

Selected Papers from Impact

# Variables Mecánicas del Sprint en Deportistas de Élite: ¿Los Perfiles de Fuerza-Velocidad son Específicos del Deporte o Individuales?

## Sprint Mechanical Variables in Elite Athletes: Are Force-Velocity Profiles Sport Specific or Individual?

Thomas A. Haugen, Felix Breitschädel y Stephen Seiler

### RESUMEN

#### Objetivo

El objetivo principal de esta investigación fue cuantificar las diferencias en las variables mecánicas del sprint entre deportes y dentro de cada deporte. Los objetivos secundarios fueron cuantificar las diferencias de sexo y las relaciones entre las variables. Métodos

En este estudio transversal de deportistas de élite, 235 mujeres ( $23 \pm 5$  años y  $65 \pm 7$  kg) y 431 hombres ( $23 \pm 4$  años y  $80 \pm 12$  kg) de 23 deportes diferentes (incluyendo 128 medallistas de Campeonatos Mundiales y/o Juegos Olímpicos) se pusieron a prueba en un sprint de 40 m en el Centro de Entrenamiento Olímpico Noruego entre 1995 y 2018. Estos eran datos pre-existentes de las pruebas trimestrales o semestrales que los deportistas realizaban con fines de entrenamiento. Se utilizaron datos antropométricos y de velocidad-tiempo de sprint para calcular la velocidad máxima teórica, la fuerza horizontal, la potencia horizontal, la pendiente de la relación fuerza-velocidad, el ratio de fuerza máxima y el índice de la técnica de aplicación de fuerza. Resultados

Se observaron diferencias sustanciales en los perfiles mecánicos entre los deportes. Los deportistas en deportes en los que la capacidad de sprint es un predictor importante del éxito (por ejemplo, deportistas que corren, saltan y hacen bobsleigh) produjeron los valores más altos para la mayoría de las variables, mientras que los deportistas en deportes en los que la capacidad de sprint no es tan importante tendieron a producir valores sustancialmente más bajos. Las diferencias de sexo variaron de pequeñas a grandes, dependiendo de la variable de interés. Aunque la mayoría de las variables se asociaron fuertemente con el tiempo de sprint de 10- y 40-m, se observaron diferencias individuales considerables en las variables mecánicas de sprint entre deportistas con el mismo rendimiento. Conclusiones

Nuestros datos de una gran muestra de deportistas de élite probados en condiciones idénticas proporcionan una imagen holística del continuo perfil fuerza-velocidad-potencia en los deportistas. Los datos indican que las variables mecánicas del sprint son más individuales que específicas del deporte. Los valores presentados en este estudio podrían ser utilizados por los entrenadores para desarrollar intervenciones que optimicen el estímulo de entrenamiento para el deportista individual.

**Palabras Clave:** sprint, fuerza, velocidad, variable mecánica, género

## ABSTRACT

---

**Purpose:** The main aim of this investigation was to quantify differences in sprint mechanical variables across sports and within each sport. Secondary aims were to quantify sex differences and relationships among the variables. **Methods:** In this cross-sectional study of elite athletes, 235 women ( $23 \pm 5$  y and  $65 \pm 7$  kg) and 431 men ( $23 \pm 4$  y and  $80 \pm 12$  kg) from 23 different sports (including 128 medalists from World Championships and/or Olympic Games) were tested in a 40-m sprint at the Norwegian Olympic Training Center between 1995 and 2018. These were pre-existing data from quarterly or semi-annual testing that the athletes performed for training purposes. Anthropometric and speed-time sprint data were used to calculate the theoretical maximal velocity, horizontal force, horizontal power, slope of the force-velocity relationship, maximal ratio of force, and index of force application technique. **Results:** Substantial differences in mechanical profiles were observed across sports. Athletes in sports in which sprinting ability is an important predictor of success (e.g., athletics sprinting, jumping and bobsleigh) produced the highest values for most variables, whereas athletes in sports in which sprinting ability is not as important tended to produce substantially lower values. The sex differences ranged from small to large, depending on variable of interest. Although most of the variables were strongly associated with 10- and 40-m sprint time, considerable individual differences in sprint mechanical variables were observed among equally performing athletes. **Conclusions:** Our data from a large sample of elite athletes tested under identical conditions provides a holistic picture of the force-velocity-power profile continuum in athletes. The data indicate that sprint mechanical variables are more individual than sport specific. The values presented in this study could be used by coaches to develop interventions that optimize the training stimulus to the individual athlete.

**Keywords:** sprint, force, speed, mechanical variable, gender

## INTRODUCCIÓN

---

Correr una distancia corta lo más rápido posible es una capacidad del core en muchos deportes. Para un velocista que compite en atletismo, 100 m y 200 m, esta capacidad por sí sola los define como ejecutantes. En el bobsleigh, los deportistas deben correr mientras mueven una masa externa. La capacidad de sprint también es crucial en la mayoría de los deportes de equipo, ya que la capacidad de crear o cerrar pequeñas brechas puede ser decisiva en situaciones de gol. Incluso en los típicos deportes de resistencia, la capacidad de aceleración explosiva puede ser una ventaja para ganar medallas al final de una carrera reñida. En consecuencia, a lo largo de los años se han realizado numerosos estudios de entrenamiento de sprint en una amplia gama de deportes. Se ha investigado en diferentes combinaciones [1-3] el sprint en condiciones asistidas, resistidas y normales, el entrenamiento de fuerza máxima y explosiva, el entrenamiento pliométrico y la carrera de alta intensidad. Aunque el principio de especificidad está claramente presente, hasta ahora no ha surgido ningún método de entrenamiento como superior. Por lo tanto, se deben tener en cuenta las predisposiciones individuales a la hora de prescribir los programas de entrenamiento.

A lo largo de los años se ha hecho un esfuerzo considerable para cuantificar las variables subyacentes del rendimiento del sprint. Los trabajos seminales de Fenn & Marsh [4] describieron la relación fuerza-velocidad (Fv) en músculos aislados de ranas y gatos, una relación que más tarde fue confirmada en humanos por Wilkie [5]. Los avances tecnológicos han permitido a los científicos explorar más de cerca los aspectos fundamentales de las habilidades de sprint, y en la actualidad, la fisiología y la mecánica de la carrera de sprint son típicamente interrogadas a través de variables mecánicas macroscópicas [6-8]. Samozino et al. [9] han desarrollado recientemente un método sencillo y práctico para perfilar las capacidades mecánicas del sistema neuromuscular utilizando un enfoque dinámico inverso aplicado al movimiento del centro de masa, calculando las fuerzas de reacción del suelo progresivas en el plano sagital del movimiento de los corredores durante un sprint acelerado a partir de datos antropométricos y espacio-temporales únicamente. La velocidad máxima teórica ( $v_0$ ), la fuerza horizontal ( $F_0$ ), la potencia horizontal ( $P_{\text{máx}}$ ) y el perfil fuerza-velocidad (es decir, la pendiente de la relación fuerza-velocidad; SFV) se pueden calcular a partir de la curva velocidad-tiempo. Otros índices, como el ratio de fuerza (RF) y el índice de la técnica de aplicación de fuerza (DRF) también se pueden calcular a partir del mismo método. El RF es un ratio entre la componente horizontal progresiva de la fuerza de reacción del suelo y la fuerza resultante correspondiente, mientras que DRF expresa la capacidad del deportista para mantener una producción neta de fuerza horizontal a pesar del aumento de la velocidad a lo largo del sprint acelerado [6]. Estas variables son factores determinantes para el rendimiento del sprint, de acuerdo con las leyes del movimiento, y proporcionan información sobre las limitaciones biomecánicas individuales [6-8,10].

Una aplicación prometedora del perfil de fuerza-velocidad está en el diseño de programas de entrenamiento

individualizados de sprint. Un programa eficaz de entrenamiento de sprint debe centrarse en los principales factores que limitan el rendimiento del deportista [11-12]. Para ayudar a adaptar el programa de entrenamiento al individuo, el entrenador podría comparar los valores de la prueba del individuo con los valores de prueba que son típicos para el deporte. A un deportista con un valor de velocidad bajo para el deporte se le podría prescribir más velocidad máxima de sprint, mientras que a un deportista con un valor de fuerza horizontal bajo para el deporte se le podría prescribir más entrenamiento de fuerza horizontal [11]. Actualmente, los datos del perfil fuerza-velocidad de sprint sólo están disponibles en deportistas de unos pocos deportes seleccionados; estudios previos sólo analizaron velocistas especialistas o deportistas de deportes de equipo seleccionados [8, 10, 13-19]. No está claro si los perfiles de fuerza-velocidad de sprint medidos anteriormente son específicos para el deporte o para el deportista. Para individualizar un programa de entrenamiento para un deportista en un deporte dado, el entrenador requiere una imagen holística del continuum del perfil de fuerza-velocidad en los deportistas. Por lo tanto, el objetivo del presente estudio fue cuantificar las diferencias en las variables mecánicas del sprint en muchos deportes y dentro de cada deporte. Los objetivos secundarios fueron cuantificar las diferencias de sexo y las relaciones entre las variables.

## MATERIALES Y MÉTODOS

---

### Participantes

El centro de entrenamiento Olímpico Noruego es un centro de pruebas estandarizado utilizado por un gran número de deportistas de élite de muchos deportes. Entre 1995 y 2018 se recopiló una base de datos de los resultados de las pruebas de sprint de 40-m, que proporciona una base para explorar el rendimiento del sprint y las propiedades mecánicas de los deportistas. En este estudio transversal analizamos las pruebas de sprint de 666 deportistas de 23 deportes. Todos los participantes eran deportistas de equipos nacionales Noruegos, es decir, representaban a Noruega en competiciones internacionales de alto nivel, y 128 de los deportistas eran medallistas de Campeonatos Mundiales y/o Juegos Olímpicos.

