Selected Papers from Impact

Especificidad de Sprint de Ejercicios Aislados de Fortalecimiento de Isquiotibiales en Términos de Actividad Muscular y Producción de Fuerza

Sprint Specificity of Isolated Hamstring-Strengthening Exercises in Terms of Muscle Activity and Force Production

Caroline Prince[1,2], Jean-Benoît Morin[3,4], Jurdan Mendiguchia[5], Johan Lahti[6], Kenny Guex[7,8], Pascal Edouard[3,9] y Pierre Samozino[1]

[1]*University of Savoie Mont Blanc, Laboratoire Interuniversitaire de Biologie de la Motricité (EA7424), Chambéry, France*
[2]*Physiotherapy and Sports Medicine Department, Swiss Olympic Medical Center, La Tour Hospital, Meyrin, Switzerland*
[3]*University of Lyon, UJM-Saint-Etienne, Inter-university Laboratory of Human Movement Science (LIBM EA 7424), Saint-Étienne, France*
[4]*Sports Performance Research Institute New Zealand, School of Sport and Recreation, Auckland University of Technology, Auckland, New Zealand*
[5]*Department of Physical Therapy, ZENTRUM Rehab and Performance Center, Barañain, Spain*
[6]*University of Côte d'Azur, LAMHESS, Nice, France*
[7]*School of Health Sciences (HESAV), University of Applied Sciences and Arts Western Switzerland (HES-SO), Lausanne, Switzerland*
[8]*Head Coach Sprint/Hurdles/Relays Coach 400m/400m Hurdles Swiss Athletics, Haus des Sports, Ittigen, Switzerland*
[9]*Sports Medicine Unit, Department of Clinical and Exercise Physiology, Faculty of Medicine, Regional Institute of Medicine and Sports Engineering (IRMIS), University Hospital of Saint-Etienne, Saint-Ètienne, France*

RESUMEN

Para entrenar los músculos isquiotibiales específicamente para el sprint, los programas de fortalecimiento deben apuntar a ejercicios asociados con la producción de fuerza horizontal y altos niveles de actividad de los isquiotibiales. Por lo tanto, los objetivos de este estudio fueron analizar la correlación entre las capacidades de producción de fuerza durante el sprint y ejercicios de fortalecimiento de los isquiotibiales, y comparar la actividad de los músculos isquiotibiales durante el sprint y estos ejercicios. Catorce atletas de pista y de campo, de nivel regional, realizaron dos sprints máximos de 50 m y seis ejercicios de fortalecimiento: ejercicios nórdicos de isquiotibiales sin y con flexión de cadera, extensión de cadera vertical en modalidades isométricas y concéntricas, patada de pie y puente deslizante de piernas. La capacidad de producción de fuerza horizontal al correr a velocidades bajas (F0) y altas (V0) se calculó a partir de los datos de la velocidad de carrera. El rendimiento de los músculos isquiotibiales se evaluó directa o indirectamente durante los ejercicios aislados. Se registró la actividad electromiográfica de los músculos isquiotibiales durante todas las tareas. Nuestros resultados demuestran correlaciones sustancialmente grandes a muy grandes entre la V0 y el rendimiento en la extensión de cadera vertical en isométrico (rs = 0.56; p = 0.040), ejercicio de isquiotibiales nórdicos sin flexión de cadera (rs = 0.66; p = 0.012) y con 90°

de flexión de cadera (rs = 0.73; p = 0.003), y entre la F0 y la extensión de cadera vertical en isométrico (rs = 0.60; p = 0.028) y el ejercicio nórdico de isquiotibiales sin flexión de cadera (rs = 0,59; p = 0.030). Sin embargo, ninguno de los ejercicios de prueba activó los músculos isquiotibiales más de un promedio del 60% de la activación máxima durante la carrera de velocidad máxima. En conclusión, los programas de entrenamiento que apuntan a ser específicos del sprint en términos de producción de fuerza horizontal podrían incluir ejercicios como el ejercicio de extensión de cadera vertical y el ejercicio de isquiotibiales nórdicos, además de la actividad máxima de sprint, que es el único ejercicio que conduce a niveles altos de actividad de los músculos isquiotibiales.

Palabras Clave: músculos isquiotibiales; producción de fuerza horizontal; mecánica de velocidad; ejercicios de fuerza; atletismo.

ABSTRACT

To train hamstring muscle specifically to sprint, strengthening programs should target exercises associated with horizontal force production and high levels of hamstring activity. Therefore, the objectives of this study were to analyze the correlation between force production capacities during sprinting and hamstring strengthening exercises, and to compare hamstring muscle activity during sprinting and these exercises. Fourteen track and field regional level athletes performed two maximal 50-m sprints and six strengthening exercises: Nordic hamstring exercises without and with hip flexion, Upright-hip-extension in isometric and concentric modalities, Standing kick, and Slide-leg-bridge. The sprinting horizontal force production capacity at low (F0) and high (V0) speeds was computed from running velocity data. Hamstring muscle performances were assessed directly or indirectly during isolated exercises. Hamstring muscle electromyographic activity was recorded during all tasks. Our results demonstrate substantially large to very large correlations between V0 and performances in the Upright-hip-extension in isometric (rs = 0.56; p = 0.040), Nordic hamstring exercise without hip flexion (rs = 0.66; p = 0.012) and with 90° hip flexion (rs = 0.73; p = 0.003), and between F0 and Upright-hip-extension in isometric (rs = 0.60; p = 0.028) and the Nordic hamstring exercise without hip flexion (rs = 0.59; p = 0.030). However, none of the test exercises activated hamstring muscles more than an average of 60% of the maximal activation during top-speed sprinting. In conclusion, training programs aiming to be sprint-specific in terms of horizontal force production could include exercises such as the Upright-hip-extension and the Nordic hamstring exercise, in addition to maximal sprinting activity, which is the only exercise leading to high levels of hamstring muscle activity.

Keywords: hamstring muscles; horizontal force production; sprint mechanics; strength exercises; track and field

INTRODUCCIÓN

La aceleración del sprint es un componente clave en numerosos deportes que buscan cubrir una distancia determinada en el menor tiempo posible (Morin y cols., 2011; Bourne y cols., 2018). Se sabe que el rendimiento de la aceleración del sprint está influenciado por las capacidades de los velocistas para producir y mantener la fuerza orientada horizontalmente hacia atrás en el suelo (Morin y cols., 2011, 2012). Los músculos extensores de la cadera (músculos isquiotibiales y glúteos) parecen ser los principales contribuyentes a dicha fuerza orientada. Más específicamente, parece que la capacidad de los músculos isquiotibiales para producir fuerza orientada horizontalmente durante la fase de apoyo está determinada por la capacidad de los músculos isquiotibiales para producir altos niveles de fuerza excéntrica y para activarse al final de la fase de balanceo ('swing') (Morin y cols., 2015; Edouard y cols., 2018). El papel de los músculos isquiotibiales varía a lo largo del sprint. Desde una perspectiva neuromuscular, la mayor parte de su actividad se genera desde el último swing hasta el final de la fase de apoyo (Yu y cols., 2008; Howard y cols., 2018). Desde una perspectiva cinemática, los músculos bíceps femoral y semitendinoso alcanzan su mayor longitud en la última fase del swing (Yu y cols., 2008; Schache y cols., 2012). Debido a que la articulación de la cadera alcanza el pico de flexión mientras la articulación de la rodilla comienza a extenderse (Kenneally-Dabrowski y cols., 2019), un estrés por distensión en los isquiotibiales aumenta en esta fase (Guex y Millet, 2013). Además, la producción de fuerza alcanza su punto máximo durante esta fase (Schache y cols., 2012). Por lo tanto, los músculos isquiotibiales juegan un rol importante en la carrera de alta velocidad (Morin y cols., 2015), y el sprint solicita los músculos isquiotibiales en varias modalidades, más específicamente desde la fase de balanceo medio hasta el comienzo de la fase de apoyo (Yu y cols., 2008; Schache y cols., 2012; Howard y cols., 2018; Kenneally-Dabrowski y cols., 2019). Estas especificidades deben tenerse en cuenta al seleccionar ejercicios de entrenamiento aislados que tienen como objetivo estimular y entrenar la función de los isquiotibiales con el mayor grado posible de transferencia a tareas y al

rendimiento de sprint reales.

