



Universidad Pablo de Olavide

FACULTAD DEL DEPORTE
DEPARTAMENTO DE DEPORTE E INFORMÁTICA

TESIS DOCTORAL

**Importancia de la fuerza muscular sobre el rendimiento físico
y deportivo en atletas especialistas de 800 metros de alto nivel**

Tesis Doctoral para optar al grado de *Doctor Internacional*

Autora: Beatriz Isabel Bachero Mena

Director: Juan José González Badillo

Codirector: Juan Antonio León Prados

Junio de 2017



UNIVERSIDAD
**PABLO^D
OLAVIDE**
S E V I L L A

Universidad Pablo de Olavide

FACULTAD DEL DEPORTE
DEPARTAMENTO DE DEPORTE E INFORMÁTICA

TESIS DOCTORAL

**Importancia de la fuerza muscular sobre el rendimiento físico
y deportivo en atletas especialistas de 800 metros de alto nivel**

Doctorando

Beatriz Isabel Bachero Mena

Director

Juan José González Badillo

Codirector

Juan Antonio León Prados

Sevilla, Junio de 2017

Paris, le 19 juillet 2016

Gaël GUILHEM
Research Department
Laboratory Sport, Expertise and Performance (EA 7370)
Mail: gael.guilhem@insep.fr
Tel : +33(0)141744336

CERTIFICATE OF STAY

This letter is to certify that Beatriz Isabel Bachero Mena, as a PhD candidate on the International Doctorate programme, has successfully completed 5 months of research work in our laboratory "Sport, Expertise and Performance" of the French National Institute of Sport (INSEP), Paris, France.

- Period of time: 1st February 2016 - 30th June 2016
- Under the supervision of Gaël Guilhem (Director)
- The candidate has participated in a research project that has addressed electromyography recording/analysis, biomechanical analysis of stride patterns, and physiological evaluation related to running economy in 800 meters elite athletes from the French Athletics Federation.

Gaël GUILHEM

**INSTITUT NATIONAL DU SPORT,
DE L'EXPERTISE ET DE LA
PERFORMANCE**
Département de la Recherche / Research Department
11, avenue du Tremblay
75012 PARIS France



*A mis padres,
que me lo han dado todo.*

AGRADECIMIENTOS

A Juan José González Badillo, el “Gran Maestro”, al que respeto y admiro por su sabiduría y calidad humana. Gracias por tu inestimable dedicación y por todo lo que me has enseñado. Por tu criterio, apoyo y confianza en mi trabajo.

A Juan Antonio León Prados, por su disposición y ayuda en todo momento.

A mi familia, en especial a mi madre, por su apoyo y por transmitirme cada día su fortaleza, lucha y perseverancia, y a mi padre, por su apoyo y por ser parte activa en este trabajo con sus revisiones del inglés, siempre dispuesto. A mi hermano Adri, por estar siempre ahí. A Jesi, por su apoyo incondicional. A mis abuelos, porque los recuerdo, y estoy segura de que se sentirían orgullosos de su nieta.

A Fernando Pareja Blanco, por su gran ayuda y por todo lo que he aprendido con él, por su gran aportación y participación activa en el desarrollo de esta Tesis, y por supuesto por su amistad.

A mi entrenador y gran amigo Coco, que me inculcó el amor por el Atletismo y el entrenamiento. Pero más allá de eso, gracias por enseñarme a luchar por lo que se quiere y por estar siempre ahí.

A mis compañeros del Centro de Investigación en Rendimiento Físico y Deportivo de la UPO: Miguel Sánchez, David Rodríguez, Juanma Yáñez, Ricardo Mora, y Antonio Villalba, por vuestra compañía todos estos años y colaboración y ayuda en las mediciones de esta Tesis.

A todos y cada uno de los participantes de esta Tesis, y a sus entrenadores, porque sin ellos esto no habría sido posible, y en especial a Luis Alberto Marco, por su implicación directa en la Tesis, no sólo como sujeto, sino también como intermediario con el grupo de atletas y entrenadores, mil gracias.

A todo el “Département de la Recherche” Laboratoire Sport, Expertise et Performance, del INSEP de Paris (Francia), por su acogida durante mi estancia, y muy especialmente a Gaël Guilhem y Christine Hanon, por su tiempo, ayuda y dedicación. Y por supuesto a Bruno Gajer, entrenador de la Federación Francesa de Atletismo, por

su tiempo, por dejarme conocer su visión del entrenamiento y permitirme investigar con su grupo de atletas. Merci beaucoup à tous.

A mis atletas Rubén Espejo y María Serrano, por dejarme aprender con ellos, por apreciar y valorar mi trabajo, y por supuesto por su amistad.

A Luis Sánchez Medina y Pedro Jiménez Reyes, porque parte de la idea de esta Tesis surgió con vosotros, y en una servilleta, en Pamplona. Pero principalmente porque para mí habéis sido un modelo a seguir, con vuestra entrega y dedicación a la investigación.

A Juan Ribas y Covadonga López, por vuestra disposición desde el primer momento a colaborar en esta Tesis y por vuestro asesoramiento y ayuda con la variabilidad de la frecuencia cardíaca.

A todos mis amigos, que directa o indirectamente han estado a mi lado durante todo este proceso y me han brindado su apoyo.

Muchas gracias de corazón.

BECAS Y FINANCIACIÓN

La presente Tesis Doctoral ha sido posible también gracias a las siguientes subvenciones:

- *“Ayuda Puente Predoctoral”* del Plan Propio de Investigación de la Universidad Pablo de Olavide.
- *Beca de Formación del Profesorado Universitario (FPU)* del Ministerio de Educación, Cultura y Deporte (FPU13/05635). Departamento de Deporte e Informática, Facultad del Deporte, Universidad Pablo de Olavide.
- *Ayuda para Estancias en Centros de Investigación* del Plan Propio de Investigación de la Universidad Pablo de Olavide.

PUBLICACIONES Y DIVULGACIÓN DE LOS RESULTADOS

Artículos publicados en revistas científicas internacionales (JCR):

- **Bachero-Mena B** and González-Badillo JJ. (2014). Effects of resisted sprint training on acceleration with three different loads accounting for 5, 12.5, and 20% of body mass. *J Strength Cond Res*, 28(10):2954-60. doi: 10.1519/JSC.0000000000000492.
- **Bachero-Mena B**, Pareja-Blanco F, Rodríguez-Rosell D, Yáñez-García JM, Mora-Custodio R, González-Badillo J.J. (2017). Relationships between sprint, jumping and strength abilities, and 800 m performance in male athletes of national and international levels. *J Hum Kinetics. September's issue*. [ACCEPTED]
- **Bachero-Mena B**, Pareja-Blanco F, González-Badillo J.J. (2017). Enhanced strength and sprint levels, and changes in blood parameters during a complete athletics season in 800 m high-level athletes. *Front Physiol*. [Provisionally ACCEPTED]

Artículos enviados para publicación en revistas científicas internacionales (JCR):

- **Bachero-Mena B**, Pareja-Blanco F, González-Badillo J.J. (2017). Effects of high-speed strength training on physical performance in 800 meters high-level athletes. *Int J Sports Physiol Perform*. [IN REVIEW]

Ponencias:

- **Bachero-Mena B**. “La carga en el ejercicio de arrastres en carrera: efecto sobre la aceleración y relación entre la pérdida de velocidad, la fuerza máxima, el peso corporal y la capacidad de salto”. **1ª Jornada Científica sobre Rendimiento Físico y Deportivo**, 16 de abril de 2015. Centro de Investigación en Rendimiento Físico y Deportivo de la Universidad Pablo de Olavide, Sevilla.

Comunicaciones presentadas en forma de Póster:

- **Bachero-Mena B** and González-Badillo JJ. Resisted sprint effects of three different loads accounting for 5%, 12.5%, and 20% of body mass on acceleration, vertical jump, loaded vertical jump, and full squat. **18TH Annual Congress of the European College of Sport Sciences (ECSS)**, Barcelona, España, 26-29 de Junio, 2013.
- **Bachero-Mena B**, Pareja-Blanco F, Rodríguez-Rosell D, Mora-Custodio R, González-Badillo JJ. Relationships between jump, strength, and sprint in 800 meters male athletes of national and international level. **IV NSCA International Conference**, 2014, Human Performance Development through Strength and Conditioning, UCAM, Murcia, España, 26-28 de Junio de 2014.
- **Bachero-Mena B**, Pareja-Blanco F, González-Badillo JJ. Relación entre los niveles basales de prolactina e IGF-1, y el rendimiento en pruebas de sprint, fuerza y 800 metros en atletas de 800 metros de alto nivel. **Simposio EXERNET**. Investigación en Ejercicio, Salud y Bienestar: “Exercise is Medicine”. Cádiz, España, 14-15 de Octubre de 2016.
- **Bachero-Mena B**, Pareja-Blanco F, Sánchez-Moreno M, González-Badillo JJ. Relationships between 800 meters performance and sprint ability, vertical jump, and lower limb strength in high-level athletes. **IX International Symposium in Strength Training**. Faculty of Physical Activity and Sports Sciences (INEF), Technical University of Madrid. Madrid, Spain, 16-17 December 2016.

ÍNDICE

RESUMEN / SUMMARY	15
STUDY I	19
STUDY II	20
STUDY III	21
STUDY IV	22
1. Introducción	23
2. Origen de la Problemática Objeto de Estudio	26
3. Estado Actual del Conocimiento	30
3.1 Descripción general de la prueba de 800 m	31
3.2 Aspectos fisiológicos relacionados con el rendimiento en 800 m	34
3.2.1 Factores cardiorrespiratorios.....	34
3.2.2 Contribución relativa del metabolismo aeróbico y anaeróbico.....	37
3.2.3 Factores metabólicos.....	37
3.2.4 Concentración de lactato tras la prueba de 800 m.....	38
3.3 Respuestas y adaptaciones hematológicas y rendimiento en pruebas de medio fondo	39
3.3.1 Serie roja.....	39
3.3.2 Serie blanca y respuesta inmunológica.....	43
3.4 Respuesta hormonal y rendimiento en pruebas de medio fondo	45
3.5 La fuerza muscular y el rendimiento en pruebas de medio fondo	47
3.5.1 Relación entre la fuerza muscular y el rendimiento en 800 m.....	47
3.5.2 Efecto del entrenamiento de fuerza en pruebas de resistencia.....	51
3.5.3 Mecanismos de mejora a través del entrenamiento de fuerza.....	56
3.5.4 El entrenamiento resistido de carrera.....	60
3.5.4.1 Influencia del entrenamiento resistido en la velocidad de carrera...	61
3.5.4.2 Carga óptima a utilizar en el entrenamiento resistido de carrera.....	62

4. ESTUDIO I. Efecto del entrenamiento de arrastres con tres cargas que representan el 5, el 12.5 y el 20% del peso corporal, sobre la capacidad de aceleración, el salto vertical, el salto vertical con cargas y la sentadilla completa.....	67
4.1 Planteamiento del problema	68
4.2 Objetivos de la Investigación.....	69
4.3 Hipótesis.....	69
4.4 Metodología.....	71
4.4.1 Tipo de investigación.....	71
4.4.2 Muestra.....	71
4.4.3 Variables objeto de estudio.....	72
4.4.4 Evaluaciones, pruebas físicas e instrumentos de medida.....	74
4.4.5 Procedimientos.....	78
4.4.6 Entrenamiento.....	79
4.4.7 Análisis estadístico.....	81
4.5 Resultados.....	82
4.5.1 Fiabilidad de los tests.....	82
4.5.2 Diferencias entre los grupos.....	82
4.5.3 Diferencias intra-grupos.....	83
4.5.4 Efecto del entrenamiento de arrastres en las variables de carrera.....	83
4.5.5 Efecto del entrenamiento de arrastres en las variables de fuerza.....	86
4.5.6 Relación entre cambios.....	88
4.5.7 Valores absolutos y porcentajes de cambio entre el test inicial y el test final.....	88
4.6 Discusión.....	90
4.7 Conclusiones.....	96
4.8 Aplicaciones prácticas.....	97

5. ESTUDIO II. Relación entre el rendimiento en 800 metros y el sprint, la capacidad de salto y la fuerza muscular en atletas masculinos de alto nivel nacional e internacional.....	98
5.1 Planteamiento del problema	99
5.2 Objetivos de la Investigación.....	100
5.3 Hipótesis.....	100
5.4 Metodología.....	101
5.4.1 Tipo de investigación.....	101
5.4.2 Muestra.....	101
5.4.3 Diseño del estudio.....	102
5.4.4 Variables objeto de estudio.....	102
5.4.5 Evaluaciones, tests físicos e instrumentos de medida	103
5.4.6 Análisis estadístico.....	108
5.5 Resultados.....	109
5.5.1 Fiabilidad de las medidas.....	109
5.5.2 Relaciones entre el rendimiento en carrera de 800 m y la capacidad de aceleración, el salto vertical y la fuerza muscular de las piernas	109
5.5.3 Relaciones entre la carrera de 200 m, el salto vertical CMJ y la concentración de lactato.....	111
5.6 Discusión.....	112
5.7 Conclusiones.....	116
5.8 Aplicaciones prácticas.....	117
6. ESTUDIO III. Evolución de la fuerza, la velocidad y el salto vertical y determinadas variables hematológicas, inmunológicas y hormonales a lo largo de una temporada completa de entrenamiento en corredores de 800 m de alto nivel.....	118
6.1 Planteamiento del problema	119
6.2 Objetivos de la Investigación.....	120
6.3 Hipótesis.....	120
6.4 Metodología.....	122
6.4.1 Tipo de investigación.....	122

6.4.2	Diseño del estudio.....	122
6.4.3	Muestra.....	123
6.4.4	VARIABLES OBJETO DE ESTUDIO.....	123
6.4.5	Evaluaciones, tests físicos, analíticas e instrumentos de medida.....	125
6.4.6	Análisis estadístico.....	127
6.5	Resultados.....	128
6.5.1	Cambios a lo largo de la temporada en las variables de fuerza y carreras de velocidad	128
6.5.2	Cambios a lo largo de la temporada en el rendimiento en 800 m.....	128
6.5.3	Cambios a lo largo de la temporada en las variables hematológicas.....	129
6.5.4	Cambios a lo largo de la temporada en las variables hormonales y bioquímicas.....	130
6.5.5	Relación entre los cambios en el rendimiento en 800 m y el resto de variables.....	131
6.6	Discusión.....	134
6.7	Conclusiones.....	143
6.8	Aplicaciones prácticas.....	144
7.	ESTUDIO IV. Efecto de un entrenamiento de fuerza en el rendimiento físico y en la respuesta hormonal en atletas de 800 m de alto nivel durante una temporada atlética.....	145
7.1	Planteamiento del problema	146
7.2	Objetivos de la Investigación.....	147
7.3	Hipótesis.....	147
7.4	Metodología.....	149
7.4.1	Tipo de investigación.....	149
7.4.2	Diseño del estudio.....	149
7.4.3	Muestra.....	150
7.4.4	VARIABLES OBJETO DE ESTUDIO.....	150
7.4.5	Evaluaciones, tests físicos, analíticas e instrumentos de medida.....	151
7.4.6	Protocolo de entrenamiento de fuerza.....	152
7.4.7	Análisis estadístico.....	153

7.5 Resultados	155
7.5.1 Efecto del entrenamiento de fuerza sobre las variables de carrera...	157
7.5.2 Efecto del entrenamiento de fuerza sobre las propias variables de fuerza y la capacidad de salto.....	157
7.5.3 Efecto del entrenamiento de fuerza sobre variables hormonales.....	160
7.5.4 Relación entre los cambios en el rendimiento en 800 m, la fuerza muscular, las carreras de velocidad y las variables hormonales en el GF.....	160
7.6 Discusión	163
7.7 Conclusiones	168
7.8 Aplicaciones prácticas	169
8. Conclusiones Generales / General Conclusions	170
9. Limitaciones de la Investigación	176
10. Futuras Líneas de Investigación	179
11. Referencias Bibliográficas	181
12. Glosario de ACRÓNIMOS	202
13. Relación de TABLAS y FIGURAS	205
14. ANEXOS	209
14.1 ANEXO 1. Consentimiento Informado Estudio I	210
14.2 ANEXO 2. Consentimiento Informado Estudios II, III y IV	211
14.3 ANEXO 3. Publicaciones Científicas y Divulgación de los Resultados	212

SUMMARY

IMPORTANCE OF STRENGTH LEVELS ON PHYSICAL AND ATHLETIC PERFORMANCE IN 800 M HIGH-LEVEL ATHLETES

This Doctoral Thesis is aimed at discussing the importance of the muscle strength on the physical and athletic performance of high-level male athletes specialized in 800 m. Different variables of the muscle strength related to the 800 m performance have been analyzed together with the hematological, immunological, and hormonal responses, during both general and specific 800 m training, in high-level national male athletes, over a whole training and competition season. To this purpose, the following four studies were carried out. In the **Study I** we analyzed the effects of resisted sprint training on acceleration with three different loads accounting for 5%, 12.5% and 20% of body mass. **Study II** aimed to analyze the relationships between sprint, jumping and strength abilities, and 800 m performance in male athletes of national and international levels. In addition, the objective of **Study III** was to analyze the changes in strength and sprint levels, and changes in blood parameters during a complete athletics season in 800 m high-level athletes. Finally, in the **Study IV** we investigated the effects of a high-speed strength training on physical performance in 800 meters high-level athletes.

In the past decades, sports coaches and scientists showed growing interest in the study of those physiological and mechanical variables allowing an endurance runner to carry out intense effort during long periods of time. Up to now, most research has been focused on the analysis of the determining performance factors in races longer than 1500 m, with less attention been paid to other athletics events such as the 800 m race.

As early as the 16th century, the Italian mathematician, physician and astronomer Galileo Galilei reached the following conclusion: "*Measured what can be measured, and make measurable what cannot be measured*". As Astrand (1992) pointed out, coaches often ask themselves why an athlete is better than another. To answer this question, a series of aspects should be considered: 1) breakdown of the athlete's best performance into several components, 2) selection of the proper test for each component, 3) objective measurement of each component, and 4) use of the results for comparison

with benchmarks of athletes in other sports, follow-up of their evolution, prescription of the training, and prediction of the athlete's best performance.

Hence, both the assessment and measurement of each and every component having an effect on the athlete's best performance are essential steps of the sports training process, since most decisions to be taken thereupon will be linked to the measurement and assessment processes; in fact, in order to reach appropriate decisions, the sports coaches and/or technicians must be able to gather objective information, in order to analyze it and draw proper conclusions (Morrow et al., 1995).

Elite athletes' best performances are the result of the interaction between a series of multiple complex factors: genetic component, training, health status (including the existence or not of lesions, fatigue, diet or drug intake), and good integration of the different physiological, biomechanical, and psychological components inherent in the sport/discipline practiced (MacDougall et al., 1991). According to the aforementioned authors, the main factor related to the athlete's potential is the genetic factor, which encompasses the inherited physical, anthropometric, cardiovascular and muscular characteristics, as well as the so-called "trainability", which is the capacity to improve personal fitness through specific training, and to tolerate and assimilate very intense and frequent training sessions. The second factor linked to the athlete's best performance has to do with a proper training. Finally, the best performance may also be affected by the general health status or nutrition of the athletes.