### Declaración de Ética

Este estudio se basó en datos pre-existentes de pruebas trimestrales o semestrales que los deportistas realizaban con fines de entrenamiento, por lo que no se obtuvo el consentimiento informado [20]. Todos los datos fueron anónimos para cumplir con la Normativa General de Protección de Datos de la Unión Europea. El estudio fue revisado por la Autoridad Noruega de Protección de Datos y aprobado por el comité de ética de la Facultad de Ciencias de la Salud y el Deporte de la Universidad de Agder (número de referencia 19/00068).

### Procedimientos y Manejo de Datos

Todos los deportistas incluidos fueron probados en el periodo 1995-2018. Las pruebas se realizaron en una pista interior de 40 metros con una superficie Mondotrack FTS de 8 mm (Mondo, Conshocken, EEUU.) en el centro de entrenamiento Olímpico Noruego de Oslo. Se completó un programa de calentamiento estándar antes de la prueba de sprint, comenzando con un trote ligero de 10-15 minutos, seguido de 5-6 minutos de ejercicios específicos de sprint, 2-4 zancadas con velocidad creciente y 1-2 arranques de prueba. Durante las pruebas, los deportistas asumieron la posición inicial y comenzaron a correr por su propia iniciativa después de que el líder de la prueba les autorizara a comenzar. Se realizaron nuevas pruebas cada 3-5 minutos hasta que se observó una meseta de rendimiento. En la práctica, el 80% de todos los jugadores lograron su mejor rendimiento en dos pruebas. La masa corporal se evaluó inmediatamente antes o después de la prueba de sprint en una plataforma de fuerza estacionaria (AMTI, modelo OR6-5-1). Los datos de un solo deportista se incluyeron en una categoría para cada análisis. Esa categoría fue la afiliación del jugador en el día de su mejor resultado en la prueba de sprint. Una hoja de cálculo Excel desarrollada por Morin & Samozino [21] formó la base para los cálculos de  $F_0$ ,  $v_0$ ,  $P_{max}$ ,  $SFV$ ,  $RF_{max}$  y  $DRF$ . Estos cálculos se basaron en la mejor prueba de sprint individual, los tiempos intermedios asociados y la masa corporal. La temperatura y la presión atmosférica se ajustaron a 20 °C y 760 mmHg.

Se utilizaron dos sistemas de cronometraje diferentes. En la época de 1995-2011, se colocó una plataforma de salida de 60x60 cm debajo de la pista en la línea de partida. El reloj se inició cuando el pie delantero salió de la plataforma. Los tiempos intermedios se registraron con una timing gate de haz dividido para cada 10 m de los sprints. Los transmisores se colocaron a 140 cm sobre el nivel del suelo, mientras que los reflectores se colocaron a 130 y 150 cm sobre el suelo. Ambos haces tuvieron que ser interrumpidos para disparar cada timing gate. Se ha evaluado la precisión y fiabilidad de la configuración del cronometraje [22]. En enero de 2011, se actualizó el sistema de cronometraje. Las timing gates de haz dividido fueron reemplazadas por timing gates de haz doble, mientras que la plataforma de salida fue reemplazada por una timing gate de haz simple ubicada a 60 cm delante de la línea de salida y a 50 cm por encima del nivel del suelo. Se realizaron pruebas piloto rigurosas antes de decidir la ubicación exacta de la timing gate al inicio para proporcionar

tiempos comparables con la configuración anterior. Las comparaciones simultáneas ( $n = 50$ ) de la configuración de cronometraje antigua y nueva no revelaron diferencias en los tiempos de carrera de 40 m (media  $\pm$  SD:  $0,00 \pm 0,02$  s). También se evaluó la precisión y fiabilidad del sistema de cronometraje de haz doble [23]. En general, el error típico (coeficiente de variación; CV) fue de 0,6-2,4% para tiempos de sprint,  $\sim 1,5\%$  para  $v_0$  y RFmax, y de 3,5-5,1% para  $F_0$ , Pmax, SFV y DRF para ambas configuraciones de cronometraje.

Para asegurar valores mecánicos válidos de sprint cuando se utilizan tiempos intermedios como entrada en el método propuesto por Samozino et al. [9], es crucial que i) se capture toda la fase de aceleración, y ii) la iniciación del tiempo (el tiempo 0) esté muy cerca del primer aumento de producción de fuerza en el suelo [24]. Para los procedimientos actuales, el centro de masa del cuerpo estaba  $\sim 0,5$  m por delante de la línea de partida, y poseía un considerable impulso hacia adelante, en el momento de la activación. Por lo tanto, basándose en los factores de corrección disponibles [22, 25], se añadieron 0,5 s a todos los tiempos de sprint para convertirlos en disparos de "primer movimiento". Todos los tiempos de sprint presentados son comparables a los tiempos de salida de los bloques y a la señal de audio con el tiempo de reacción restado del tiempo total.

### Análisis Estadístico

Los datos se presentan como media  $\pm$  SD. Se utilizó el R de Pearson ( $\pm 90\%CL$ ) para examinar la relación entre las variables (después de la transformación logarítmica de los datos fisiológicos). Los valores de correlación se interpretaron categóricamente de acuerdo con la escala descrita por Hopkins et al. [26], lo que significa que 0,10, 0,30, 0,50, 0,70, 0,90 y 1,0 eran umbrales para pequeños, moderados, grandes, muy grandes, extremadamente grandes y perfectos, respectivamente. Las magnitudes de las diferencias entre las medias de las categorías se evaluaron mediante la estandarización (diferencia de la media dividida por la media armónica de la SD de los grupos comparados). Los umbrales para evaluar la diferencia observada en las medias fueron 0,2, 0,6, 1,2, 2,0 y 4,0 para los pequeños, moderados, grandes, muy grandes y extremadamente grandes, respectivamente [26]. Para hacer inferencias sobre los valores reales de los efectos, se utilizó la inferencia no clínica basada en la magnitud en lugar de la prueba de significación con hipótesis nula [26, 27]. Las magnitudes se evaluaron mecánicamente: si el intervalo de confianza se superponía a valores positivos y negativos sustanciales, el efecto se consideraba poco claro; de lo contrario, los efectos se consideraban claros y se mostraban con la probabilidad de que el efecto real fuera sustancial utilizando la siguiente escala: 25-75%, posiblemente; 75-95%, probablemente; 95-99,5%, muy probablemente;  $> 99,5\%$ , lo más probable [26, 27]. Para calcular las magnitudes de los efectos, los límites de confianza (CL) y las inferencias [28] se utilizó una hoja de cálculo Excel especialmente diseñada para combinar los resultados de varios grupos de sujetos. El rendimiento de las mujeres se definió como el 100% para las comparaciones entre deportistas masculinos y femeninos (todas las disciplinas deportivas agrupadas).

## RESULTADOS

Para mantener los resultados dentro de límites razonables, en esta sección sólo se presenta un resumen de los resultados. Sin embargo, se pueden realizar comparaciones adicionales entre las medias de las categorías insertando datos del archivo complementario en la hoja de cálculo de Hopkins [28].

La Tabla 1 muestra la edad, la masa corporal y el rendimiento de sprint en todos los deportes analizados. En general, la carrera de atletismo (en adelante denominada "sprint" o "velocistas") produjo los tiempos de carrera más rápidos tanto en las distancias más cortas (10 m) como en las más largas (40 m) entre los hombres, claramente por delante del bobsleigh (diferencia de medias,  $\pm 90\%CL$ :  $0,02$ ,  $\pm 0,03$  y  $0,09$ ,  $\pm 0,09$  s; posiblemente y probablemente; moderado), el salto de atletismo (en adelante denominado "salto" o "saltadores") ( $0,07$ ,  $\pm 0,03$  y  $0,15$ ,  $\pm 0,09$  s; lo más probable y muy probablemente; grande), el fútbol ( $0,11$ ,  $\pm 0,02$  y  $0,38$ ,  $\pm 0,07$  s; muy probablemente; muy grande) y todos los demás deportes ( $0,13$ ,  $\pm 0,03$  a  $0,24$ ,  $\pm 0,03$  y  $0,45$ ,  $\pm 0,09$  a  $0,88$ ,  $\pm 0,09$  s; lo más probable; muy grande a extremadamente grande). Los velocistas también mostraron los tiempos de sprint más rápidos en las mismas distancias entre las mujeres, claramente por delante de los saltadores ( $0,10$ ,  $\pm 0,04$  y  $0,28$ ,  $\pm 0,15$  s; lo más probable y muy probablemente; muy grande), el balonmano ( $0,15$ ,  $\pm 0,03$  y  $0,52$ ,  $\pm 0,11$  s; lo más probable; muy grande), el lanzamiento de atletismo ( $0,16$ ,  $\pm 0,04$  y  $0,57$ ,  $\pm 0,13$  s; lo más probable; muy grande) y todos los demás deportes ( $0,17$ ,  $\pm 0,02$  a  $0,34$ ,  $\pm 0,05$  y  $0,61$ ,  $\pm 0,13$  a  $1,23$ ,  $\pm 0,25$  s; lo más probable; muy grande a extremadamente grande). La diferencia media de sexo aumentó del 6,4% en los sprints de 10 metros al 9,3% en los sprints de 40 metros.

**Tabla 1.** Valores medios ( $\pm$  SD) de la edad, la masa corporal y el rendimiento de sprint en los deportistas de la selección nacional Noruega ( $n = 666$ ).