Además de su importante rol en la mecánica y el rendimiento del sprint (Schache y cols., 2012; Morin y cols., 2015), los músculos isquiotibiales parecen ser los músculos más vulnerables en los deportes que involucran carreras de alta velocidad (Edouard y cols., 2016). ; Ekstrand y cols., 2016). Por lo tanto, los ejercicios de fortalecimiento de los isquiotibiales se han propuesto como un enfoque prometedor en la prevención primaria de la lesión de los músculos isquiotibiales (HMI) (Al Attar y cols., 2017; Bourne y cols., 2018), y se ha discutido su eficacia para disminuir la HMI en el contexto de estudios intervencionistas (Gabbe y cols., 2006; Goode y cols., 2015; Al Attar y cols., 2017; van Dyk y cols., 2019). Sin embargo, la HMI sigue siendo una lesión importante en los deportes relacionados con el sprint (Edouard y cols., 2016; Ekstrand y cols., 2016). Una explicación podría ser la falta de especificidad del sprint de los ejercicios de fortalecimiento de los isquiotibiales (Malliaropoulos y cols., 2012; Guex y Millet, 2013; van den Tillaar y cols., 2017), lo que podría limitar los beneficios potenciales de la transferencia de ganancia de fuerza de ejercicios para forzar la producción o resistir la tensión muscular durante el sprint. Van den Tillaar y cols. (2017) abordaron esta especificidad del sprint comparando la actividad de los músculos isquiotibiales y el ángulo de actividad máxima de la cadera y la rodilla durante los ejercicios de fortalecimiento y el sprint. Sus resultados mostraron que incluso si los ejercicios de velocidad y los ejercicios nórdicos de isquiotibiales (NHE) tenían la actividad máxima de los músculos isquiotibiales en un ángulo similar de cadera y rodilla, ninguno de los ejercicios aislados (NHE y variaciones, patada de pie, patada en recostado) que fueron testeados, indujo actividad electromiográfica (EMG) >75% de los isquiotibiales para el semimembranoso, 65% para el semitendinoso y 40% para el bíceps femoral de la medida durante el sprint de alta velocidad (van den Tillaar y cols., 2017).

Además, considerando el papel que juega el músculo isquiotibial en la producción de fuerza durante el sprint (Morin y cols., 2015), saber cuánto los ejercicios de fortalecimiento están dirigidos a la capacidad de producción de fuerza horizontal durante el sprint, también podría ser relevante para evaluar la especificidad del sprint de los ejercicios para ambos enfoques preventivos y de rendimiento. Dicha capacidad de producción de fuerza horizontal se puede evaluar a través de la relación fuerza-velocidad durante el sprint, resumida en sus dos extremos que caracterizan la capacidad de producción de fuerza horizontal a baja (F0) y alta (V0) velocidad (Samozino y cols., 2016; Morin y cols., 2019).

Para resumir, los músculos isquiotibiales desempeñan un papel importante en la producción de fuerza orientada horizontalmente durante el sprint (Morin y cols., 2015), pero el sprint es una causa importante de la lesión muscular de los isquiotibiales (Edouard y cols., 2016; Ekstrand y cols., 2016). Hasta la fecha, se sabe poco sobre el nivel de especificidad del sprint de diferentes ejercicios aislados de fortalecimiento de los músculos isquiotibiales (van den Tillaar y cols., 2017), pero esta información podría ayudar a identificar qué ejercicios de fortalecimiento solicitan los músculos isquiotibiales en las modalidades de sprint más cercanas. Un ejercicio de fortalecimiento de los isquiotibiales específico del sprint sería un ejercicio que active los isquiotibiales de manera significativa y que apunte a la producción de fuerza horizontal durante un sprint. Además de la prevención primaria y secundaria de lesiones, estos ejercicios también serían relevantes para mejorar la producción de fuerza horizontal desde una perspectiva de estrategia del rendimiento.

Por lo tanto, los objetivos de este estudio fueron: (1) analizar las correlaciones entre las capacidades de producción de fuerza horizontal durante el sprint y la capacidad de producción de fuerza durante los ejercicios de fortalecimiento de los músculos isquiotibiales, y (2) comparar la actividad de los músculos isquiotibiales durante el sprint y los ejercicios de fortalecimiento de los músculos isquiotibiales. Primero planteamos la hipótesis de que el rendimiento logrado durante los ejercicios de isquiotibiales dominantes ejecutados en condiciones similares a la producción de fuerza de los isquiotibiales durante un sprint, estaría correlacionado con la capacidad de producción de fuerza horizontal durante el sprint. Por lo tanto, se podría esperar que el rendimiento durante los ejercicios ejecutados en extensión de pierna completa y alta velocidad se correlacione con la producción de fuerza horizontal a altas velocidades de carrera (V0) y no a bajas velocidades de carrera (F0). Por el contrario, el rendimiento en ejercicios ejecutados a una velocidad baja o nula, y sin extensión completa de la pierna, se correlacionaría con la capacidad de producción de fuerza horizontal a velocidades de carrera bajas (F0) y no a velocidades de carrera altas (V0). Basado en los resultados de van den Tillaar y cols. (2017) durante el sprint en cinta ergométrica, la segunda hipótesis de este trabajo fue que el nivel de actividad alcanzado durante el sprint sobre el suelo no se puede reproducir con ejercicios de fortalecimiento de isquiotibiales.

MATERIALES Y MÉTODOS

Diseño y procedimientos del estudio

Llevamos a cabo un estudio transversal experimental con velocistas masculinos y femeninos adultos, que realizaron, durante una sesión, dos sprints máximos y seis ejercicios seleccionados por su capacidad para apuntar a los músculos isquiotibiales. La producción de fuerza de los isquiotibiales y la actividad muscular se evaluaron durante los sprints

máximos y los ejercicios. El protocolo del estudio fue revisado y aprobado por el Comité de Ética del Hospital de la Universidad de Saint-Etienne (Comité de Revisión Institucional: IORG0007394; IRBN322016/CHUSTE).

Población

Los participantes fueron reclutados de clubes de atletismo franceses y se incluyeron si practicaban carreras de sprint, entrenaban al menos tres veces por semana, realizaban entrenamiento de la fuerza semanalmente y aceptaban participar en este estudio. Los participantes con cualquier historial reciente (<6 meses) de lesiones HMI fueron excluidos del estudio, al igual que los participantes que informaron dolor o malestar lo suficientemente grande como para influir en sus capacidades para correr o realizar uno de los ejercicios.

Los cálculos del tamaño de la muestra (software G *Power, versión 3.1.9.2, Alemania) se determinaron para permitirnos (1) analizar las correlaciones entre las capacidades de producción de fuerza horizontal durante el sprint y la capacidad de producción de fuerza durante los ejercicios de fortalecimiento de los músculos isquiotibiales (para detectar la correlación de 0.7 entre las variables), y (2) para comparar la actividad de los músculos isquiotibiales durante el sprint y los ejercicios de fortalecimiento de los músculos isquiotibiales [basado en la diferencia mínima reportada en la actividad de los músculos isquiotibiales entre el ejercicio de fortalecimiento y el sprint (van den Tillaar y cols., 2017)] . Con un valor de significancia de 0.05 y una potencia deseada de 0.80, se calculó un tamaño de muestra de 13 sujetos para este análisis.

Protocolo experimental

Las pruebas se realizaron durante una sesión por participante en su centro de entrenamiento, en días diferentes para cada atleta pero con condiciones climáticas similares. Se pidió a los participantes que trajeran su propia ropa y zapatillas de correr con clavos. La prueba tuvo una duración de 1 hora y consistió en la recogida de datos basales, un calentamiento, dos sprints máximos y seis ejercicios, siempre siguiendo el mismo orden. Los datos antropométricos (edad, masa y altura) fueron recolectados al comienzo de la prueba por un fisioterapeuta. La información personal sobre el nivel de práctica deportiva de los participantes, los años de práctica, la frecuencia de entrenamiento y las lesiones HMI actuales o pasadas, fue recopilada a través de una encuesta *on-line*.