Currently, the search for greater athletic performance is essentially focused on achieving the highest effectiveness out of training stimuli. From the physiological point of view, it is understood that the training process should involve the repetition of a series of exercises to make the competition gesture automatic, and develop both structural and metabolic functions that would lead to increased athletic performance (Viru, 1995). In this regard, training might be defined as an adaptation process where there is a relationship between the training stimuli and the desired structural and functional effects, by applying specific means and methods, aimed at improving athletic performance (González-Badillo, 2002).

In the past few years, there has been a growing interest both from the scientific community and the sports technicians or coaches concerning the assessment of muscle strength and the effect of training in endurance disciplines (Mikkola et al., 2007, 2011; Taipale et al., 2010, 2014). Such interest is due to the benefits observed from strength training on performances achieved in the above disciplines, be it among recreational, high-level, or competition athletes.

One of the biggest challenges facing the sports technicians and coaches, nowadays, lies in applying the most adequate means and methods to the specific sports discipline targeted to obtain the best performance. To this purpose, it is essential to know the determining factors for athletic performance in the concerned discipline; this is the prerequisite for deciding which type and amount of training is necessary and how to evaluate it. Furthermore, another important task to be carried out by coaches and sports technicians is to analyze the basic physical qualities and determine the most adequate training methods to optimize athletic performance.

In the past decades, many studies dealt with the physiological variables related to performance in endurance events of medium to long duration, such as maximum oxygen uptake ($VO_2\text{max}$), lactate, relative contribution from the energy systems, etc. (Hanon & Thomas, 2011; Hill, 1999; Lacour et al., 1990; Craig & Morgan, 1998; Weyand et al., 1994; Spencer & Gastin, 2001; Duffield et al., 2005). However, other determining factors related to performance in endurance events of medium to long duration, such as strength, jump ability and sprint ability, have been less investigated by the scientific community; actually, this issue was not deemed important until the past few years when the concern and need to study such factors started to appear (Aagaard & Andersen, 2010; Mikkola et al., 2007, 2011; Taipale et al., 2010, 2014).

Recently, several studies have analyzed the effects of different types of strength training on performance in endurance events of medium to long duration (Aagaard & Andersen, 2010; Mikkola et al., 2007, 2011; Taipale et al., 2010, 2014). Most of these studies tend to underline the importance of carrying out strength training with light-medium or explosive loads, and high or maximum loads achieved with a medium-low number of repetitions, contrary to traditional strength trainings performed by the endurance athletes, known as *strength-endurance or circuit training*, and consisting in circuit type

trainings with very low loads and high number of repetitions (>15) (Mikkola et al., 2011; Taipale et al., 2010, 2014).

Furthermore, and in view of the importance of blood and its essential role in the oxygen transport, buffering or thermoregulation, variables which are directly related to performance in endurance capacity (Calbet et al., 2006), part of the scientific community have shown interest in evaluating and monitoring the athletes' hematological profile. Likewise, the endocrine and immune systems play a function as modulators of the stress response caused by intense physical exercise (Crewther et al., 2006; Vleck et al., 2014). Through various mechanisms, both systems could get their functions diminished during intense endurance efforts, which would entail a greater risk of disease or lesion for the athlete (Knez et al., 2006). By monitoring these variables, very precise information could be obtained about the effects of the training stimuli on the body.

STUDY I. Effects of resisted sprint training on acceleration with three different loads accounting for 5%, 12.5% and 20% of body mass

Purpose: The optimal resisted load for sprint training has not been established yet, although it has been suggested that a resistance reducing the athlete's velocity by more than 10% from unloaded sprinting would entail substantial changes in the athlete's sprinting mechanics.

Methods: This investigation has evaluated the effects of a 7-week, 14-session sled resisted sprint training on acceleration with three different loads according to a % of body mass (BM): low load (LL: 5% BM, $n = 7$), medium load (ML: 12.5% BM, $n = 6$) and high load (HL: 20% BM, $n = 6$), in young male students. Besides, the effects on untrained exercises: vertical jump (CMJ), loaded vertical jump (JS) and full squat (SQ) were analyzed. The three groups followed the same training program consisting in maximal effort sprint accelerations with the respective loads assigned.

Results: Significant differences between groups only occurred between LL and ML in CMJ ($p < 0.05$), favoring ML. Paired t-tests demonstrated statistical improvements in 0-40 m sprint times for the three groups ($p < 0.05$), and in 0-20 m ($p < 0.05$) and 0-30 m ($p < 0.01$) sprint times for HL. Sprint times in 10-40 m ($p < 0.01$) and 20-40 m ($p < 0.05$) were improved in LL. Time intervals in 20-30 m and 20-40 m ($p < 0.05$) were statistically reduced in ML. As regards the untrained exercises, CMJ and SQ for ML and HL ($p < 0.05$) and JS for HL were improved.

Conclusions: The results show that, depending on the magnitude of load used, the related effects will be attained in different phases of the 40 m. It would seem that to improve the initial phase of acceleration up to 30 m, loads around 20% of BM should be used, whereas to improve high-speed acceleration phases, loads around 5 to 12.5% of BM should be preferred. Moreover, sprint resisted training with ML and HL would enhance vertical jump and leg strength in moderately trained subjects.

STUDY II. Relationships between sprint, jumping and strength abilities, and 800 m performance in male athletes of national and international levels

Purpose: This study analysed the relationships between sprinting, jumping and strength abilities, with regard to 800 m running performance.

Methods: Fourteen athletes of national and international levels in 800 m (personal best: 1:43-1:58 min:ss) completed sprint tests (20 m and 200 m), a countermovement jump, jump squat and full squat test as well as an 800 m race.

Results: Significant relationships ($p < 0.01$) were observed between 800 m performance and sprint tests: 20 m ($r = 0.72$) and 200 m ($r = 0.84$). Analysing the 200 m run, the magnitude of the relationship between the first to the last 50 m interval times and the 800 m time tended to increase (1st 50 m: $r = 0.71$; 2nd 50 m: $r = 0.72$; 3rd 50 m: $r = 0.81$; 4th 50 m: $r = 0.85$). Performance in 800 m also correlated significantly ($p < 0.01-0.05$) with strength variables: the countermovement jump ($r = -0.69$), jump squat ($r = -0.65$), and full squat test ($r = -0.58$).

Conclusions: Performance of 800 m in high-level athletes was related to sprint, strength and jumping abilities, with 200 m and the latest 50 m of the 200 m being the variables that most explained the variance of the 800 m performance.

STUDY III. Enhanced strength and sprint levels, and changes in blood parameters during a complete athletics season in 800 m high-level athletes

Purpose: The purpose of this study was to analyze changes in sprint, strength, hematological, and hormonal parameters in high-level 800 m athletes during a complete athletics season.

Methods: Thirteen male athletes of national and international level in 800 m (personal best ranging from 1:43 to 1:58 min:ss) participated in this study. A total of 5 tests were conducted during a complete athletics season. Athletes performed sprint tests (20 m and 200 m), countermovement jump (CMJ), jump squat (JS), and full squat (SQ) tests. Blood samples (red and white blood profile) and hormones were collected in test 1 (T1), test 3 (T3) and test 5 (T5).

Results: A general increase in the performance of the strength and sprint parameters analyzed (CMJ, JS, SQ, 20 m, and 200 m) during the season was observed, with a significant time effect in CMJ ($P < 0.01$), SQ ($P < 0.01$), and 200 m ($P < 0.05$). This improvement was accompanied by a significant enhancement of the 800 m performance from T3 to T5 ($P < 0.01$). Significant changes in some hematological variables: hematocrit (Hct) ($P < 0.01$), mean corpuscular volume (MCV) ($P < 0.001$), mean corpuscular hemoglobin content (MCHC) ($P < 0.001$), white blood cells count (WBC) ($P < 0.05$), neutrophils ($P < 0.05$), monocytes ($P < 0.05$), and mean platelet volume (MPV) ($P < 0.05$) were observed throughout the season. The hormonal response and creatin kinase (CK) did not show significant variations during the season, except for insulin-like growth factor I (IGF-1) ($P < 0.05$).

Conclusions: In conclusion, our results suggest the importance of strength levels in middle-distance athletes. On the other hand, the variations in the hematological parameters analyzed may have an influence on 800 m performance. A depression of the immune system occurred at the end of the season. Therefore, monitoring of the mechanical, hematological and hormonal response in athletes may help coaches and athletes to optimize the regulation of training contents and may be useful to diagnose states of overreaching or overtraining in athletes throughout the season.

STUDY IV. Effects of high-speed strength training on physical performance in 800 meters high-level athletes

Purpose: Previously, it has been suggested that strength training could enhance endurance performance. The aim of this study was to analyze the effects of a 25-week strength training program in physical performance and hormonal response in 800 m high-level athletes.

Methods: Thirteen male 800 m high-level athletes (personal best ranging from 1:43 to 1:58 min:ss) were divided into 2 groups: one group (n=6) followed a 25-week high-speed strength training program (STG), whereas a control group (n=7) followed their habitual strength training (CG). Three tests including sprint and 800 m running, strength exercises and blood hormones samples were carried out during the 25-weeks.

Results: Both groups improved significantly performance in 800 m ($p \leq 0.01$), however, STG showed an additional improvement in T200 ($p < 0.05$) and the strength variables: CMJ ($P < 0.01$; 98/2/0%; 87/12/0%; from T1 to T3 and from T2 to T3, respectively) and V1load ($P < 0.05$; 91/9/0%; from T1 to T3), whereas CG did not reach significant improvements in any of the strength variables analyzed. Concerning the hormonal variables, only STG showed a significant ($P < 0.05$) decrease in IGF-1 from T2 to T3. In addition, STG resulted in a likely increase in testosterone from T1 to T3, and CG showed a likely increase in cortisol from T2 to T3.

Conclusion: The results of the study suggest that strength training characterized by high-speed intensity and low volume, combined with jumps and resisted sprint training produced improvements in both strength and running performance. These results were accompanied by little or no changes in the hormonal response.

I. INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, los entrenadores y científicos del deporte han mostrado un creciente interés en el estudio de aquellas variables fisiológicas y biomecánicas que permitan a un corredor de resistencia realizar un esfuerzo intenso durante largos períodos de tiempo. Hasta la fecha, la mayoría de las investigaciones se han centrado en el análisis de los factores determinantes del rendimiento en pruebas atléticas superiores a los 1500 m, prestando menos atención a otras pruebas como la carrera de 800 m.

Ya en el siglo XVI, el matemático, físico y astrónomo italiano Galileo Galilei llegó a la siguiente conclusión: *“Hay que medir lo que puede ser medido, y hay que intentar que sea medible todo lo que no se pueda medir”*. Tal y como señalan Astrand & Rodhal (1992), los entrenadores y técnicos se preguntan a menudo por qué un deportista es mejor que otro. Para poder responder a esta cuestión lo más adecuado sería tener en cuenta una serie de aspectos: intentar descomponer la marca deportiva en varios componentes, elegir el test adecuado para cada componente, medir objetivamente cada componente, y utilizar los resultados para compararlos con referencias de deportistas de otros deportes, ver su evolución, prescribir el entrenamiento y predecir la marca deportiva.

Por ello, evaluar y medir cada uno de los componentes que influyen en la marca deportiva es un aspecto fundamental en el proceso de entrenamiento deportivo, ya que la mayoría de las decisiones que se van a tomar en este proceso van a estar relacionadas con los procesos de medida y de evaluación, puesto que para tomar decisiones adecuadas es necesario que los entrenadores o técnicos deportivos sean capaces de reunir información objetiva, para analizarla y deducir unas conclusiones (Morrow, Jackson, Disch, & Mood, 1995).

La marca deportiva de los deportistas de élite es el resultado de la interacción de múltiples factores complejos: el componente genético, el entrenamiento realizado, el estado de salud (que incluye la existencia o no de lesiones, fatiga, dieta o ingesta de drogas), y una buena integración de diferentes componentes fisiológicos, biomecánicos y psicológicos relacionados con el deporte o la disciplina practicados (MacDougall, Wenger, & Green, 1991). Según estos autores, el principal factor relacionado con el potencial del deportista es el factor genético, que incluye las características físicas o

antropométricas, cardiovasculares y musculares que han sido heredadas, y también lo que se llama “entrenabilidad”, que es la capacidad para mejorar la forma física con un entrenamiento dado, y para tolerar y asimilar entrenamientos muy intensos y frecuentes. El segundo factor relacionado con la marca deportiva hace referencia a la realización de un entrenamiento adecuado. Por último, la marca deportiva también puede estar influenciada por el estado de salud general y la nutrición de los deportistas.

Con la presente Tesis Doctoral se ha pretendido estudiar la importancia de la fuerza muscular sobre el rendimiento físico y deportivo en atletas especialistas en 800 m de alto nivel, y se ha realizado un análisis de las variables de fuerza muscular relacionadas con el rendimiento en la prueba de 800 m, así como de las respuestas hematológicas, inmunológicas y hormonales al entrenamiento general y específico de esta prueba en atletas de alto nivel nacional a lo largo de una temporada completa de entrenamiento y competición. Para ello se han llevado a cabo cuatro estudios:

Estudio I. Efecto del entrenamiento de arrastres con tres cargas que representan el 5, el 12,5 y el 20% del peso corporal sobre la capacidad de aceleración, el salto vertical, el salto vertical con cargas y la sentadilla completa.

Estudio II. Relación entre el rendimiento en 800 m y el sprint, la capacidad de salto y la fuerza muscular en atletas masculinos de alto nivel nacional e internacional.

Estudio III. Evolución de la fuerza, la velocidad y el salto vertical y determinadas variables hematológicas, inmunológicas y hormonales a lo largo de una temporada completa de entrenamiento en corredores de 800 m de alto nivel.

Estudio IV. Efecto de un entrenamiento de fuerza en el rendimiento físico y en la respuesta hormonal en atletas de 800 m de alto nivel durante una temporada atlética.

2. ORIGEN DE LA PROBLEMÁTICA OBJETO DE ESTUDIO

2. ORIGEN DE LA PROBLEMÁTICA OBJETO DE ESTUDIO

En la actualidad, la búsqueda de un mayor rendimiento deportivo se centra especialmente en lograr la máxima efectividad de los estímulos de entrenamiento. Desde el punto de vista fisiológico se entiende que el proceso de entrenamiento supone la repetición de una serie de ejercicios para provocar la automatización del gesto de competición y desarrollar las funciones estructurales y metabólicas que conducen al incremento del rendimiento deportivo (Viru, 1995). En este sentido, el entrenamiento puede definirse como un proceso de adaptación en el que existe una relación entre los estímulos de entrenamiento y los efectos estructurales y funcionales deseados, aplicando los medios y métodos específicos, con el objetivo de mejorar el rendimiento deportivo (González-Badillo & Ribas-Serna, 2002).

En los últimos años existe un interés creciente por parte tanto de la comunidad científica como por parte de los técnicos deportivos o entrenadores en lo que respecta a la valoración de la fuerza muscular y el efecto de su entrenamiento en disciplinas de resistencia (Mikkola, Rusko, Nummela, Pollari, & Hakkinen, 2007; Mikkola et al., 2011; Taipale et al., 2010, 2014). Este interés se debe a los beneficios que se han observado que ocurren con el entrenamiento de fuerza en el rendimiento en estas pruebas tanto en atletas recreacionales como en atletas de alto nivel o competición.

Uno de los mayores retos a los que se enfrentan diariamente los técnicos deportivos y entrenadores consiste en aplicar los medios y métodos de entrenamiento más adecuados en la disciplina deportiva concreta sobre la cual se quieren obtener los mejores rendimientos. Para ello, resulta de vital importancia conocer cuáles son los factores determinantes del rendimiento deportivo en la disciplina en la que se va a trabajar, se trata del requisito previo para decidir qué tipo y qué cantidad de entrenamiento hay que aplicar y cómo evaluar. Por otro lado, será otra tarea importante por parte de los entrenadores y técnicos deportivos el análisis de las cualidades físicas básicas y de los métodos de entrenamiento más adecuados para la optimización del rendimiento deportivo.

En las últimas décadas son varios los estudios que han investigado sobre las variables fisiológicas relacionadas con el rendimiento en pruebas de resistencia de media y larga duración, tales como: consumo máximo de oxígeno ($VO_{2\text{máx}}$), lactato, contribución relativa de los sistemas energéticos, etc (Hanon & Thomas, 2011; Hill, 1999; Lacour, Bouvat, & Barthelemy, 1990; Craig & Morgan, 1998; Weyand, Cureton, Conley, Sloniger, & Liu, 1994; Spencer & Gatin, 2001; Duffield, Dawson, & Goodman, 2005). No obstante, otros posibles factores determinantes del rendimiento en estas pruebas tales como la fuerza muscular, la capacidad de salto y la capacidad de sprint han sido menos investigados por la comunidad científica, y es durante los últimos años cuando han comenzado a adquirir mayor importancia y a ponerse de manifiesto la preocupación y necesidad de estudiarlos (Aagaard & Andersen, 2010; Mikkola et al., 2007, 2011; Taipale et al., 2010, 2014).

Recientemente, son varias las investigaciones que han analizado los efectos de diferentes tipos de entrenamientos de fuerza sobre el rendimiento en pruebas de resistencia de corta, media o larga duración (Aagaard & Andersen, 2010; Mikkola et al., 2007, 2011; Taipale et al., 2010, 2014). La mayoría de estas investigaciones han tratado de poner de manifiesto la importancia de realizar entrenamientos de fuerza con cargas ligeras-medias o explosivas y cargas altas o máximas realizados con un número de repeticiones medio-bajo, frente a los entrenamientos de fuerza tradicionalmente realizados por los deportistas de resistencia conocidos como entrenamientos de *fuerza-resistencia o circuit training* que consisten en entrenamientos de tipo circuito con cargas muy bajas y un número elevado de repeticiones (>15) (Mikkola et al., 2011; Taipale et al., 2010, 2014).

Por otro lado, y debido a la importancia y al rol esencial que desempeña la sangre en el transporte de oxígeno, buffering o termorregulación, variables que están directamente relacionados con el rendimiento en la capacidad de resistencia (Calbet, Lundby, Koskolou, & Boushel, 2006), existe un interés por parte de la comunidad científica en lo que respecta a la evaluación y control del perfil hematológico de los deportistas. Del mismo modo, los sistemas endocrino e inmune desempeñan una función como moduladores de la respuesta de estrés provocada por el ejercicio físico intenso (Crewther, Keogh, Cronin, & Cook, 2006; Vleck, Millet, & Alves, 2014). A través de diversos mecanismos, ambos sistemas podrían ver disminuidas sus funciones durante

los esfuerzos intensos de resistencia, provocando un mayor riesgo de enfermedad o lesión en el deportista (Knez, Coombes, & Jenkins, 2006). A través del control de estas variables podríamos tener una información muy precisa sobre los efectos que han provocado los estímulos de entrenamiento sobre el organismo.

3. ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO

3. ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO

3.1 Descripción general de la prueba de 800 m

La prueba de 800 m es una de las pruebas de medio fondo incluidas en el actual programa de atletismo. La prueba consiste en recorrer la distancia de 800 m (dos vueltas a la pista de 400 m) en el menor tiempo posible. En la salida los atletas se colocan por calles y corren en sus respectivas calles durante los primeros 100 m, pasando a partir de ese momento a la denominada “calle libre”, compuesta normalmente por las calles 1 y 2 de la pista.

La prueba de 800 m masculino forma parte del programa atlético de los Juegos Olímpicos modernos desde su primera edición celebrada en Atenas 1896. La modalidad femenina no se incluyó hasta los Juegos de Ámsterdam 1928, sin embargo, dejó de incluirse en el programa femenino de los Juegos hasta la edición en Roma 1960, debido a que se consideró por parte de las autoridades deportivas como una prueba demasiado exigente para las atletas.

Los actuales récords mundiales, europeos y nacionales en la prueba de 800 m tanto en categoría masculina como en categoría femenina son los siguientes: 1) Masculino: a) Mundial: 1:40.91 min:ss.cs ; b) Europeo: 1:41.11; c) Nacional: 1:43.74 (en posesión de uno de los participantes de la presente Tesis Doctoral) y 2) Femenino: a) Mundial: 1:53.28; b) Europeo: 1:53.28; c) Nacional: 1:57.45.

La prueba de 800 m es una disciplina que tiene una elevada exigencia física que requiere la contribución de los sistemas aeróbico y anaeróbico, debido a los elevados valores relativos de $VO_{2\text{máx}}$ (Hill, 1999; Spencer & Gatin, 2001; Thomas et al., 2005; Hanon, Thomas, Le Chevalier, Gajer, & Vandewalle, 2002), así como a las elevadas concentraciones de lactato (por encima de los $15 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$) alcanzadas al final de la prueba de 800 m (Hanon & Thomas, 2011; Hill, 1999; Lacour et al., 1990). Estos valores elevados de lactato sanguíneo se han asociado con un aumento de la producción de lactato muscular (Bogdanis, Nevill, Boobis, & Lakomy, 1996) junto con una marcada disminución de la cantidad de glucógeno en el músculo (Green, 1978); particularmente en las fibras tipo IIX (Casey, Constantin-Teodosiu, Howell, Hultman,

& Greenhaff, 1996). Esto sugiere que se da una extensa activación de la glucogenólisis anaeróbica durante este tipo de ejercicio, sobre todo en las fibras tipo IIX (Green, 1978).

Otro aspecto importante a tener en cuenta en la carrera de 800 m es la estrategia seguida por el atleta en cuanto al ritmo de carrera se refiere. Esta estrategia del ritmo de carrera hace referencia a las variaciones de velocidad durante la carrera para regular la tasa de gasto energético durante la misma (Foster, Schrager, & Snyder, 1994) y ha sido propuesta como un marcador de la regulación fisiológica subyacente (Tucker & Noakes, 2009). Cuando se analizan los resultados en competición de los medallistas de oro, plata y bronce, se obtiene que las marcas se encuentran dentro del 1% de variabilidad o menos y que incluso pequeñas variaciones en las estrategias de carrera podrían tener efectos marcados en el resultado (de Koning, Bobbert & Foster, 1999).

Son pocos los estudios que han analizado las distintas estrategias de ritmo de carrera utilizadas en competiciones de atletismo. Tucker, Lambert & Noakes (2006) encontraron diferencias importantes entre las estrategias de carrera en 800, 5000 y 10000 m, siendo en el 800 m la segunda vuelta significativamente más lenta que la primera, mientras que en el 5000 y 10000 m se termina esprintando debido a un mantenimiento del ritmo más estable durante toda la carrera. Gajer, Hanon, Marajo & Vollmer (2001) encontraron que el último 100 m en corredores de élite de 800 m era siempre el que se corría a menor velocidad. Se ha considerado que estrategias con ritmos de salida rápidos implican una reducción progresiva de la velocidad de carrera (Gajer et al., 2001; Hanon & Gajer, 2009) y una disminución en el VO_2 (Billat, Hamard, Koralsztejn, & Morton, 2009; Hanon, Leveque, Thomas, & Vivier, 2008) hacia el final de la carrera. Hanon et al. (2011) analizaron los perfiles de velocidad alcanzados durante las diferentes fases de carrera en las pruebas de 400, 800 y 1500 m en atletas de elite, encontrando el pico de velocidad en el 2º parcial de 100 m en la prueba de 800 m y una disminución significativa de la velocidad en el último 100 m de las carreras de 400, 800 y 1500 m, siendo el parcial más lento en la carrera de 400 y 800 m (**Tabla 1** y **Figura 1**).

Tabla 1. Velocidades, tiempos y porcentajes medios, inicial y final en tramos de 100 m en carreras de 400, 800 y 1500 m. (Hanon et al., 2011)

	400 m	800 m	1500 m
Mean velocity ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	8.99	7.76	6.97
First 100 m ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	9.06	7.86	7.35
Segment time (s)	11.04	12.73	13.61
Last 100 m ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	8.12	7.32	7.13
Segment time (s)	12.31	13.65	14.02
Last 100 m (%)	76.60	88.40	95.94

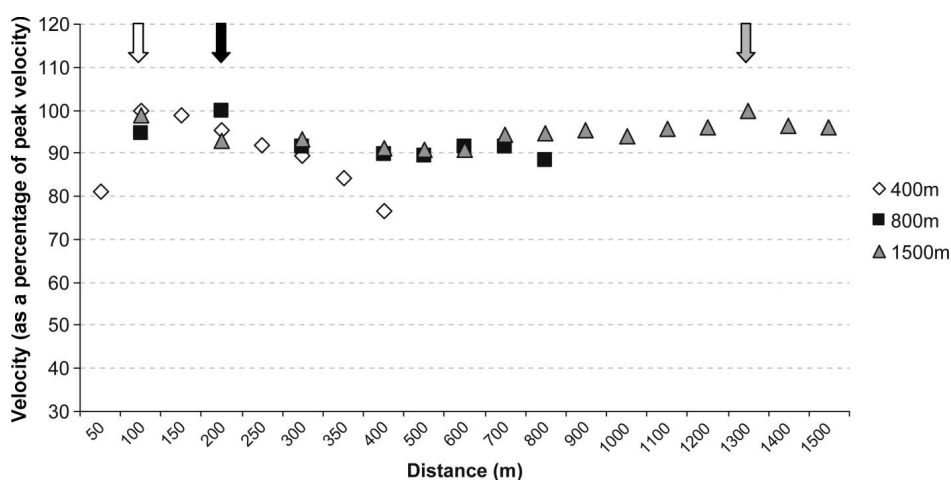


Figura 1. Evolución de la velocidad de carrera durante una competición de 400, 800 y 1500 m en atletas de élite. Las velocidades están expresadas en porcentajes relativos con respecto al pico de velocidad de cada distancia. (Hanon et al., 2011)

En lo que respecta a la prueba de 800 m, la literatura científica se ha centrado en estudiar los diferentes porcentajes de contribución aeróbica/anaeróbica en la prueba de 800 m (Craig & Morgan, 1998; Weyand et al., 1994; Spencer & Gastin, 2001; Lacour et al., 1990; Hill, 1999; Duffield et al., 2005). También se ha investigado ampliamente otras variables fisiológicas, tales como el $\text{VO}_{2\text{máx}}$ o la respuesta de VO_2 (Hanon & Thomas, 2011; James, Sandals, Draper, Maldonado-Martin, & Wood, 2007). Sin embargo, otros posibles factores determinantes del rendimiento en la prueba de 800 m tales como la fuerza muscular, la capacidad de salto y la capacidad de sprint han sido menos investigados por la comunidad científica (Hudgins, Scharfenberg, Triplett, & McBride, 2013).

A continuación se exponen los factores relacionados con el rendimiento en la prueba de 800 m.

3.2 Aspectos fisiológicos y mecánicos relacionados con el rendimiento en 800 m

3.2.1 Factores cardiorrespiratorios

Como hemos indicado en el apartado anterior, la bibliografía científica ha reportado una gran participación del metabolismo aeróbico en la producción de energía en atletas especialistas en 800 m. En la **Figura 2** podemos observar la evolución VO_2 a lo largo del tiempo durante una prueba sobre tapiz rodante de 800 m realizada a la máxima intensidad posible hasta el agotamiento (tiempo de agotamiento: $1:51.60 \pm 3$ min:ss.cs), en atletas franceses de 400 m de alto nivel (Heugas, Brisswalter, & Vallier, 1997). El $\text{VO}_{2\text{máx}}$ de estos atletas era de 62.3 ± 6.3 $\text{ml}\cdot\text{kg}\cdot\text{min}^{-1}$. En la gráfica podemos observar como el VO_2 aumenta de forma rápida al inicio del ejercicio y alcanza valores próximos al máximo (90-95% del $\text{VO}_{2\text{máx}}$) a los 50-60 s, manteniéndose a continuación en esos valores, sin llegar a los valores máximos de VO_2 . Por otro lado, se ha encontrado que para una misma duración de ejercicio, la participación del metabolismo aeróbico en la producción de energía es mayor en atletas de alto nivel que en sedentarios (Olesen, Raabo, Bangsbo, & Secher, 1994), y es menor en atletas especialistas de 800 m que en atletas especialistas de disciplinas de mayor duración (Weyand et al., 1993).

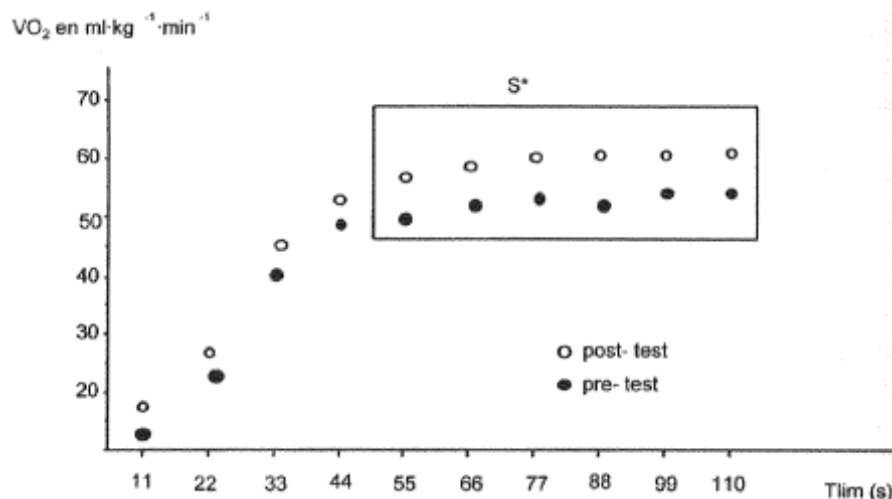


Figura 2. Evolución de los valores medios de VO_2 , cada 11 s durante una prueba realizada en tapiz rodante hasta el agotamiento por 11 atletas de 400 m (tiempo: $1:51.6 \pm 3$ min:ss) (Heugas et al., 1997).

Otros autores han encontrado resultados similares con atletas de 800 m (Spencer et al., 1996). La mayoría de estos estudios han encontrado valores cercanos al 90-95% del $VO_{2\text{máx}}$ cuando se realiza este tipo de ejercicios, pero parece que raramente llegan a alcanzar valores máximos del 100%, como podrían alcanzarse en una prueba de laboratorio incremental hasta el agotamiento. La mayoría de los estudios que han analizado esta contribución lo han hecho utilizando tests a velocidad constante en un tapiz rodante de tal manera que provocaba el agotamiento cerca de los 2 min de duración. Sin embargo, esta no es la situación real de las competiciones de 800 m, en las que el objetivo es recorrer una distancia en el menor tiempo posible y donde la velocidad no permanece constante, sino que varía a lo largo de la prueba. Por ello, para estudiar una situación más real, Thomas et al. (2005) analizaron la evolución de la velocidad, del $VO_{2\text{máx}}$ (medido con un metabolímetro portátil) y de la frecuencia cardíaca en 5 atletas franceses de nivel regional y nacional (marca en 800 m: 1:50-1:58 min:ss) que corrieron una carrera de 800 m a la máxima velocidad posible, simulando una competición. Estos autores observaron que la velocidad de carrera aumenta de forma progresiva desde el comienzo de la prueba hasta alcanzar valores máximos a los 75-100 m, a partir de donde comienza a disminuir de modo progresivo hasta el final (**Figura 3**). Además el VO_2 no siguió la misma evolución que la **Figura 2** (en la que los atletas corrían a una velocidad constante), sino que aumentó progresivamente desde el principio hasta alcanzar los valores máximos entre los 300 y 400 m, es decir a unos 45 s de carrera, a continuación se mantuvieron esos valores hasta los 550 m (78 s) y disminuyeron progresivamente entre los 400 y los 800 m, coincidiendo con un descenso en la velocidad. Los valores de VO_2 observados en los últimos metros eran un 20% inferiores al máximo. Sandals, Word, Draper & James (2006) también encontraron valores superiores de $VO_{2\text{máx}}$ en una prueba de 800 m en tapiz rodante en la que simularon los cambios de velocidad que cuando se realiza a velocidad constante.

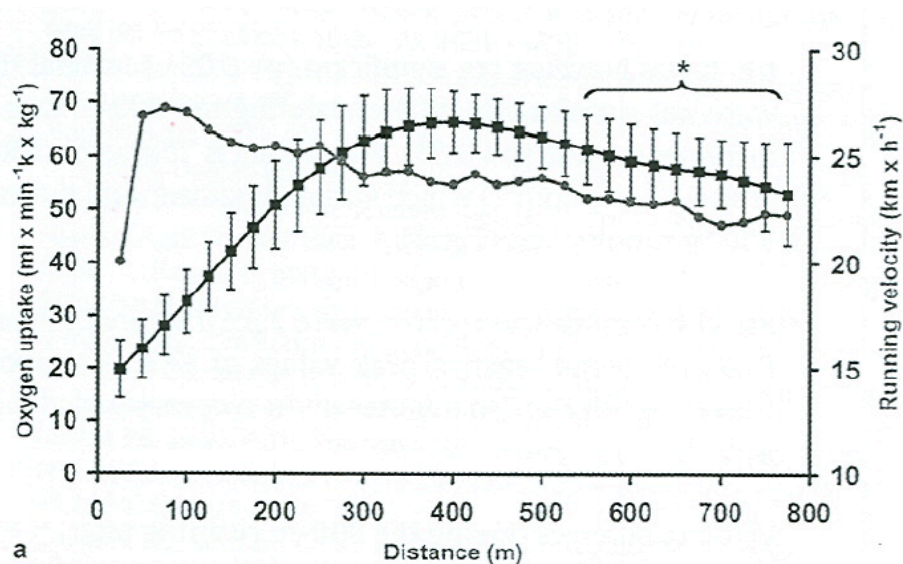


Figura 3. Evolución de los valores medios de velocidad (círculos negros) y VO_2 (cuadrados negros) a lo largo de una carrera de 800 m, realizada en pista de atletismo por 5 atletas de nivel regional y nacional (tiempo: $2:00 \pm 3$ min:ss) (Thomas et al., 2005).

En cuanto al comportamiento de la frecuencia cardíaca (FC) durante la prueba de 800 m, Thomas et al. (2005) han observado que ésta aumenta durante la primera mitad de la prueba de modo similar al $VO_{2m\acute{a}x}$, hasta alcanzar los valores de FC máxima a los 300-400 m, y a continuación se mantienen estos valores máximos hasta el final de la prueba, a pesar de que la velocidad y el $VO_{2m\acute{a}x}$ disminuyen (**Figura 4**).

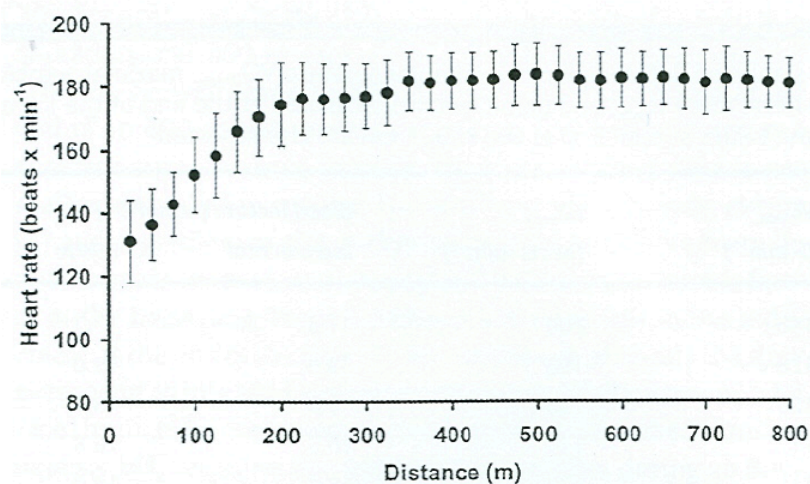


Figura 4. Evolución de los valores medios de FC a lo largo de una carrera de 800 m, realizada en pista de atletismo por 5 atletas de nivel regional y nacional (tiempo: $2:00 \pm 3$ min:ss) (Thomas et al., 2005).

3.2.2 Contribución relativa del metabolismo aeróbico y anaeróbico

Hasta la fecha, los entrenadores y científicos del deporte han mostrado gran interés en las variables de rendimiento relacionados con la contribución metabólica del ejercicio y las fuentes energéticas para explicar el rendimiento en la prueba de 800 m (Craig & Morgan, 1998; Duffield et al., 2005; Hill, 1999; Lacour et al., 1990; Spencer & Gastin, 2001; Weyand et al., 1994). El estudio de todo ello, ha llevado a encontrar diferentes porcentajes relativos de contribución aeróbica/anaeróbica en la prueba de 800 m: 73/27% (Craig & Morgan, 1998), 71/29% (Weyand et al., 1994), 66/34% (Spencer & Gastin, 2001), 59/41% (Lacour et al., 1990), 58/42% (Hill, 1999), y 60/40% (Duffield et al., 2005). Estas discrepancias de los autores en los diferentes porcentajes de contribución aeróbica/anaeróbica podrían deberse principalmente a los diferentes métodos de estimación indirecta utilizados para determinar la contribución anaeróbica, ya que la contribución aeróbica puede obtenerse de forma directa mediante la determinación del consumo de oxígeno. Por otro lado, se ha encontrado una mayor participación del metabolismo aeróbico en deportistas de elite con respecto a sedentarios o poco entrenados, que podría ser debido a las diferencias en los valores de $VO_{2máx}$ entre ambos (Olesen et al., 1994).