Discipline (sex)	N	Age	BM	10 m	20 m	30 m	40 m
		(y)	(kg)	(s)	(s)	(s)	(s)
Alpine skiing (W)	10	22.6 $\pm$ 3.3	66.0 $\pm$ 4.2	2.19 $\pm$ 0.05	3.62 $\pm$ 0.10	4.95 $\pm$ 0.15	6.29 $\pm$ 0.19
Alpine skiing (M)	13	24.7 $\pm$ 3.8	84.4 $\pm$ 3.7	2.04 $\pm$ 0.05	3.30 $\pm$ 0.08	4.48 $\pm$ 0.10	5.64 $\pm$ 0.13
Athletics jumping (W)	8	20.4 $\pm$ 4.9	60.4 $\pm$ 2.6	2.10 $\pm$ 0.06	3.40 $\pm$ 0.10	4.60 $\pm$ 0.15	5.79 $\pm$ 0.19
Athletics jumping (M)	9	21.8 $\pm$ 3.6	77.4 $\pm$ 6.8	1.97 $\pm$ 0.05	3.16 $\pm$ 0.06	4.23 $\pm$ 0.09	5.28 $\pm$ 0.11
Athletics sprinting (W)	5	19.2 $\pm$ 3.0	58.4 $\pm$ 2.1	2.00 $\pm$ 0.02	3.24 $\pm$ 0.04	4.39 $\pm$ 0.05	5.51 $\pm$ 0.09
Athletics sprinting (M)	8	20.7 $\pm$ 3.2	71.8 $\pm$ 3.8	1.90 $\pm$ 0.03	3.05 $\pm$ 0.05	4.09 $\pm$ 0.08	5.13 $\pm$ 0.11
Athletics throwing (W)	10	20.3 $\pm$ 3.6	75.0 $\pm$ 6.6	2.16 $\pm$ 0.06	3.53 $\pm$ 0.09	4.81 $\pm$ 0.14	6.08 $\pm$ 0.20
Athletics throwing (M)	14	22.4 $\pm$ 4.7	100.1 $\pm$ 8.8	2.03 $\pm$ 0.07	3.30 $\pm$ 0.11	4.45 $\pm$ 0.15	5.58 $\pm$ 0.20
Bandy (W)	13	23.0 $\pm$ 5.4	64.1 $\pm$ 8.6	2.28 $\pm$ 0.07	3.76 $\pm$ 0.12	5.18 $\pm$ 0.16	6.63 $\pm$ 0.21
Bandy (M)	23	19.3 $\pm$ 2.7	77.4 $\pm$ 8.3	2.09 $\pm$ 0.06	3.39 $\pm$ 0.09	4.60 $\pm$ 0.12	5.80 $\pm$ 0.16
Basketball (M)	10	22.6 $\pm$ 3.3	86.2 $\pm$ 9.5	2.06 $\pm$ 0.07	3.36 $\pm$ 0.12	4.55 $\pm$ 0.17	5.74 $\pm$ 0.22
Beach-/volleyball (M)	23	24.9 $\pm$ 4.7	87.7 $\pm$ 7.7	2.04 $\pm$ 0.05	3.34 $\pm$ 0.09	4.56 $\pm$ 0.13	5.78 $\pm$ 0.16
Bobsleigh (M)	9	26.7 $\pm$ 1.9	92.8 $\pm$ 4.4	1.92 $\pm$ 0.03	3.10 $\pm$ 0.06	4.17 $\pm$ 0.07	5.22 $\pm$ 0.09
Combat sports (W)	17	23.7 $\pm$ 6.0	60.6 $\pm$ 5.7	2.30 $\pm$ 0.07	3.78 $\pm$ 0.12	5.20 $\pm$ 0.19	6.62 $\pm$ 0.26
Combat sports (M)	32	22.5 $\pm$ 4.2	74.8 $\pm$ 11.1	2.08 $\pm$ 0.07	3.38 $\pm$ 0.11	4.59 $\pm$ 0.16	5.80 $\pm$ 0.23
Cross-country skiing (W)	8	20.0 $\pm$ 3.4	59.9 $\pm$ 5.1	2.27 $\pm$ 0.10	3.73 $\pm$ 0.19	5.12 $\pm$ 0.28	6.51 $\pm$ 0.37
Cross-country skiing (M)	15	21.9 $\pm$ 3.4	74.2 $\pm$ 4.4	2.11 $\pm$ 0.10	3.44 $\pm$ 0.16	4.68 $\pm$ 0.23	5.88 $\pm$ 0.31
Fencing (W)	5	18.9 $\pm$ 1.0	64.6 $\pm$ 4.0	2.34 $\pm$ 0.06	3.86 $\pm$ 0.11	5.30 $\pm$ 0.18	6.74 $\pm$ 0.25
Fencing (M)	10	21.9 $\pm$ 2.0	77.1 $\pm$ 6.6	2.14 $\pm$ 0.04	3.50 $\pm$ 0.07	4.76 $\pm$ 0.10	6.01 $\pm$ 0.13
Handball (W)	32	25.8 $\pm$ 4.6	72.8 $\pm$ 6.1	2.15 $\pm$ 0.07	3.50 $\pm$ 0.13	4.77 $\pm$ 0.18	6.03 $\pm$ 0.24
Handball (M)	18	23.9 $\pm$ 3.6	92.7 $\pm$ 9.0	2.03 $\pm$ 0.04	3.27 $\pm$ 0.07	4.43 $\pm$ 0.10	5.58 $\pm$ 0.14
Ice hockey (M)	34	24.8 $\pm$ 4.6	88.7 $\pm$ 7.4	2.03 $\pm$ 0.06	3.30 $\pm$ 0.10	4.46 $\pm$ 0.14	5.62 $\pm$ 0.19
Mogul skiing (W)	5	19.4 $\pm$ 1.9	64.0 $\pm$ 9.1	2.18 $\pm$ 0.04	3.57 $\pm$ 0.10	4.88 $\pm$ 0.16	6.19 $\pm$ 0.22
Mogul skiing (M)	14	21.2 $\pm$ 3.1	72.9 $\pm$ 6.3	2.05 $\pm$ 0.04	3.32 $\pm$ 0.05	4.52 $\pm$ 0.09	5.67 $\pm$ 0.12
Nordic combined (M)	22	23.5 $\pm$ 4.2	69.6 $\pm$ 4.0	2.04 $\pm$ 0.05	3.33 $\pm$ 0.08	4.51 $\pm$ 0.11	5.69 $\pm$ 0.16
Ski jumping (W)	11	18.4 $\pm$ 4.1	56.3 $\pm$ 3.1	2.23 $\pm$ 0.04	3.68 $\pm$ 0.06	5.05 $\pm$ 0.11	6.45 $\pm$ 0.15
Ski jumping (M)	28	21.2 $\pm$ 3.5	64.3 $\pm$ 5.0	2.05 $\pm$ 0.07	3.34 $\pm$ 0.12	4.55 $\pm$ 0.18	5.75 $\pm$ 0.25
Snowboard (W)	5	21.7 $\pm$ 4.6	59.4 $\pm$ 3.4	2.24 $\pm$ 0.06	3.73 $\pm$ 0.11	5.13 $\pm$ 0.17	6.61 $\pm$ 0.24
Snowboard (M)	9	21.3 $\pm$ 3.1	78.5 $\pm$ 7.7	2.05 $\pm$ 0.05	3.34 $\pm$ 0.09	4.55 $\pm$ 0.11	5.76 $\pm$ 0.16
Soccer (W)	93	23.8 $\pm$ 3.9	64.0 $\pm$ 4.9	2.17 $\pm$ 0.06	3.55 $\pm$ 0.11	4.84 $\pm$ 0.16	6.12 $\pm$ 0.22
Soccer (M)	57	25.4 $\pm$ 4.3	78.7 $\pm$ 5.8	2.01 $\pm$ 0.05	3.24 $\pm$ 0.08	4.39 $\pm$ 0.12	5.51 $\pm$ 0.16
Speed skating (W)	12	21.4 $\pm$ 4.0	68.5 $\pm$ 5.8	2.20 $\pm$ 0.05	3.60 $\pm$ 0.08	4.92 $\pm$ 0.12	6.25 $\pm$ 0.17
Speed skating (M)	22	22.3 $\pm$ 3.7	78.6 $\pm$ 8.0	2.10 $\pm$ 0.06	3.39 $\pm$ 0.12	4.59 $\pm$ 0.17	5.78 $\pm$ 0.23
Table tennis (M)	13	21.1 $\pm$ 4.1	69.5 $\pm$ 8.8	2.12 $\pm$ 0.06	3.46 $\pm$ 0.13	4.71 $\pm$ 0.19	5.95 $\pm$ 0.27
Telemark skiing (W)	5	18.6 $\pm$ 1.7	62.0 $\pm$ 1.9	2.26 $\pm$ 0.13	3.72 $\pm$ 0.23	5.10 $\pm$ 0.35	6.49 $\pm$ 0.49
Telemark skiing (M)	13	23.3 $\pm$ 2.6	82.7 $\pm$ 6.3	2.08 $\pm$ 0.06	3.39 $\pm$ 0.08	4.60 $\pm$ 0.11	5.80 $\pm$ 0.14
Tennis (W)	7	17.5 $\pm$ 1.7	65.6 $\pm$ 3.3	2.25 $\pm$ 0.07	3.70 $\pm$ 0.12	5.08 $\pm$ 0.18	6.48 $\pm$ 0.24
Tennis (M)	11	20.8 $\pm$ 3.3	75.3 $\pm$ 4.8	2.07 $\pm$ 0.05	3.37 $\pm$ 0.07	4.57 $\pm$ 0.10	5.78 $\pm$ 0.13
Weight-/powerlifting (M)	13	20.6 $\pm$ 4.2	87.9 $\pm$ 22.2	2.12 $\pm$ 0.07	3.45 $\pm$ 0.10	4.71 $\pm$ 0.17	5.96 $\pm$ 0.22