Cada participante tuvo que realizar un calentamiento personalizado de 30 minutos, basado en una estructura similar y consistente en carrera moderada, movimientos atléticos específicos (por ejemplo, driles) y aceleraciones. Después del período de calentamiento, a los participantes se les permitió 5-10 min de enfriamiento libre durante el cual un fisioterapeuta (CP) colocó electrodos de superficie EMG (en configuración bipolar) en la porción larga del bíceps femoral (BF) y en el semitendinoso (ST) de la pierna dominante del participante, sobre la piel que se había afeitado, raspado y limpiado con alcohol. La colocación de electrodos en los músculos ST y BF respetó la presunta dirección de las fibras musculares y las recomendaciones del SENIAM (Hermens y cols., 2000) (Figura 1). El electrodo de referencia se colocó en la cabeza del peroné.

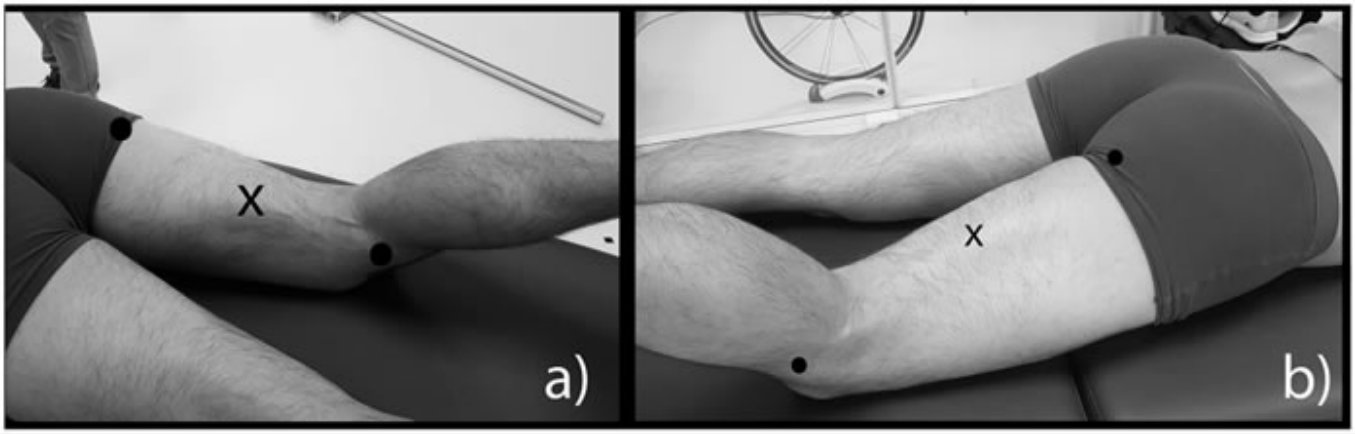


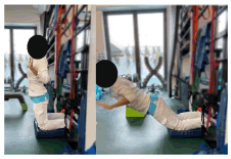
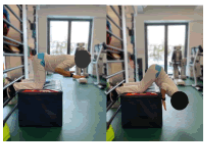
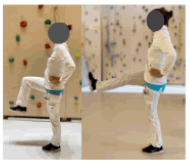
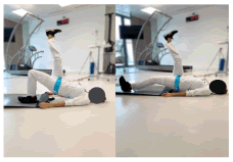
Figura 1**. Colocación de los electrodos EMG para el semitendinoso **(a)** y la porción larga del bíceps femoral **(b).

Después del período de descanso de 15 min, cada participante realizó dos sprints máximos en una distancia de 50 m. Los sprints se realizaron en una pista de atletismo sintética al aire libre con zapatillas con clavos y comenzando desde una posición agachada. Se permitió un período de descanso de 3-5 min entre los dos sprints máximos y 10 min de descanso

después de los dos sprints y antes de los seis ejercicios.

Luego, cada participante realizó seis ejercicios. Estos ejercicios fueron elegidos en base a estudios previos (Bourne y cols., 2017; van den Tillaar y cols., 2017; Hegyi y cols., 2019a) que informan ejercicios que activan los músculos isquiotibiales de manera significativa y se enfocan en la producción de fuerza horizontal durante el sprint, y en base a su capacidad para apuntar al músculo isquiotibial en varias modalidades que podrían parecerse a las que se encuentran durante las diferentes fases del sprint. More Específicamente, se eligió el ejercicio de extensión de cadera de pie (UHE) por su capacidad para evaluar las capacidades de los isquiotibiales como productores de fuerza horizontal en una posición más cercana a la fase de apoyo de un sprint (es decir, de pie y realizado en una pierna) (Malliaropoulos y cols., 2012). La patada de parado (SK) fue elegido por su capacidad para evaluar las capacidades excéntricas de los músculos isquiotibiales indirectos a alta velocidad (van den Tillaar y cols., 2017) y por su probabilidad con el posicionamiento de la última fase del swing. El puente deslizante de piernas (SB), así como el ejercicio nórdico de isquiotibiales (NHE), fueron elegidos por su capacidad para llevar a altos niveles de actividad neuromuscular de los músculos isquiotibiales (Hegyi y cols., 2019c) y por su capacidad para evaluar las capacidades excéntricas de los músculos isquiotibiales a baja velocidad (Bourne y cols., 2017; Hegyi y cols., 2019c). Los detalles de las ubicaciones, las instrucciones dadas a los participantes y una descripción completa de los ejercicios se proporcionan en la Tabla 1 y en el Material complementario. Los ejercicios se realizaron tres veces después de tres intentos de familiarización y en un orden aleatorio para evitar un potencial sesgo de la fatiga. No se dieron sesiones de familiarización ni instrucciones sobre la presentación del ejercicio antes de la prueba.

***Tabla 1**. Detalles de las ubicaciones, instrucciones y medidas tomadas durante el protocolo.*

	Sprints	Nordic Hamstring hip at 0° (NHE0)	Nordic hamstring hip at 90° (NHE90)	Upright hip extension (UHE C/I)	Standing Kick (SK)	Slide leg Bridge (SB)
						
Variable of interest for hamstring performance assessment	Horizontal force production capacity at low (F0) and high (V0) velocities	Hamstring muscle eccentric force production capacity at low velocities with higher (NHE90) or lower (NHE0) muscle lengths		Hamstring muscle concentric force production capacity at low (UHE-I) and high (UHE-C) velocities standing with leg straight	Indirect Hamstring muscle eccentric force production capability in the same lower limb configuration as for the end swing of the leg	Low maximal speed as an index of hamstring muscle eccentric force production capability
Placement	The participant is placed on a crouched position behind the starting line. The subject is asked to sprint as fast as possible until the 50 meters line	The participant is positioned on a bench on his/her knees with feet self-fixed. The subject is asked to fall forward as slow and as long as possible and keep arms crossed and hips in a neutral position	The participant is positioned on a bench on his/her knees with feet self-fixed. The subject is asked to fall forward as slow and as long as possible and keep arms crossed and hips in a 90° position	The participant is standing on one foot with hands on shoulders. The subject is asked to do a hip extension as fast as possible while keeping the lower leg straight	The participant is standing on his/her non-dominant leg with hands crossed on shoulders. The dominant leg is bent (90° hip and knee flexion). The subject is asked to do a knee extension as fast as possible while keeping the hip flexed and without losing balance	The subject is positioned supine with the dominant leg semi-flexed with foot on the ground, the non-dominant leg is stretched with foot in the air. The subject is asked to let his foot slide down to stretch the knee as slowly as possible
Set point	"Run as fast as possible until you reach the 50 meters line"	"Let yourself fall forward gently, restraining yourself only with the strength of your thighs. When the tension on the back of your thighs is too great, let go and put your hands on the ground"	"Let yourself fall forward gently, restraining yourself only with the strength of your thighs. When the tension on the back of your thighs is too great, let go and put your hands on the ground"	"While keeping your hands on your shoulder and your leg straight, shift your weight on your non-dominant leg and do a hip extension as fast as possible with the dominant leg. You cannot bend forward"	"While staying on one leg and without losing balance, kick as fast as possible with your flexed leg"	"While keeping one leg up, slip the other foot as slowly as possible on the ground. Until you cannot maintain your weight"
Measured parameters	Instantaneous displacement	Break angle		Maximum velocity (UHE-C) or force (UHE-I)	Maximum velocity	
Tools used for parameters recording	Radar Stalker ATS©	Video recording, 240 fps, kinematic analysis software Kinovea ©		Linear encoder and LabVIEW© program		