3.2.3 Factores metabólicos

La mayoría de los trabajos que se han centrado en el estudio de los sustratos musculares (Adenosín trifosfato: ATP, Fosfocreatina PCr, glucógeno y lactato) durante un ejercicio de una duración aproximada de 2 min, lo han hecho con ejercicios realizados en cicloergómetro (Karlsson & Saltin, 1970; Gollnick & Hermansen, 1973; Medbo & Tabata, 1993; Withers, Sherman, Clark, & Brinkman, 1991; Green, Dawson, Goodman, & Carey, 1996) o simuladores ergométricos del gesto específico (Tesch & Karlsson, 1984), debido a la mayor facilidad de extracción de las muestras por medio de biopsias musculares. Además, la mayoría de los estudios se han realizado con sujetos sedentarios o físicamente activos debido a la mayor complejidad de realizar este tipo de estudios con deportistas de alto nivel, ya que podría interferir en el entrenamiento y por tanto en el rendimiento de los mismos. No obstante, existen algunos estudios sobre la evolución de los sustratos musculares en este tipo de ejercicios con deportistas de alto nivel (Withers et al., 1991; Green et al., 1996; Tesch & Karlsson, 1984).

La mayoría de estos autores sugieren que los ejercicios comprendidos en una duración de entre 1:30 y 3:00 min:ss se acompañan de una disminución casi completa de las reservas de PCr muscular (cercana al 70-90%), de una disminución significativa de las reservas musculares de ATP y de glucógeno (cercana al 30%), y de un gran aumento de la concentración muscular de lactato (unas 10-15 veces por encima de los valores de reposo). Además, la utilización de los sustratos energéticos musculares es predominante en las fibras musculares de tipo IIa y IIx, y no parece existir diferencia entre sujetos sedentarios o poco entrenados y deportistas de élite, lo cual puede ser debido a que no existe un número de estudios con deportistas de élite suficiente para obtener conclusiones.

3.2.4 Concentración de lactato tras la prueba de 800 m

Existe una gran variabilidad en los valores medios de lactato encontrados tras una carrera de 800 m. Este rango oscila entre los 12.8 mmol·L⁻¹ (Medbo et al., 1988) y 24-25 mmol·L⁻¹ (Lacour et al., 1990), y depende fundamentalmente del tipo de deportistas en los que se analizó, siendo mayor en los deportistas de alto nivel, y sin encontrar diferencias significativas entre hombres y mujeres (Lacour et al., 1990). Este aumento de la concentración de lactato en respuesta a la alta intensidad demandada por ejercicios de corta duración como en esta disciplina se ha asociado a una disminución en la concentración de bicarbonato [HCO₃⁻] aproximadamente de 10 mmol·L⁻¹, y a una reducción del pH sanguíneo entre 7.15 y 7.00 (Hanel, Clifford, & Secher, 1994; Nielsen, 2003). Estos valores bajos de pH podrían tener unos efectos negativos sobre el rendimiento, tales como una inhibición de la actividad muscular contráctil (Favero, Zable, Bowman, Thompson, & Abramson, 1995; Sahlin, 1992), una inhibición del metabolismo oxidativo muscular (Jubrias, Crowther, Shankland, Gronka, & Conley, 2003), y una disminución en la saturación de O₂ de la Hb (Rasmussen, Hanel, Diamant, & Secher, 1991). Arcelli, Bianchi, Tebaldini, Bonato, & La Torre (2012) observaron que la mayor producción de lactato en la unidad de tiempo se produce en la parte inicial de la carrera (0-300 m), sin embargo, la mayor concentración se alcanza en la mitad de la prueba (300-600 m), la cual permanece estable hasta el final de la prueba (600-800 m). Esto sugiere que el metabolismo anaeróbico tiene un papel más relevante en la parte inicial de la prueba, ya que es cuando la producción de lactato es mayor y los valores de VO₂ más bajos.

3.3 Respuestas y adaptaciones hematológicas y rendimiento en pruebas de medio fondo

3.3.1 Serie Roja

El perfil hematológico de los deportistas es de gran importancia debido al rol esencial que desempeña la sangre en el transporte de oxígeno (O_2), buffering o termorregulación. Durante el ejercicio, el sistema cardiovascular tiene que garantizar el aporte de sustratos a los músculos implicados. Los glóbulos rojos, también llamados hematíes o eritrocitos son los elementos más numerosos de la sangre ($4.5 - 5.9 \text{ mill}\cdot\text{mm}^{-3}$). La hemoglobina (Hb) es uno de sus principales componentes y su función durante el ejercicio es el transporte de O_2 desde los pulmones hacia los tejidos del cuerpo y la liberación del dióxido de carbono (CO_2) producido en los pulmones para su expulsión. El significado biológico del transporte de O_2 por la Hb queda bien reflejado en la anemia, de tal manera que una disminución de la Hb también disminuye el rendimiento físico a pesar de una respuesta compensatoria de aumento de la función cardíaca (Carroll, 2007), así como en la mejora del rendimiento aeróbico que ocurre tras un aumento de la Hb (Berglund & Hemmingson, 1987). Además del transporte de O_2 , los glóbulos rojos también se encargan de otras funciones, las cuales contribuyen igualmente a la mejora del rendimiento físico. Una de ellas es la contribución en la capacidad de buffering de la sangre en el pH sanguíneo, gracias al transporte de CO_2 y la unión de los hidrogeniones (H^+) a la Hb. Los glóbulos rojos también absorben metabolitos como el lactato liberado por las células del músculo durante el ejercicio de alta intensidad. Por otro lado, los glóbulos rojos contribuyen a una vasodilatación y mejora de la circulación sanguínea en los músculos demandados gracias a la liberación de ATP y óxido nítrico (NO) (González-Alonso, Olsen, & Saltin, 2002). Todas estas funciones requieren de una cantidad suficiente de glóbulos rojos en la circulación.

Los deportistas entrenados, en especial los de deportes de resistencia, suelen tener valores de hematocrito (Hct) disminuidos, lo que en ocasiones se conoce como una situación de falsa anemia o pseudoanemia. Sin embargo, no se trata de una anemia real en el sentido clínico, ya que los deportistas tienen de hecho unos niveles superiores relativos de glóbulos rojos y Hb en circulación en comparación con personas sedentarias. Este ligero descenso del Hct producido por el entrenamiento está

relacionado con un aumento del volumen plasmático, que hace que se modifiquen los parámetros relativos (López-Chicharro & Fernández-Vaquero, 2006). El mecanismo por el que se produce la expansión del volumen plasmático como respuesta al ejercicio regular no se conoce con certeza, pero se cree que puede deberse a una mayor producción de aldosterona por activación del sistema renina-angiotensina-aldosterona y a una mayor retención de fluidos corporales (Schumacher, Jankovits, Bultermann, Schmid, & Berg, 2002). Los mecanismos responsables del aumento de la cantidad total de glóbulos rojos no han sido descubiertos completamente. El principal factor que regula la producción de glóbulos rojos es la eritropoyetina (EPO), que se estimula cuando se reduce la oxigenación de las zonas renal y hepática principalmente. Pero a pesar de la estimulación de la eritropoyesis, el ejercicio puede disminuir la cantidad de glóbulos rojos debido a la hemólisis de los glóbulos rojos principalmente, que comienzan a envejecer por una ruptura mecánica cuando pasan a través de los capilares de los músculos que se contraen, así como por la compresión de los mismos, como ocurre por ejemplo en la planta de los pies debido a los impactos durante la carrera o en las palmas de las manos en los levantadores de pesas (Mairbäul, 2013). Todas estas modificaciones provocan una disminución de la edad media de los glóbulos rojos circulantes en deportistas entrenados, generando glóbulos rojos jóvenes caracterizados por una mayor liberación de O_2 y capacidad de deformación, lo cual mejora el aporte de O_2 en los tejidos durante el ejercicio.

La mayoría de los cambios hematológicos a largo plazo correspondientes a la serie roja se han descrito en relación a ejercicios de larga duración, aunque también hay estudios que demuestran modificaciones durante actividades de corta duración y elevada intensidad (Constantini, Eliakim, Rigel, Yaaron, & Falk, 2000; Schumacher et al., 2002; Rietjens, Kuipers, Hartgens, & Keizer, 2002; Wilkinson, Martin, Adams, & Liebman, 2002; Nikolaidis et al, 2003). La adaptación del volumen sanguíneo representa uno de los mecanismos que puede influir en el incremento del $VO_{2m\acute{a}x}$ (Jones, Davy, De Souza, van Pelt, & Seals, 1997; Sawka, Convertino, Eichner, Schnieder, & Young, 2000). Se han encontrado correlaciones entre la capacidad de transporte de O_2 y la capacidad de rendimiento aeróbico (Berglund & Hemmingson, 1987). Del mismo modo se han observado correlaciones elevadas entre la Hb y $VO_{2m\acute{a}x}$ en atletas (Sawka et al., 2000; Schmidt & Prommer, 2010). Por lo tanto, no cabe duda de que poseer una elevada capacidad de transporte de O_2 supone una clara ventaja para el rendimiento en las

disciplinas con un elevado componente aeróbico. Sin embargo, existen controversias en cuanto a la proporción de contribución de dicha adaptación en la mejora del $VO_{2m\acute{a}x}$, de forma que existen algunos trabajos que encuentran mejoras en el $VO_{2m\acute{a}x}$ sin observar aumentos del volumen sanguíneo (Branco et al., 1997). Una posible explicación a esos resultados controvertidos reside en la duración del entrenamiento, ya que cuando se mide el volumen sanguíneo después de 11 días de entrenamiento se encuentra una expansión del volumen plasmático de un 11% sin cambios en el volumen eritrocitario y aumentando sólo en un 6% el $VO_{2m\acute{a}x}$, mientras que aumentando la duración del entrenamiento hasta >21 días, ocurre un aumento del volumen plasmático acompañado del volumen eritrocitario, relacionado con un aumento del 16% en el $VO_{2m\acute{a}x}$ (Sawka et al., 2000). En otro estudio realizado por Warburton et al. (2004) en el que analizaron los efectos de 12 semanas de diferentes modalidades de entrenamiento aeróbico en la función cardiorrespiratoria y volumen sanguíneo encontraron que el entrenamiento produjo aumentos del volumen sanguíneo que justificaban el 47% de las mejoras encontradas en el $VO_{2m\acute{a}x}$.

Como hemos indicado anteriormente, algunas de las variables necesarias para evaluar la capacidad de transporte de O_2 son: la Hb, el Hct y los hematíes o glóbulos rojos. La Hb y los glóbulos rojos indican la cantidad total de O_2 que puede ser transportada a través de la sangre, llevando el O_2 a los órganos con una alta demanda así como manteniendo el suministro basal de O_2 en los tejidos menos activos (Mairbäurl, 2013). Por tanto, una disminución en la concentración de Hb, incluso cuando el volumen de sangre circulante se mantiene, resulta en un $VO_{2m\acute{a}x}$ y rendimiento en resistencia menor, debido a la reducción de la capacidad de transporte de O_2 (Calbet et al., 2006). Por el contrario, un incremento en la concentración de Hb se ha asociado con una mejora del $VO_{2m\acute{a}x}$ y del rendimiento en resistencia para un volumen plasmático constante, que es también proporcional al aumento de la capacidad de transporte de O_2 de la sangre (Calbet et al., 2006).

El hematocrito (Hct) mide la porción de la sangre compuesta por glóbulos rojos. En concreto, se define como la relación entre el volumen corpuscular y el volumen de sangre total, de tal forma que sus valores dependen del número de glóbulos rojos, del volumen corpuscular medio, y del volumen plasmático. Se han establecido como valores normales de referencia un $45 \pm 1.5\%$ en hombres y $40 \pm 1.5\%$ en mujeres,

existiendo desviaciones significativas en deportistas de distinta condición física y grado de entrenamiento (López-Chicharro & Fernández-Vaquero, 2006). La influencia de la actividad física en las variables hematológicas se han analizado en muchos trabajos. Algunos han encontrado disminuciones en el Hct, la Hb y el número de glóbulos rojos en atletas comparados con sedentarios, mientras que otros estudios argumentan que estos cambios no dependen de la actividad física en sí misma sino del tipo de ejercicio realizado, como por ejemplo el ejercicio de resistencia (Green, Sutton, Coates, Ali, & Jones, 1991; Sawka et al., 2000). Otros autores no han encontrado disminución en las variables estudiadas (Hct, Hb, RBC) en el grupo de atletas respecto a los sedentarios. Según López-Chicharro & Fernández-Vaquero (2006) estos resultados contradictorios parecen estar justificados por el hecho de analizar las muestras de sangre dos días después de permanecer en reposo, lo que condiciona la menor influencia de la expansión del volumen plasmático sobre los valores de Hct y Hb. Los estudios que han observado cambios en el Hct lo relacionan con la expansión del volumen plasmático como adaptación al entrenamiento y la hemólisis intravascular originada en algunos deportes, siendo la disminución observada en el Hct debida fundamentalmente a la hemodilución y en menor medida a la destrucción de células rojas. La mayoría de las investigaciones que analizan los cambios hematológicos lo hacen en deportistas de resistencia aeróbica, y la mayoría encuentran disminuciones del Hct y Hb asociados con reticulocitosis e incremento de los hematíes jóvenes caracterizados por un bajo contenido de Hb corpuscular y un gran volumen corpuscular medio (Green et al., 1991; Weight, Klein, Noakes, & Jacobs, 1992). En muchos estudios se han encontrado valores inferiores de Hct en atletas que en sedentarios (Sawka et al., 2000; Weight et al., 1992). Esto ha sido corroborado por Sharpe et al. (2002), con la intención de establecer unos valores de referencia del Hct y la Hb en atletas. Estos autores encontraron que de los 1100 atletas de diferentes países que participaron en el estudio (85% hombres y 22% mujeres) tenían valores de Hct por debajo del 44%. Por otro lado, se ha encontrado una tendencia de correlación inversa entre los valores de Hct y el estado de forma, representado por el VO_{2max} (Heinicke et al., 2001). Sawka et al. (2000), en su revisión, analizaron los resultados de 18 investigaciones y encontraron que el volumen plasmático y volumen sanguíneo incrementaban rápidamente después de varias sesiones de entrenamiento, mientras que el número de glóbulos rojos permanecía estable durante varios días hasta que comenzaba a aumentar provocando una disminución del Hct durante varios días. La magnitud de cambio del Hct parece depender de la intensidad y

el tipo de ejercicio (Hu & Lin, 2012). Además, hay que tener en cuenta que las distintas variables hematológicas varían debido a los cambios estacionales (verano/invierno). Tanto las concentraciones de Hb como de Hct son menores cuando el período de entrenamiento se realiza en verano que en invierno, observando descensos de hasta un 15% en el Hct (del 48% en invierno al 42% en verano) (Mairbäul, 2013). Estos cambios estacionales dependen fundamentalmente de los cambios climáticos, existiendo diferencias mayores en los países próximos al ecuador (Thirup, 2003). Los estudios que analizan los cambios en los valores de Hct en atletas son escasos pero indican que el Hct podría reducirse otro 1-2% en verano con el efecto del entrenamiento (Mairbäul, 2013).

Rietjens et al. (2002) evaluaron el perfil hematológico (serie roja) de triatletas olímpicos de larga distancia durante tres años y encontraron que el entrenamiento de resistencia a largo plazo no alteró en gran medida el perfil hematológico, sin embargo indican la necesidad de una revisión regular de las variables hematológicas para controlar que se encuentran en un rango normal. A pesar de la estrecha relación existente entre el volumen sanguíneo, el $VO_{2\text{máx}}$, el rendimiento aeróbico y la capacidad máxima de ejercicio (Kanstrup & Ekblom, 1984; Calbet et al., 2006), existen escasos estudios que analicen los cambios a largo plazo de variables hematológicas asociadas con el entrenamiento de resistencia. Desde nuestro conocimiento, no existen datos descriptivos de los perfiles hematológicos en atletas de 800 m a lo largo de una temporada completa de atletismo.

3.3.2 Serie blanca y respuesta inmunológica

Los leucocitos son las células sanguíneas de la serie blanca. Éstos incluyen un grupo heterogéneo de poblaciones celulares derivadas de precursores hematopoyéticos que median la respuesta inmunológica del organismo. Estas células sanguíneas de la serie blanca se dividen en granulocitos (neutrófilos, eosinófilos y basófilos) y agranulocitos (monocitos y linfocitos). Los neutrófilos son los leucocitos más abundantes de la sangre (60-65% del total de leucocitos) y aumentan en situaciones de estrés. Los neutrófilos actúan también como células inmunoregulatoras a través de la producción de citoquinas que estimulan la inflamación, y de sustancias que actúan inhibiendo la progresión de la respuesta inflamatoria. Los eosinófilos constituyen entre el 1 y el 3% del total de leucocitos y participan en el desarrollo de las respuestas alérgicas. Los basófilos son la

población leucocitaria minoritaria en la sangre (menos del 1%). Los monocitos representan el 2-8% de los leucocitos de la sangre, y cumplen funciones fagocitarias. Por último, los linfocitos representan entre el 20 y el 40% del total de leucocitos de la sangre y se caracterizan por tener funciones biológicas muy especializadas, ya que son capaces de reconocer de forma específica estructuras moleculares o antígenos. Los glóbulos blancos o leucocitos desempeñan una función importante en el sistema inmune. Los linfocitos son células responsables de la inmunidad específica (Córdova, 2003).

La actividad física conlleva una serie de demandas sobre el organismo que dependen del tipo, intensidad y duración del ejercicio, y que tendrá repercusiones sobre la capacidad de respuesta y adaptación del sistema inmunológico del deportista. De este modo, la capacidad de respuesta inmune del deportista repercute sobre su salud, y ésta a su vez sobre su rendimiento físico. La respuesta de estrés originada por el ejercicio físico va a provocar una serie de adaptaciones en el sistema inmune (Clow & Hucklebridge, 2001). El ejercicio físico intenso, en especial el que requiere contracciones excéntricas, induce respuestas inflamatorias transitorias en los músculos más solicitados. Esta inflamación se corresponde con microtraumatismos musculares y participa en los procesos de reparación, hipertrofia y angiogénesis muscular secundarios al ejercicio. No obstante, la repetición de reacciones inflamatorias intensas, provocadas por cargas de entrenamiento excesivas podrían provocar una inflamación local de carácter crónico o recurrente, llevando a una disminución del rendimiento deportivo (López-Chicharro & Fernández-Vaquero, 2006).

Los epidemiólogos han relacionado la incidencia de determinadas infecciones con cargas de entrenamiento elevadas o competiciones estresantes, aunque hay que tener en cuenta que el ejercicio puede modificar el riesgo de infecciones a través de otros mecanismos diferentes a la función inmune (Brenner, Shek, & Shepard, 1993; Shepard & Shek, 1993). El sistema inmune podría estar afectado por el nivel de actividad o rendimiento en el que se encuentra el deportista (Vleck et al., 2014). A través de diversos mecanismos, el sistema inmune podría verse afectado durante un esfuerzo intenso de resistencia, provocando un mayor riesgo de enfermedad o lesión (Knez et al., 2006). Además, se ha sugerido que, en los atletas de elite con exceso de entrenamiento, la mayor susceptibilidad a las infecciones podría deberse a una inmunosupresión más acusada provocada por la acumulación de un exceso de carga de trabajo (Scott, 2002).

