mejor [17], mientras que el entrenamiento de la fuerza pesado se ha demostrado que aumenta la rigidez del tendón rotuliano [18, 19]. Un tendón rotuliano más dócil puede permitir al músculo en realidad actuar mecánicamente con longitudes y velocidades eficaces durante la fase de contacto [17]. Sin embargo, para una rigidez del tendón determinada un músculo más fuerte podría habilitar un almacenamiento de energía más grande. Por consiguiente, el entrenamiento de la fuerza pesado podría inducir cambios en las propiedades musculares y del tendón con efectos tanto beneficiosos como negativos potenciales sobre la economía de carrera. Por lo tanto, es importante aclarar los efectos del entrenamiento de la fuerza sobre las propiedades mecánicas del tendón rotuliano, y si los posibles efectos inducen cambios en la economía de la carrera. Sin embargo, a nuestro mejor conocimiento, ningún estudio ha investigado esto hasta la fecha.

Más investigación sobre los efectos del entrenamiento de la fuerza sobre el rendimiento de la carrera se ha realizado con atletas varones (por ejemplo, [1, 3, 6, 15]) o una combinación de atletas varones y mujeres (por ejemplo, [2, 5, 7, 20]). Desafortunadamente, hay poco volumen sustancial de investigación en esta área usando a sólo atletas mujeres [10, 13]. Por lo tanto, hay una necesidad por más investigación con atletas femeninas. Esto es especialmente cierto con respecto al efecto del entrenamiento de la fuerza que indujo cambios en la rigidez del tendón rotuliano sobre la economía de la carrera puesto que aparentemente los tendones de los varones y de las mujeres pueden reaccionar diferentemente a una carga mayor [21].

Aunque el entrenamiento de la fuerza puede mejorar el rendimiento de la carrera de media a larga distancia a través de la economía de carrera mejorada, lo que también hará aumentar normalmente el área de corte transversal (CSA) de las fibras musculares [22]. Por lo tanto, puede especularse que el entrenamiento de la fuerza puede aumentar las distancias de difusión de los capilares hacia el interior de células musculares, lo que podría ser negativo para el rendimiento. En individuos desentrenados hay reportes de mayor número o de inalterados capilares alrededor de cada fibra muscular [23, 24] y ningún cambio en los capilares por área de fibra [24] después del entrenamiento de la fuerza. Sin embargo, en tanto realizar el entrenamiento de la resistencia simultáneamente con el entrenamiento de la fuerza puede afectar la respuesta hipertrófica (por ejemplo, [25]), y los atletas entrenados en resistencia tienen números más grandes de capilares que los desentrenados [26, 27], estos resultados no pueden aplicarse a atletas de resistencia. Por consiguiente, hay una necesidad de mirar más de cerca los efectos del entrenamiento combinado de la resistencia que y la fuerza sobre la capilarización y el CSA de las fibras en los atletas de resistencia bien entrenados.

El propósito de este estudio fue investigar los efectos de 11 semanas de entrenamiento de la fuerza pesado sobre el rendimiento de la carrera durante un test de carrera extrema de 40 minutos y la economía de carrera en atletas de resistencia mujeres bien entrenadas. Es más, nosotros quisimos evaluar los efectos del entrenamiento de la fuerza sobre las propiedades mecánicas del tendón rotuliano para elucidar si esto puede relacionarse a los cambios en el rendimiento de la carrera y la economía de carrera. Para investigar si el entrenamiento de la fuerza podría tener algún efecto en la capilarización en atletas de resistencia, nosotros medimos el CSA de la fibra muscular y la capilarización en el músculo vasto externo.

Nosotros supusimos que sumar un entrenamiento de la fuerza pesado resultaría en un mejor rendimiento de una carrera extrema de 40' y mejor economía de carrera y que estos cambios se relacionarían a los cambios en las propiedades mecánicas del tendón rotuliano, junto con ningún efecto negativo en la capilarización.

MATERIALES Y MÉTODOS

Aprobación ética

El estudio fue aceptado por el Comité de Ética Local en el *Lillehammer University College*. El consentimiento informado por escrito fue obtenido antes de la inclusión de todos los atletas, y el estudio se llevó a cabo de acuerdo con la Declaración de Helsinki.

Participantes

Veintiocho atletas de resistencia femeninas activas tanto en ciclismo como en carrera y que cumplían al menos dos de las descripciones del estado de carrera y entrenamiento que Jeunkedrup y cols. [28], referidas a un atleta de resistencia bien entrenado, fueron recluidos a este estudio. Ninguno de los atletas había realizado un entrenamiento de la fuerza sistemático durante los 12 meses últimos antes de llevar a cabo el estudio (menos de una sesión por semana). Los atletas fueron emparejados en el $VO_{2m\acute{a}x}$ y al azar fueron asignados a sumar un entrenamiento de la fuerza pesado al entrenamiento de la resistencia continuo (R+F, $n = 14$) o a un entrenamiento de la resistencia sólo (R, $n = 14$). Durante el estudio, tres atletas en el R+F dejaron el proyecto por razones no relacionadas al protocolo del proyecto: una debido a una lesión, una debido a un período prolongado de enfermedad durante la parte última de la intervención y una debido a otras razones médicas. En el grupo R, seis atletas dejaron el estudio por razones no relacionadas al protocolo del proyecto (lesiones de entrenamiento, embarazo y falta de tiempo). Por lo tanto, los números finales de atletas fueron en R+F y R, de 11 y 8, respectivamente.

Apreciación global del experimento

Este estudio es parte de uno más grande que investiga los efectos del entrenamiento de la fuerza pesado sobre varios aspectos del rendimiento de resistencia. Algunas de las características básicas como la antropometría y el entrenamiento de la resistencia se han reportado previamente [29].

El programa del entrenamiento de la fuerza para el grupo de R+F consistió de dos sesiones de entrenamiento de la fuerza por semana y duró 11 semanas (durante el período de competición de abril a julio). La evaluación antes y después del período de intervención se realizó en cuatro días de tests. Durante los pre-tests, el día uno fue utilizado para probar las biopsias musculares del músculo vasto externo derecho, y se midieron las propiedades mecánicas del tendón rotuliano izquierdo. En el día dos, un test de 1MR en el press de piernas con una sola pierna y la media sentadilla fueron medidos. El día 3 consistió en un test de carrera incremental para la determinación del perfil de lactato sanguíneo, un test de $VO_{2m\acute{a}x}$ y evaluación de la altura máxima de un salto desde sentadilla (SJ) y de salto con contra movimiento (CMJ). El día 4 consistió en un test de 40 minutos de carrera extrema. Hubo 7 días al menos entre el día uno y dos, y 3-7 días entre los restantes días de tests. Todos los tests para cada participante se completó dentro de 2-3 semanas. Durante los post-tests, los atletas en el grupo R+F mantuvieron su entrenamiento de la fuerza con una sesión por semana hasta que toda la evaluación fuera realizada. En general, los post-tests se realizaron en el mismo orden como los pre-tests. Sin embargo, las biopsias musculares y las mediciones del tendón rotuliano fueron movidos al último día de la prueba. Los atletas no realizaron ninguna periodización sistemática de tal forma que ni los pre-tests y ni los post-tests fueron realizados en una fase particular de la periodización.

Entrenamiento

La duración y la intensidad del entrenamiento de la resistencia eran calculadas en base a registros de la frecuencia cardíaca (FC). El entrenamiento de la resistencia era dividido en tres zonas de la FC: 1) 60%-82%, 2) 83%-87%, y 3) 88%-100% de la FC máxima. El entrenamiento de la resistencia realizado ha sido previamente reportado [29]. En breve, no hubo diferencias significativas entre los grupos en la duración semanal promedio del entrenamiento de la resistencia, en la distribución de este entrenamiento dentro de las tres zonas divididas de intensidad (los valores de los grupos eran: zona 1: 3.7 ± 1.6 hs, zona 2: 1.1 ± 0.5 hs, zona 3: 0.8 ± 0.5) y en el número de sesiones del entrenamiento de la resistencia por semana (los valores en los grupos eran de 4.3 ± 1 sesiones \cdot semana⁻¹).