RECOLECCIÓN DE DATOS Y ANÁLISIS

Análisis EMG

La señal EMG del ST y del BF durante todo el sprint y los ejercicios se midió a 1000 Hz utilizando un sistema Data LOG MWX8 (masa = 125 g; Biometrics Ltd., Newport, Reino Unido). Las señales se rectificaron, suavizaron (ventana móvil 25), pasaron por un filtro de banda de bajo paso (tipo Butterworth, cuarto orden y frecuencia de corte a 8 Hz) y se analizaron utilizando el software Analyze©. La señal rectificada, suavizada y filtrada se promedió en cada ráfaga. Desde Hegyi y cols. (2019b) informaron recientemente una mayor actividad EMG durante los sprints a una velocidad diferente que durante la contracción voluntaria máxima, utilizamos la mayor actividad EMG sostenida durante los dos sprints para establecer el valor máximo (100%) y examinamos la actividad muscular durante los diversos ejercicios en relación con ese valor máximo.

Análisis del Sprint

La velocidad instantánea se registró utilizando un sistema Radar Stalker ATS II© fijado en un trípode a 1 m de altura y colocado 2 m detrás de los participantes. Se utilizó un método basado en un modelo biomecánico, datos antropométricos (altura y peso) y velocidad instantánea durante una aceleración de sprint para determinar las relaciones fuerza-velocidad individuales a partir de regresión lineal (Samozino y cols., 2016; Morin y cols., 2019). Sólo se consideró la parte del sprint desde el inicio hasta que la velocidad había alcanzado su meseta máxima. De la relación fuerza-velocidad, dos parámetros: producción de fuerza horizontal máxima teórica a velocidad nula (F0, intersección de la curva fuerza-velocidad con el eje de fuerza) y velocidad máxima teórica cuando se puede producir la fuerza horizontal (V0, intersección de la curva fuerza-

velocidad con el eje de velocidad): se utilizaron para caracterizar la capacidad de producción de fuerza horizontal durante el sprint a baja y alta velocidad, respectivamente.

Análisis de los ejercicios de fortalecimiento de los músculos isquiotibiales

Los parámetros de rendimiento, la recopilación de datos y el análisis se presentan para cada ejercicio en la Tabla 1 y con información adicional proporcionada en el Material Complementario.

Análisis estadístico

La normalidad de todas las variables se evaluó mediante la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk. La confiabilidad intra-prueba de cada variable mecánica se calculó usando los dos valores máximos de la sesión de prueba. Se calculó el coeficiente de correlación intraclase (ICC; efectos mixtos bidireccionales, concordancia absoluta, evaluador/medida única basada en Koo y Li, 2016, así como el error estándar de medida (SEM%).

Para probar la correlación entre las capacidades de producción de fuerza horizontal de velocidad (F0 y V0) y el rendimiento de los músculos isquiotibiales durante los ejercicios, se utilizaron las pruebas de correlación de Pearson (r) o las pruebas de correlación de Spearman (rs) cuando no se observó normalidad de la distribución. Para evaluar la magnitud de las correlaciones, se determinaron intervalos de límite de confianza al 95% (IC del 95%) del coeficiente de correlación y se interpretaron utilizando el umbral de Hopkin (Hopkins, 2000) ($r = 1$: correlación perfecta; $1 \geq r \geq 0.9$ casi perfecto; $0.9 \geq r \geq 0.7$ muy grande; $0.7 \geq r \geq 0.5$: grande; $0.5 \geq r \geq 0.3$: moderado; $0.3 \geq r \geq 0.1$: pequeño; $0.1 \geq r$: trivial). El nivel de significación estadística se fijó en $p < 0.05$.

Para comparar la actividad EMG de los músculos isquiotibiales observada durante cada ejercicio con la actividad EMG máxima durante el sprint (100%), se utilizaron los t-tests de Student de una muestra o pruebas de Wilcoxon no paramétricas cuando no se observó la distribución de normalidad. Después de ajustar por error de tipo 1, el nivel de significación estadística se estableció en $p \leq 0.008$.
Los análisis estadísticos se realizaron utilizando Microsoft Excel (Office, Microsoft, 2017) y JASP (software JASP Team, versión 0.9.1.0, Universidad de Amsterdam).

RESULTADOS

Participantes del estudio

Un total de 14 velocistas (7 mujeres y 7 hombres; edad (media ±SD): 19.5±3.2 años; masa corporal: 64.9±8.8 kg; altura: 1.72±0.11 m; años de práctica: 10±4.6; horas de entrenamiento por semana: 7.0±1.1) entrenados para carreras de sprint (mejor marca personal de la temporada: 13.53±0.65 seg para mujeres y 11.84±0.98 seg para hombres en sprints de 100 m, y 27.71±1.35 seg para mujeres y 24.45±1.00 seg para hombres en sprints de 200 m; en el momento del estudio), y que cumplieron con los criterios de inclusión, dieron su consentimiento por escrito para participar en el estudio.

CORRELACIÓN ENTRE LAS CAPACIDADES DE PRODUCCIÓN DE FUERZA HORIZONTAL DE VELOCIDAD (F0 Y V0) Y FUERZA

Producción durante los ejercicios

Las estadísticas descriptivas y las medidas de confiabilidad para las variables de ejercicio de los músculos isquiotibiales y de velocidad se presentan en la Tabla 2.

***Tabla 2**. Medias, desviaciones estándar y medidas de confiabilidad para datos de sprint y ejercicios.*

TABLE 2 | Means, standard deviations, and reliability measures for sprint and exercises data.

Mechanical variables		Mean ± SD	ICC	SEM%
Sprint	F0 (N/kg)	7.1 ± 0.6	0.996	6.62
Sprint	V0 (m/s)	8.6 ± 0.6	0.999	3.67
Sprint	Vmax (m/s)	8.2 ± 0.5	0.999	3.53
NHE 0	Break angle (°)	38 ± 17.8	0.996	6.55
NHE 90	Break angle (°)	35 ± 12	0.994	7.73
UHE-I	Maximal Force (N/kg)	0.54 ± 0.15	0.885	6.96
UHE-C	Peak speed (m/s)	4.3 ± 0.94	0.979	14.5
SK	Peak speed (m/s)	4.4 ± 0.93	0.985	2.44
SB	Peak speed (m/s)	0.16 ± 0.09	0.878	19.5

	Biceps femoris long head	Semitendinosus
Peak EMG activity [Normalized to sprint (%)]		
Sprint	100	100
NHE 0	46.1 ± 20.3	57.8 ± 18.3
NHE 90	29.7 ± 9.4	40.8 ± 7.9
UHE-I	54.0 ± 27.0	53.7 ± 20.7
UHE-C	48.4 ± 22.9	55.2 ± 22.3
SK	27.4 ± 19.4	29.5 ± 16.0
SB	34.28 ± 16.7	39.3 ± 13.4

EMG, Electromyography, normalized to maximal burst of activity during sprint; SD, Standard deviation; NHE0 and NHE90, Nordic hamstring exercise at 0and 90° of hip flexion; UHE-I and UHE-C, Upright-hip-extension in isometric and concentric modalities; SK, Standing kick; SB, Slide Leg Bridge; F0 and V0, Theoretical horizontal force production at low and high speed. ICC, Intraclass correlation coefficient; SEM, Standard error of measurement.