Por otra parte, las plaquetas (trombocitos), son pequeños fragmentos citoplasmáticos que circulan en la sangre y cuya función es la de formar coágulos o trombos, es decir, que ayudan a la sangre a su proceso de coagulación, a mantener un equilibrio en el sistema cardiovascular y a evitar hemorragias cuando hay heridas, formando por medio de coágulos costras que ayudan a detener la hemorragia mientras el vaso dañado es reparado. Se ha encontrado que el entrenamiento físico regular provoca como adaptación una disminución del número de plaquetas circulantes, así como una disminución de amplitud de la distribución plaquetaria. La consecuencia de este proceso es el descenso del platelecrito (producto del número de plaquetas por el volumen plaquetar medio) (López-Chicharro & Fernández-Vaquero, 2006). Además, se ha demostrado que después de un periodo de entrenamiento físico aeróbico se produce una atenuación en el incremento del número de plaquetas en respuesta al ejercicio intenso (Ferguson & Guest, 1974).

3.4 Respuesta hormonal y rendimiento en pruebas de medio fondo

El ejercicio físico intenso provoca una respuesta de estrés por parte del sistema endocrino (Crewther et al., 2006). Estas respuestas podrían regularse con el estado de forma física que ocurre con el entrenamiento a largo plazo (De Souza et al., 1991). Las adaptaciones hormonales al entrenamiento de resistencia a largo plazo se caracterizan por una reducción o no cambio en las concentraciones basales de las hormonas (Consitt, Copeland, & Tremblay, 2002). Una de las hormonas más estudiadas con respecto a la respuesta al ejercicio físico ha sido la testosterona, la cual se considera como una hormona anabólica principal ya que actúa aumentando la síntesis de proteínas y disminuyendo la degradación de proteínas (Crewther, Cook, Cardinale, Weatherby, & Lowe, 2011). Las variaciones encontradas en la concentración de testosterona en saliva provocadas por la fatiga muscular han mostrado tener relación con la duración y la intensidad de la carga física precedente, indicando un estado catabólico (Gatti & De Palo, 2011). Por el contrario, el cortisol es una de las principales hormonas catabólicas, debido a su función de degradación y disminución de la síntesis de proteínas (Crewther et al., 2011). En este sentido, el cortisol puede ser útil para determinar estados psicofisiológicos de estrés durante un ejercicio único o repetidas sesiones de entrenamiento, incluso si no se ha encontrado una relación unívoca entre el estrés y la

concentración de esta hormona (Gatti & De Palo, 2011). En relación con el entrenamiento de medio fondo, Balsalobre-Fernández, Tejero-González, & del Campo-Vecino (2014) encontraron una tendencia en la cual las semanas en las que los atletas tenían mayores concentraciones de cortisol libre en saliva eran aquellas en las que estos mismos atletas obtuvieron los valores de salto vertical con contramovimiento (CMJ) más altos.

La literatura científica indica que las adaptaciones hormonales crónicas en atletas de resistencia suponen una reducción de los niveles de testosterona y un aumento de los niveles de cortisol (Hackney, Szczepanowska, & Viru, 2003), lo cual significa que ocurre un estado catabólico en el cuerpo que podría afectar al rendimiento específico. La disminución de la carga de entrenamiento y por tanto la fatiga provocan una respuesta adrenocortical más baja así como una mejora en el estado inmunológico, a pesar de que no se han encontrado correlaciones significativas entre las diferentes hormonas en saliva y la carga de entrenamiento (Guilhem et al., 2015). Por otro lado, estudios anteriores han mostrado incrementos en los niveles de prolactina producidos por el ejercicio (Gray, Telford, & Weidemann, 1993; Hickson, Hidaka, Foster, Falduto, & Chatterton, 1994; Kraemer, Volek, Bush, Putukian, & Sebastianelli, 1998) que parecen estar relacionados con la intensidad del ejercicio (Luger et al., 1992). La hormona del crecimiento o GH y su principal mediador el factor de crecimiento insulínico tipo 1 (IGF-1) o somatomedina C juegan un papel importante en la formación, mantenimiento y regeneración del músculo esquelético (Frystyk, 2010). Los estudios en los que se han analizado los efectos crónicos del ejercicio en la IGF-1 circulante han dado lugar a resultados contradictorios, encontrando aumentos (Poehlman, Rosen, & Copeland, 1994; Kraemer et al., 1990; Koziris et al., 1999), disminuciones (Eliakim et al., 1996, 1998; Nishida et al., 2010) o no cambios (Vitiello et al., 1997) en los niveles de IGF-1 tras periodos de entrenamiento de resistencia o fuerza. Por otro lado, en algunos estudios transversales se han encontrado asociaciones positivas entre el $VO_{2m\acute{a}x}$ y los niveles de IGF-1 (Eliakim et al., 1996; Poehlman & Copeland, 1990; Poehlman et al., 1994; Nishida et al., 2010), sugiriendo que una mejora en la condición física podría resultar en unos niveles superiores de IGF-1 (Frystyk, 2010). Por el contrario, otros estudios han mostrado una disminución en los niveles de IGF-1 tras varias semanas de entrenamiento a pesar de una mejora en el rendimiento físico (fuerza muscular y/o $VO_{2m\acute{a}x}$) (Eliakim et al., 1996; 1998) y una disminución del 9% tras 6 semanas de

entrenamiento aeróbico de baja intensidad (Nishida et al., 2010).

Se ha propuesto que las hormonas juegan un papel importante en las adaptaciones producidas por el entrenamiento de fuerza y resistencia (Tremblay, Copeland, & Van Helder, 2005). El tipo, la intensidad y la duración del entrenamiento van a influir sobre las concentraciones hormonales (Tremblay et al., 2005). Una de las típicas respuestas agudas al entrenamiento de fuerza en hombres corresponde a un aumento de los niveles basales de testosterona, mientras que se ha encontrado que sesiones de entrenamiento de resistencia provocan un aumento significativo de la concentración basal de cortisol, y/o una disminución de los niveles basales de testosterona (Taipale, Mikkola, Vesterinen, Nummela, & Häkkinen, 2013). Las respuestas agudas de las concentraciones basales de las hormonas podrían llevar a respuestas crónicas.

Según nuestro conocimiento, la mayoría de los estudios a largo plazo sobre la respuesta hormonal al ejercicio han tratado con atletas relacionados con el entrenamiento de fuerza, mientras que las investigaciones sobre variables hematológicas en atletas de medio fondo de alto nivel son escasas. No conocemos estudios que analicen la respuesta mecánica, hematológica y hormonal en atletas de medio fondo durante un temporada completa de atletismo. Por ello, uno de los objetivos de esta Tesis Doctoral ha sido analizar los cambios en diferentes variables de velocidad y fuerza, así como la respuesta hematológica y hormonal durante una temporada completa de atletismo en atletas de 800 m de alto nivel (**Estudio III**).

3.5 La fuerza muscular y el rendimiento en pruebas de resistencia

3.5.1 Relación entre la fuerza muscular y el rendimiento en 800 m

Existe una amplia investigación sobre la estrecha relación entre las diferentes capacidades de fuerza muscular y el rendimiento en sprint en atletas de élite. Sin embargo, la mayoría de estas investigaciones se han centrado en distancias de carrera muy cortas (50 y 100 m) (Loturco et al., 2015a, 2015b; Seitz, Reyes, Tran, de Villarreal, & Haff, 2014).

La evaluación y el análisis de la fuerza muscular forman parte del control del entrenamiento. El control tiene como objetivo proporcionar constante información acerca de los efectos del entrenamiento realizado y del estado de condición física del deportista. A través del control se racionaliza el proceso de entrenamiento, ya que con la información obtenida se podrán tomar las decisiones pertinentes acerca del estímulo más ajustado para obtener los mejores rendimientos. Para ello hace falta la medición de una serie de variables que son las que van a expresar el efecto del entrenamiento. En este sentido, las variables medidas han de ser relevantes para el deporte o especialidad deportiva, es decir, han de ser capaces de explicar el rendimiento y poder predecir los resultados. Además los tests han de ser válidos, de forma que lo que se pretende medir sea lo que realmente se mide. Igualmente, los instrumentos de medida utilizados han de ser fiables, es decir, constantes y precisos en la medición. También será necesario tener en cuenta las circunstancias en las que se realiza la medición, como por ejemplo el calentamiento previo, la temperatura, la hora, y la actitud del deportista, de tal manera que cuando se realizan los mismos tests a lo largo del tiempo éstos se realicen en las mismas condiciones.

Existen multitud de tests para evaluar la fuerza muscular en el deporte (Glatthorn et al., 2011; McMaster, Gill, Cronin, & McGuigan, 2012; González-Badillo & Sánchez-Medina, 2010). Algunos de los más utilizados son los sprints cortos, el salto vertical o ejercicios de fuerza como la sentadilla completa (Pareja-Blanco, Rodríguez-Rosell, Sánchez-Medina, Gorostiaga, & González-Badillo, 2014; Jiménez-Reyes et al., 2014). Los tests de sprint se han utilizado con frecuencia en numerosas especialidades deportivas debido a su especificidad con el gesto de competición, en este caso la carrera, y además debido a su facilidad de aplicación y su alta fiabilidad (Faude, Koch, & Meyer, 2012; Buchheit, Spencer, & Ahmaidi, 2010; Hopker, Coleman, Wiles, & Galbraith, 2009). En cuanto a las distancias de sprint utilizadas usualmente para evaluar la fuerza muscular en atletas de resistencia, éstas oscilan entre los 10 y 60 m (Aagaard & Andersen, 2010; Nummela et al., 2006). Estos tests de sprint constituyen la evaluación más específica de la producción de fuerza de los corredores, dada la similitud con el gesto de competición (Nummela et al., 2006; Sinnott, Berg, Latin, & Noble, 2001). Se han observado correlaciones altas ($r > 0.70$) entre la capacidad de sprint en 50 m y el tiempo en correr 10000 m en atletas recreacionales (Sinnott et al., 2001), sin embargo, son pocos los estudios que han analizado estas relaciones sobre el rendimiento en

carreras de medio fondo. Por otro lado, Deason, Powers, Lawler, Ayers, & Stuart (1991) encontraron una correlación significativa ($r = 0.83$; $p < 0.01$) entre el tiempo en 800 m y el tiempo en 300 m en corredores de 800 m, sugiriendo que la energía requerida para correr un 800 m está relacionada en gran parte con el metabolismo anaeróbico. Con respecto a los tests de salto vertical, éstos han sido ampliamente propuestos por la comunidad científica como una herramienta eficiente e inmediata de valoración de la fuerza muscular de las piernas (Cormie, McBride, & McGaulley, 2009; Jiménez-Reyes et al., 2014). El test de salto vertical con contramovimiento (CMJ) es uno de los tests de salto vertical utilizados más comúnmente debido a su gran validez, fiabilidad y especificidad (Jiménez-Reyes et al., 2014; Markovic, Dizdar, Jukic, & Cardinale, 2004). Además se trata de un test de fácil aplicación y que produce poco o ningún grado de fatiga, lo que resulta muy útil en deportistas de alto nivel (Jiménez-Reyes & González-Badillo, 2011; Hauger, Tonnessen, & Seiler, 2012; Balsalobre-Fernández, 2014). En este sentido, Jiménez-Reyes et al. (2011) analizaron la evolución del salto vertical a lo largo de una temporada completa en atletas velocistas, encontrando que los mejores rendimientos obtenidos en el CMJ se daban durante el mismo período en el que los atletas alcanzaban sus mejores rendimientos en carreras de velocidad en competición. Lo mismo ocurrió con los peores rendimientos obtenidos en competición, los cuales coincidieron con los peores valores de rendimiento de CMJ de la temporada. Por otro lado, la velocidad de carrera se ha propuesto como una función de la producción de fuerza y potencia (Hunter, Marshall, & McNair, 2005). Por lo tanto, debido a la elevada asociación de la potencia muscular con actividades o ejercicios explosivos de salto, se ha planteado la utilidad de los tests de salto para predecir el rendimiento en carreras que van desde los 60 m hasta los 5000 m (Hudgins et al., 2013). Aunque las carreras de medio fondo (800 y 1500 m) y fondo (3000 y 5000 m) se corren a una menor velocidad que las carreras de velocidad, se considera que existe un componente de producción de fuerza que permite alcanzar un mayor rendimiento en las pruebas de larga distancia igualmente. La fuerza se considera como un componente determinante de la capacidad de correr (Novacheck, 1998). Son muchos los estudios que han encontrado correlaciones entre distintas medidas de la fuerza y capacidad de salto y el rendimiento en carreras de distancias cortas. McBride et al. (2009) encontraron correlaciones significativas entre la fuerza máxima medida a través del ejercicio de sentadilla y el rendimiento en sprint ($r = -0.60$). Varios autores han encontrado igualmente correlaciones significativas entre distintos tipos de salto: drop jump (Barr & Nolte,

2011; Kale, Ascii, Bayrak, & Acikada, 2009), squat jump (Chelly et al., 2010; Smirniotou et al., 2008), CMJ (Vescovi & McGuigan, 2008; Young, Cormack, & Crichton, 2011), salto horizontal (Brechue, Mayhew, & Piper, 2010) y la capacidad de sprint. Por lo tanto, parece clara la estrecha relación que existe entre la fuerza muscular, la capacidad de salto, tanto horizontal como vertical, y el rendimiento en distancias de carrera muy cortas. No obstante, en lo que respecta a distancias más largas la bibliografía es escasa. Hudgins et al. (2013) analizaron la relación entre la capacidad de salto, medida a través de la suma de tres saltos a pie junto realizados de forma sucesiva, y el rendimiento en diferentes disciplinas de carrera de atletismo (60, 100, 200, 800, 3000 y 5000 m) en atletas de competición. Estos autores observaron una correlación significativa ($r = 0.83$; $p \leq 0.05$) entre la capacidad de salto horizontal y la carrera de 800 m en atletas de competición, sugiriendo que una cierta cantidad de la varianza explicada del rendimiento en 800 m está relacionada con la capacidad de salto, y remarcando la posible importancia de los niveles de fuerza en el rendimiento en pruebas de mayor distancia. Igualmente, Houmard, Costill, Mitchell, Park, & Chenier (1991) encontraron una relación significativa entre la altura del salto vertical y la marca en 5000 m en corredores recreacionales de nivel similar, indicando que los sistemas anaeróbicos influyen en el rendimiento en medio fondo. Además, se han encontrado valores de salto vertical CMJ en atletas españoles de alto nivel de 400 m entre 40 y 55 cm (Gorostiaga et al., 2010). Parece lógico pensar que en las distancias superiores a 400 m, la importancia relativa de la fuerza en la marca deportiva será cada vez menor. Por ejemplo, la importancia relativa de la producción de fuerza en la unidad de tiempo (Rate of force development, RFD) en una maratón o en una carrera de 10000 m debería ser muy pequeña. Sin embargo, en el 800 y 1500 m la fuerza tiene una importancia que podrá ser mayor o menor en función de cómo se desarrolle la carrera o la táctica que se emplee, de tal forma que una carrera lenta de 800 m se puede decidir en un sprint de 100 m. En este tipo de carrera, probablemente aquellos atletas que tengan mayor RFD podrían desarrollar seguramente más velocidad y podrían ser los ganadores a pesar de no tener una gran capacidad aeróbica. Sin embargo, cuando la carrera se haga a ritmo constante, por ejemplo con liebre, la importancia de una RFD muy elevada podría ser menor, y la importancia de la capacidad aeróbica podría ser mayor. En cuanto a la evaluación de la fuerza muscular a través de ejercicios comunes del entrenamiento de fuerza tales como el ejercicio de sentadilla completa, existen muchos estudios en los que se han encontrado correlaciones significativas entre el rendimiento en este ejercicio

y el rendimiento en sprint (McBride et al., 2009; Seitz et al., 2014). Sin embargo, no se han encontrado estudios que analicen de manera específica la correlación entre la fuerza muscular en sentadilla completa y el rendimiento en carreras de resistencia, a pesar de que la mayoría de los estudios que analizan los efectos del entrenamiento de fuerza sobre el rendimiento en carreras de resistencia utilizan este ejercicio como parte fundamental de sus programas de entrenamiento.

Por lo tanto, debido al escaso número de estudios en los que se ha analizado la importancia de las diferentes variables neuromusculares responsables del rendimiento en pruebas de medio fondo (Hudgins et al., 2013), el propósito de esta tesis doctoral fue por una parte analizar las relaciones que existen entre la fuerza muscular de las piernas, la capacidad de sprint, la capacidad de salto vertical y el rendimiento en la prueba de 800 m en atletas de alto nivel nacional e internacional (**Estudio II**).

3.5.2 Efecto del entrenamiento de fuerza en pruebas de resistencia

El entrenamiento específico de carrera ocupa un gran porcentaje del entrenamiento total de los atletas corredores. Sin embargo, también se realizan otras formas de entrenamiento diferentes a la carrera con la intención de producir unas adaptaciones fisiológicas específicas que puedan influir directa o indirectamente (como reducir el riesgo de sufrir una lesión) en el rendimiento. Un método habitualmente utilizado por los corredores es el entrenamiento de fuerza.

Uno de los aspectos interesantes relacionados con el entrenamiento de fuerza y de resistencia es la posible influencia que pueda tener el entrenamiento y la mejora de la fuerza sobre el rendimiento en resistencia. Dicha influencia se podría medir por el efecto sobre diferentes variables relacionadas con el rendimiento en resistencia, tales como el consumo máximo de oxígeno, el umbral de lactato, la velocidad o la potencia de umbral, el tiempo empleado en una distancia determinada o la economía de carrera o de la actividad cíclica propia de cada especialidad de resistencia.

Para Verkhoshansky (1990), la fuerza es determinante en la mejora de la capacidad para mantener el rendimiento durante una prueba. El desarrollo de la resistencia depende no sólo del perfeccionamiento de la capacidad respiratoria, sino también de la especialización funcional de los músculos esqueléticos, es decir, del aumento de la

capacidad de fuerza y de su capacidad oxidativa.

Tradicionalmente, los atletas especialistas en carreras de resistencia han realizado poco o ningún entrenamiento de fuerza para mejorar el rendimiento específico de carrera, y además este entrenamiento estaba poco o nada controlado. Recientemente existe un interés creciente por parte de la comunidad científica en lo que respecta a la valoración de la fuerza muscular en disciplinas de media y larga distancia debido a los beneficios que se han observado que ocurren con el entrenamiento de fuerza en el rendimiento en estas pruebas tanto en atletas recreacionales (Taipale et al., 2010, 2014; Hickson, Dvorak, Gorostiaga, Kurowski, & Foster, 1988), como moderadamente entrenados (Storen et al., 2008; Berryman, Maurel, & Bosquet, 2010), y de alto nivel (Sedano et al., 2013; Millet et al., 2002). Sin embargo, los estudios realizados con deportistas de alto nivel son escasos (Aagaard & Andersen, 2010; Sedano et al., 2013). Se ha sugerido que el entrenamiento de fuerza podría producir una mejora a largo plazo en la capacidad de resistencia tanto en atletas recreacionales como en atletas altamente entrenados y de competición (Aagaard & Andersen, 2010).