Las sesiones del entrenamiento de la fuerza pesado para los grupos de R+F apuntaron a los músculos de la pierna y se

realizaron dos veces por semana durante el período de intervención de 11 semanas. La adhesión al entrenamiento de la fuerza fue alta, con las atletas del grupo R+F completando 21.4 ± 1.0 (rango 19-22) de las 22 sesiones de entrenamiento de la fuerza que teníamos planificadas. El programa del entrenamiento de la fuerza se realizó como fue reportado en Vikmoen y cols. [29]. Brevemente, cada sesión del entrenamiento de la fuerza consistió en cuatro ejercicios de piernas: media sentadilla en una máquina Smith (Gym 80 International, Gelsenkirchen, Alemania), press de piernas con una pierna a la vez (Gym 80 International, Gelsenkirchen, Alemania), flexión de la cadera con una sola pierna en una máquina con cable desde parado (Gym 80 International, Gelsenkirchen, Alemania), y flexión plantar de tobillos en la máquina Smith. Para una descripción detallada de los ejercicios, ver Ronnestad y cols. [30]. Se realizaron tres series por ejercicio. Un investigador supervisó a las atletas en todos los entrenamientos durante las primeras dos semanas y al menos un entrenamiento por semana después. Durante las semanas una a tres, las atletas se entrenaron con series de 10MR en la primera sesión y de 6MR en la segunda sesión. Estas cargas alternadas se ajustaron a 8MR y 5MR durante las semanas cuatro a seis, y se ajustaron aún más a 6MR y 4MR durante las semanas siete a once (Tabla 1). Los números de repeticiones siempre eran iguales que la carga de MR prescrita, significando que las series se realizaron hasta el fallo, y las atletas ajustaban la carga absoluta cuando ellas conseguían ponerse fuertes hasta corresponderse con la carga MR prescrita. A las atletas se les permitió ayuda en la última repetición si era necesario. Porque uno de los mecanismos propuestos para mejorar el rendimiento de la carrera después de un entrenamiento de la fuerza es una tasa mayor de desarrollo de la fuerza [2], las atletas fueron instruidas para realizar la fase concéntrica de los ejercicios con un enfoque en el esfuerzo máximo (duración alrededor de 1 segundo) mientras la fase excéntrica era realizada más lentamente (duración 2-3 segundos). Durante cada sesión del entrenamiento de la fuerza, las atletas consumieron una barra que contenía 15 g de proteínas (barra de recuperación Squeezy, Squeezy Sports Nutrition, Braunschweig, Alemania) para asegurar una ingesta de proteínas adecuada junto con las sesiones del entrenamiento de la fuerza. Las atletas fueron incentivadas a realizar el entrenamiento de la fuerza y el entrenamiento de la resistencia en días separados. En los días que las atletas tenían que realizar tanto entrenamiento de la resistencia como entrenamiento de la fuerza, se les aconsejaba realizar el entrenamiento de la fuerza en la primera sesión del día.

Tests de fuerza, de salto y de carrera

Los atletas fueron advertidos de que se abstengan de ejercicio intenso el día anterior a la evaluación, para prepararse para los tests como lo hubieran hecho para una competición, y consumir el mismo tipo de comida antes de cada test. Se realizaron los tests de carrera en una cinta ergométrica motorizada (Woodway Desmo Evo, Waukesha, Wisconsin, EE.UU.). La inclinación de la cinta ergométrica se puso a 5.3% en todos los tests. Toda la evaluación se realizó bajo condiciones ambientales similares ($18-20^{\circ}C$).

Tabla 1. Cargas de entrenamiento usadas durante la intervención del entrenamiento de la fuerza

Semana	Carga 1er sesión	Carga 2da sesión
1-3	10MR	6MR
4-6	8MR	5MR
7-11	6MR	4MR

MR: Repetición máxima

Tests de 1MR.

La 1MR se evaluó en el press de piernas con una sola pierna y en la media sentadilla y el valor promedio de estos dos ejercicios se usó para los análisis estadísticos. Antes del día de la evaluación, cada atleta realizó una sesión de familiarización supervisada para aprender la técnica de levantamiento apropiada, encontrar aspectos individuales de los dispositivos y práctica de los saltos SJ y CMJ. Durante esta sesión, la carga fue aumentada para permitir la estimación de un punto de partida adecuado para el test de 1MR en forma gradual.

Los tests de 1MR en ambos ejercicios se realizaron como previamente están descritos (Vikmoen y cols. 2015). Brevemente, la evaluación empezaba con una entrada en calor específica, que consistía en tres series con carga gradualmente creciente (40, 75 y 85% de 1MR esperada) y número decreciente de repeticiones (10–6–3). El primer intento se realizaba aproximadamente con una carga 5% por debajo de 1MR esperada. Si un levantamiento tenía éxito, la carga era aumentada por aproximadamente un 5%. El test finalizaba cuando las atletas no levantaban la carga en 2-3 intentos y la carga exitosa más alta levantada era definida como 1MR. Las atletas tenían 3 minutos de pausa entre los levantamientos.

Perfil de lactato sanguíneo.

Los tests del perfil de lactato sanguíneo empezaron con una carrera de 5 minutos a 7 km·h⁻¹ que eran seguidamente aumentada cada 5 minutos por 1 km·h⁻¹. Entre los turnos de 5 minutos consecutivos había un 1 minuto de pausa, en donde se tomaba una muestra de sangre de la punta de un dedo y se analizaba para la concentración global de lactato en sangre ([la-]) usando un analizador Lactato Pro LT-1710 (Arcray Inc., Kyoto, Japón), y se registraba la tasa de esfuerzo percibido (RPE). El test terminaba cuando una concentración de [la-] de 4 mmol·L⁻¹ o superior era medida. El VO₂ y las FCs eran medidas durante los últimos 3 minutos de cada turno, y se usaron valores promedio para el análisis estadístico. El VO₂ fue medido (30 segundos de tiempo de muestreo) usando un sistema metabólico computarizado con cámara mezcladora (Oxycon Pro, Erich Jaeger, Hoechberg, Alemania).

Los analizadores de gas se calibraron con gases de calibración certificados de concentraciones conocidas antes de cada test. La turbina de flujo (Triple V, Erich Jaeger, Hoechberg, Alemania) se calibró antes de cada test con una jeringa de calibración 3 l, 5530 series (Hans Rudolph, Kansas City, EE.UU.). La FC fue registrada usando un monitor de frecuencia cardíaca S610i Polar (Polar, Kempele, Finlandia). De este test de carrera incremental, la velocidad de carrera en 3.5 mmol·L⁻¹ [la-] fue calculada para cada atleta a partir de la relación entre [la-] y velocidad de carrera usando una regresión lineal entre los puntos de datos. La economía de carrera fue determinada por el VO₂ promedio a una velocidad de carrera de 10 km·h⁻¹.

VO_{2máx}

Después de la finalización del test de perfil de lactato sanguíneo, las atletas corrieron durante 10 minutos a una carga de trabajo submáxima libremente seleccionada. El test de VO_{2máx} entonces se iniciaba con carrera de 1 minuto a 8 km·h⁻¹ y la velocidad era incrementada por 1 km·h⁻¹ durante todos los minutos hasta el agotamiento. Las atletas recibieron un estímulo verbal fuerte para correr lo más posible. El VO₂ era continuamente medido, y el VO_{2máx} fue calculado como el promedio de las dos mediciones de VO₂ de 30 segundos más altas. El test de VO_{2máx} fue considerado válido cuando dos o más de los siguientes criterios eran reunidos: un *plateau* en el VO₂ a pesar de una carga de trabajo aumentada, una tasa de intercambio respiratorio por arriba de 1.1 y una FCpico ±10 latidos por minuto de la FC máxima (220-edad) [31]. El rendimiento de la carrera pico durante el test (V_{máx}) era calculado como la velocidad de carrera promedio durante los últimos 2 minutos del test incremental. La FC más alta registrada durante el test se tomó como FCpico e inmediatamente después del test, se registraron lactato [la-] y RPE.

Salto SJ y CMJ.

Veinte minutos después de la finalización del test de VO_{2máx}, la fuerza explosiva fue evaluada como la altura máxima salto de SJ y CMJ. Estos saltos se realizaron en una plataforma de fuerza (SG-9, Advanced Mechanical Technologies, Newton, MA, EE.UU., frecuencia de muestreo de 1kHz). Después de 3-5 saltos de precalentamiento submáximos, las atletas realizaron tres SJ y tres CMJ con 2-3 minutos de descanso entre los saltos. Se utilizaron el SJ y el CMJ más altos para los análisis estadísticos. Durante todos los saltos, las atletas mantenían sus manos puestas en sus caderas y apuntaron a saltar al máximo. El SJ se realizó desde un ángulo de rodillas de ~90 grados. En esta posición, ellas hacían una pausa de 3 segundos antes de saltar. Ningún movimiento descendente se permitía antes del salto y las curvas de fuerza fueron inspeccionadas para verificar esto. Durante la fase excéntrica del CMJ, las atletas fueron instruidas para cambiar a un ángulo de la rodilla que ellas sintieran óptimo para lograr la altura máxima del salto.

Test de 40 minutos de carrera extrema.

Antes del test de 40 minutos de carrera extrema, las atletas realizaron 10 minutos de precalentamiento a velocidades auto-seleccionadas submáximas, conteniendo tres sprints submáximos realizados durante los últimos 2 minutos. Estos sprints se estandarizaron desde pre a post en cada atleta. Durante los primeros 5 minutos del test, los investigadores ponían la velocidad. Esta velocidad seleccionada individual era en base al test de perfil de lactato y correspondía a una velocidad a 2.5 mmol·L⁻¹ [la-]. Después de esto, la velocidad de carrera era controlada por las atletas mismas, con instrucciones para correr la mayor distancia posible durante 40 minutos. Las mediciones de VO₂ fueron hechas durante el último minuto de cada sección de 5 minutos para permitir la estimación del VO₂ del rendimiento y la utilización fraccional del VO_{2máx}. Durante este minuto, no se les permitía a las atletas ajustar la velocidad de carrera. El VO₂ promedio durante este minuto fue estimado para reflejar el VO₂ promedio durante la correspondiente sección de 5 minutos. Durante los 5 minutos últimos del test, el VO₂ fue continuamente medido como evaluación piloto demostrando que las atletas realizaron numerosos ajustes de la velocidad durante esta parte del test. El VO₂ del rendimiento fue calculado como el VO₂ promedio de todas las secciones de 5 minutos, y la utilización fraccional del VO_{2máx} fue calculada como el VO₂ del rendimiento en porcentaje del VO_{2máx}. Durante el test, las atletas fueron permitidas a beber agua *ad libitum*.