La confiabilidad fue excelente para SK (ICC: 0.96-0.99; SEM: 2.44%); para NHE0 (ICC: 0.95–0.99; SEM: 6.55%); para NHE90 (ICC: 0.90-0.99; SEM: 7.73%); la confiabilidad fue buena para UHE-C (ICC: 0.86-0.98; SEM: 14.5%) para SB (ICC: 0.78-0.97; SEM: 19.5%); para UHE-I (ICC: 0.81–0.97; SEM: 6.96%); para Vmáx (ICC: 0.89 a 0.98; SEM: 3.53%) y para V0 (ICC: 0.85 a 0.98; SEM: 3.67%), y la confiabilidad fue moderada para F0 (ICC: 0.69 a 0.96; SEM: 6.62%).

Se utilizaron pruebas no paramétricas debido a la distribución anormal de los datos. Se encontraron grandes correlaciones positivas estadísticamente significativas entre V0 y la fuerza máxima durante el ejercicio UHE-I [rs = 0.56 (IC del 95%: 0.454-0.665); p = 0.040] y entre V0 y el ángulo de ruptura durante ambos NHE0 [rs = 0.66 (IC 95% 0.554–0.764); p = 0.012] y NHE90 [rs = 0.73 (IC del 95%: 0.625-0.832); p = 0.003] (Tabla 3). Se encontraron grandes correlaciones positivas estadísticamente significativas entre F0 y la fuerza máxima durante UHE-I [rs = 0.60 (IC del 95%: 0.494–0.705); p = 0.028] y entre F0 y el ángulo del punto de ruptura durante el NHE0 [rs = 0.59 (IC 95% 0.484-0.695); p = 0.030] (Tabla 3). No se encontró una correlación significativa entre V0 y la velocidad máxima durante el SK, SB o UHE-C. Los resultados de los análisis de correlación se presentan en la Tabla 3, de los cuales, para información, aquellos que no están directamente asociados con nuestras hipótesis (por ejemplo, correlación entre el rendimiento durante ejercicios de fortalecimiento a baja velocidad y V0, o viceversa).

***Tabla 3**. Resultados del análisis de correlación entre la producción de fuerza horizontal durante el sprint y el rendimiento de los músculos isquiotibiales en los ejercicios.*

	Spearman r_s (correlation magnitude)	*p*	Lower and upper limits (95% CI) of the r_s
V0 - NHE0	0.66 (large)	* 0.012	0.55 (large)–0.76 (very large)
V0 - NHE 90	0.73 (very large)	** 0.003	0.62 (large)–0.83 (very large)
V0 - UHE-I	0.56 (large)	* 0.040	0.45 (moderate)–0.66 (large)
V0 - UHE-C	0.35 (moderate)	0.215	0.25 (small)–0.45 (moderate)
V0 - SK	–0.29 (small)	0.209	–0.39 (moderate)–0.18 (small)
V0 - SL	0.29 (small)	0.299	0.18 (small)–0.39 (moderate)
F0 - NHE0	0.59 (large)	* 0.030	0.48 (moderate)–0.69 (large)
F0 - NHE90	0.43 (moderate)	0.126	0.32 (moderate)–0.54 (large)
F0 - UHE-I	0.60 (large)	* 0.028	0.49 (moderate)–0.70 (very large)
F0 - UHE-C	0.26 (small)	0.374	0.15 (small)–0.36 (moderate)
F0 - SK	0.04 (trivial)	0.892	0.00 (trivial)–0.14 (small)
F0 - SB	0.09 (trivial)	0.765	0.00 (trivial)–0.19 (small)

*r_s: Spearman's correlation coefficient: p: level of significance of the correlation *p < 0.05, **p < 0.01; CI confidence intervals for the r_s; EMG, Electromyography; NHE0 and NHE90, Nordic hamstring exercise at 0 and 90° of hip flexion; UHE-I and UHE-C, Upright-hip-extension in isometric and concentric modalities; SK, Standing kick; SB, Slide leg bridge; F0 and V0, Theoretical horizontal force production at low and high speed.*

Comparación de la actividad EMG del músculo isquiotibial observada durante cada ejercicio con la actividad EMG máxima durante el sprint

Se utilizaron pruebas paramétricas ya que todas las series de datos EMG siguieron una distribución normal. Después de un ajuste de error tipo 1, el t-test de Student para una muestra informó diferencias estadísticamente significativas (p <0.008) entre la actividad EMG durante todos los ejercicios y la actividad EMG máxima durante el sprint (100%) (Figura 2).

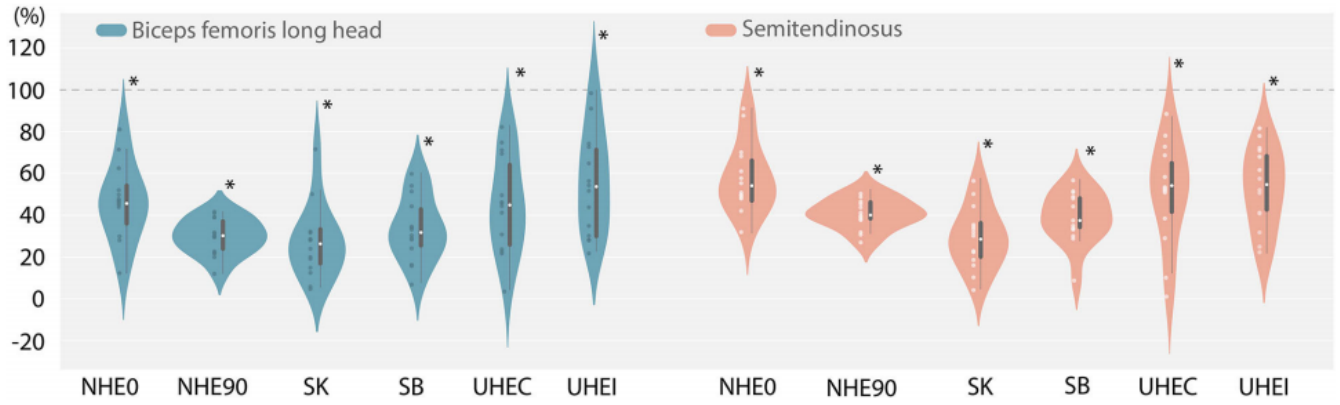


***Figura 2**. Distribución individual, mediana, cuartiles, mínimo, máxima actividad neuromuscular (EMG) del bíceps femoral y semitendinoso durante los ejercicios (%) relacionados con el turno máximo de actividad durante el sprint (100%). *Una diferencia significativa entre esta actividad EMG y el 100% (p <0,008). NHE0 y NHE90, ejercicio nórdico de isquiotibiales a 0° y 90° de flexión de cadera; UHE-I y UHE-C, extensión de cadera en vertical en modalidades isométricas y concéntricas; SK, patada desde pie; SB, puente de pierna deslizante.*

Discusión

Los principales hallazgos de este estudio fueron que (1) el rendimiento durante el ejercicio nórdico de isquiotibiales y el ejercicio de extensión de cadera desde parado en isométrico (UHE-I) se correlacionaron en gran medida con la producción de fuerza durante el sprint tanto en baja (F0) como en alta (V0) velocidad, y que (2) ninguno de los ejercicios evaluados (NHE0, NHE90, UHE-I, UHE-C, SK, SB) indujo una actividad EMG de isquiotibiales >60% (en promedio, para bíceps

femoral o semitendinoso) de la actividad EMG máxima de los isquiotibiales medida durante la aceleración máxima de velocidad en el sprint. Este estudio es el primero, según el conocimiento de los autores, que investiga la especificidad de los ejercicios de fortalecimiento en relación con los determinantes de la mecánica de sprint sobre suelo en términos de capacidad funcional de producción de fuerza y actividad EMG de superficie.