W = women, M = men, BM = body mass.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0215551.t001>

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0215551.t001>

La Fig 1A muestra F0 en todos los deportes. El Bobsleigh y el sprint mostraron los mayores valores de F0 entre los hombres (diferencia poco clara entre ellos), claramente por delante del voleibol/voleibol de playa (0,4,  $\pm$ 0,3 a 0,5,  $\pm$ 0,3 N·kg-1; probablemente a muy probablemente; moderado), el snowboard (0,4,  $\pm$ 0,4 a 0,5,  $\pm$ 0,4 N·kg-1; probablemente a muy probablemente; moderado), el fútbol (0,5,  $\pm$ 0,3 a 0,6,  $\pm$ 0,3 N·kg-1; muy probablemente a lo más probable; moderado a grande) y todos los demás deportes (0,5,  $\pm$ 0,3 a 1,3,  $\pm$ 0,3; muy probablemente a lo más probable; moderado a muy grande). En las mujeres, las velocistas mostraron los valores más altos de F0, claramente por delante de los saltos (0,7,  $\pm$ 0,4 N·kg-1; muy probablemente; muy grande), el balonmano (0,8,  $\pm$ 0,3 N·kg-1; muy probablemente; muy grande), el snowboard (0,9,  $\pm$ 0,4 N·kg-1; muy probable; muy grande), esquí de montaña (0,9,  $\pm$ 0,3 N·kg-1; lo más probable; muy grande) y todos los demás deportes (0,9,  $\pm$ 0,3 N·kg-1 a 1,7,  $\pm$ 0,3 N·kg-1; lo más probable; muy grande a extremadamente

grande). La diferencia de sexo para F0 fue 9,3, ±1,2% (lo más probable; moderado).

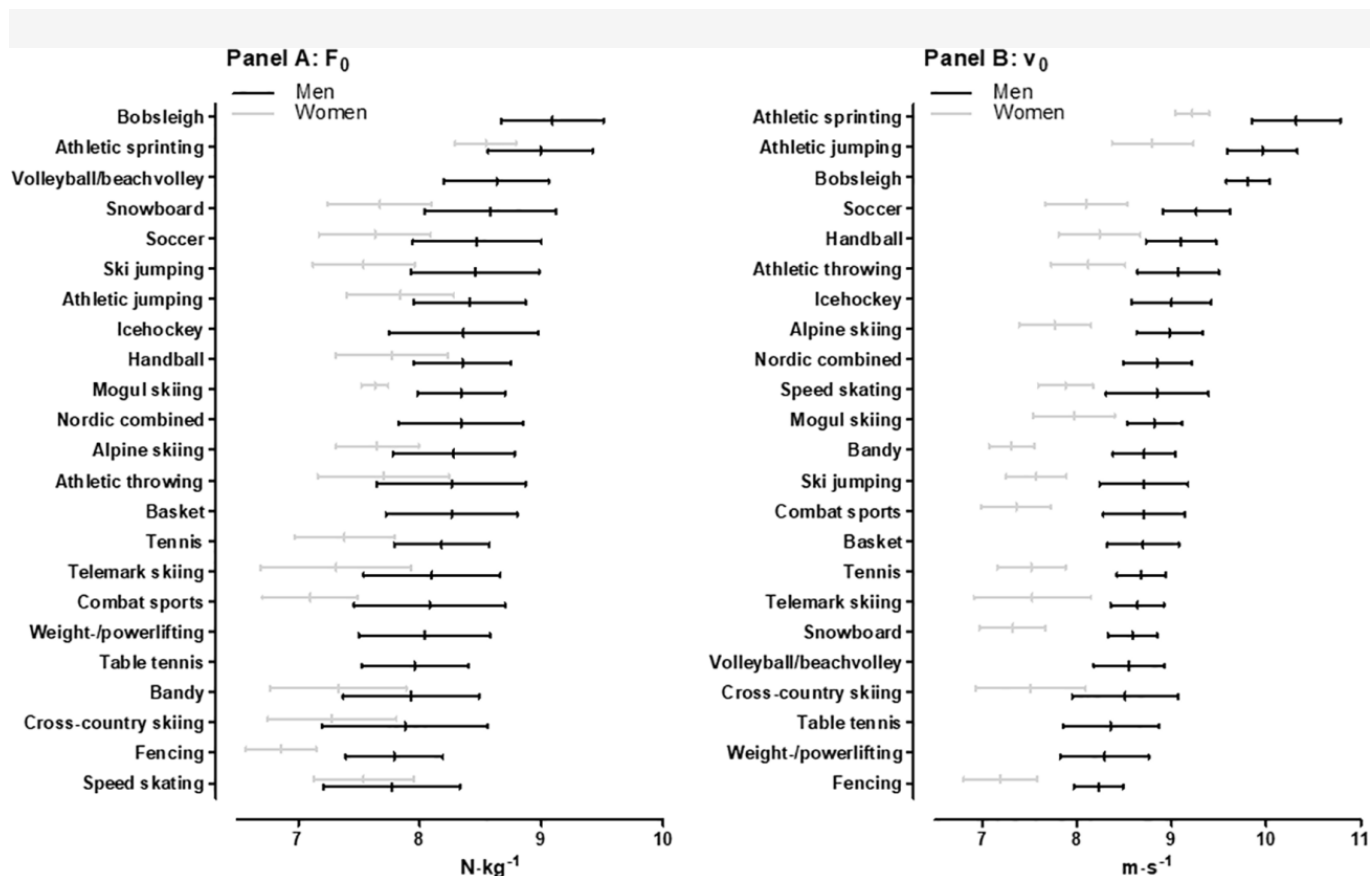


Figura 1. Fuerza horizontal máxima (F0) (Panel A) y velocidad máxima teórica (v0) (Panel B) en los deportes.

Los deportes se clasifican según los valores medios para los hombres.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0215551.g001>

La Fig 1B muestra v0 en todos los deportes. Los velocistas mostraron los valores más altos entre los hombres, claramente por delante de los saltadores (0,4, ±0,4 m·s-1; probablemente; moderado), el bobsleigh (0,5, ±0,3 m·s-1; muy probablemente; grande), el fútbol (1,1, ±0,3 m·s-1; lo más probable; muy grande) y todos los demás deportes masculinos (1,2, ±0,3 a 2,1, ±0,3 m·s-1; lo más probable; muy grande a extremadamente grande). Los velocistas también mostraron valores superiores entre las mujeres, claramente mejores que los saltadores (0,4, ±0,3 m·s-1; muy probablemente; moderado), el balonmano (1,0, ±0,2 m·s-1; lo más probable; muy grande), lanzamiento de atletismo (1,1, ±0,2 m·s-1; lo más probable; muy probable; muy grande) y todos los demás deportes femeninos (1,1, ±0,2 a 2,0 ±0,4 m·s-1; lo más probable; muy grande a extremadamente grande). La diferencia de sexo para v0 fue 11,9, ±1,1% (lo más probable; grande).

La Fig. 2A muestra la Pmax en todos los deportes. En los hombres, los velocistas obtuvieron los valores más altos, claramente por delante del bobsleigh (0,9, ±1,0 W·kg-1; probablemente; moderado), el salto (2,2, ±1,1 W·kg-1; lo más probable; grande), el fútbol (3,7, ±0,8 W·kg-1; lo más probable; muy grande) y todos los demás deportes masculinos (4,2, ±0,9, a 7,2, ±0,9 W·kg-1; lo más probable; muy grande a extremadamente grande). Los velocistas de atletismo también mostraron los valores más altos de Pmax entre las mujeres, claramente por delante de los de salto (2,4, ±1,1 W·kg-1; lo más probable; muy grande), el balonmano (3,6, ±0,8 W·kg-1; lo más probable; muy grande), los lanzadores (4,0, ±0,9 W·kg-1; lo más probable; extremadamente grande) y todos los demás deportes femeninos (4,2, ±0,7 a 7,3, ±0,8 W·kg-1; lo más probable; extremadamente grande). La diferencia de sexo para Pmax fue de 21,9, ±1,1% (lo más probable; grande).