Mediciones de las propiedades mecánicas y materiales del tendón rotuliano

Todas las mediciones de las propiedades mecánicas y materiales del tendón rotuliano se realizaron en la pierna izquierda y fueron hechas como previamente fueron descritas [32]. Brevemente, las atletas se sentaron con un ángulo de 90° en la rodilla y en la cadera sobre un aparato de extensión de rodillas (Knee extension, Gym 2000, Geithus, Noruega) instrumentada con una célula de fuerza (U2A, Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt, Alemania). Para medir el CSA del tendón rotuliano, escaneos transversales se realizaron proximalmente, medialmente y distalmente a lo largo de la longitud del tendón usando un aparato de ultrasonido de modo-B (HD11XE, Phillips, Bothell, WA, EE.UU.).

El escaneo sagital fue usado para medir la longitud del tendón. Para medir la fuerza del tendón y el alargamiento, una sonda de ultrasonido se unió a la rodilla izquierda con un dispositivo hecho a medida. Las atletas realizaron las contracciones en 'rampa' a una tasa constante de 100 N·seg⁻¹. Para corregir la co-activación de los isquiotibiales al calcular la fuerza del tendón (ver abajo), una flexión de rodillas isométrica máxima se realizó después del test de la extensión de rodillas. Además, se registraron los datos de la EMG (TeleMyo 2400 G2 telemetry Systems, Noraxon Inc., Scottsdale, AZ, EE.UU.) del músculo bíceps femoral durante la extensión y flexión isométrica de rodillas. La fuerza del tendón rotuliano (FTR) fue calculada como la fuerza medida en la célula de fuerza, corregida para la co-activación de los isquiotibiales, los brazos del momento interno y externo son de la siguiente manera:

$$FTR = ((Fq + Fh)Me)/Mi$$

...donde Fq es la fuerza medida por la célula de fuerza, Fh es la fuerza estimada de la co-activación de los isquiotibiales, Mi y Me corresponden respectivamente al brazo del momento interno y externo.

Morfología del tendón. Los datos se analizaron como se describen previamente [32], usando un software de análisis de imagen (ImageJ 1.45s, National Institute of Health, Austin, TE, EE.UU.). Se analizaron los datos del alargamiento de tendón usando un software de análisis de video (racker Video Analysis and Modeling Tool, Open Source Physics, Douglas Brown, 2012). El ápice rotular y el plateau de la tibia fueron digitalmente marcados dentro de un sistema de coordenadas común. El alargamiento real del tendón era calculado como el cambio en la distancia entre las coordenadas de estas prominencias anatómicas. Para calcular el material del tendón y las propiedades mecánicas, las curvas de fuerza-alargamiento fueron ajustadas con un polinomio de 2do grado. Todos los registros usados en los resultados tenían un ajuste de $R^2 = 0,92$ o superior. La rigidez fue calculada como el incremento de la curva de fuerza-alargamiento, entre el 90 y 100% de la fuerza máxima de cada atleta. El módulo de Young fue calculado multiplicando los valores de rigidez por la proporción entre la longitud del tendón rotuliano en reposo (l_0) y el CSA promedio. La l_0 del tendón rotuliano y la longitud máxima ($l_{\text{máx}}$) fueron usadas para calcular la tensión del tendón rotuliano. Dos series de datos de ultrasonido (de dos atletas del grupo R+F) tuvieron que ser desechados debido a una calidad insuficiente para habilitar el análisis. Por lo tanto, el número de atletas incluidas en los datos del tendón a evaluar fue de 9 en el grupo R+F y de 8 en el grupo R.

Muestras de biopsia muscular

Las biopsias musculares de músculo vasto externo fueron tomadas para muestras usando el procedimiento de Bergström. Se les dijo a las atletas que se abstuvieran de actividad física durante las últimas 24h hasta la toma de la biopsia. Durante cada evento de toma de la biopsia, se recuperaban dos biopsias musculares separadas y agrupadas en una placa de Petri con agua salada fisiológica estéril. Una muestra muscular de tamaño apropiado (peso mojado promedio: 29 ± 8 mg) fue seleccionada para los análisis inmunohistoquímicos y montada en el Tejido-Tek (Sakura Finetek EE.UU., Inc., Torrance, CA, EE.UU.) y rápidamente congeladas en isopentano frío sobre nitrógeno líquido. Las muestras musculares se guardaron a -80°C hasta los análisis posteriores.

Inmunohistoquímica

Cortes transversales $8 \mu\text{m}$ de espesor fueron cortados con un micrótopo en -20°C (CM3050; Leica Microsystems GmbH, Wetzlar, Alemania) y montados en las laminillas portaobjetos (Superfrost Plus; Thermo Fisher Scientific, Inc., Waltham, MA, EE.UU.). Las secciones luego eran secadas al aire y guardadas a -80°C . Antes del marcado con anticuerpos, se bloquearon las secciones del músculo en una solución que contenía 1% de BSA (cat. no. A4503; Sigma-Aldrich Corp., St Louis, MO, EE.UU.) y 0.05% de solución de PBS-T (cat. no. 524650; Calbiochem, EMD Biosciences, Inc., San Diego, CA, EE.UU.) por 30 minutos. Luego, fueron incubados toda la noche a 4°C con los anticuerpos contra el marcador capilar CD31 (1:200; clone JC70A, M0823; Dako A/S, Glostrup, Dinamarca), seguido por la incubación con anticuerpos secundarios apropiados (Alexa Fluor, cat. no. A11005).

Después del marcado, las secciones del músculo fueron visualizadas y se tomaron imágenes usando una cámara de la alta resolución (DP72; Olimpo S.A., Tokio, Japón) montado en un microscopio (BX61; Olimpo S.A.) con una fuente luminosa de fluorescencia (X-Cite 120PCQ; EXFO Photonic Solutions Inc., Mississauga, Ontario, Canadá).

Luego, esas secciones musculares se incubaron durante 1 hora a temperatura de ambiente con anticuerpos contra la cadena pesada de miosina tipo II (1:1000; SC71; obsequio del Profesor S. Schiaffino) y distrofina (1:1000; cat. no. ab15277;

Abcam Plc), seguido por la incubación con anticuerpos secundarios apropiados (Alexa Fluor, cat. no. A11005 or A11001; Invitrogen, Inc.).

Las secciones del músculo fueron cubiertas con un cubre-objetos y pegadas con ProLong Gold Antifade Reagent con DAPI (cat.no. P36935; Invitrogen Molecular Probes, Eugene, OR, EEUU) y llevadas a secar toda la noche a temperatura ambiente. Se visualizaron las secciones del músculo de nuevo y se sacaron nuevas fotos el mismo lugar precisamente en la sección como la imagen CD31. Entre todas las fases, se lavaron las secciones por 3×5 minutos usando una solución 0.05% de PBS-T.

La distribución del tipo de fibra, el área del corte transversal de la fibra y los capilares fueron identificados usando el software TEMA (CheckVision, Hadsund, Dinamarca). La capilarización se expresó como los capilares alrededor de cada fibra (CAF) y los capilares relacionados al área de fibra (CAFA), para las fibras tipo I y tipo II (IIA y IIX). Debido a los problemas técnicos con algunos análisis, el número de atletas en los datos de inmunohistoquímica es de 8 en el grupo R+F y 5 en el grupo R.

Análisis estadístico

Todos los datos en el texto, figuras y tablas se presentan como promedios \pm desvío estándar, a menos que se indique lo contrario. Se analizaron los datos usando un ANOVA bidireccional (grupo x tiempo) de medidas repetidas. Los tamaños de efecto (ES) fueron calculados para adaptaciones claves fisiológicas y de rendimiento para elucidar sobre la significancia práctica del entrenamiento de la fuerza. Los ES fueron calculados según el criterio de Cohen y el criterio para interpretar la magnitud fueron de la siguiente forma: 0-0.2 = trivial, 0.2-0.6 = pequeño, 0.6-1.2 = moderado, 1.2-2.0 = grande y > 2 = muy grande [33].

Los análisis de las correlaciones fueron hechos usando el método de momento del producto de Pearson. Los análisis se realizaron en Excel 2013 (Microsoft Corporation, Redmon, WA, EE.UU.). Los análisis resultantes en $p \leq 0.05$ eran considerados significativos estadísticamente.

RESULTADOS

No hubo diferencias significativas entre el R+F y R en cualquiera de las variables medidas en los valores iniciales.

Masa corporal, fuerza máxima de las piernas y área de la fibra muscular

La masa corporal permaneció inalterada en R+F (de 62.4 ± 5.2 kg a 63.1 ± 5.6 kg) pero fue ligeramente reducida en R (de 65.6 ± 8.4 kg a 64.8 ± 8.0 kg, $p < 0.05$). Hubo una interacción significativa ($p < 0.05$) entre grupo y tiempo (pre vs post) indicando que el cambio en la masa corporal fue diferente entre los grupos.