Especificidad de sprint de los ejercicios de fortalecimiento de isquiotibiales con respecto a la producción de fuerza horizontal durante el sprint

Nuestros resultados muestran que la capacidad de alcanzar un ángulo de punto de ruptura mayor (estimando indirectamente la capacidad de producción de fuerza excéntrica) durante los ejercicios NHE0 y NHE90 se correlacionó con mayores niveles de producción de fuerza a baja y alta velocidad (F0 y V0). Estos resultados están parcialmente de acuerdo con nuestra hipótesis, ya que esperábamos que los ejercicios de baja velocidad (NHE) estuvieran correlacionados con la producción de fuerza a baja velocidad, pero no con alta velocidad. Esto podría interpretarse como el hecho de que la capacidad funcional de los músculos isquiotibiales en la modalidad excéntrica puede estar relacionada con la capacidad de producir fuerza orientada hacia atrás durante toda la aceleración del sprint. Esto resalta una posible relación entre el rendimiento de velocidad y la modalidad de contracción excéntrica de los músculos isquiotibiales, y ofrece un apoyo indirecto a la teoría de Chapman y Caldwell (Chapman y Caldwell, 1983) que establece que la capacidad de los músculos isquiotibiales para reducir la energía cinética de los músculos de la extremidad inferior al final del swing (momento en el que se ha sugerido la contracción excéntrica de los isquiotibiales durante el sprint; Kenneally-Dabrowski y cols., 2019), podría ser un factor determinante en el rendimiento del sprint, especialmente a altas velocidades (Chapman y Caldwell, 1983). En cuanto a la relación entre la fuerza excéntrica de los isquiotibiales evaluada durante el NHE y la mecánica o el rendimiento del sprint, los resultados de la literatura reciente tienden a ser controvertidos (Ishøi y cols., 2018; Markovic y cols., 2019; Suarez-Arrones y cols., 2019). Los autores han reportado beneficios (Ishøi y cols., 2018), ningún efecto (Suarez-Arrones y cols., 2019) o efectos negativos (Markovic y cols., 2019) de NHE en el rendimiento del sprint. Nuestros resultados sugieren una relación positiva entre la fuerza excéntrica de los flexores de la rodilla y la producción de fuerza horizontal. Sin embargo, aún se necesitan estudios de intervención en atletas de pista y de campo para analizar el efecto potencial del NHE como ejercicio aislado sobre el rendimiento de sprints y/o reducción de las lesiones de HMI.

Nuestros resultados también revelaron que la producción de fuerza durante el ejercicio de extensión de cadera desde parado en isométrico (UHE-I) fue fuertemente correlacionada con la capacidad de producción de fuerza de sprint a alta (V0) y baja (F0) velocidad. Esto sugiere que la producción de fuerza de los isquiotibiales a velocidad nula pero en fuerza máxima está vinculada a la capacidad de producción de fuerza horizontal tanto en carreras de baja como de alta velocidad. Dado que el UHE-I imita la fase inicial de la postura, estos resultados podrían respaldar los hallazgos de Clark y Weyand (2014) quienes informaron que el impulso generado durante la primera mitad de la postura es de gran importancia para el rendimiento del sprint. Adicionalmente, a la fecha, la mayoría de las publicaciones de prevención de lesiones de HMI recomiendan que los ejercicios se dirijan al fortalecimiento de la fuerza excéntrica (Bourne y cols., 2018; van Dyk y cols., 2019), y se promuevan menos otras modalidades de fortalecimiento. Nuestros resultados actuales destacan la especificidad de la capacidad de fuerza isométrica con la producción de fuerza durante la carrera de velocidad y apoyan indirectamente los beneficios potenciales de las diversas modalidades de fortalecimiento, incluida la posición isométrica, así como la posición de la cadera y de la rodilla para los ejercicios, en el rendimiento y la reducción de la lesión de HMI (Kenneally-Dabrowski y cols., 2019). Sin embargo, estas correlaciones no se asociaron directamente a las hipótesis iniciales y podrían sufrir un error tipo I ligeramente inflado, que debe tenerse en cuenta a la hora de interpretar los resultados.

Actividad de los músculos isquiotibiales durante los ejercicios de fortalecimiento

Informamos una actividad de los músculos isquiotibiales significativamente mayor durante los sprints máximos sobre el suelo que durante los ejercicios específicos de los isquiotibiales. Nuestros resultados muestran una gran variabilidad interindividual y algunos sujetos alcanzan niveles de actividad muscular cercanos al sprint, sin embargo, considerando el promedio de los sujetos, ninguno de los ejercicios evaluados aquí activó los isquiotibiales tanto como un 58% (para bíceps femoral o semitendinoso) de lo que se sostuvo al máximo durante un sprint. Estos resultados fueron similares a los reportados por van den Tillaar y cols. (2017) de su estudio realizado en carreras de velocidad en cinta. Por lo tanto, nuestros resultados sugieren que hacer un sprint sería el mejor ejercicio para activar en gran medida los isquiotibiales e inducir la adaptación muscular. Esto apoya la hipótesis de Edouard y cols. (2019) estipulando que el sprint podría ser un “ejercicio” relevante en el control de la lesión de HMI relacionada con el sprint.

La actividad de los músculos isquiotibiales más alta se registró durante los ejercicios que imitaban las fases de la posición inicial [extensión de cadera desde parado en isométrico (UHE-I)] y de la posición [extensión de cadera desde parado en concéntricas (UHE-C)] de las salidas de velocidad. Del mismo modo, Yu y cols. (2008) informaron la máxima actividad de los isquiotibiales durante la fase última del swing y la fase de apoyo inicial de un sprint sobre el suelo. Con respecto a los niveles más altos de EMG durante el UHE-C, una explicación podría ser que este ejercicio solicita el isquiotibial en una cadena cinética abierta, lo que se ha reportado previamente como un aumento de la actividad de los músculos

isquiotibiales (Andersen y cols., 2006; Malliaropoulos y cols., 2015).

De manera similar a estudios anteriores (McAllister y cols., 2014; Bourne y cols., 2017), se informó una mayor actividad de los músculos isquiotibiales durante los ejercicios en modalidades isométricas o concéntricas que en modalidades excéntricas. Además, de todos los "ejercicios excéntricos" testeados, el ejercicio de isquiotibiales nórdicos realizado a 0° de flexión de la cadera (NHE0) permitió una mayor actividad de los músculos isquiotibiales, lo cual también fue informado por estudios previos (Bourne y cols., 2017; van den Tillaar y cols., 2017). De acuerdo con Hegyi y cols. (2019c), los 90° adicionales de flexión de la cadera durante el ejercicio de isquiotibiales nórdicos (NHE90) no facilitó una mayor actividad de los músculos isquiotibiales que el NHE0. Para ser más específicos al sprint, Guex y Millet (2013) sugirieron aumentar la tensión de los isquiotibiales durante los ejercicios aumentando la flexión de la cadera. En nuestro estudio, sin embargo, los niveles de actividad de los músculos isquiotibiales no parecieron aumentar de NHE90 a NHE0 (es decir, aumento de la tensión de los isquiotibiales). De manera controvertida, los ejercicios realizados con tensión negativa (UHE-C) hicieron posible lograr altos niveles de actividad de los músculos isquiotibiales, mientras que los ejercicios de mayor tensión (ejercicios de patada desde pie o ejercicios de isquiotibiales nórdicos) permitieron una menor actividad muscular.

Como la actividad EMG se correlaciona con la fuerza muscular (Disselhorst-Klug y cols., 2009), los bajos niveles de actividad EMG durante los ejercicios podrían explicarse por las intensidades submáximas alcanzadas en comparación con el sprint realizado a intensidad máxima. La comparación de la actividad EMG durante el sprint con ejercicios realizados a intensidades altas y controladas [como el peso muerto rumano (Andersen y cols., 2006; McAllister y cols., 2014)] podría dar más crédito a estos ejercicios en términos de su especificidad al sprint.