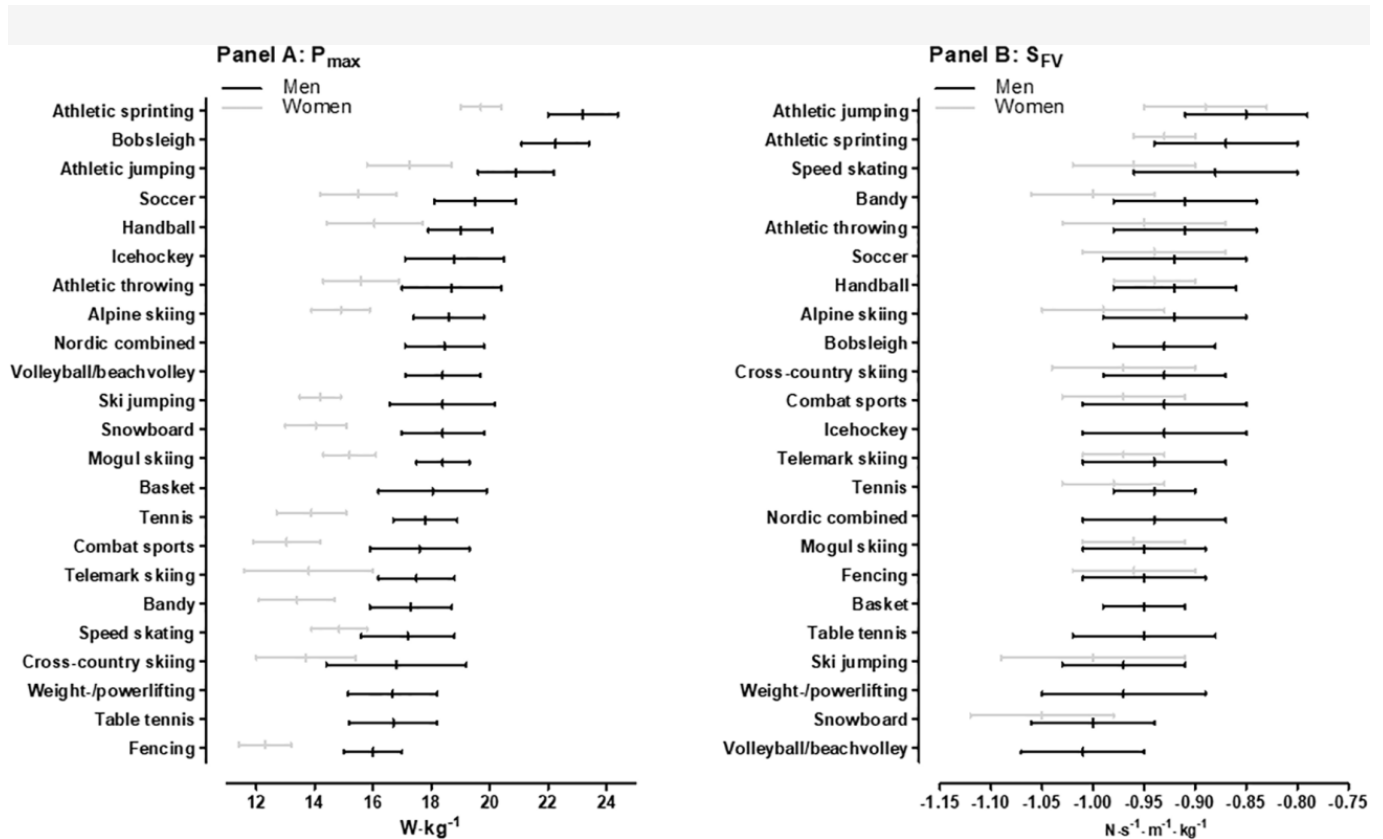


Figura 2. Potencia horizontal máxima ( $P_{max}$ ) (Panel A) y pendiente fuerza-velocidad (SFV) (Panel B) en todos los deportes.

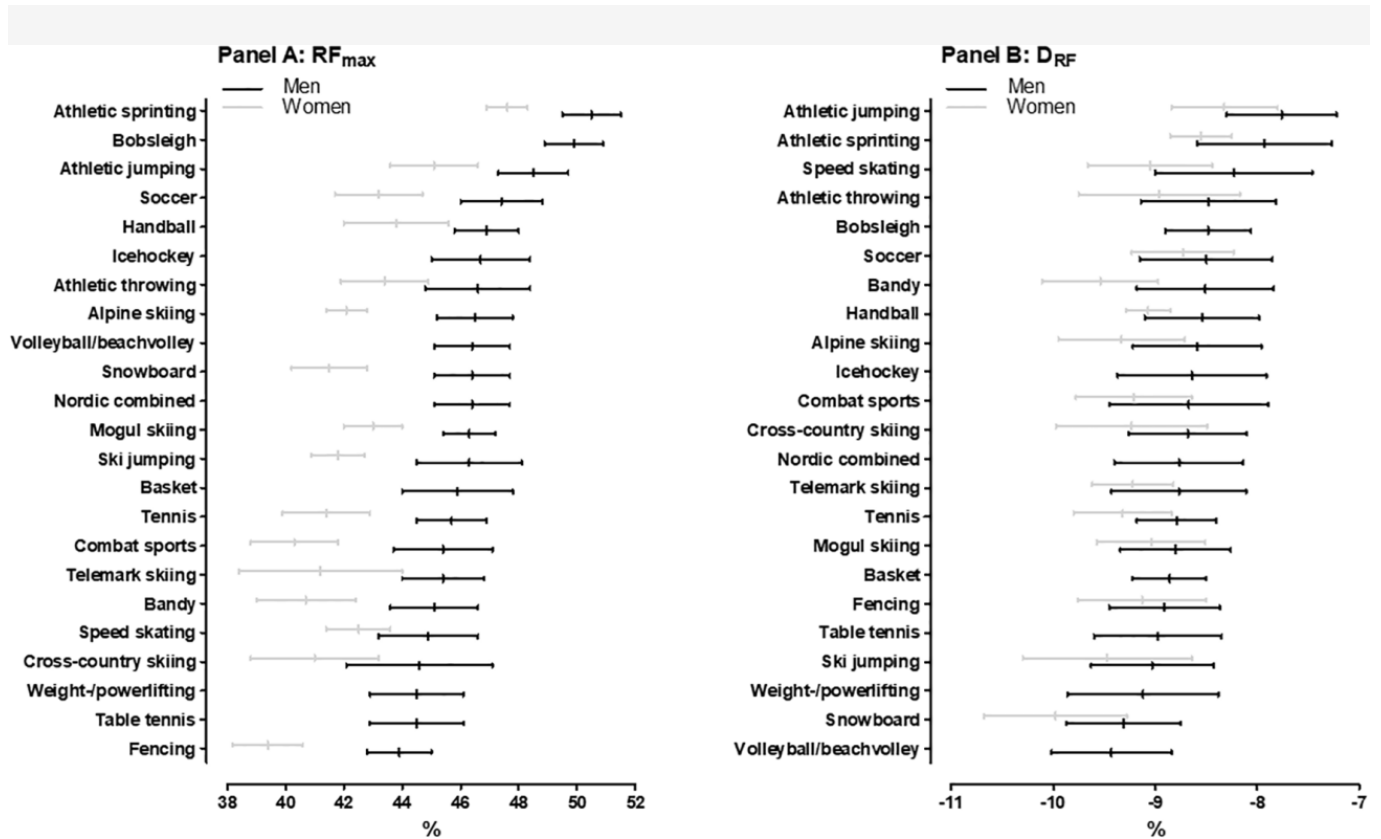
Los deportes se clasifican según los valores medios para los hombres.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0215551.g002>

La Fig 2B muestra la SFV a través de los deportes. Los saltadores produjeron los valores más altos (es decir, más orientados a la velocidad) entre los hombres, por delante de los especialistas en sprint ( $0,02, \pm 0,04 \text{ N}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}\cdot\text{kg}^{-1}$ ; poco claro; pequeño), el patinaje de velocidad ( $0,03, \pm 0,04 \text{ N}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}\cdot\text{kg}^{-1}$ ; posiblemente; pequeño) y todos los demás deportes masculinos ( $0,06, \pm 0,04$  a  $0,16, \pm 0,03 \text{ N}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}\cdot\text{kg}^{-1}$ ; muy probablemente a lo más probable; de moderado a muy grande). En el otro extremo, el voleibol/voleibol de playa y el snowboard fueron las disciplinas más orientadas a la fuerza (diferencia poco clara entre ellas), mostrando valores de SFV claramente más bajos que el levantamiento de pesas/potencia ( $0,03, \pm 0,04$  a  $0,04, \pm 0,04 \text{ N}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}\cdot\text{kg}^{-1}$ ; probablemente: pequeño a moderado) y todos los demás deportes masculinos ( $0,03, \pm 0,04$  a  $0,16, \pm 0,03 \text{ N}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}\cdot\text{kg}^{-1}$ ; probablemente a lo más probable; de pequeño a muy grande). Entre las deportistas femeninas, las saltadoras mostraron los valores de SFV más basados en la velocidad, claramente más altos que las carreras de atletismo ( $0,04, \pm 0,05 \text{ N}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}\cdot\text{kg}^{-1}$ ; probablemente; moderado) y todos los demás deportes femeninos ( $0,05, \pm 0,04$  a  $0,16, \pm 0,08 \text{ N}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}\cdot\text{kg}^{-1}$ ; probablemente a lo más probable; moderado a muy grande). El snowboard fue el grupo más orientado a la fuerza, por delante del bandy ( $0,05, \pm 0,07 \text{ N}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}\cdot\text{kg}^{-1}$ ; poco claro; moderado), el salto de esquí ( $0,05, \pm 0,08 \text{ N}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}\cdot\text{kg}^{-1}$ ; poco claro; moderado) y todos los demás deportes femeninos ( $0,06, \pm 0,07$  a  $0,16, \pm 0,08 \text{ N}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}\cdot\text{kg}^{-1}$ ; muy probablemente a lo más probable; moderado a muy grande). La diferencia de sexo para la SFV fue de  $2,4, \pm 0,7\%$  (lo más probable; pequeño).

La Fig 3A muestra la RFmax en todos los deportes. Los velocistas produjeron los valores porcentuales más altos entre los hombres, por delante del bobsleigh ( $0,4, \pm 0,8\%$ ; poco claro; pequeño), el salto ( $1,4, \pm 0,8\%$ ; muy probablemente; grande) y todos los demás deportes masculinos ( $2,1, \pm 0,7$  a  $4,6, \pm 0,7\%$ ; lo más probable; grande a extremadamente grande). Los velocistas también mostraron los valores más altos entre las mujeres, claramente por delante de los saltadores ( $1,7, \pm 1,1\%$ ; muy probablemente; grande) y todos los demás deportes ( $2,9, \pm 0,9$  a  $5,9, \pm 1,2\%$ ; lo más probable; muy grande a extremadamente grande).





**Figura 3.** Ratio de fuerza máxima (RF<sub>max</sub>) (Panel A) e índice de la técnica de aplicación de fuerza (DRF) (Panel B) en todos los deportes.