EL test de 1MR en los ejercicios de piernas aumentó $40.4 \pm 14.7\%$ en R+F ($p < 0.01$, Fig. 1), sin cambio en R. Hay una interacción significativa ($p < 0.01$) entre grupo y tiempo (pre vs post). En suma, los análisis de tamaño del efecto revelaron un efecto práctico muy grande del grupo R+F comparado a grupo R (ES = 3.20).

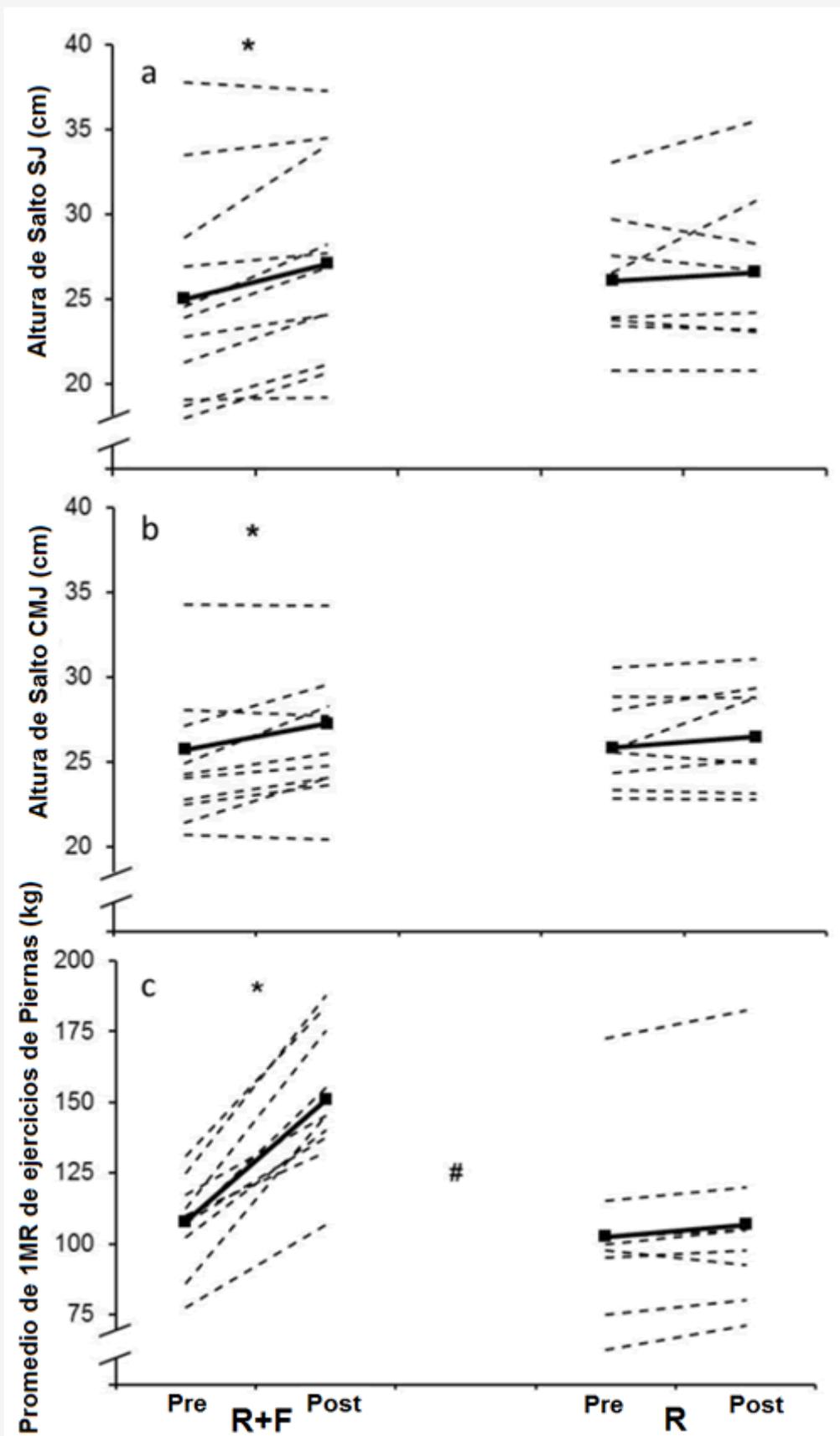


Figura 1. Fuerza máxima y rendimiento de salto.

Valores individuales (las líneas punteadas) y valores promedio (las líneas sólidas) antes del (Pre) y después del (Post)

período de intervención para atletas que agregaron un entrenamiento de la fuerza a su entrenamiento de la resistencia normal (R+F) y atletas que sólo realizaron un entrenamiento de la resistencia normal (R). a: altura del salto desde sentadilla (SJ). b: altura del salto con contra movimiento (CMJ). c: promedio de 1 máxima repetición (1MR) en la media sentadilla y en el press de piernas con una sola pierna (ejercicios de piernas). * diferente de pre ($p < 0.05$), # interacción significativa entre grupo y tiempo ($p < 0.05$).

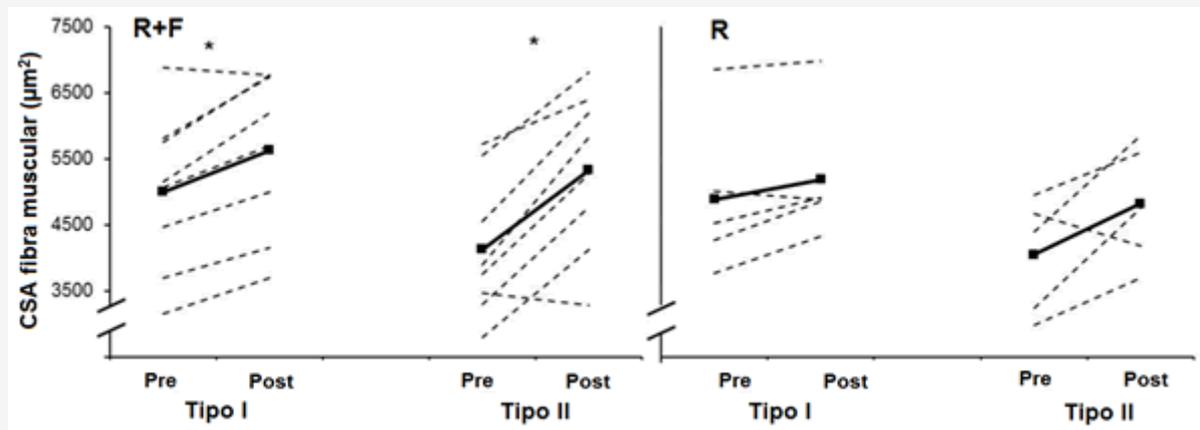


Figura 2. Área del corte transversal de la fibra muscular.

Valores individuales (las líneas punteadas) y valores promedio (las líneas sólidas) antes del (Pre) y después del (Post) período de intervención para atletas que agregaron un entrenamiento de la fuerza a su entrenamiento de la resistencia normal (R+F, lado izquierdo) y atletas que sólo realizaron el entrenamiento de la resistencia normal (R, lado derecho). Área del corte transversal de la fibra muscular (CSA) tanto para las fibras musculares de tipo I como de tipo II. * diferente de pre ($p < 0.05$).

En el grupo R+F, el CSA de las fibras musculares tanto tipo I como tipo II, aumentaron en el músculo vasto externo ($13.2 \pm 6.8\%$ y $30.8 \pm 19.6\%$, respectivamente, $p < 0.01$), sin cambios que ocurren en grupo R (Fig. 2). El grupo R+F tuvo un efecto práctico moderado sobre el CSA de la fibra muscular comparado al grupo R ($ES = 0.83$).

Saltos SJ y CMJ

El grupo R+F aumentó la altura de SJ y de CMJ respectivamente por $8.9 \pm 6.8\%$ y $5.9 \pm 6.0\%$ ($p < 0.05$) mientras ningún cambio ocurrió en el grupo R (Fig. 1). Los análisis de tamaño del efecto revelaron un efecto práctico moderado a favor del grupo R+F en ambos saltos SJ ($ES = 1.06$) y CMJ ($ES = 0.65$).

Capilarización

Ninguno de los grupos no tuvo ningún cambio en CAF o CAFA alrededor de las fibras tipo I y tipo II (Fig. 3).