Aunque nuestros resultados mostraron que el ejercicio de los isquiotibiales nórdicos realizado a 90° de flexión de la cadera era específico para el sprint desde el punto de vista de la producción de fuerza, nuestro estudio también reveló que la actividad de los músculos isquiotibiales durante este ejercicio fue significativamente menor que durante el sprint. Hasta la fecha, el ejercicio nórdico de isquiotibiales es el ejercicio más estudiado para la prevención de lesiones (Gabbe y cols., 2006; Bourne y cols., 2018; van Dyk y cols., 2019), y parece ser un ejercicio clave en la reducción de lesión de HMI (Goode y cols., 2015; Al Attar y cols., 2017; van Dyk y cols., 2019). Aunque van Dyk y cols. (2019) informaron de su eficacia en la disminución de las tasas de lesiones de HMI, aún no se sabe si esto se debió a la realización de un ejercicio de fortalecimiento de los isquiotibiales en modalidad excéntrica, o los ejercicios de los isquiotibiales nórdicos *per se*. Además, dado que ningún estudio ha analizado la eficacia de otros ejercicios para prevenir la lesión de HMI, toda esta información sigue siendo sólo hipótesis.

Finalmente, algunos de los ejercicios que testeamos eran específicos para el sprint en términos de producción de fuerza; sin embargo, los niveles de actividad de los músculos isquiotibiales fueron heterogéneos en los diversos ejercicios de fortalecimiento y ninguno de ellos pudo activar los isquiotibiales tanto como lo haría el sprint. Por lo tanto, creemos que usar sólo un parámetro (capacidades de producción de fuerza o niveles de actividad muscular) para explicar la especificidad del sprint podría ser un enfoque reduccionista. En la práctica, nuestros resultados destacan el hecho de que el sprint se dirige a los músculos isquiotibiales de una manera irreplicable y debe ser parte de cualquier programa de acondicionamiento de los isquiotibiales o de prevención de lesiones.

Consideraciones metodológicas

El rendimiento de los músculos isquiotibiales se evaluó mediante la velocidad máxima durante algunos ejercicios de fortalecimiento en lugar de medir la producción de fuerza directa durante los ejercicios. Dado que la velocidad del movimiento depende de la fuerza producida durante este tipo de ejercicio a partir de la velocidad nula, elegimos evaluar la capacidad de producción de fuerza indirectamente midiendo la velocidad máxima. Sin embargo, podrían haberse incluido otros parámetros para abordar la producción de fuerza directa o indirectamente. Respecto al ejercicio de isquiotibiales nórdicos, Sconce y cols. (2015) reportaron una correlación entre un mayor “ángulo de ruptura” alcanzado y un mayor torque excéntrico del flexor de la rodilla. Sin embargo, parece que el ángulo de torque máximo y el ángulo del punto de ruptura no están correlacionados (Sconce y cols., 2015). Además, los ángulos articulares y las velocidades a las que se produce el torque máximo durante el ejercicio de isquiotibiales nórdicos podrían no ser una medida fiable y podría registrarse una mayor producción de fuerza excéntrica después de alcanzar el ángulo del punto de ruptura (Muggleton y cols., 2015).

Teniendo en cuenta el procedimiento de normalización EMG, la actividad EMG de los isquiotibiales durante los ejercicios aislados estuvo intrínsecamente relacionada con los ejercicios de sprint, por lo que no pudimos comparar la actividad muscular del BF y del ST durante los ejercicios ni establecer la relación BF/ST. Además, el uso de electrodos de superficie únicos proporciona una estimación de sólo un área del músculo (Hermens y cols., 2000). El uso de electrodos más precisos, como la EMG de alta definición (HDEMG) en nuestro estudio, podría haber proporcionado más información, ya que estos electrodos proporcionarían un espectro más amplio de la actividad muscular. Los estudios futuros podrían centrarse en este último punto para aclarar la especificidad de los ejercicios de fortalecimiento de los isquiotibiales que apuntan a las

diferentes fases del sprint. Finalmente, los atletas evaluados aquí eran velocistas de nivel intermedio y los hallazgos deben confirmarse aún más en niveles superiores.

Conclusión

Saber qué ejercicios de fortalecimiento aislados solicitan los músculos isquiotibiales en las modalidades funcionales más cercanas (en términos de fuerza y actividades EMG) en comparación con el sprint es de gran interés desde el punto de vista del rendimiento, la prevención primaria y el regreso al deporte. La especificidad del sprint de los ejercicios evaluados a través de la producción de fuerza y la actividad muscular reveló que la capacidad de producción de fuerza durante ciertos ejercicios como el de isquiotibiales nórdicos o el ejercicio de extensión de cadera desde parado estuvieron relacionados con la producción de fuerza horizontal durante el sprint. Sin embargo, con ninguno de estos ejercicios fue posible alcanzar niveles similares de actividad EMG a los inducidos por las actividades de velocidad. Las actividades de velocidad máxima parecen ser la única forma de lograr una alta actividad muscular. Sin embargo, se necesita más investigación para determinar qué ejercicio o combinación de ejercicios podría reducir las lesiones de los músculos isquiotibiales o aumentar el rendimiento del sprint.

Declaración de disponibilidad de datos

Los datos en bruto que respaldan las conclusiones de este artículo son proporcionados por los autores, sin reservas indebidas.

Declaración de Ética
Los estudios con participantes humanos fueron revisados y aprobados por el Comité de Ética del Hospital de la Universidad de Saint-Etienne, Junta de Revisión Institucional: IORG0007394; IRBN322016/CHUSTE. El consentimiento informado por escrito para participar en este estudio fue proporcionado por el tutor legal/pariente más cercano de los participantes.
Financiamiento
Este proyecto se llevó a cabo con el apoyo de la Fundación Paul Bennetot, Grupo Matmut, París, Francia (proyecto nº AP-FPB-19-003, 2020).
Conflicto de intereses
Los autores declaran que la investigación se llevó a cabo en ausencia de relaciones comerciales o financieras que pudieran interpretarse como un posible conflicto de intereses.
Material suplementario
El material complementario de este artículo se puede encontrar on line en:https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fspor.2020.609636/full#supplementary-material

REFERENCIAS

1. Al Attar, W. S. A., Soomro, N., Sinclair, P. J., Pappas, E., and Sanders, R. H. (2017). Effect of injury prevention programs that include the nordic hamstring exercise on hamstring injury rates in soccer players: a systematic review and meta-analysis. *Sports Med. 47, 907–916.*
2. Andersen, L. L., Magnusson, S. P., Nielsen, M., Haleem, J., Poulsen, K., and Aagaard, P. (2006). Neuromuscular activation in conventional therapeutic exercises and heavy resistance exercises: implications for rehabilitation. *Phys. Ther. 86, 683–697.*
3. Bourne, M. N., Timmins, R. G., Opar, D. A., Pizzari, T., Ruddy, J. D., Sims, C., et al. (2018). An evidence-based framework for strengthening exercises to prevent hamstring injury. *Sports Med. 48, 251–267.*
4. Bourne, M. N., Williams, M. D., Opar, D. A., Al Najjar, A., Kerr, G. K., and Shield, A. J. (2017). Impact of exercise selection on hamstring muscle activation. *Br. J. Sports Med. 51, 1021–1028.*
5. Chapman, A. E., and Caldwell, G. E. (1983). Factors determining changes in lower limb energy during swing in treadmill running. *J. Biomech. 16, 69–77.*
6. Clark, K. P., and Weyand, P. G. (2014). Are running speeds maximized with simple-spring stance mechanics? J. *Appl. Physiol. 117, 604–615.*
7. Disselhorst-Klug, C., Schmitz-Rode, T., and Rau, G. (2009). Surface electromyography and muscle force: limits in sEMG-force relationship and new approaches for applications. *Clin. Biomech. 24, 225–235.*
8. Edouard, P., Branco, P., and Alonso, J. M. (2016). Muscle injury is the principal injury type and hamstring muscle injury is the first injury diagnosis during top-level international athletics championships between 2007 and 2015. *Br. J. Sports Med. 50, 619–630.*
9. Edouard, P., Mendiguchia, J., Lahti, J., Arnal, P. J., Gimenez, P., Jimenez-Reyes, P., et al. (2018). Sprint acceleration mechanics in fatigue conditions: compensatory role of gluteal muscles in horizontal force production and potential protection of