Hasta el momento, las investigaciones que se han hecho respecto al entrenamiento de fuerza han sido diseñadas específicamente para aumentar la fuerza muscular, la potencia, la resistencia muscular y producir adaptaciones neurales. Los diferentes métodos de entrenamiento de fuerza que han sido utilizados se pueden resumir de la siguiente forma:

- *Entrenamiento de fuerza con cargas pesadas o altas*: en los que se utilizan cargas con ≤ 6 repeticiones máximas (RM) (1-6 RM) y que utilizan porcentajes de RM (%RM) elevados (80-100% RM).
- *Entrenamiento de fuerza cargas ligeras-medias*: tradicionalmente conocido como fuerza explosiva, en los que se utilizan cargas bajas o medias (30-60% RM) con un número de repeticiones por series medio (4-8).
- *Entrenamiento de fuerza-resistencia o circuit training*: que habitualmente incluye entrenamientos de tipo circuito con cargas bajas o muy bajas y un número elevado de repeticiones (>15).
- *Entrenamiento de sprints cortos y entrenamiento de carrera resistida*.

Son varios los estudios que han investigado los efectos del entrenamiento de fuerza en disciplinas de medio fondo y fondo (Mikkola et al., 2007, 2011; Taipale et al., 2010, 2014). Mikkola et al. (2011) analizaron los efectos de tres tipos de entrenamiento de fuerza (máxima, explosiva, y fuerza-resistencia) durante 8 semanas sobre el rendimiento en resistencia y en las propias variables de fuerza en corredores de fondo recreacionales. Estos autores encontraron que los tres tipos de entrenamiento de fuerza: el entrenamiento de fuerza con cargas altas o máxima (3x4-6 RM), el entrenamiento de fuerza con cargas ligeras o explosiva (3 series x 6 repeticiones 0-40% RM, realizadas a la máxima velocidad posible) y el entrenamiento de fuerza-resistencia (3 series x 40-50 repeticiones, sin carga externa y con velocidad de ejecución lenta) mejoraron la capacidad de resistencia en un test incremental hasta el agotamiento en tapiz rodante, sin encontrar mejoras significativas en el $VO_{2máx}$ y economía de carrera en ninguno de los grupos. Sin embargo, sólo los grupos que entrenaron con cargas altas y ligeras mejoraron la fuerza muscular (medida a través de 1RM) junto con un aumento de la activación muscular de las piernas (medida a través de electromiografía). Por otro lado, sólo el grupo que entrenó con cargas altas obtuvo mejoras en el test de capacidad máxima anaeróbica y en el salto vertical. Estos autores sugieren que aunque los tres grupos mejoraron el rendimiento en resistencia, sólo los entrenamientos con cargas altas y ligeras resultaron ser beneficiosos en la mejora de las características neuromusculares, y el entrenamiento de cargas altas en concreto contribuyó a las mejoras en los esfuerzos de alta intensidad, indicando la importancia de éste a la hora de mejorar la capacidad de sprint al final de una carrera. Además, Taipale et al. (2010) también mostraron un efecto positivo del entrenamiento de fuerza máxima (80-85% 1RM) y explosiva (30-40% 1RM) durante un período de 8 semanas en el rendimiento específico en carrera en atletas de resistencia, junto con mejoras en la fuerza muscular medida a través de un test de 1RM y de salto vertical. Estos autores concluyeron que tanto el entrenamiento de fuerza máxima como explosiva realizado de forma concurrente con el entrenamiento de resistencia resultó más efectivo en la mejora de la fuerza muscular y el rendimiento neuromuscular, así como en la mejora de velocidad de $VO_{2máx}$ y la economía de carrera que un entrenamiento de fuerza de tipo circuito caracterizado por un elevado número de repeticiones y poca carga. De forma similar, estos autores también encontraron mejoras en el pico de velocidad máxima en un test incremental tras un entrenamiento mixto de fuerza máxima y explosivo (50-70% 1RM) realizado de manera concurrente con el entrenamiento de resistencia durante 8 semanas en atletas recreacionales, atribuyendo

estos efectos a las mejoras paralelas en la fuerza muscular y en la activación muscular (Taipale et al., 2014). Por el contrario, en un estudio reciente (Vikmoen et al., 2016) no se han encontrado mejoras significativas en el rendimiento en resistencia en mujeres corredoras en un test de 40 min “all out” tras un entrenamiento de fuerza de 11 semanas con cargas altas (3x4-10 RM) combinado con entrenamiento de resistencia en comparación con el grupo que sólo entrenó resistencia. No obstante, el grupo que entrenó fuerza si obtuvo mejoras en las variables de fuerza analizadas: fuerza máxima (1RM) y capacidad de salto (CMJ y CMJc).

Los efectos del entrenamiento de fuerza sobre la economía de carrera han sido estudiados en varios trabajos, encontrando adaptaciones neuromusculares positivas tras un entrenamiento de fuerza con cargas altas, con mejoras tanto en la economía de carrera como en la fuerza máxima (Guglielmo, Greco, & Denadai, 2009; Storen et al., 2008; Taipale et al., 2010; Millet et al., 2002). La mejora de la economía de carrera se entiende como la capacidad para realizar la misma actividad con un menor consumo energía o una actividad más intensa con el mismo consumo. En Sedano et al. (2013), un entrenamiento de fuerza con cargas altas (3x7x70% 1RM) durante 12 semanas mostró mayores mejoras que un entrenamiento tradicional de fuerza-resistencia caracterizado por un elevado número de repeticiones por serie (3x20x40% 1RM) en el rendimiento en carrera de 3 km (1.2% vs. sin cambio) y en la economía de carrera (5.0 vs. 1.6%) en atletas de competición (3000-5000 m). Igualmente, Beryman et al. (2010) encontraron tras 8 semanas de entrenamiento de fuerza (3-6x8 de media sentadilla realizado a la máxima velocidad posible con la carga de máxima potencia) mejoras en la economía de carrera (4%) y en el tiempo en 3 km (4.3%) en atletas moderadamente entrenados, atribuyendo estas mejoras a los cambios en las características neuromusculares. La combinación de la mejora en la eficiencia muscular junto con el aumento del reclutamiento de las unidades motoras y la coordinación muscular, podrían ser los responsables de una disminución de la carga de trabajo relativa, con la consiguiente reducción del VO₂ para esa carga (Hoff, Helgerud, & Wisloff, 1999).

Por otro lado, en algunos estudios se han encontrado beneficios del entrenamiento pliométrico sobre el rendimiento en carreras de resistencia (Spurrs, Murphy, & Watsford, 2003; Turner, Owings, & Schwane, 2003). El concepto de especificidad del movimiento sugiere que el tipo de ejercicio de fuerza utilizado por los corredores debe

ser lo más similar posible al gesto que realizará posteriormente en el entrenamiento o competición (Jung, 2003). El entrenamiento pliométrico es una forma específica de entrenar la fuerza con el objetivo de mejorar la capacidad de los músculos para producir fuerza aumentando la rigidez del sistema músculo-tendinoso y dando lugar a una disminución del tiempo de contacto y del gasto energético (Spurrs et al., 2003; Turner et al., 2003; Anderson, 1996). Considerando que en la mayoría de gestos deportivos toda contracción concéntrica va precedida de un estiramiento del músculo, nos damos cuenta de la importancia del trabajo de este ciclo estiramiento-acortamiento (CEA) o acción pliométrica. Esta es la razón por la que hoy en día está ampliamente aceptada la eficacia del método pliométrico, que se centra concretamente en la capacidad reactiva del sistema neuromuscular, muy relacionado con la elasticidad, y se realiza a través de ejercicios tales como los saltos, multisaltos, saltos con rebotes o saltos desde una altura determinada (Turner et al., 2003). Verkhoshansky (1983) define esta capacidad reactiva como *“la capacidad específica de desarrollar un impulso elevado de fuerza inmediatamente después de un brusco estiramiento mecánico muscular”*, es decir, es la capacidad de pasar rápidamente del trabajo muscular excéntrico al concéntrico. En este sentido, Spurrs et al. (2003) encontraron que tras 6 semanas de entrenamiento pliométrico se produjo una mejora en el tiempo en 3 km y la economía de carrera acompañada de un aumento de la rigidez muscular, la fuerza isométrica máxima, la RFD y diferentes tests de salto en atletas de fondo. El entrenamiento pliométrico consistió en varios ejercicios de saltos sin carga realizados 2-3 veces por semana con unos 60 a 180 contactos por semana. Además, en un estudio llevado a cabo por Paavolainen et al. (1999a) se investigó el efecto del entrenamiento simultáneo de fuerza realizado a altas velocidades y entrenamiento pliométrico (sprints cortos, diferentes tipos de saltos: alternativos, a una pierna, drop jumps y con vallas, realizados sin carga o con cargas muy ligeras 0-40% 1RM) junto con el entrenamiento de resistencia sobre las características del rendimiento físico de un grupo de deportistas de resistencia de competición, encontrando mejoras en el rendimiento en 5 km (3.1%) tras 9 semanas de entrenamiento, así como mejoras en la economía de carrera (8.1%), la velocidad máxima en el test anaeróbico máximo, test de 20 m (3.4%), test de carrera saltada (4.6%), y una disminución de los tiempos de contacto en la fase de amortiguación. Estos autores sugieren que en deportistas experimentados en resistencia, las mejoras en la economía de carrera y el tiempo en 5 km se relacionan positivamente con los cambios en los procesos neuromusculares y en la fuerza muscular, y la relación de ésta con el

tiempo (RFD). En este caso, las mejoras en la producción de fuerza se produjeron sin aumento de la fuerza máxima y sin probable modificación significativa del área fibrilar, ya que el entrenamiento de fuerza realizado fue intenso, a alta velocidad, pero con poco volumen. La influencia de la producción rápida de fuerza queda reforzada por el hecho de que no se modificaron factores generalmente relacionados con la resistencia como el $VO_{2m\acute{a}x}$ y el umbral de lactato individual. Además se deduce que el efecto del entrenamiento de fuerza con cargas ligeras y a gran velocidad puede no ser totalmente inhibido por el entrenamiento simultáneo de resistencia. Las diferentes variables de salto y sprint se han propuesto como medidas indirectas de la capacidad del sistema neuromuscular para aplicar fuerza rápidamente de forma repetida durante un ejercicio intenso, así como de la capacidad para almacenar y utilizar la energía elástica (Paavolainen et al., 1999a; 1999b, 1999c). Millet et al. (2002) sugieren que el entrenamiento de fuerza con cargas ligeras o explosivo conlleva unas adaptaciones musculares distintas al entrenamiento de fuerza con cargas altas o máxima, como por ejemplo, un mayor aumento en la tasa de activación de las unidades motoras.

3.5.3 Mecanismos de mejora a través del entrenamiento de fuerza

La mejora en el rendimiento neuromuscular que se obtiene a través del entrenamiento de fuerza se debe fundamentalmente a un aumento de la contracción muscular voluntaria, que lleva a un aumento de la fuerza muscular asociado con una mejora de la velocidad y una disminución del $VO_{2m\acute{a}x}$ a velocidades sub-máximas (economía de carrera) (Taipale et al., 2013). El entrenamiento de fuerza realizado de forma simultánea con el entrenamiento de resistencia ha mostrado ser eficaz en la mejora de las características neuromusculares en corredores y corredoras ya sean entrenados o no, así como de todas las edades (Hoff, Gran, & Helgerud, 2002; Mikkola et al., 2007; Paavolainen, Häkkinen, & Rusko, 1991; Paavolainen et al., 1999a; Støren et al. 2008; Taipale et al., 2010). Sin embargo, también se ha encontrado que podría existir un “efecto de interferencia” cuando se combina el entrenamiento de fuerza con el de resistencia (Hickson, 1980). La posible causa de este “efecto de interferencia” parece estar relacionada con las diversas respuestas y adaptaciones que ocurren con el entrenamiento de fuerza y resistencia, las cuales están relacionadas con altos volúmenes e intensidades de entrenamiento, larga duración y tipo de entrenamiento (Wilson et al., 2012).

En cuanto al entrenamiento de fuerza, es importante saber que dependiendo del tipo de entrenamiento realizado, en función del volumen, intensidad y ejercicio, las respuestas y adaptaciones en el sistema neuromuscular serán diferentes. Por ejemplo, un entrenamiento de fuerza con cargas altas o máximas (70-90% 1RM) y un bajo número de repeticiones por serie, parece resultar en adaptaciones de tipo neural seguidas de una hipertrofia muscular durante prolongados períodos de entrenamiento (Taipale et al., 2013). Por otro lado, un entrenamiento de fuerza con cargas ligeras-medias o explosivo (30-60% 1RM) pero realizados a velocidades altas o máximas producen una mejora en las características neuromusculares, especialmente en la rápida activación muscular debido a un mayor reclutamiento de las unidades motoras (Taipale et al., 2013). Estas dos formas de entrenamiento de fuerza han mostrado ser más efectivos en la mejora de la fuerza y activación muscular que el entrenamiento de fuerza realizado en forma de circuito o fuerza-resistencia (Mikkola et al., 2011; Taipale et al., 2010, 2014).

Algunos autores señalan que el entrenamiento de fuerza podría influir de forma positiva en el rendimiento en carreras de media y larga distancia debido a una mejora en la economía de carrera (Ferrauti, Bergermann, & Fernández-Fernández, 2010; Kelly, Burnett, & Newton, 2008). Es por ello que el entrenamiento de fuerza ha sido propuesto como un entrenamiento complementario de gran importancia para aumentar los niveles de rendimiento en disciplinas de resistencia (Jung, 2003). Kyrolainen, Belli, & Komi (2001) propusieron que el entrenamiento de fuerza puede mejorar la economía de carrera a través de una mejora en la coordinación y co-activación de la musculatura de las piernas, y de este modo por un aumento de la rigidez muscular y disminución de los tiempos de contacto. El entrenamiento de fuerza con cargas altas produce principalmente una hipertrofia de las fibras tipo IIA y IIB (fibras rápidas), pero también de las fibras tipo I (fibras lentas) (Staron et al., 1991, 1994), dando lugar a una menor activación de las unidades motoras para producir una fuerza determinada (Moritani & deVries, 1979). Desafortunadamente, los aumentos de masa corporal que pueden tener lugar con el entrenamiento de fuerza son un efecto no deseado y podrían ser contraproducente para el rendimiento en resistencia. Sin embargo, el aumento de la fuerza muscular puede darse principalmente debido a las adaptaciones neurales que tienen lugar sin que ocurra una hipertrofia considerable (Hakkinen, 1994), ya que la mayoría de los estudios que han utilizado cargas altas no encontraron apenas cambios en la masa corporal, la masa libre de grasa o el porcentaje de grasa. Sale (1988) indicó

que el entrenamiento de fuerza con cargas altas induce cambios en el sistema nervioso permitiendo el aumento de la activación de los músculos implicados en el ejercicio, y produciendo una mayor fuerza neta en cada zancada de carrera. Además, el aumento de la fuerza muscular tras un entrenamiento con cargas altas produce un aumento del reclutamiento de unidades motoras y una mayor sincronización de unidades motoras que podrían mejorar la eficiencia mecánica y los mecanismos de reclutamiento (Sale; 1988, Kraemer, Fleck, & Evans, 1996). Por otro lado, se ha demostrado que las ganancias de fuerza muscular tras un entrenamiento de fuerza pueden retrasar la fatiga muscular, dando lugar a un menor incremento en el VO_2 para una velocidad dada durante un ejercicio de resistencia constante (Hayes, French, & Thomas, 2011). Además, se ha encontrado que las mejoras iniciales en el rendimiento tras un entrenamiento de fuerza con cargas altas son el resultado de adaptaciones neuromusculares más que de adaptaciones intramusculares tales como la hipertrofia (Sale, 1988, Kraemer et al., 1996). También se ha propuesto que la mejora del rendimiento en medio fondo y fondo a través del entrenamiento de fuerza podría ser debido a un aumento de la sección transversal de las fibras musculares (Folland & Williams, 2007).

El entrenamiento simultáneo de fuerza y resistencia podría tener ciertos inconvenientes, uno de ellos es la posible transferencia negativa o interferencia entre ambas capacidades. Pero, dado que existen muchas especialidades deportivas que exigen alcanzar un desarrollo notable de cada una de ellas, y que en muchos casos la mejora de la fuerza es positiva para el rendimiento, como en este caso en la prueba de 800 m, será necesario una adecuada organización del entrenamiento de ambas de manera que el beneficio que pueda aportar la fuerza al rendimiento en resistencia sea el máximo, y que la interferencia se reduzca al mínimo. En la prueba de 800 m predominan los entrenamientos de resistencia con estímulos de corta duración (1-2 min) pero a altas velocidades (90-105% del $VO_{2m\acute{a}x}$), por encima del umbral anaeróbico y con una acumulación relativamente alta de lactato. El efecto principal de estos entrenamientos es de tipo periférico, con un aumento del tamaño y densidad de las mitocondrias, una mayor concentración de mioglobina y enzimas oxidativas y una mayor capilarización. Los entrenamientos de fuerza que tienen un carácter del esfuerzo alto o máximo, con un número elevado de repeticiones por serie (8-10) con una intensidad media (75-80% 1RM) se conocen como entrenamientos típicos de hipertrofia y se caracterizan por producir una alta síntesis de proteínas y la consiguiente hipertrofia, una considerable

producción de lactato, una reducción de la densidad mitocondrial, el mantenimiento o reducción de la densidad capilar y la reducción de la actividad y la disponibilidad de enzimas oxidativas, así como el aumento de las enzimas glucolíticas. Todas estas adaptaciones tienden a reducir la capacidad oxidativa del músculo. Por tanto, los principales efectos de este tipo de entrenamiento van a incidir sobre el músculo esquelético, es decir, son de carácter periférico y de características opuestas a las que produce el entrenamiento de resistencia próximo al $VO_{2m\acute{a}x}$. Por otro lado, los entrenamientos con pocas repeticiones por serie (1-4) y con intensidades medias-altas tendrán mayor influencia sobre los factores neurales y presentan unos efectos de tipo periférico muy reducidos. Los principales efectos de este tipo de entrenamiento son de carácter neural y podríamos decir que estimulan fundamentalmente los cambios del comportamiento del sistema nervioso central y de los procesos facilitadores e inhibidores de la activación muscular. Por esta razón, la utilización de entrenamientos de fuerza con intensidades y carácter del esfuerzo medio-bajo, con pocas repeticiones por serie realizadas a alta velocidad y combinados con entrenamientos de resistencia con moderados niveles de lactato, ofrecería muchas posibilidades de mejora de ambas capacidades, sobre todo de la resistencia, con niveles bajos de interferencia (González-Badillo & Ribas-Serna, 2002).