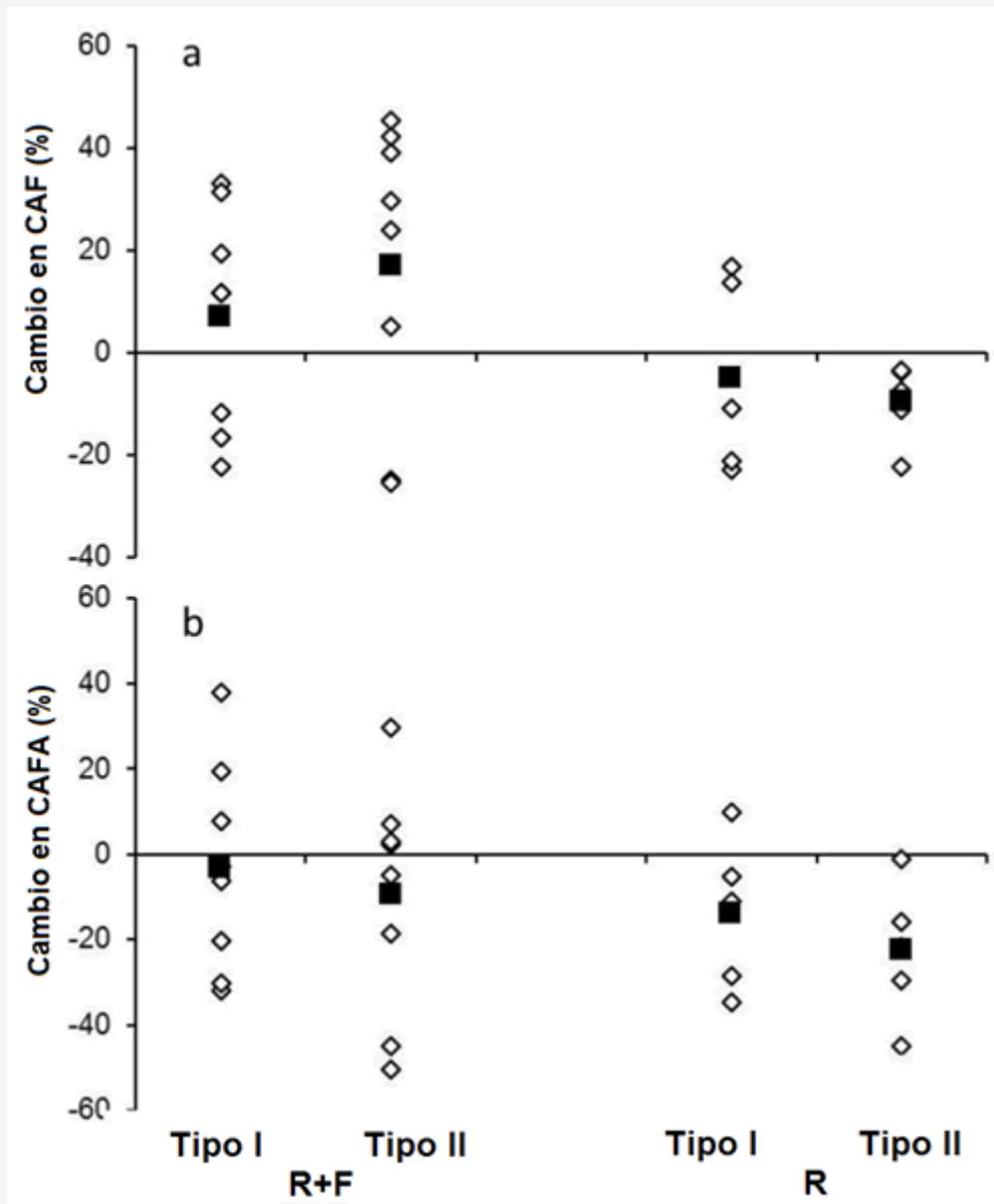


Figura 3. Capilarización.

Valores individuales (los símbolos abiertos) y valores promedio (los cuadrados sólidos) para atletas que agregaron un entrenamiento de la fuerza a su entrenamiento de la resistencia normal (R+F) y atletas que sólo realizaron el entrenamiento de la resistencia normal (R). a: porcentaje de cambio en los capilares alrededor de cada fibra muscular (CAF) para las fibras musculares tipo I y tipo II para el grupo R+F, y el grupo R. b: porcentaje de cambio en los capilares relacionados al área de fibra (CAFA) para las fibras musculares tipo I y tipo II para los grupos R+F y R.

Propiedades mecánicas y materiales del tendón rotuliano

No hubo ningún cambio significativo en la rigidez o módulo de Young del tendón rotuliano en R+F ni en R (Tabla 2). El CSA promedio del tendón rotuliano aumentó por $5.2 \pm 3.6\%$ en el grupo R+F ($p < 0.01$) mientras ningún cambio significativo ocurrió en el grupo R (Tabla 2).

Tabla 2. Rigidez, módulo de Young y área transversal promedio (CSA) del tendón rotuliano.

	<i>R+F</i>		<i>R</i>	
	Pre	Post	Pre	Post
Rigidez (N·mm ⁻¹)	2752 ± 402	2483 ± 733	2753 ± 947	2692 ± 697
Módulo de Young (MPa)	1038 ± 194	925 ± 162	1251 ± 296	1158 ± 273
CSA promedio (mm ²)	65.9 ± 7.1	69.2 ± 6.9*	60.3 ± 4.2	59.9 ± 4.4

Rigidez, módulo de Young y área trasversal promedio (CSA) del tendón rotulino antes (Pre) y después (Post) del período de la intervención para las atletas que sumaron entrenamiento de la fuerza a su entrenamiento de la resistencia normal (*R+F*) y las atletas que realizaban sólo entrenamiento de la resistencia normal (*R*). Los valores son promedios ±SD. * diferente de Pre ($p < 0.05$).

VO_{2máx} y V_{máx}

El VO_{2máx} y la V_{máx} no cambiaron en ambos grupos durante el período de intervención (Tabla 3).

Tabla 3. Datos del test de consumo máximo de oxígeno.

	<i>R+F</i>		<i>R</i>	
	Pre	Post	Pre	Post
VO _{2máx} (ml·kg ⁻¹ ·min ⁻¹)	52.2 ± 2.3	52.7 ± 3.3	54.2 ± 2.9	53.1 ± 1.9
V _{máx} (km·h ⁻¹)	12.8 ± 0.7	13.0 ± 0.9	13.1 ± 0.5	13.3 ± 0.6
FC _{pico} (latidos·min ⁻¹)	193 ± 9	192 ± 9	189 ± 8	187 ± 7
RPE	19 ± 1	20 ± 1	19 ± 1	19 ± 1
[La ⁻¹] _{pico} (mmol·l ⁻¹)	9.7 ± 3.0	8.1 ± 3.8	8.9 ± 2.2	7.7 ± 1.8

Datos del test de consumo máximo (VO_{2máx}) antes (Pre) y después (Post) del período de intervención para las atletas que agregaron entrenamiento de la fuerza a su entrenamiento de la resistencia normal (*R+F*) y atletas que realizaban sólo entrenamiento de la resistencia normal (*R*). Los valores son promedios ±SD.

Economía de carrera y velocidad de carrera a 3.5 mmol·L⁻¹ [la-]

No hubo ningún cambio en la economía de carrera medida a 10 km·h⁻¹ durante el test de perfil de lactato (Fig. 4) o velocidad de carrera a 3.5 mmol·L⁻¹ [la-] (Fig. 4) en ninguno de los grupos.

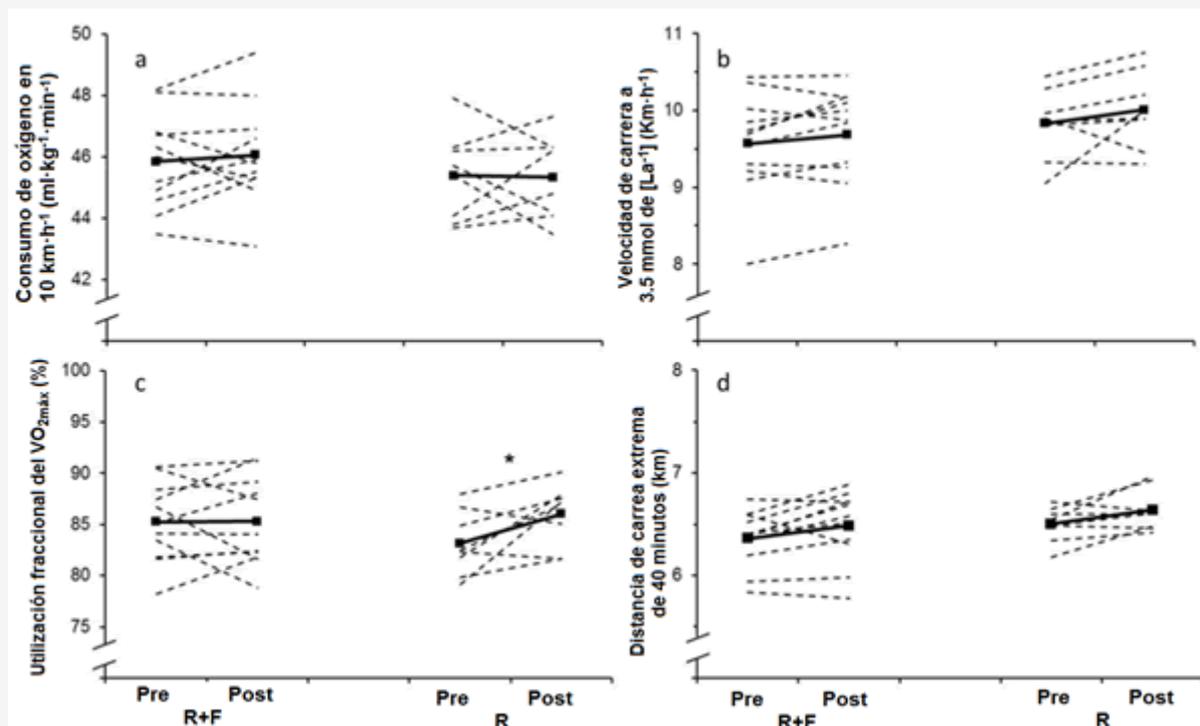


Figura 4. Factores determinantes de la economía de la carrera y rendimiento de la carrera.