hamstring muscles. *Front. Physiol. 9:1706.*
10. Edouard, P., Mendiguchia, J., Guex, K., Lahti, J., Samozino, P., and Morin, J.-B. (2019). Sprinting: a potential vaccine for hamstring injury? Sport Perform. Sci. Rep. 48:2. Available online at: *https://sportperfsci.com/sprinting-a-potential-vaccine-for-hamstring-injury/*
11. Ekstrand, J., Waldén, M., and Hägglund, M. (2016). Hamstring injuries have increased by 4% annually in men's professional football, since 2001: a 13-year longitudinal analysis of the UEFA Elite Club injury study. *Br. J. Sports Med. 50, 731–737.*
12. Gabbe, B. J., Branson, R., and Bennell, K. L. (2006). A pilot randomised controlled trial of eccentric exercise to prevent hamstring injuries in community-level Australian Football. *J. Sci. Med. Sport 9, 103–109.*
13. Goode, A. P., Reiman, M. P., Harris, L., DeLisa, L., Kauffman, A., Beltramo, D., et al. (2015). Eccentric training for prevention of hamstring injuries may depend on intervention compliance: a systematic review and meta-analysis. *Br. J. Sports Med. 49, 349–356.*
14. Guex, K., and Millet, G. P. (2013). Conceptual framework for strengthening exercises to prevent hamstring strains. *Sports Med. 43, 1207–1215.*
15. Hegyi, A., Csala, D., Péter, A., Finni, T., and Cronin, N. J. (2019a). High-density electromyography activity in various hamstring exercises. *Scand. J. Med. Sci. Sports 29, 34–43.*
16. Hegyi, A., Gonçalves, B. A. M., Finni, T., and Cronin, N. J. (2019b). Individual region- and muscle-specific hamstring activity at different running speeds. *Med. Sci. Sports Exerc. 51, 2274–2285.*
17. Hegyi, A., Lahti, J., Giacomo, J.-P., Gerus, P., Cronin, N. J., and Morin, J.-B. (2019c). Impact of hip flexion angle on unilateral and bilateral nordic hamstring exercise torque and high-density electromyography activity. *J. Orthopaed. Sports Phys. Ther. 49, 584–592.*
18. Hermens, H. J., Freriks, B., Disselhorst-Klug, C., and Rau, G. (2000). Development of recommendations for SEMG sensors and sensor placement procedures. *J. Electromyogr. Kinesiol. 10, 361–374.*
19. Hopkins, W. (2000). Measures of reliability in sports medicine and science. *Sports Med. 30, 1–15.*
20. Howard, R. M., Conway, R., and Harrison, A. J. (2018). Muscle activity in sprinting: a review. *Sports Biomech. 17, 1–17.*
21. Ishøi, L., Hölmich, P., Aagaard, P., Thorborg, K., Bandholm, T., and Serner, A. (2018). Effects of the Nordic Hamstring exercise on sprint capacity in male football players: a randomized controlled trial. *J. Sports Sci. 36, 1663–1672.*
22. Kenneally-Dabrowski, C. J. B., Brown, N. A. T., Lai, A. K. M., Perriman, D., Spratford, W., and Serpell, B. G. (2019). Late swing or early stance? a narrative review of hamstring injury mechanisms during high-speed running. *Scand. J. Med. Sci. Sports 29, 1083–1091.*
23. Koo, T. K., and Li, M. Y. (2016). A guideline of selecting and reporting intraclass correlation coefficients for reliability research. *J. Chiropract. Med. 15, 155–163.*
24. Malliaropoulos, N., Mendiguchia, J., Pehlivanidis, H., Papadopoulou, S., Valle, X., Malliaras, P., et al. (2012). Hamstring exercises for track and field athletes: injury and exercise biomechanics, and possible implications for exercise selection and primary prevention. *Br. J. Sports Med. 46, 846–851.*
25. Malliaropoulos, N., Panagiotis, T., Jurdan, M., Vasilis, K., Debasish, P., Peter, M., et al. (2015). Muscle and intensity based hamstring exercise classification in elite female track and field athletes: implications for exercise selection during rehabilitation. *Open Access J. Sports Med. 6, 209–217.*
26. Markovic, G., Sarabon, N., Boban, F., Zoric, I., Jelcic, M., Sos, K., et al. (2019). Nordic Hamstring strength of highly trained youth football players and its relation to sprint performance. *J. Strength Cond. Res. 34, 800–807.*
27. McAllister, M. J., Hammond, K. G., Schilling, B. K., Ferreria, L. C., Reed, J. P., and Weiss, L. W. (2014). Muscle activation during various hamstring exercises. *J. Strength Cond. Res. 28, 1573–1580.*
28. Morin, J. B., Bourdin, M., Edouard, P., Peyrot, N., Samozino, P., and Lacour, J.-R. (2012). Mechanical determinants of 100-m sprint running performance. *Eur. J. Appl. Physiol. 112, 3921–3930.*
29. Morin, J. B., Edouard, P., and Samozino, P. (2011). Technical ability of force application as a determinant factor of sprint performance. *Med. Sci. Sports Exerc. 43, 1680–1688.*
30. Morin, J. B., Gimenez, P., Edouard, P., Arnal, P., Jiménez-Reyes, P., Samozino, P., et al. (2015). Sprint acceleration mechanics: the major role of hamstrings in horizontal force production. *Front. Physiol. 6:404.*
31. Morin, J. B., Samozino, P., Murata, M., Cross, M., and Nagahara, R. (2019). A simple method for computing sprint acceleration kinetics from running velocity data: replication study with improved design. *J. Biomech. 94, 82–87.*
32. Muggleton, S., Shield, A., and Kerr, G. (2015). Kinematics and Kinetics of the Nordic Hamstring Curl. *Brisbane, QLD: Queensland University of Technology.*
33. Samozino, P., Rabita, G., Dorel, S., Slawinski, J., Peyrot, N., Saez de Villarreal, E., et al. (2016). A simple method for measuring power, force, velocity properties, and mechanical effectiveness in sprint running: simple method to compute sprint mechanics. *Scand. J. Med. Sci. Sports 26, 648–658.*
34. Schache, A. G., Dorn, T. W., Blanch, P. D., Brown, N. A. T., and Pandy, M. G. (2012). Mechanics of the human hamstring muscles during sprinting. *Med. Sci. Sports Exerc. 44, 647–658.*
35. Sconce, E., Jones, P., Turner, E., Comfort, P., and Graham-Smith, P. (2015). The validity of the nordic hamstring lower for a field-based assessment of eccentric hamstring strength. *J. Sport Rehabil. 24, 13–20.*
36. Suarez-Arrones, L., Lara-Lopez, P., Rodriguez-Sanchez, P., Lazaro-Ramirez, J. L., Di Salvo, V., Guitart, M., et al. (2019). Dissociation between changes in sprinting performance and Nordic hamstring strength in professional male football players. *PLoS ONE 14:e0213375.*
37. van den Tillaar, R., Solheim, J. A. B., and Bencke, J. (2017). Comparision of hamstring muscle activation during high-speed running and various hamstring strengthening exercises. *Int. J. Sports Phys. Ther. 12, 718–727.*
38. van Dyk, N., Behan, F. P., and Whiteley, R. (2019). Including the Nordic hamstring exercise in injury prevention programmes halves the rate of hamstring injuries: a systematic review and meta-analysis of 8459 athletes. *Br. J. Sports Med. 53, 1362–1370.*

39. Yu, B., Queen, R. M., Abbey, A. N., Liu, Y., Moorman, C. T., and Garrett, W. E. (2008). Hamstring muscle kinematics and activation during overground sprinting. *J. Biomech. 41, 3121–3126.*

Cita Original

Prince C, Morin J-B, Mendiguchia J, Lahti J, Guex K, Edouard P and Samozino P (2021) Sprint Specificity of Isolated Hamstring-Strengthening Exercises in Terms of Muscle Activity and Force Production. Front. Sports Act. Living 2, 609636. http://doi.org/10.3389/fspor.2020.609636