A pesar de que no existe un consenso sobre los mecanismos responsables de la influencia del entrenamiento de fuerza en el rendimiento de la resistencia y éstos no están suficientemente claros, no hay duda de que el desarrollo de la fuerza con un entrenamiento y los medios adecuados es una ayuda importante en la mejora de la capacidad para mantener altos niveles de rendimiento. Chromiak & Mulvaney (1990), en una revisión sobre los efectos combinados del entrenamiento de fuerza y resistencia llegaron a las siguientes conclusiones y aplicaciones prácticas:

- Los deportistas y entrenadores deberían ser conscientes del concepto de la especificidad del entrenamiento, de forma que el entrenamiento debe poner énfasis en los sistemas de energía utilizados en competición.
- En entrenamiento de fuerza incrementa el tiempo para llegar a la fatiga en la carrera.
- Complementando los entrenamientos de resistencia con entrenamientos de fuerza se puede mejorar el rendimiento en especialidades de resistencia en las

que se requiere un sustancial reclutamiento de fibras rápidas, o en aquellos que es importante un final rápido.

- Los deportistas de resistencia pueden beneficiarse del entrenamiento de fuerza para prevenir lesiones y mejorar el rendimiento.

La prueba de 800 m es una disciplina de medio fondo cuyo entrenamiento se basa en la programación de entrenamientos de fuerza y resistencia, además de los entrenamientos específicos de la prueba. A pesar de la extensa bibliografía científica que confirma los efectos positivos del entrenamiento de fuerza sobre el rendimiento en resistencia (Mikkola et al., 2007; Taipale et al., 2010, 2014), la mayoría de los estudios han analizado estos efectos sobre el rendimiento en resistencia en pruebas superiores a 3 km, con periodos de intervención inferiores a las 8 semanas, y sobre todo en deportistas recreacionales o de nivel medio. Sin embargo, no conocemos estudios que analicen el efecto del entrenamiento de fuerza a largo plazo en el rendimiento específico de 800 m en atletas de alto nivel. Es por ello que el propósito de esta tesis doctoral fue analizar el efecto de un entrenamiento de fuerza durante 25 semanas sobre el rendimiento en 800 m y en las propias variables de fuerza en atletas de alto nivel (**Estudio IV**).

3.5.4 El entrenamiento resistido de carrera

En deportes como el atletismo y diversos deportes colectivos (fútbol, baloncesto, balonmano, rugby, etc.) la capacidad de aceleración, sprint y salto son determinantes para el rendimiento. En estos deportes, gran parte de los programas de entrenamiento incluyen métodos de entrenamiento con sobrecargas y programas de entrenamiento específicos de fuerza en los que el deportista reproduce el gesto técnico en condiciones de sobrecarga (entrenamiento resistido).

Uno de los principios más importantes del entrenamiento es el principio de especificidad, el cual se justifica porque los efectos del entrenamiento se producen principalmente en el mismo ejercicio con el que se entrena. La especificidad debe hacerse cada vez más evidente a medida que se avanza en la mejora de los resultados (González-Badillo & Ribas-Serna, 2002). El entrenamiento resistido de carrera es un ejemplo de aplicación de la especificidad al entrenamiento. El entrenamiento resistido se utiliza para mejorar el rendimiento de manera que realizando el gesto técnico

específico de competición, en este caso correr, se añade una sobrecarga no excesiva y que no altere el patrón de movimiento.

Según Young (2006), el entrenamiento específico mejora la coordinación intermuscular y prepara el músculo para una mayor producción de fuerza. De este modo, la utilización de una carga adicional será una estrategia para cumplir la especificidad del entrenamiento, aunque será necesaria la comprobación científica del efecto de la dirección de aplicación de la fuerza, así como la magnitud de la carga a utilizar. En nuestro trabajo, nos centraremos en determinar qué magnitud de carga en el arrastre es la que produce mejores resultados en el rendimiento en aceleración.

Parece ser que el entrenamiento resistido al proporcionar una resistencia mayor que el entrenamiento no resistido produce un estímulo mayor en la musculatura involucrada en el movimiento y permite optimizar las adaptaciones al entrenamiento y mejorar el rendimiento (Hrysomallis, 2012).

Los ejercicios de entrenamiento resistido ayudan al rendimiento del atleta gracias a una sobrecarga muscular utilizada durante la carrera y que tiene como principal efecto la mejora de la relación fuerza/velocidad (Plisk, 2000). Los métodos de entrenamiento resistido parecen mejorar la capacidad del atleta para producir una mayor velocidad horizontal (Zatsiorsky, 1995).

3.5.4.1 Influencia del entrenamiento resistido en la velocidad de carrera

La velocidad de carrera es determinante para el rendimiento en muchos deportes. Uno de los ejercicios más utilizados para la mejora de la carrera velocidad es el entrenamiento resistido.

Los métodos de entrenamiento resistido son aquellos que imitan la técnica de carrera por medio de la adición de una carga en el deportista (Costello, 1985; Delecluse et al. 1995; Murray et al., 2005). Los métodos de entrenamiento resistido que más se han investigado son: arrastres de trineo (Clark, Stearne, Walts, & Miller, 2010; Harrison & Bourke, 2009; Spinks et al., 2007; Zafeiridis et al., 2005), cinturones lastrados (Clark et al., 2010), y paracaídas (Paulson & Braun, 2011). En nuestro trabajo nos centraremos en el método de entrenamiento resistido arrastres de trineo, ya que es el método con el que se han encontrado mayores evidencias científicas con respecto a la mejora del

rendimiento en la velocidad de carrera. Verchoshanky (1990) considera que la utilización del arrastre de trineo es el ejercicio más apropiado por su eficacia en el desarrollo simultáneo de la técnica y la fuerza del deportista. Cuando se utilizan arrastres de trineo, la resistencia adicional que el atleta experimenta está producida principalmente por la fuerza de fricción entre la base del trineo y la superficie donde se realiza el movimiento. Esta fuerza de fricción es proporcional al peso total del trineo, pudiéndose modificar la carga transportada (Alcaraz, Palao, Elvira, & Linthorne, 2008).

Los ejercicios de entrenamiento resistido tienen como principal objetivo producir una sobrecarga adicional en los músculos involucrados en la carrera, de forma que se cree que esta sobrecarga produce una activación neural y un reclutamiento mayor de unidades motoras de contracción rápida (Faccioni, 1994a; 1994b; Alcaraz, Palao, & Elvira, 2009; Donati, 1996).

La mayoría de los estudios han investigado la influencia del entrenamiento resistido de carrera en estudiantes (Kristensen, van der Tillaar, & Ettema, 2006; Zafeiridis et al., 2005), lacrosse (Clark et al., 2010), futbolistas (Spinks, Murphy, Spinks, & Lockie, 2007), y jugadores de rugby (Harrison & Bourke, 2009). La frecuencia de entrenamiento de estos estudios ha sido de 2-3 días por semana, durante 6-8 semanas de entrenamiento, y las sobrecargas utilizadas están entre el 7 y el 13% del peso corporal (Pc). Las distancias de entrenamiento y tests utilizadas por la mayoría de los estudios oscilan entre los 10 m y los 55 m, y el número de series normalmente utilizado está entre 3 y 9 series por sesión de entrenamiento.

En muchos estudios se ha encontrado que el entrenamiento resistido incrementa la velocidad de carrera, aunque sin diferencias significativas con el entrenamiento de carrera normal (Clark et al., 2010; Kristensen et al., 2006; Myer, Ford, Brent, Divine, & Hewett, 2007; Spinks et al., 2007). Harrison & Bourke (2009) mostraron que el entrenamiento con arrastres incrementó la velocidad de carrera más que el entrenamiento normal sin arrastres. También Zafeiridis et al. (2005) observaron mayores mejoras en la velocidad de carrera en el grupo de entrenamiento resistido que en un grupo control. Estas mejoras se manifestaron en mayor medida en la fase inicial de aceleración. Sin embargo, Spinks et al. (2007) no encontraron diferencias significativas en la fase inicial de aceleración. Según Seagrave (1996), la utilización del arrastre de trineo mejora la capacidad del atleta en la fase de aceleración, ya que este

método influye en la dirección horizontal de la carrera. Este mismo autor sostiene que el aumento de carga repercutirá negativamente en el tiempo de contacto, y en la frecuencia de zancada, aumentándolos. Cronin, Hansen, Kawamori, & McNair (2008) compararon la cinemática de la carrera con arrastres de trineo y cinturones lastrados, concluyendo que la utilización del trineo provoca modificaciones agudas en la cinemática de carrera durante la fase de aceleración. De esta forma, la utilización del trineo producirá una mayor extensión del muslo y mayor inclinación del tronco, permitiendo a los atletas adoptar una posición que les permita maximizar las fuerzas propulsivas y minimizar las fuerzas de frenado. Este autor considera que el uso del trineo es el método más apropiado para la fase de aceleración de carrera. Según Harrison & Bourke (2009) y Spinks et al. (2007), el entrenamiento resistido de carrera incrementaría los niveles de fuerza y potencia produciendo una mayor fuerza propulsiva de los músculos de las piernas e incrementando la longitud y frecuencia de zancada.

Parece ser que el entrenamiento resistido de carrera no produce mejores resultados en distancias superiores a los 20 m. De hecho, se sugiere que el entrenamiento de carrera normal produce mejores resultados que el resistido para distancias superiores a los 20 m (Kristensen et al., 2006; Zafeiridis et al., 2005). En una revisión reciente (Petrakos, Morin & Egan, 2016) los autores concluyeron que la mayor efectividad del entrenamiento resistido con respecto al entrenamiento no resistido en la mejora de la capacidad de aceleración o velocidad máxima no está clara.

3.5.4.2 Carga óptima a utilizar

La carga óptima de entrenamiento a utilizar en los métodos de entrenamiento resistido es un aspecto de gran importancia, ya que la utilización de cargas incorrectas podrían producir efectos negativos sobre el rendimiento, o incluso provocar modificaciones no deseadas sobre la cinemática de carrera.

En los entrenamientos de velocidad, las intensidades se suelen controlar a través de la velocidad máxima del atleta, de forma que si el atleta alcanza velocidades próximas a sus valores máximos significa que las cargas son bajas, de lo contrario, si las cargas son elevadas las pérdidas en la velocidad máxima serán mayores.

Alcaraz et al. (2009) afirman que para mantener la especificidad del entrenamiento resistido, la velocidad horizontal no debe ser inferior al 90% de la velocidad máxima del atleta. Esta pérdida máxima del 10% en la velocidad máxima también ha sido referenciada por autores como Letzelter, Sauerwein, & Burger (1995) y Lockie, Murphy, & Spinks (2003). Cronin et al. (2008) en su estudio en el que analizaron los efectos cinemáticos del uso de arrastres con trineo y de cinturones lastrados utilizaron cargas del 15% y 20% del Pc del atleta. Estos autores concluyeron que la utilización de una carga del 20% del Pc es suficiente para poder analizar el efecto de una carga extrema en la cinemática de la carrera. No obstante, según Murray et al. (2005), durante el entrenamiento de velocidad, los atletas casi nunca utilizan arrastres con cargas superiores al 5 y 7.5% del Pc. Mochbahan, Gollhofer, & Dickhuth (2004) recomiendan el arrastre de cargas para mejorar la potencia de las capacidades elásticas del velocista. Este autor señala que la carga utilizada no debe ser extremadamente elevada, estando pues comprendida entre un 5% y un 8% del Pc del atleta, y nunca superando un máximo del 10%. Lockie et al. (2003), propusieron una ecuación como intento de calcular la carga más adecuada y necesaria para el entrenamiento de velocidad con arrastres de trineo.

Tabla 2. Ecuación para determinar la carga óptima en el arrastre según Lockie et al. (2003)

$$\% \text{ Masa corporal} = (-1.96 \times \% \text{ velocidad}) + 188.99$$

Esta ecuación permite calcular la carga a utilizar para el arrastre de trineo durante la fase de aceleración.

Investigaciones recientes han analizado los efectos del entrenamiento de arrastres con cargas superiores al 20% del Pc. Kawamori, Newton, Hori, & Nosaka (2014) analizaron el efecto del entrenamiento de arrastres sobre la carrera en 10 m en un grupo que entrenó con una carga pesada (que producía una pérdida de velocidad del 30% con respecto a la carrera sin arrastre) y en otro grupo que entrenó con una carga ligera (10% de pérdida de velocidad). En este estudio el grupo de carga pesada mejoró significativamente la carrera de 5 y 10 m, mientras que el grupo de carga ligera sólo mejoró la carrera de 10 m, sin diferencias significativas entre grupos. Estos autores cuestionan la idea anteriormente propuesta en la bibliografía científica sobre los

posibles efectos negativos que podría tener una carga en el arrastre que provoque una pérdida en la velocidad de carrera superior al 10% y señalan el posible beneficio que podría tener la utilización de cargas superiores en el arrastre. En otro estudio reciente (Morin et al., 2016) se analizaron los efectos de un entrenamiento de arrastres de 8 semanas con una carga muy elevada (80% del Pc) sobre variables de fuerza y carrera en futbolistas, encontrando mejoras pequeñas y moderadas en 5 y 20 m y sugiriendo la utilidad de este tipo de carga en la efectividad mecánica y capacidad de producir fuerza máxima horizontal en futbolistas u otros deportes de equipo.

Una gran parte de los estudios que han analizado los efectos producidos por el entrenamiento de arrastres se han centrado principalmente en el estudio de la utilización de esta metodología de entrenamiento sobre diferentes variables biomecánicas tales como: amplitud y frecuencia de zancadas, inclinación del tronco, flexión de caderas, amplitud de movimiento y ángulo de rodillas. (Corn & Knudson, 2003; Lockie et al., 2003; Murray et al., 2005; Alcaraz et al., 2008; Cronin et al., 2008; Clark et al., 2009; Lockie et al., 2012). La mayoría de los estudios longitudinales que hemos encontrado sobre el entrenamiento con arrastres, es decir, que hayan estudiado los efectos de un programa de entrenamiento con arrastres a lo largo del tiempo sobre el rendimiento en velocidad (Zafeiridis et al., 2005; Kristensen et al., 2006; Myer et al., 2007; Spinks et al., 2007; Harrison & Bourke, 2009; Clark et al., 2010) comparan un único grupo de entrenamiento resistido (con una determinada carga en el arrastre) con grupos control, grupos que entrenan sin arrastre, grupos de entrenamiento asistido, o con otros tipos de entrenamiento resistido (paracaídas, cinturones lastrados, gomas elásticas, etc.), pero no se comparan diferentes cargas de entrenamiento en el arrastre.

La carga óptima para el entrenamiento resistido aún no ha sido determinada por medio de estudios longitudinales, pero en varios estudios se ha concluido que para lograr una respuesta de sobrecarga sin alterar los parámetros biomecánicos del movimiento, la sobrecarga utilizada en el arrastre no debe disminuir la velocidad de carrera durante el entrenamiento más del 10% (Jakalski, 1998; Letzelter et al., 1995; Lockie et al., 2003; Alcaraz et al., 2009). Esto sugiere que antes de la intervención debería realizarse una prueba inicial para determinar la pérdida de velocidad, ya que la carga que suponga el arrastre podría estar influida por el rozamiento de la superficie de entrenamiento o las características físicas de los sujetos (Clark et al., 2010).

Por todo lo anteriormente expuesto, podemos considerar el desarrollo y entrenamiento de la fuerza específica de carrera como un objetivo de análisis dentro de la actual problemática del entrenamiento de velocidad y fuerza, siendo un posible factor determinante en carreras. Además, cabe recordar que el control de la intensidad es uno de los requisitos más importantes en la programación del entrenamiento deportivo ya que va a determinar el efecto producido por el método utilizado, tal y como establece el principio de especificidad.

4. ESTUDIO I



Efecto del entrenamiento de arrastres con tres cargas que representan el 5, el 12.5 y el 20% del peso corporal, sobre la capacidad de aceleración, el salto vertical, el salto vertical con cargas y la sentadilla completa

4. ESTUDIO I. Efecto del entrenamiento de arrastres con tres cargas que representan el 5, el 12.5 y el 20% del peso corporal, sobre la capacidad de aceleración, el salto vertical, el salto vertical con cargas y la sentadilla completa

4.1 Planteamiento del Problema

La mayoría de los estudios sobre arrastres se han centrado principalmente en los efectos de la carrera con arrastres sobre diferentes variables biomecánicas tales como: amplitud y frecuencia de zancadas, inclinación del tronco, flexión de caderas, amplitud de movimiento, y ángulo de rodillas (Corn et al., 2003; Lockie et al., 2003; Murray et al., 2005; Alcaraz et al., 2008; Cronin et al., 2008; Clark et al., 2009; Lockie et al., 2012). Sin embargo, hemos encontrado pocos estudios longitudinales sobre el entrenamiento con arrastres que hayan estudiado los efectos de un programa de entrenamiento con arrastres a lo largo del tiempo sobre el rendimiento en velocidad (Zafeiridis et al., 2005; Kristensen et al., 2006; Myer et al., 2007; Spinks et al., 2007; Harrison & Bourke, 2009; Clark et al., 2010). Además, en la mayoría de estos estudios se compara un único grupo de entrenamiento resistido (con una determinada carga en el arrastre) con grupos control, grupos que entrenan sin arrastre, grupos de entrenamiento asistido o con otros tipos de entrenamiento resistido (paracaídas, cinturones lastrados, gomas elásticas, etc.), pero no se comparan diferentes cargas de entrenamiento en el arrastre.

Como se deduce de nuestra revisión bibliográfica, los estudios son escasos y no dan una respuesta definitiva en relación con el efecto de la carga utilizada en el ejercicio. Por consiguiente, podemos considerar que la cuestión planteada es relevante y no ha sido suficientemente investigada. Por lo que el problema de nuestra investigación es el siguiente:

- ¿Cuál es la carga, cuantificada en función del peso corporal, en el entrenamiento resistido de carrera con arrastres que produce los mejores resultados sobre la aceleración en 40 m?

4.2 Objetivos de la Investigación

Una vez definido el problema objeto de estudio, el objetivo principal de esta investigación fue el siguiente:

- Comprobar el efecto del entrenamiento de arrastres con tres cargas, que representan el 5, el 12.5 y el 20% del peso corporal, sobre la capacidad de aceleración, así como su efecto sobre ejercicios no entrenados como el salto vertical sin cargas, salto vertical con cargas y la sentadilla completa.