Valores individuales (las líneas punteadas) y valores promedio (las líneas sólidas) antes del (Pre) y después del (Post) período de intervención para atletas que agregaron un entrenamiento de la fuerza a su entrenamiento de la resistencia normal (R+F) y atletas que sólo realizaron el entrenamiento de la resistencia normal (R). a: masa corporal ajustada a consumo de oxígeno a 10 km·h⁻¹. b: velocidad de carrera a 3.5 mmol·L⁻¹ [La⁻] calculado durante el test de perfil de lactato sanguíneo. c: utilización fraccional del VO_{2máx} durante el test de 40 minutos de carrera extrema. d: distancia de carrera durante el test de 40 minutos de carrera extrema. * diferente de pre (p < 0.05).

Test de 40 minutos de carrera extrema

No hubo ningún cambio en la distancia de carrera o VO₂ del rendimiento durante el test de 40 minutos de carrera extrema en ninguno de los grupos durante la intervención (Fig. 4). La utilización fraccional del VO_{2máx} no cambió en el grupo R+F (de 85.3±3.9 a 85.3±4.3, Fig. 4), pero fue mayor en el grupo R, yendo de 83.2±3.1% a 86.0±3.0% (p < 0.05).

Antes de la intervención, el rendimiento en el test de 40 minutos de carrera extrema se correlacionó con la velocidad a 3.5 mmol·L⁻¹ [La⁻], el VO_{2máx} y la V_{máx} (r = 0.65, r = 0.58, r = 0.79, respectivamente), pero no con la economía de carrera (r = -0.24). No se observaron correlaciones significativas entre los cambios en estas variables y los cambios en la distancia de la carrera extrema de 40 minutos.

DISCUSIÓN

Los resultados principales del estudio actual fueron que agregando un entrenamiento de la fuerza pesado al entrenamiento de la resistencia normal de atletas mujeres bien entrenadas, no afectaron las propiedades mecánicas del tendón rotuliano o economía de carrera. Es más, no hubo ningún efecto sobre el rendimiento de la carrera durante un test de 40 minutos de carrera extrema. El entrenamiento de la fuerza no tuvo un efecto negativo sobre la densidad capilar a pesar de una mayor fuerza muscular y CSA de la fibra muscular.

Fuerza máxima y área del corte transversal de la fibra muscular

El programa del entrenamiento de la fuerza usado en el estudio actual fue eficaz en aumentar la fuerza máxima de las piernas como quedó demostrado por un aumento en el test de 1MR en los ejercicios de piernas. Esto está de acuerdo con

los aumentos previamente observados en el test de 1MR en atletas de resistencia que agregaron un entrenamiento de la fuerza pesado a su entrenamiento de la resistencia normal (por ejemplo, [2, 4, 13]). Los resultados del estudio actual confirman los resultados previos [2, 34], de que un aumento bastante grande en la fuerza muscular puede ser logrado sin una mayor masa corporal. Esto es importante para los corredores puesto que una mayor masa corporal puede influir sobre el rendimiento de la carrera en forma negativa. A pesar de esto, una mejor fuerza pareció ser al menos parcialmente dependiente de una mayor masa muscular, ya que fue evidente un mayor CSA de la fibra muscular. La hipertrofia muscular presente es conforme con otros estudios que usaron protocolos del entrenamiento de la fuerza similares en atletas de resistencia [34-36]. Es interesante observar que no hubo ninguna diferencia en el CSA de las fibras de tipo I y tipo II en las atletas actuales, confirmando la noción que en atletas de resistencia las fibras de tipo I pueden ser tan grandes [37] o aún más grandes [38] que las fibras de tipo II.

Salto SJ y CMJ

El protocolo del entrenamiento de la fuerza actual también fue eficaz en aumentar la potencia muscular de las piernas, como fue evidente el mejorado rendimiento del SJ y del CMJ. Esto está en línea con reportes previos de efectos del entrenamiento de la fuerza pesado sobre la capacidad de salto en participantes desentrenados [39, 40]. Sin embargo, datos previos de atletas de resistencia son más inciertos, ya que algunos estudios reportan mejor rendimiento del salto [36, 41] mientras que otros no lo hacen [14, 20]. El estudio actual indica que las mejoras bastante grandes en la capacidad de salto y en la fuerza explosiva pueden ser alcanzados con un entrenamiento pesado de la fuerza, a pesar de realizar el entrenamiento de la resistencia en forma simultánea.

Capilarización

Once semanas de entrenamiento de la fuerza pesado no afectaron la capilarización expresada como CAF o CAFA, a pesar de llevar a una hipertrofia de la fibra muscular significativa. Considerablemente, esto indica que el efecto potencialmente negativo de un mayor CSA de la fibra muscular sobre las distancias de difusión entre la sangre y las partes internas de las fibras musculares, fue neutralizado por un aumento no significativo en CAF. Sin embargo, este dato debe tratarse con precaución debido al limitado tamaño de la muestra. A pesar de esto, nuestro hallazgo está en línea con los estudios previos en participantes desentrenados que han reportado poco o ningún cambio o un aumento ligero en CAF [23, 24] y ningún cambio en CAFA [24] después de un período de entrenamiento de la fuerza pesado. Nuestro hallazgo también está conforme con resultados reportados en ciclistas varones de élite después de 16 semanas de entrenamiento de la fuerza pesado [35]. Por lo tanto, parece ser que los atletas de resistencia no deberían tener miedo de una capilarización reducida cuando ellos consideren sumar un entrenamiento de la fuerza pesado a su propio entrenamiento de la resistencia.

Propiedades mecánicas del tendón rotuliano

La falta de cambios en las propiedades mecánicas del tendón rotuliano después del entrenamiento de la fuerza pesado está en contraste con la mayoría de los estudios, típicamente se reporta una mayor rigidez del tendón rotuliano, al menos en los participantes previamente desentrenados [19, 42-44]. Una posible razón para la diferencia en los resultados entre nuestro estudio y los de otro, es que nosotros incluimos a participantes femeninos mientras los otros estudios incluyeron a varones [19, 42-44]. De hecho, se han reportado que los tendones de las mujeres muestran una tasa inferior de nueva formación de tejido conectivo en respuesta a la carga mecánica [21]. Las diferencias en el protocolo del entrenamiento de la fuerza también pueden explicar la falta de cambios en el estudio actual. En realidad, estudios más previos que reportan mayor rigidez del tendón rotuliano luego de un entrenamiento de la fuerza han incluido el ejercicio de extensión de rodillas pesado [19, 42, 44] o acciones musculares isométricas [45]. En el estudio actual, los ejercicios involucrados eran más complejos que implicaban múltiples articulaciones, lo que quizás redujeron la carga mecánica absoluta sobre el tendón rotuliano comparado a un ejercicio puro de extensión de rodillas. En suma, las atletas fueron instruidas para realizar la fase concéntrica de los ejercicios tan rápidas como fueran posible haciendo el tiempo bajo tensión bastante menor.

En contraste a la falta de efecto del entrenamiento de la fuerza sobre las propiedades del tendón rotuliano, llevó a aumentos en su CSA. En línea con estos resultados, algunos estudios sobre el efecto del entrenamiento de la fuerza, sin embargo, no todos [18], reportan un aumento en el CSA del tendón rotuliano [19, 42]. Sin cambios en las propiedades mecánicas, la hipertrofia del tendón medida aquí indica que las propiedades materiales también pudieron haber sido alteradas. La falta de cambio en el módulo de Young luego de los entrenamientos puede resaltar la limitación de este parámetro en base a las secciones finitas del tendón para reflejar las propiedades materiales del tendón entero. Interpretar los mecanismos que conducen a la hipertrofia del tendón se extiende más allá del alcance del artículo presente. Uno podría especular que ese mayor CSA del tendón puede proteger este tejido contra el daño causado por estrés excesivo y/o inusual. Tomado todo junto, las mediciones presentes indican que el entrenamiento de la fuerza activa una respuesta adaptativa sobre el tendón rotuliano de corredoras mujeres, sin afectar las propiedades mecánicas de este tejido. Si esta adaptación puede afectar las tasas de lesión o si tiene otros efectos entre los corredores, es un tema que necesita mayor investigación a futuro.