Los deportes se clasifican según los valores medios para los hombres.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0215551.g003>

La Fig. 3B muestra el DRF en todos los deportes. Los saltadores mostraron los valores más altos, por delante de los velocistas (0,2, ±0,4%; poco claro; pequeño), el patinaje de velocidad (0,4, ±0,4%; probablemente; moderado) y todos los demás deportes masculinos (0,7, ±0,4 a 1,5, ±0,3%; muy probablemente a lo más probable; moderado a muy grande). Entre las mujeres, las saltadoras también obtuvieron los valores más altos, claramente por delante de las velocistas (0,2, ±0,4%; poco claro; pequeño), el balonmano (0,5, ±0,3%; muy probablemente; moderado) y todos los demás deportes femeninos (0,5, ±0,3 a 1,5, ±0,7%; muy probablemente a lo más probable; moderado a muy grande).

La Tabla 2 muestra las correlaciones (±90%CL) entre las variables analizadas. Las correlaciones entre las variables mecánicas del sprint y los tiempos de sprint variaron de triviales a perfectas. Las correlaciones entre el rendimiento de sprint y SFV/DRF aumentaron con el aumento de la distancia de sprint.



**Tabla 2.** Correlaciones ( $\pm 90\%CL$ ) entre las variables analizadas.

	10-m time	40-m time	F <sub>0</sub>	v <sub>0</sub>	P <sub>max</sub>	S <sub>FV</sub>	RF <sub>max</sub>
40-m time	0.96, $\pm 0.01$						
F <sub>0</sub>	-0.89, $\pm 0.01$	-0.73, $\pm 0.03$					
v <sub>0</sub>	-0.87, $\pm 0.02$	-0.97, $\pm 0.01$	0.57, $\pm 0.04$				
P <sub>max</sub>	-1.00, $\pm 0.01$	-0.97, $\pm 0.01$	0.88, $\pm 0.02$	0.89, $\pm 0.01$			
S <sub>FV</sub>	-0.02, $\pm 0.06$	-0.30, $\pm 0.06$	-0.43, $\pm 0.05$	0.50, $\pm 0.05$	0.05, $\pm 0.06$		
RF <sub>max</sub>	-1.00, $\pm 0.01$	-0.96, $\pm 0.01$	0.89, $\pm 0.01$	0.88, $\pm 0.02$	1.00, $\pm 0.01$	0.03, $\pm 0.06$	
D <sub>RF</sub>	-0.15, $\pm 0.06$	-0.42, $\pm 0.05$	-0.30, $\pm 0.06$	0.62, $\pm 0.04$	0.19, $\pm 0.06$	0.99, $\pm 0.01$	0.17, $\pm 0.06$

F<sub>0</sub> = maximal horizontal force (relative to body mass), v<sub>0</sub> = theoretical maximal velocity, P<sub>max</sub> = maximal horizontal power (relative to body mass), S<sub>FV</sub> = force-velocity slope (relative to body mass), RF<sub>max</sub> = ratio of force, D<sub>RF</sub> = index of force application technique.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0215551.t002>

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0215551.t002>

## DISCUSIÓN

Hasta donde sabemos, este es el primer estudio en explorar y comparar las variables fisiológicas y mecánicas subyacentes del rendimiento del sprint en una amplia gama de deportes. Se observaron diferencias muy grandes, e incluso extremadamente grandes, en las variables mecánicas del sprint en todos los deportes. En general, los deportes en los que la capacidad de sprint es un predictor importante del éxito obtuvieron los valores más altos para la mayoría de las variables, mientras que los deportes que involucran otras modalidades de locomoción que la carrera tendieron a producir valores sustancialmente más bajos. Los datos actuales de una gran muestra de deportistas de élite probados en condiciones idénticas proporcionan una imagen holística del continuum del perfil Fv en deportistas de sprint. En los siguientes párrafos, discutiremos cada una de las variables analizadas con más detalle.

La F<sub>0</sub> en la presente muestra se encuentra en el rango 7-10 N•kg<sup>-1</sup> para los hombres y 6-9 N•kg<sup>-1</sup> para las mujeres, lo que corresponde a una diferencia media de sexo del 9,3%. Los velocistas de atletismo y los participantes de bobsleigh se encontraban en el extremo superior de la escala. Estudios publicados anteriormente han demostrado que los velocistas masculinos y femeninos de clase mundial pueden alcanzar 11 y 10 N•kg<sup>-1</sup> respectivamente [10], lo que representa los límites superiores actuales para la producción de fuerza horizontal relativa a la masa corporal durante el sprint acelerado. Sin embargo, la F<sub>0</sub> calculada con el método simple descrito por Samozino et al. [9], es mayor durante el sprint con resistencia que durante el sprint sin carga [14, 15, 29]. Por lo tanto, la F<sub>0</sub> derivada del sprint normal no parece ser una verdadera F<sub>0</sub>, ya que la resistencia para superar la inercia de la masa corporal parece insuficiente para la máxima generación de fuerza-capacidad horizontal. Para los practicantes, la importancia de la F<sub>0</sub> queda perfectamente ilustrada por el hecho de que los deportistas de bobsleigh mostraron valores de F<sub>0</sub> ligeramente más altos (y una masa corporal claramente mayor) que los velocistas, a pesar de que los tiempos de sprint fueron ligeramente inferiores en todas las divisiones de tiempo. Por lo tanto, F<sub>0</sub> es una medida particularmente crucial para los deportistas que realizan sprints cortos mientras mueven una masa externa. Cuanto más corta sea la distancia considerada, mayor será la correlación entre el rendimiento de sprint y F<sub>0</sub> (ver Tabla 2).

Cross et al. [17] informaron 8,5  $\pm$  1,3 y 8,8  $\pm$  0,4 N•kg<sup>-1</sup> para los forwards y backs de la unión de rugby de élite, y 8,1  $\pm$  0,8 y 8,2  $\pm$  1,0 N•kg<sup>-1</sup> para los jugadores de la liga de rugby correspondiente. Estos valores de F<sub>0</sub> están a la par con los actuales jugadores de fútbol masculino. Curiosamente, aunque los jugadores de rugby son generalmente más pesados que los jugadores de fútbol, no producen una F<sub>0</sub> más alta cuando se normalizan para la masa corporal. A medida que un deportista se hace más pesado, el costo de energía para acelerar esa masa también aumenta, al igual que la resistencia aerodinámica asociada con empujar esa área frontal más amplia a través del aire [30]. Por lo tanto, "más grande" no es necesariamente mejor para el sprint, al menos cuando no hay masa externa que empujar. Además, el voleibol/voleibol de playa estaba entre los mejores deportes en términos de puntajes de F<sub>0</sub>, mientras que los levantadores de pesas/potencia produjeron valores claramente más bajos, a pesar de no haber diferencias medias sustanciales de grupo en la masa corporal. Esto confirma los hallazgos anteriores de que el entrenamiento de fuerza pesado y orientado verticalmente de los miembros inferiores no se traduce necesariamente en una mayor producción de fuerza horizontal durante la aceleración del sprint [31].

La correlación entre la  $v_0$  y el rendimiento de sprint fue muy grande para el sprint de 10 m, y los valores de correlación aumentaron con el aumento de la distancia de sprint (ver Tabla 2). La  $V_0$  estaba en el rango 7,5-11  $m\cdot s^{-1}$  para los hombres y 6-9,5  $m\cdot s^{-1}$  para las mujeres, equivalente a una diferencia media de sexo de 11,9%. No es de extrañar que los velocistas obtuvieran las mejores puntuaciones. En comparación, los velocistas de pista más rápidos del mundo, hombres y mujeres, alcanzan velocidades máximas de  $\sim 12$  y  $\sim 11$   $m\cdot s^{-1}$ , respectivamente [10, 32]. Los deportistas de deportes de equipo masculinos y femeninos más rápidos de nuestro material se acercaron/excedieron 10 y 9  $m\cdot s^{-1}$ , respectivamente, en línea con los informes anteriores [33-35]. Muchos practicantes argumentarían que los receptores, los corredores y/o los cornerbacks de élite en el fútbol americano son aún más rápidos, pero ningún estudio hasta la fecha ha presentado datos comparables.

El movimiento de la energía metabólica y la transferencia eficiente a la potencia de salida externa son la base del rendimiento exitoso en muchos deportes. Observamos correlaciones perfectas o extremadamente grandes entre la  $P_{max}$  y el rendimiento del sprint, dependiendo de la distancia (Tabla 2). La mejora del tiempo de sprint no es una función lineal del aumento de potencia. De hecho, el cambio de velocidad ( $\Delta v$ ) está relacionado con el cubo del cambio de potencia ( $\Delta P^3$ ), por lo que un aumento del 5% en la velocidad requeriría un aumento de potencia de casi el 16% [36]. Los datos actuales son coherentes con esta relación. Observamos valores de  $P_{max}$  en el rango 13-25  $W\cdot kg^{-1}$  para hombres y 11-21  $W\cdot kg^{-1}$  para mujeres. La diferencia media de sexo observada (21,9%), basada en datos agrupados de todas las disciplinas, se corresponde bien con los datos de los velocistas de élite. Slawinski et al. [10] informaron que la  $P_{max}$  en velocistas hombres y mujeres de clase mundial fue de  $30,3 \pm 2,5$  y  $24,5 \pm 4,2$   $W\cdot kg^{-1}$ , respectivamente, típicamente alcanzado después de  $\sim 1$  s de sprint. Los valores individuales más altos fueron 36,1  $W\cdot kg^{-1}$  y 29,3  $W\cdot kg^{-1}$ , que representan los límites superiores actuales en humanos [37]. Los deportistas consiguen dos o tres veces más  $W\cdot kg^{-1}$  durante el countermovement jump (CMJ) en comparación con el sprint [37]. Sin embargo, como no es posible evaluar una potencia máxima anaeróbica genérica, cada prueba de potencia anaeróbica debe tratarse por separado, y las comparaciones de los valores de potencia entre modalidades no tienen sentido.