VO_{2máx} utilización fraccional del VO_{2máx} velocidad de carrera en 3.5 mmol·L⁻¹ [La-], y economía de carrera

La falta de cambio en el VO_{2máx} después del entrenamiento de la fuerza no es sorprendente y realmente está de acuerdo con la literatura actual (por ejemplo, [6, 12, 46]). La utilización fraccional del VO_{2máx} medida durante el test de 40 minutos de carrera extrema no cambió en el grupo R+F durante el curso del estudio. A nuestro conocimiento, éste es el primer estudio en medir la utilización fraccional del VO_{2máx} en la carrera después de sumar un entrenamiento de la fuerza pesado en atletas de resistencia. Sin embargo, el VO₂ en el umbral de lactato en porcentaje del VO_{2máx} se toma a menudo como una medida indirecta de la utilización fraccional del VO_{2máx} [11]. Los pocos estudios que miden esta variable en la carrera no reportan ningún efecto después de la suma de un entrenamiento de la fuerza pesado [2, 12]. En forma notable, hubo un aumento ligero en la utilización fraccional del VO_{2máx} en el grupo R en el transcurso de la intervención. Esto fue probable debido a una combinación de dos factores; una reducción pequeña pero no significativa en el VO_{2máx}, principalmente debido a un atleta que exhibe una reducción grande, y un aumento pequeño pero no significativo en el VO₂ del rendimiento.

Sorprendentemente, nosotros no encontramos ningún efecto del entrenamiento de la fuerza pesado sobre la economía de carrera, contrastando con la mayoría de los estudios previos, que típicamente reportan mejoras del 3-8% [2, 6, 13, 14]. Sin embargo, algunos estudios apoyan la falta de un efecto del entrenamiento de la fuerza sobre la economía de carrera [1, 7, 8, 47]. En dos de estos estudios [7, 47] la falta de una economía de carrera mejorada podría ser porque el programa del entrenamiento de la fuerza sólo consistió en una sesión para las piernas por semana.

Sosteniendo la falta de un efecto sobre el VO_{2máx}, la utilización fraccional del VO_{2máx} y la economía de carrera, el entrenamiento de la fuerza no tuvo un efecto en la velocidad de carrera a 3.5 mmol·L⁻¹ de lactato sanguíneo [La-]. Lo último está de acuerdo con la mayoría de la literatura actual que no reporta ningún cambio en la velocidad a un cierto umbral en sangre [la-] o umbral ventilatorio después de agregar varias formas de entrenamiento de la fuerza al entrenamiento normal de los corredores [2, 7, 12], aunque las excepciones existen [14]. Esto es bastante sorprendente considerando que una mejorada economía de carrera en teoría debería afectar la velocidad de carrera a un cierto umbral de lactato [11].

Rendimiento de la carrera

La falta de cambios en el rendimiento de la carrera extrema de 40' no está en línea con muchos de los estudios en esta área donde un rendimiento de la carrera mejorado se ha reportado [1, 2, 4-6]. Sin embargo, ningún cambio en el rendimiento está en línea con la falta presente de cambios en el rendimiento importante de factores determinantes como el VO_{2máx}, la economía de la carrera y la utilización fraccional del VO_{2máx}. Puesto que el entrenamiento de la fuerza no afecta el VO_{2máx} y la utilización fraccional del VO_{2máx}, el mecanismo para las observaciones de un rendimiento de la carrera mejorado en algunos otros estudios parece ser una economía de carrera mejorada [2, 6]. Sin embargo, no todos los estudios han encontrado que el entrenamiento de la fuerza para sea beneficioso para el rendimiento de la carrera [7, 8, 10, 47], y está de acuerdo con el estudio actual. Es interesante observar que estos estudios también no reportan mejoras en la economía de la carrera. Por lo tanto, la falta de un mejor rendimiento de la carrera en el estudio actual probablemente sea debido a ningún cambio en la economía de la carrera.

Aunque incierto, las diferencias en las medidas del rendimiento de la carrera inducidas por el entrenamiento entre el estudio actual y las de otros puede atribuirse a las diferencias metodológicas. En el estudio actual, todos los tests de carrera se realizaron a 5.3% de inclinación. Esta inclinación producía una velocidad de carrera bastante baja comparada a algunos otros estudios. En realidad, los cambios en la economía de carrera después del entrenamiento de la fuerza se han visto previamente que se relacionan a la velocidad de carrera [46]. Sin embargo, las mejoras en la economía de carrera después del entrenamiento de la fuerza también se han reportado a velocidades similares [20, 36] y a la misma inclinación [48] usada en el estudio actual. Por lo tanto, la inclinación usada probablemente no es la única explicación de por qué no se observó ningún cambio en la economía de la carrera y del rendimiento.

El hecho de que este estudio incluye a sólo atletas mujeres mientras la mayoría de los estudios previos o incluye sólo varones o una mezcla de corredores varones y mujeres, es lo que puede explicar quizás por qué no se observó ningún efecto del entrenamiento de la fuerza sobre la economía de carrera. Sin embargo, el entrenamiento de la fuerza se ha reportado que mejora la economía de carrera en las corredoras mujeres [13] haciendo esta explicación poco probable.

Unos de los mecanismos propuestos más frecuentemente para el posible efecto ergogénico del entrenamiento de la fuerza sobre la economía de la carrera son los cambios en la rigidez del músculo o tendones en las piernas [2, 14]. A pesar de esta especulación, los estudios tienen que investigar el efecto del entrenamiento de la fuerza pesado sobre las propiedades mecánicas del tendón rotuliano junto con la economía de la carrera, sin embargo. En el estudio actual, la rigidez del tendón inalterada y la mayor fuerza indican que más energía elástica puede ser guardada en el tendón rotuliano durante la fase de apoyo, amplificando la eficiencia y la potencia muscular. Sin embargo, la falta de cambios en la economía de la carrera no sostiene esta hipótesis, y la conclusión no puede verse con respecto de la influencia de las propiedades del

tendón rotuliano en el presente estudio.

El V_{\max} se ha reportado de ser la mejor medida de laboratorio para predecir el rendimiento en varias distancias de carrera [49] y realmente puede ser considerada una medida de rendimiento de la carrera [50]. La falta de una mayor V_{\max} indica aún más que el entrenamiento de la fuerza pesado no conllevó a un mejorado rendimiento de la carrera en el estudio actual. Se ha reportado previamente tanto una mejor V_{\max} [6, 36] como ningún cambio [14] en la V_{\max} después del entrenamiento de la fuerza pesado en corredores entrenados.

CONCLUSIÓN

En contraste a nuestra hipótesis, agregar un entrenamiento de la fuerza pesado al entrenamiento de la resistencia en atletas de resistencia mujeres bien entrenadas no afectó el rendimiento de la carrera medido como la distancia de carrera durante un test de 40 minutos de carrera extrema. La falta de efecto en el rendimiento probablemente fue porque la intervención del entrenamiento de la fuerza no mejoró la economía de la carrera o no cambiaron las propiedades mecánicas del tendón rotuliano. Sin embargo, el entrenamiento de la fuerza no tuvo un efecto negativo sobre la densidad capilar.

Agradecimientos

Nos gustaría agradecer a los participantes por su tiempo y esfuerzo. Los estudiantes Øyvind Trøen, Roger Kristoffersen, Allan Sørgaard Nielsen y Sondre Prestkvern por ayudar durante el seguimiento de la intervención y la toma de datos.

REFERENCIAS

1. Damasceno MV, Lima-Silva AE, Pasqua LA, Tricoli V, Duarte M, Bishop DJ, et al. (2015). Effects of resistance training on neuromuscular characteristics and pacing during 10-km running time trial. *Eur J Appl Physiol.* 2015; s00421-015-3130-z.
2. Storen O, Helgerud J, Stoa EM, Hoff J. (2008). Maximal strength training improves running economy in distance runners. *Med Sci Sports Exerc.* 2008;40(6): 1087-1092.
3. Paavolainen L, Hakkinen 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.* 1999;86(5): 1527-1533.
4. Hickson RC, Dvorak BA, Gorostiaga EM, Kurowski TT, Foster C. (1988). Potential for strength and endurance training to amplify endurance performance. *J Appl Physiol.* 1988;65(5): 2285-2290.
5. Barnes KR, Hopkins WG, McGuigan MR, Northuis ME, Kilding AE. (2013). Effects of resistance training on running economy and cross-country performance. *Med Sci Sports Exerc.* 2013;45(12): 2322-2331.
6. Sedano S, Marin PJ, Cuadrado G, Redondo JC. (2013). Concurrent training in elite male runners: the influence of strength versus muscular endurance training on performance outcomes. *J Strength Cond Res.* 2013;27(9): 2433-2443
7. Ferrauti A, Bergermann M, Fernandez-Fernandez J. (2010). Effects of a concurrent strength and endurance training on running performance and running economy in recreational marathon runners. *J Strength Cond Res.* 2010;24(10): 2770-2778.
8. Roschel H, Barroso R, Tricoli V, Batista MA, Acquesta FM, Serrao JC, et al. (2015). Effects of strength training associated with whole body vibration training on running economy and vertical stiffness. *J Strength Cond Res.*
9. Bertuzzi R, Pasqua LA, Bueno S, Damasceno MV, Lima-Silva AE, Bishop D, et al. (2013). Strength-training with whole-body vibration in long-distance runners: a randomized trial. *Int J Sports Med.* 2013;34(10): 917-923.
10. Kelly CM, Burnett AF, Newton MJ. (2008). The effect of strength training on three-kilometer performance in recreational women endurance runners. *J Strength Cond Res.* 2008;22(2): 396-403
11. Bassett DR, Howley ET. (2000). Limiting factors for maximum oxygen uptake and determinants of endurance performance. *Med Sci Sports Exerc.* 2000;32(1): 70-84.
12. Millet GP, Jaouen B, Borrani F, Candau R. (2002). Effects of concurrent endurance and strength training on running economy and VO_2 kinetics. *Med Sci Sports Exerc.* 2002;34(8): 1351-1359.
13. Johnston RE, Quinn TJ, Kertzer R, Vroman NB. (1997). Strength training in female distance runners: Impact on running economy. *J Strength Cond Res.* 1997;11(4): 224-229.
14. Guglielmo LG, Greco CC, Denadai BS. (2009). Effects of strength training on running economy. *Int J Sports Med.* 2009;30(1): 27-32.
15. Spurrs RW, Murphy AJ, Watsford ML. (2003). The effect of plyometric training on distance running performance. *Eur J Appl Physiol.* 2003;89(1): 1-7.
16. Roberts TJ, Azizi E. (2011). Flexible mechanisms: the diverse roles of biological springs in vertebrate movement. *J Exp Biol.* 2011;214(Pt 3): 353-361.

17. Arampatzis A, De Monte G, Karamanidis K, Morey-Klapsing G, Stafilidis S, Bruggemann GP. (2006). Influence of the muscle-tendon unit's mechanical and morphological properties on running economy. *J Exp Biol.* 2006;209(Pt 17): 3345-3357.
18. Reeves ND, Maganaris CN, Narici MV. (2003). Effect of strength training on human patella tendon mechanical properties of older individuals. *J Physiol.* 2003;548(Pt 3): 971-981.
19. Seynnes OR, Erskine RM, Maganaris CN, Longo S, Simoneau EM, Grosset JF, et al. (2009). Training-induced changes in structural and mechanical properties of the patellar tendon are related to muscle hypertrophy but not to strength gains. *Journal of applied physiology.* 2009;107(2): 523-530.
20. Francesca PM, Giulia DI, Stefania C, Alessandro S, Gianluca V, Antonio LT. (2012). Concurrent strength and endurance training effects on running economy in master endurance runners. *J Strength Cond Res.*
21. Magnusson SP, Hansen M, Langberg H, Miller B, Haraldsson B, Westh EK, et al. (2007). The adaptability of tendon to loading differs in men and women. *International journal of experimental pathology.* 2007;88(4): 237-240.
22. Folland JP, Williams AG. (2007). The adaptations to strength training: morphological and neurological contributions to increased strength. *Sports Med.* 2007;37(2): 145-168.
23. Bell GJ, Syrotuik D, Martin TP, Burnham R, Quinney HA. (2000). Effect of concurrent strength and endurance training on skeletal muscle properties and hormone concentrations in humans. *Eur J Appl Physiol.* 2000;81(5): 418-427.
24. Hather BM, Tesch PA, Buchanan P, Dudley GA. (1991). Influence of eccentric actions on skeletal muscle adaptations to resistance training. *Acta physiologica Scandinavica.* 1991;143(2): 177-185.
25. Kraemer WJ, Patton JF, Gordon SE, Harman EA, Deschenes MR, Reynolds K, et al. (1995). Compatibility of high-intensity strength and endurance training on hormonal and skeletal muscle adaptations. *J Appl Physiol.* 1995;78(3): 976-989.
26. Ingjer F, Brodal P. (1978). Capillary supply of skeletal muscle fibers in untrained and endurance-trained women. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol.* 1978;38(4): 291-299.
27. Brodal P, Ingjer F, Hermansen L. (1977). Capillary supply of skeletal muscle fibers in untrained and endurance-trained men. *The American journal of physiology.* 1977;232(6): H705-712.
28. Jeukendrup AE, Craig NP, Hawley JA. (2000). The bioenergetics of World Class Cycling. *Journal of science and medicine in sport / Sports Medicine Australia.* 2000;3(4): 414-433.
29. Vikmoen O, Ellefsen S, Troen O, Hollan I, Hanestadhaugen M, Raastad T, et al. (2015). Strength training improves cycling performance, fractional utilization of VO and cycling economy in female cyclists. *Scand J Med Sci Sports*
30. Ronnestad BR, Hansen EA, Raastad T. (2010). In-season strength maintenance training increases well-trained cyclists' performance. *Eur J Appl Physiol.* 2010;110(6): 1269-1282.
31. Howley ET, Bassett DR Jr., Welch HG. (1995). Criteria for maximal oxygen uptake: review and commentary. *Med Sci Sports Exerc.* 1995;27(9): 1292-1301.
32. Helland C, Bojsen-Moller J, Raastad T, Seynnes OR, Moltubakk MM, Jakobsen V, et al. (2013). Mechanical properties of the patellar tendon in elite volleyball players with and without patellar tendinopathy. *British journal of sports medicine.* 2013;47(13): 862-868.
33. Hopkins WG, Marshall SW, Batterham AM, Hanin J. (2009). Progressive statistics for studies in sports medicine and exercise science. *Med Sci Sports Exerc.* 2009;41(1): 3-13.
34. Ronnestad BR, Hansen EA, Raastad T. (2010). Effect of heavy strength training on thigh muscle cross-sectional area, performance determinants, and performance in well-trained cyclists. *Eur J Appl Physiol.* 2010;108(5): 965-975.
35. Aagaard P, Andersen JL, Bennekou M, Larsson B, Olesen JL, Crameri R, et al. (2011). Effects of resistance training on endurance capacity and muscle fiber composition in young top-level cyclists. *Scand J Med Sci Sports.* 2011;21(6): e298-307.
36. Taipale RS, Mikkola J, Nummela A, Vesterinen V, Capostagno B, Walker S, et al. (2010). Strength training in endurance runners. *Int J Sports Med.* 2010;31(7): 468-476.
37. Sjogaard G. (1984). Muscle morphology and metabolic potential in elite road cyclists during a season. *Int J Sports Med.* 1984;5(5): 250-254.
38. Costill DL, Fink WJ, Pollock ML. (1976). Muscle fiber composition and enzyme activities of elite distance runners. *Medicine and science in sports.* 1976;8(2): 96-100.
39. Tricoli V, Lamas L, Carnevale R, Ugrinowitsch C. (2005). Short-term effects on lower-body functional power development: weightlifting vs. vertical jump training programs. *J Strength Cond Res.* 2005;19(2): 433-437.
40. Wilson GJ, Newton RU, Murphy AJ, Humphries BJ. (1993). The optimal training load for the development of dynamic athletic performance. *Med Sci Sports Exerc.* 1993;25(11): 1279-1286.
41. Ronnestad BR, Kvamme NH, Sunde A, Raastad T. (2008). Short-term effects of strength and plyometric training on sprint and jump performance in professional soccer players. *J Strength Cond Res.* 2008;22(3): 773-780.
42. Kongsgaard M, Reitelseder S, Pedersen TG, Holm L, Aagaard P, Kjaer M, et al. (2007). Region specific patellar tendon hypertrophy in humans following resistance training. *Acta physiologica.* 2007;191(2): 111-121.
43. Kubo K, Kanehisa H, Ito M, Fukunaga T. (2001). Effects of isometric training on the elasticity of human tendon structures in vivo. *J Appl Physiol.* 2001;91(1): 26-32.
44. Kubo K, Komuro T, Ishiguro N, Tsunoda N, Sato Y, Ishii N, et al. (2006). Effects of low-load resistance training with vascular occlusion on the mechanical properties of muscle and tendon. *Journal of applied biomechanics.* 2006;22(2): 112-119.
45. Kubo K, Yata H, Kanehisa H, Fukunaga T. (2006). Effects of isometric squat training on the tendon stiffness and jump performance. *Eur J Appl Physiol.* 2006;96(3): 305-314.
46. Saunders PU, Telford RD, Pyne DB, Peltola EM, Cunningham RB, Gore CJ, et al. (2006). Short-term plyometric training improves running economy in highly trained middle and long distance runners. *J Strength Cond Res.* 2006;20(4): 947-954.
47. Mikkola J, Rusko H, Nummela A, Pollari T, Hakkinen K. (2007). Concurrent endurance and explosive type strength training improves neuromuscular and anaerobic characteristics in young distance runners. *Int J Sports Med.* 2007;28(7): 602-611.
48. Hoff J, Helgerud J. Maximal strength training enhances running economy and aerobic endurance performance In: Hoff J, Helgerud J, editors. (2003). Football (Soccer) New Developments in Physical Training Research. *Trondheim: Norwegian University*

of Science and Technology, Dept. of Physiology and Biomedical Engineering; 2003. p. 37-53.

49. Noakes TD, Myburgh KH, Schall R. (1990). Peak treadmill running velocity during the VO₂ max test predicts running performance. *Journal of sports sciences. 1990;8(1): 35-45.*
50. Hill DW, Rowell AL. Running velocity at VO₂max. (1996). *Med Sci Sports Exerc. 1996;28(1): 114-119.*

Cita Original

Vikmoen O, Raastad T, Seynnes O, Bergstrøm K, Ellefsen S, Rønnestad BR (2016) Effects of Heavy Strength Training on Running Performance and Determinants of Running Performance in Female Endurance Athletes. *PLoS ONE 11(3): e0150799.* Editor: Massimo Sacchetti, University of Rome Foro Italico, ITALIA Recibido: Junio 16, 2015; Aceptado: Febrero 20, 2016; Publicado: Marzo 8, 2016