La SFV refleja el equilibrio individual del deportista entre las capacidades de fuerza y velocidad. Morin & Samozino [11] han sugerido que a los deportistas con valores de velocidad más bajos para el deporte se les podría prescribir más velocidad máxima de sprint, mientras que a los deportistas con valores de fuerza horizontal más bajos para el deporte se les podría prescribir más entrenamiento de fuerza horizontal. Los resultados actuales muestran que la SFV osciló entre -0,75 y -1,10  $N\cdot s^{-1}\cdot m^{-1}\cdot kg^{-1}$  para los hombres y -0,80 a -1,15  $N\cdot s^{-1}\cdot m^{-1}\cdot kg^{-1}$  para las mujeres, lo que corresponde a una diferencia de sexo del 2,4%. Los valores medios de los velocistas a nivel nacional fueron similares a los valores de SFV observados en los velocistas de clase mundial [10]. En el presente estudio, las mujeres mostraron valores de pendiente más bajos que los hombres en todos los deportes analizados en los que ambos sexos estaban representados. Si seguimos el enfoque propuesto por Morin & Samozino [11], los hombres generalmente deberían realizar un entrenamiento más orientado a la fuerza que las mujeres. Hasta donde sabemos, ningún estudio previo ha recomendado programas diferenciados de entrenamiento de velocidad según el sexo. Mientras que los individuos jóvenes y no entrenados tienden a mostrar mejorías independientemente de los métodos de entrenamiento [38], los deportistas senior bien entrenados sólo logran mejorías anuales menores que la variación típica [39].

La distancia del sprint también debe ser considerada si la prescripción del entrenamiento debe estar basada en la SFVorientación. La correlación entre el rendimiento de sprint y la SFV aumentó (hacia un perfil de FV más orientado a la velocidad) con el aumento de la distancia del sprint (Tabla 2). Esto sugiere que cuanto más larga sea la distancia del sprint, se debe prescribir el entrenamiento más orientado a la velocidad. El entrenamiento de sprint orientado a la fuerza (por ejemplo, sprints con resistencia) es probablemente más apropiado para deportes en los que se requiere que los deportistas realicen sprints breves mientras mueven una masa externa (por ejemplo, bobsleigh). Sin embargo, los perfiles de Fv macroscópicos derivados del método simple proporcionan información limitada sobre la relación de Fv de los músculos individuales involucrados. La velocidad de acortamiento del fascículo de los diferentes músculos comprometidos no cambia necesariamente con el aumento de la velocidad de carrera, y esta relación inconsistente se explica por una contribución aumentada de las propiedades elásticas con el aumento de la velocidad de carrera [40, 41]. Por lo tanto, la velocidad de carrera no es un indicador de la velocidad de contracción muscular, y no se pueden utilizar los perfiles de Fv derivados de las pruebas de sprint para determinar las prescripciones de entrenamiento para los músculos de forma aislada.

La RFmax refleja la proporción de la producción de fuerza total que se dirige en la dirección de movimiento hacia adelante al inicio del sprint [9]. Observamos una correlación perfecta entre RFmax y  $P_{max}$  ( $r = 1,0$ , Tabla 2). Esto es mecánicamente sólido, ya que la  $P_{max}$  en el modelo simple corresponde al pico de la curva de potencia (es decir, el producto máximo de la fuerza horizontal y la velocidad), mientras que la fuerza vertical corresponde a la masa corporal cuando se promedia en un paso. Por lo tanto,  $P_{max}$  y RFmax son dos medidas de la misma capacidad. Dentro de nuestro material, la RFmax osciló entre el 41 y el 52% en hombres y entre el 37 y el 48% en mujeres. Rabita et al. [8] informaron  $71,6 \pm 2,6\%$  en velocistas hombres de clase mundial, pero estos valores no son directamente comparables debido a las diferencias metodológicas. En el artículo de Rabita et al. [8], la RF se calculó a partir de los datos de la plataforma de fuerza, donde la intersección-y de la curva lineal extrapolada de RF-velocidad se definió como RFmax, es decir, la

contribución máxima teórica de la fuerza anteroposterior a la fuerza total producida en una fase de contacto a velocidad cero. Para el método simple, en el que las variables mecánicas se calculan a partir de datos antropométricos y espacio-temporales, la RFmax no corresponde al valor extrapolado a velocidad cero, sino al valor a 0,5 s (correspondiente al valor de RF aproximadamente en el primer paso). Basándonos en los datos antropométricos y de tiempo fraccionado disponibles públicamente de los velocistas de clase mundial [42], calculamos los valores de RFmax a 0,5 s hasta 56-57% en los hombres y 52-53% en las mujeres, utilizando el modelo simple. Sin embargo, el valor máximo posible de RFmax (100%) no es óptimo para el sprint porque se requiere una cierta cantidad de fuerza vertical para trabajar contra la gravedad.

El DRF expresa la capacidad de los deportistas para mantener una producción de fuerza horizontal neta a pesar del aumento de la velocidad de carrera. Cuanto más negativa sea la pendiente, más rápida será la pérdida de fuerza horizontal neta durante la aceleración, y viceversa. En el conjunto de datos actual, los valores oscilaron entre -7 y -10,5% entre los hombres y -7,5 y -11% entre las mujeres. Para las comparaciones, Rabita et al. [8] informaron  $-6,4 \pm 0,3\%$  para los velocistas masculinos de clase mundial. En términos prácticos, el DRF refleja la distancia sobre la cual los deportistas son capaces de acelerar (es decir, la distancia a la velocidad máxima). Investigaciones anteriores han demostrado que la duración de la fase de aceleración varía en función del nivel de rendimiento del deportista. Los deportistas de deportes de equipo [33, 34], los estudiantes [43] y los niños pre-adolescentes [44] típicamente alcanzan la velocidad máxima a ~ 25-30 m de sprint lineal máximo. Los velocistas de pista de 100 metros nacionales e internacionales alcanzan su velocidad máxima después de 40-50 y 50-80 metros de carrera, respectivamente, pero los hombres alcanzan un ~20% más de distancia que las mujeres [10, 32, 45]. La correlación casi perfecta entre DRF y SFV ( $r = 0,99$ , Tabla 2) es lógica y esperada, ya que los deportistas más orientados a la velocidad son capaces de acelerar en una distancia mayor que sus semejantes más orientados a la fuerza.

## CONCLUSIÓN

En el presente estudio, se observaron diferencias sustanciales en las propiedades mecánicas del sprint en todos los deportes. Con base en estos hallazgos, algunos pueden argumentar que la práctica crónica de una actividad induce diferentes perfiles de Fv en la carrera de sprint a lo largo del tiempo. Sin embargo, la gran dispersión dentro de cada disciplina, además de la gran superposición entre los deportes, indica que tales variables son más individuales que específicas de cada deporte. La mayoría de las variables mecánicas del sprint están fuertemente correlacionadas con el nivel de rendimiento del sprint, de acuerdo con las leyes del movimiento. De hecho, cuando los tiempos fraccionados y los datos antropométricos forman la base para el cálculo de múltiples variables, es razonable esperar altas correlaciones entre ellas. Basándose en estas consideraciones, los profesionales pueden cuestionar la relevancia práctica de tales variables, ya que están entrelazadas y, en algunos casos, son meras "explicaciones diferentes de la misma historia". Sin embargo, mientras que los datos de tiempo fraccionado proporcionan una base para un análisis conveniente en el campo, las variables mecánicas del sprint pueden proporcionar una visión más profunda de las limitaciones biomecánicas individuales. Los valores presentados aquí pueden ser utilizados por los profesionales para desarrollar intervenciones de entrenamiento individuales.

### Información Complementaria

**S1 Archivo.** Archivo Excel que contiene el tamaño de la muestra, las medias de los grupos y la SD de todas las variables de los deportes.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0215551.s001>

(DOCX)

## REFERENCIAS

1. Rumpf MC, Lockie RG, Cronin JB, Jalilvand F. (2016). Effect of different sprint training methods on sprint performance over various distances: A brief review. *J Strength Cond Res.* 2016;30(6):1767-85. *pmid:26492101*
2. Haugen T, Tønnessen E, Hisdal J, Seiler S. (2014). The role and development of sprinting speed in soccer. *Brief review. Int J Sports Physiol Perform.* 2014;9(3): 432-41. *pmid:23982902*
3. Petrakos G, Morin JB, Egan B. (2016). Resisted sled sprint training to improve sprint performance: a systematic review. *Sports Med.* 2016;46(3):381-400. *pmid:26553497*
4. Fenn WO, Marsh BS. (1935). Muscular force at different speeds of shortening. *J Physiol.* 1935;85(3): 277-97. *pmid:16994712*

5. Wilkie DR. (1950). The relation between force and velocity in human muscle. *J Physiol.* 1950;110(3-4):249-80.
6. Morin JB, Edouard P, Samozino P. (2011). Technical ability of force application as a determinant factor of sprint performance. *Med Sci Sports Exerc.* 2011;43(9):1680-8. [pmid:21364480](#)
7. Morin JB, Bourdin M, Edouard P, Peyrot N, Samozino P, Lacour JR. (2012). Mechanical determinants of 100-m sprint running performance. *Eur J Appl Physiol.* 2012;112(11): 3921-30. [pmid:22422028](#)
8. Rabita G, Dorel S, Slawinski J, Sáez-de-Villarreal E, Couturier A, Samozino P, et al. (2015). Sprint mechanics in world-class athletes: a new insight into the limits of human locomotion. *Scand J Med Sci Sports.* 2015;25(5):583-94. [pmid:25640466](#)
9. 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. *Scand J Med Sci Sports.* 2016;26(6):648-58. [pmid:25996964](#)
10. Slawinski J, Termoz N, Rabita G, Guilhem G, Dorel S, Morin JB, et al. (2017). How 100-m event analyses improve our understanding of world-class men's and women's sprint performance. *Scand J Med Sci Sports.* 2017;27(1):45-54. [pmid:26644061](#)
11. Morin JB, Samozino P. (2016). Interpreting power-force-velocity profiles for individualised and specific training. *Int J Sports Physiol Perform.* 2016;11(2):267-72. [pmid:26694658](#)
12. Cross MR, Brughelli M, Samozino P, Morin JB. (2017). Methods of power-force-velocity profiling during sprint running: A narrative review. *Sports Med.* 2017;47(7):1255-69. [pmid:27896682](#)
13. Rakovic E, Paulsen G, Helland C, Eriksrud O, Haugen T. (2017). The effect of individualised sprint training in elite female team sport athletes: A pilot study. *J Sports Sci.* 2017;9: 1-7. [pmid:29741443](#)
14. Monte A, Nardello F, Zamparo P. (2017). Sled Towing: The optimal overload for peak power production. *Int J Sports Physiol Perform.* 2017;12(8):1052-1058. [pmid:27967284](#)
15. Pantoja PD, Carvalho AR, Ribas LR, Peyré-Tartaruga LA. (2018). Effect of weighted sled towing on sprinting effectiveness, power and force-velocity relationship. *PLoS One* 2018;13(10):e0204473. [pmid:30289907 eCollection 2018.](#)
16. Buchheit M, Samozino P, Glynn JA, Michael BS, Al Haddad H, Mendez-Villanueva A, et al. (2014). Mechanical determinants of acceleration and maximal sprinting speed in highly trained young soccer players. *J Sports Sci.* 2014;32(20):1906-13. [pmid:25356503](#)
17. Cross MR, Brughelli M, Brown SR, Samozino P, Gill ND, Cronin JB, et al. (2015). Mechanical properties of sprinting in elite rugby union and rugby league. *Int J Sports Physiol Perform.* 2015;10(6):695-702. [pmid:25310279](#)
18. Nagahara R, Morin JB, Koido M. (2016). Impairment of sprint mechanical properties in an actual soccer match: A pilot study. *Int J Sports Physiol Perform.* 2016;11(7):893-8. [pmid:26791405](#)
19. Morin JB, Petrakos G, Jiménez-Reyes P, Brown SR, Samozino P, Cross MR. (2017). Very-heavy sled training for improving horizontal-force output in soccer players. *Int J Sports Physiol Perform.* 2017;12(6):840-4. [pmid:27834560](#)
20. Winter EM, Maughan RJ. (2009). Requirements for ethics approvals. *J Sports Sci.* 2009;27(10): 985. [pmid:19847681](#)
21. Morin JB, Samozino P. (2017). Spreadsheet for sprint acceleration force-velocity-power profiling. *ResearchGate* 2017. [https://www.researchgate.net/publication/321767606\\_Spreadsheet\\_for\\_Sprint\\_acceleration\\_force-velocity-power\\_profiling?\\_sg=CuBBw\\_XwgEAtdCkL8QKaMMLUEFzmLpEIkMDsHU8dJoYTgIEc2ajruKZRlXrNB7njaQP-IHyYZ5Sjij5I9ViryIwEvCxpweYnPHHcVjj.FNC82J-TAKYvWmcYRn5itbWhbTST\\_WIyHM9Z7VPv\\_bAQ-yvAm9Wmnm](https://www.researchgate.net/publication/321767606_Spreadsheet_for_Sprint_acceleration_force-velocity-power_profiling?_sg=CuBBw_XwgEAtdCkL8QKaMMLUEFzmLpEIkMDsHU8dJoYTgIEc2ajruKZRlXrNB7njaQP-IHyYZ5Sjij5I9ViryIwEvCxpweYnPHHcVjj.FNC82J-TAKYvWmcYRn5itbWhbTST_WIyHM9Z7VPv_bAQ-yvAm9Wmnm)
22. Haugen T, Tønnessen E, Seiler S. (2012). The difference is in the start: impact of timing and start procedure on sprint running performance. *J Strength Cond Res.* 2012;26(2):473-9. [pmid:22233797](#)
23. Haugen T, Tønnessen E, Svendsen I, Seiler S. (2014). Sprint time differences between single and dual beamed timing systems. *Technical report. J Strength Cond Res.* 2014;28(8): 2376-9. [pmid:24531428](#)
24. Haugen TA, Breitschädel F, Samozino P. (2018). Power-force-velocity profiling of sprinting athletes: methodological and practical considerations when using timing gates. *J Strength Cond Res.* 2018. [pmid:30273283 \(forthcoming\).](#)
25. Haugen T, Buchheit M. (2016). Sprint running performance monitoring: methodological and practical considerations. *Sports Med.* 2016;46(5):641-56. [pmid:26660758](#)
26. 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. [pmid:19092709](#)
27. Hopkins WG, Batterham AM. (2018). The vindication of magnitude-based inference. *Sportsci.* 2018;22:19-29.
28. Hopkins WG. (2006). A spreadsheet for combining outcomes from several subject groups. *Sportsci.* 2006;10:51-53.
29. Helland C, Haugen T, Rakovic E, Eriksrud O, Seynnes O, Mero AA, et al. (2018). Force-velocity profiling of sprinting athletes: single- vs. multiple-run methods. *Eur J Appl Physiol.* 2018. [pmid:30519907 \(forthcoming\).](#)
30. Haugen T, Tønnessen E, Seiler S. 9. (2015). 58 and 10. 49: *Nearing the citius end for 100-m? Invited commentary.* *Int J Sports Physiol Perform.* 2015;10(2):269-72. [pmid:25229725](#)
31. Loturco I, Contreras B, Kobal R, Fernandes V, Moura N, Siqueira F, et al. (2018). Vertically and horizontally directed muscle power exercises: Relationships with top-level sprint performance. *PLoS One* 2018;13(7):e0201475. [pmid:30048538](#)
32. Graubner R, Nixdorf E. (2011). Biomechanical analysis of the sprint and hurdles events at the 2009 IAAF World Championships in athletics. *New Stud Athletics* 2011;26:19-53.
33. Haugen T, Tønnessen E, Seiler S. (2013). Anaerobic performance testing of professional soccer players 1995-2010. *Int J Sport Physiol Perform.* 2013;8(2):148-56.
34. Haugen T, Tønnessen E, Seiler S. (2012). Speed and countermovement jump characteristics of elite female soccer players 1995-2010. *Int J Sport Physiol Perform.* 2012;7(4):340-9.
35. Schimpchen J, Skorski S, Nopp S, Meyer T. (2016). Are "classical" tests of repeated-sprint ability in football externally valid? A new approach to determine in-game sprinting behaviour in elite football players. *J Sports Sci.* 2016;34(6):519-26. [pmid:26580089](#)
36. Seiler S, De Koning JJ, Foster C. (2007). The fall and rise of the gender difference in elite anaerobic performance 1952-2006. *Med Sci Sports Exerc.* 2007;39(3):534-40. [pmid:17473780](#)

37. Haugen T, Paulsen G, Seiler S, Sandbakk Ø. (2018). New records in human power. *Int J Sports Physiol Perform.* 2018;13(6):678-86. *pmid:28872385*
38. Tønnessen E, Svendsen I, Olsen IC, Guttormsen A, Haugen T. (2015). Performance development in adolescent track and field athletes according to age, sex and sport discipline. *PLoS ONE* 2015;10(6):e0129014. *pmid:26043192*
39. Haugen T, Solberg PA, Morán-Navarro R, Breitschädel F, Hopkins W, Foster C. (2018). Peak age and performance progression in world-class track-and-field athletes. *Int J Sports Physiol Perform.* 2018;13(9):1122-1129. *pmid:29543080*
40. Lai A, Schache AG, Brown NA, Pandy MG. (2016). Human ankle plantar flexor muscle-tendon mechanics and energetics during maximum acceleration sprinting. *J R Soc Interface* 2016;13(121). *pmid:27581481*
41. Miller RH, Umberger BR, Caldwell GE. (2012). Sensitivity of maximum sprinting speed to characteristic parameters of the muscle force-velocity relationship. *J Biomech.* 2012; 45(8):1406-43. *pmid:22405495*
42. Ferro A, Rivala A, Pagola I, Ferreruela M, Martin A, Rocandio V. (2002). A kinematic study of the sprint events at the 1999 World Championships in athletics in Sevilla. *20th International Symposium on Biomechanics in Sports*
43. Babić V, Čoh M, Dizdār D. (2011). Differences in kinematics parameters of athletes of different running quality. *Biol Sport.* 2011;28:115-121.
44. Chatzilazaridis I. (2012). Stride characteristics progress in a 40-m sprinting test executed by male preadolescent, adolescent and adult athletes. *Biol Exerc.* 2012;8:59-77.
45. Debaere S, Jonkers I, Delecluse C. (2013). The contribution of step characteristics to sprint running performance in high-level male and female athletes. *J Strength Cond Res.* 2013;27(1):116-24. *pmid:22395270*

### **Cita Original**

Haugen TA, Breitschädel F, Seiler S (2019) Sprint mechanical variables in elite athletes: Are force-velocity profiles sport specific or individual? *PLoS ONE* 14(7): e0215551. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0215551>