4.3 Hipótesis

En la bibliografía encontrada se recomienda que para que un entrenamiento resistido sea efectivo éste no debe producir una pérdida con respecto a la velocidad sin carga superior al 10% (Jakalski, 1998; Letzelter et al., 1995; Lockie et al., 2003; Alcaraz et al., 2009), pues de lo contrario se podrían producir modificaciones significativas en los ángulos de las principales articulaciones implicadas en la carrera, proporcionando adaptaciones indeseadas. Dado que en nuestro caso hemos comprobado en un estudio piloto que las cargas utilizadas en el ejercicio de arrastres equivalentes al 5, 12.5 y 20% del peso corporal de los sujetos se corresponden con unas pérdidas medias de velocidad del 5.6, 10 y 15.5%, respectivamente, es probable que, según los resultados de los estudios previos citados, las mayores ganancias en la carrera se den con el entrenamiento de la carga que produce una pérdida media del 10%. Por otra parte, cuanto mayor sea la carga de entrenamiento utilizada como arrastre, y por tanto, mayor la pérdida de velocidad y el tiempo de aplicación de la fuerza y, consiguientemente, menores las velocidades alcanzadas durante el entrenamiento, es probable que los efectos del entrenamiento sobre el salto vertical, la sentadilla y la primera fase de la aceleración sean mayores cuando se utiliza la carga más pesada. Por el contrario, las cargas más pequeñas tenderían a producir mayor efecto en la fase de alta velocidad de la aceleración. Por tanto, nuestras hipótesis son las siguientes:

Hipótesis 1: La carga de arrastre equivalente al 12.5% del peso corporal, que se corresponde con una pérdida media del 10% de la velocidad en carrera, produce mejores resultados en la carrera de 40 m y en los intervalos de 10 m de la fase de alta velocidad que las cargas del 5 y el 20%.

Hipótesis 2: La carga de arrastre del 20% del peso corporal, que se corresponde con una pérdida media del 15.5% de la velocidad, proporciona mayor mejora en la fase de aceleración hasta 10-20 m y en los ejercicios de sentadilla, CMJ y CMJ con cargas que las cargas del 5 y el 12.5% del peso corporal.

4.4 Metodología

4.4.1 Tipo de investigación

La metodología del estudio queda determinada por el tipo de investigación y, más concretamente, por los objetivos buscados, la naturaleza de las variables y el nivel de control que ejerzamos sobre las mismas. Dadas las características de los datos, el estudio es una investigación cuantitativa. Por el grado de manipulación de las variables y los objetivos del estudio, la investigación es experimental. Por el enfoque del análisis de los datos, la investigación es inferencial y correlacional. El trabajo es de carácter longitudinal ya que, estudiamos la evolución de la relación entre los cambios mecánicos y el rendimiento a través del tiempo.

4.4.2 Muestra

En este estudio participaron 19 sujetos jóvenes, estudiantes del Grado en Ciencias de la Actividad Física y del Deporte habituados al entrenamiento deportivo. Para poder tomar parte en el estudio, dichas personas debían cumplir varios requisitos, entre los cuales: 1) no padecer ninguna enfermedad o problema de salud que pueda suponer un riesgo ante el esfuerzo físico intenso (p. ej.: disfunción renal, anormalidades cardíacas, enfermedades respiratorias o metabólicas, patologías osteoarticulares, etc.); 2) ser sujetos físicamente activos; y 3) no realizar otro tipo de entrenamiento físico intenso, aparte del entrenamiento específico de carrera con arrastres. Una vez seleccionados los sujetos que cumplían los requisitos y confirmada su disponibilidad, y tras ser informados del propósito de la investigación y los procedimientos experimentales, los sujetos debieron dar su consentimiento por escrito, firmando el correspondiente *Consentimiento Informado (Anexo I)*.

Estos sujetos se dividieron en 3 grupos, los cuales entrenaron con diferentes cargas (kg) en el arrastre de trineo con respecto a un porcentaje del peso corporal (Pc).

- Grupo CB (carga baja, n=7): 5% del Pc.
- Grupo CM (carga media, n=6): 12.5% del Pc.
- Grupo CA (carga alta, n=6): 20% del Pc.

Las características de los sujetos se presentan en la **Tabla 3**:

Tabla 3. Características iniciales de los sujetos del **Estudio I** (medias \pm dt) (n=19)

	EDAD (años)	ALTURA(cm)	PESO CORPORAL (Kg)
Grupo CB (n=7)	21.9 \pm 2.27	180.9 \pm 6.78	75.8 \pm 10.73
Grupo CM (n=6)	20.8 \pm 2.04	173.8 \pm 4.58	66.8 \pm 8.53
Grupo CA (n=6)	19.8 \pm 1.60	175.4 \pm 6.79	70.2 \pm 11.91
Total (n=19)	20.9 \pm 2.08	176.7 \pm 6.57	71.2 \pm 10.63

4.4.3 Variables objeto de estudio

Variables dependientes:

- Media de la velocidad media propulsiva (VMP) de las cargas comunes en el ejercicio de sentadilla completa ($m \cdot s^{-1}$)
- Altura en el salto vertical con contramovimiento (CMJ) (cm)
- Media de la altura de las cargas comunes en el salto vertical con cargas (CMJc) (cm)
- Distancia alcanzada en 12 zancadas de 2° de Triple (m)
- Tiempo en 10 m (s)
- Tiempo en 20 m (s)
- Tiempo en 30 m (s)
- Tiempo en 40 m (s)
- Tiempo entre 10 y 20 m (s)
- Tiempo entre 10 y 30 m (s)
- Tiempo entre 10 y 40 m (s)
- Tiempo entre 20 y 30 m (s)
- Tiempo entre 20 y 40 m (s)
- Tiempo entre 30 y 40 m (s)

Variables independientes:

Como variables independientes se utilizaron los distintos niveles de la variable carga de entrenamiento en el arrastre, definida por la carga en kg con respecto al porcentaje correspondiente del peso corporal.

Control de Variables Extrañas

Las posibles variables extrañas o contaminantes que han podido intervenir en los resultados hacen referencia a:

- Validez de los instrumentos de medida

Cada uno de los instrumentos utilizados miden directamente determinadas variables, por lo que está garantizada su validez con respecto a las mismas, es decir, estamos seguros de que miden lo que se pretende medir en cada caso. Además, se contrastó su precisión antes de cada utilización calibrándolos o comparándolos con instrumentos previamente validados.

- Ejecución técnica y cumplimiento de los protocolos de evaluación y entrenamiento

Este aspecto se controló debidamente en el momento de realización de los tests y en cada una de las sesiones de entrenamiento programados. Se procuró que el efecto de aprendizaje no existiese, además, se realizó una sesión práctica previa, introductoria, donde se recordaron las instrucciones de ejecución. Todas las sesiones de entrenamiento y evaluación que componen este estudio se llevaron a cabo bajo la supervisión del equipo de investigadores.

- Situación ambiental

Las variables situacionales se minimizaron al realizar cada sujeto los diferentes tests y sesiones de entrenamiento siempre a la misma hora del día, en similares condiciones (temperatura y humedad de la sala, periodos de descanso nocturno, ingesta alimentaria, etc.) y ausencia de viento en las pruebas de distancias cortas hasta 40 m.

4.4.4 Evaluaciones, pruebas físicas, e instrumentos de medida

Para describir adecuadamente la muestra, al comienzo de cada estudio se realizó una evaluación antropométrica y de composición corporal de cada sujeto.

Antropometría

- *Masa corporal (kg)*: Se pesó a los sujetos colocándolos en posición erecta en el centro de una báscula de precisión (Quirumed, Valencia, España).
- *Talla (m)*: Se midió la distancia entre el vértex y las plantas de los pies. Los sujetos permanecieron de pie con los talones, glúteos, espalda y región occipital en contacto con el plano vertical del tallímetro (Quirumed, Valencia, España).

Test de sentadilla

La principal cualidad que se midió fue la velocidad de los extensores de las piernas y caderas ante todas las cargas. Para la realización del test se utilizó un medidor lineal de velocidad (T-FORCE System, Ergotech, Murcia, España). El sujeto se colocaba de pie entre las guías verticales de una máquina *Smith*. La barra de pesas se colocaba por detrás de la cabeza apoyada sobre la parte superior de la espalda. A partir de esta posición, se realizaba una flexión profunda de las piernas, hasta sobrepasar la horizontal del muslo con respecto al suelo, pasando inmediatamente a la extensión completa de las piernas a la máxima velocidad posible. Después de un calentamiento con cargas ligeras, la barra se fue cargando progresivamente, desde una carga de 20 kg aumentándose de 10 en 10 kg o de 5 en 5 kg según el caso, hasta alcanzar una velocidad de $0.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Con cada carga se anotó la mejor de las repeticiones correctamente ejecutada. La velocidad media resultante de cada sujeto se calculó como la media de todas las velocidades medias propulsivas alcanzadas en cada una de las cargas comunes del test, desde los 20 kg hasta la carga de $0.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.



Figura 5. Imagen de la ejecución del ejercicio de sentadilla con el medidor lineal de velocidad (T-FORCE System, Murcia, Spain).

Test de salto vertical con contramovimiento (CMJ)

La cualidad fundamental que se pretende estimar es la capacidad de producción de fuerza en la unidad de tiempo en la musculatura extensora de las piernas. El CMJ o “*countermovement jump*” es un salto vertical en el que se busca alcanzar la máxima elevación del centro de gravedad realizando una flexión-extensión rápida de piernas con la mínima parada entre ambas fases. Se utilizó una plataforma de infrarrojos (Optojump, Microgate, Italia), cuyo uso para este propósito está ampliamente aceptado (Glatthorn y col., 2011). El CMJ se realizó con las manos en la cintura. Se realizaron 5 saltos y se anotó la media de 3 intentos correctamente ejecutados, ya que estos tres saltos intermedios presentan una alta fiabilidad, despreciando el mejor y el peor salto que pueden estar más afectados que el resto por errores de ejecución. Por tanto, la media de estos tres saltos es probable que sea la medida que mejor representa la verdadera capacidad de salto de los sujetos.



Figura 6. Imagen de la ejecución del test de salto CMJ con la plataforma de infrarrojos (Optojump, Microgate, Italia).

Test de salto vertical con cargas (CMJc)

Este test de salto se realizó con cargas progresivas. Para la medición se utilizó una plataforma de infrarrojos (Optojump, Microgate, Italia) al igual que en el test CMJ sin cargas, pero con una barra en la que la carga iba aumentándose progresivamente desde el peso inicial de la barra (20 kg) hasta que el sujeto saltase una altura igual o inferior a los 20 cm. Esto se justifica por tres razones: en primer lugar porque al llegar a esa altura el sujeto se despega del suelo a una velocidad aproximada de $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, lo que significa que la velocidad media de todo el recorrido se aproxima a $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, carga que servirá de referencia para la posterior programación de la carga de entrenamiento, las cuales siempre deberán desplazarse siempre a mayor velocidad media de $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; en segundo lugar porque alturas inferiores a las indicadas son muy poco fiables (Vitasalo, 1985); y en tercer lugar, cuando los sujetos no son expertos, además de que la fiabilidad aún será menor, no merece la pena correr riesgos innecesarios de lesión. Para el análisis de los resultados se consideró la media de la altura de las cargas utilizadas en el test 1.



Figura 7. Imagen de la ejecución del test de salto CMJc con la plataforma de infrarrojos (Optojump, Microgate, Italia).

Test de 12 zancadas de 2° de Triple

Este test se realizó desde una posición bípeda estática, detrás de la línea de salida. A continuación los sujetos comenzaban a desplazarse con zancadas de 2° de triple lo más amplias posible hasta realizar un total de 12. El punto donde caía el talón de la última zancada fue el punto de referencia para la medición del test. Se utilizó una cinta métrica para la medición.

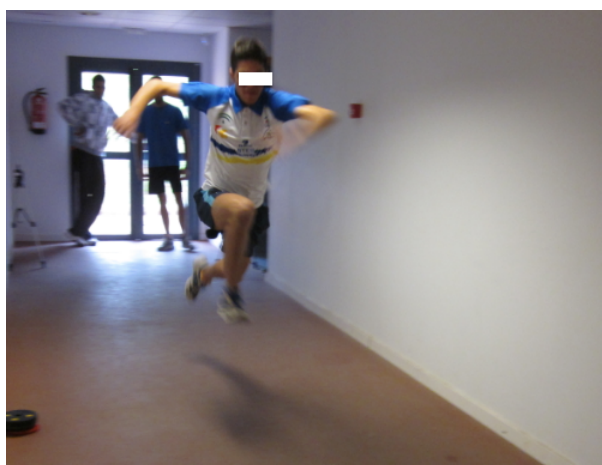


Figura 8. Imagen de la ejecución del ejercicio de 2° de triple.

Test de carrera en 10, 20, 30 y 40 m

Para cronometrar los tiempos en recorrer los 10, 20, 30 y 40 m, así como los intervalos 10-20 m, 10-30 m, 10-40 m, 20-30 m, 20-40 m, 30-40 m, se utilizaron cinco pares de células fotoeléctricas (Polifemo Radio Light, Microgate, Italia), basadas en un emisor laser y un reflector, tecnología ampliamente utilizada en los sistemas de cronometraje electrónico (Earp & Newton, 2012). Las carreras se realizaron desde posición bípeda estática, con la línea de salida situada a un metro de la célula fotoeléctrica de salida (inicio del cronometraje). El resto de células fotoeléctricas se situaron a los 10, 20, 30 m, y la célula fotoeléctrica de llegada (fin del cronometraje) se situó a 40 m desde la célula de salida. Se anotó el mejor de 2 intentos.



Figura 9. Imagen de la realización del test de velocidad de 40 m y tiempos parciales con las células fotoeléctricas (Polifemo Radio Light, Microgate, Italia).

4.4.5 Procedimientos

Una vez seleccionados los sujetos e instruidos sobre las características del estudio se realizaron los tests físicos en dos días diferentes de una misma semana (separados por al menos 2 días). El primer día se realizaron los test relacionados con la carrera (test de 10, 20, 30 y 40 m), test de CMJ y test de 2º de triple. El segundo día se realizaron los test de CMJ, CMJ cargas y sentadilla. En los resultados se ha utilizado la media de los dos tests de CMJ realizados. Todas las mediciones se realizaron en las mismas condiciones: hora

del día, instalaciones, temperatura y momento de la semana. Una vez realizados los tests físicos, se distribuyó a los sujetos en 3 grupos, los cuales entrenaron con diferentes cargas (kg) en el arrastre de trineo con respecto al porcentaje del peso corporal (% Pc). La distribución de los grupos se realizó en función de los tiempos en la carrera de 40 m, asignándose el sujeto de mayor rendimiento de forma aleatoria a uno de los grupo y el resto de los sujetos por el procedimiento *ABCCBA*. Las cargas utilizadas equivalentes al 5, al 12.5 y al 20% del Pc se corresponden con unas pérdidas de velocidad del: 5.6, 10 y 15.5%, respectivamente (**Tabla 4**).

Tabla 4. Distribución de la carga de los arrastres.

Grupo	%Pc	% Pérdida velocidad	dt	CV
CB (n=7)	5% Pc	5.6%	0.05	1.4
CM (n=6)	12.5% Pc	10%	0.05	1.4
CA (n=6)	20% Pc	15.5%	0.07	2.0

CB: cargas bajas; CM: cargas medias; CA: cargas altas; Pc: peso corporal; dt: desviación típica; CV: coeficiente de variación.

A continuación se muestra una tabla resumen del diseño.

Tabla 5. Resumen del diseño del Estudio I.

Grupo	Pretest	Asignación	Tratamiento	Postest
CB (n=7)	Pre	ABCCBA	5% Pc	Post
CM (n=6)	Pre	ABCCBA	12.5% Pc	Post
CA (n=6)	Pre	ABCCBA	20% Pc	Post

CB: cargas bajas; CM: cargas medias; CA: cargas altas; Pc: peso corporal; Pre: test inicial; Post: test final.

4.4.6 Entrenamiento

Durante un periodo de 7 semanas se sometió a los sujetos a un programa de entrenamiento específico de carrera con arrastres. Durante la última semana de este periodo de entrenamiento los sujetos realizaron el entrenamiento programado sin el arrastre de trineo, debido a la imposibilidad de mantener el entrenamiento con arrastres.

El programa de entrenamiento consistió en 2 sesiones por semana, separadas por 2 días, de carreras con el arrastre de trineo. Cada sujeto entrenó siempre con la carga que se le había asignado.

La parte inicial de cada sesión de entrenamiento consistió en un calentamiento estándar de 15 min de duración que incluyó 8 min de carrera continua suave, ligeros estiramientos, una progresión de 40 m al 80% y 2 progresiones de 20 m al 90%.

Tabla 6. Programación del entrenamiento específico de carreras con arrastre durante el entrenamiento de 7 semanas. Las cargas se expresan en volumen e intensidad.

Semana	Sesión	Entrenamiento	Distancia (m)	Distancia Semanal (m)
1	1	5x20m / R-3'	100	250
	2	5x30m / R-4'	150	
2	3	6x20m / R-3'	120	300
	4	6x30m / R-4'	180	
3	5	8x20m / R-3'	160	340
	6	6x30m / R-4'	180	
4	7	8x20m / R-3'	160	335
	8	5x35m / R-5'	175	
5	9	8x20m / R-3'	160	370
	10	6x35m / R-5'	210	
6	11	8x20m / R-3'	160	280
	12	6x20m / R-3'	120	
7*	13	4x30m / R-4'	120	240
	14	6x20m / R-3'	120	
Distancia total durante el período de entrenamiento				2115

* Semana de entrenamiento sin arrastres.



Figura 10. Imagen de una sesión de entrenamiento con arrastres.



Figura 11. Imagen del arrastre de trineo utilizado en las sesiones de entrenamiento con sus respectivos discos de pesas.

4.4.7 Análisis estadístico

Para la descripción de los resultados se utilizaron los cálculos clásicos de tendencia central: medias, de variabilidad: desviaciones típicas y el número de casos. Se analizó la fiabilidad de las medidas aplicando el coeficiente de correlación intraclase (CCI) y el coeficiente de variación (CV). Además de la fiabilidad relativa y absoluta, se expresó el intervalo de confianza del CCI al 95%. Dado que las medidas que se manejaron son de nivel de razón y continuas, la relación entre variables se analizó con el coeficiente de correlación bivariado de Pearson. Para analizar las diferencias intra-grupos se realizó la prueba T para muestras relacionadas. Para comprobar si existieron diferencias entre los grupos se realizó un análisis de la covarianza (ANCOVA). En el caso de obtener diferencias significativas, se aplicó la prueba de Scheffé para determinar entre qué pares de grupos se daban las diferencias. La significatividad se estableció cuando la probabilidad de error fue igual o menor que el 5% ($p \leq 0.05$).

4.5 Resultados

4.5.1 Fiabilidad de los tests

En este estudio todas las variables mostraron una buena fiabilidad en general (**Tabla 7**).

Tabla 7. Fiabilidad de las medidas

Variables	CCI	CV
10 m	0.87 (0.66-0.95)	1.79
20 m	0.93 (0.83-0.98)	1.03
30 m	0.96 (0.89-0.98)	0.74
40 m	0.98 (0.94-0.99)	0.58
10-20 m	0.90 (0.74-0.96)	1.45
10-30 m	0.95 (0.86-0.98)	1.26
10-40 m	0.97 (0.93-0.99)	0.46
20-30 m	0.83 (0.55-0.94)	2.61
20-40 m	0.96 (0.90-0.99)	0.78
30-40 m	0.88 (0.68-0.95)	1.56
CMJ	0.99 (0.98-0.99)	1.78
2° Triple	0.95 (0.87-0.98)	1.87
CMJc 20 kg	0.97 (0.91-0.99)	4.08
CMJc 30 kg	0.92 (0.73-0.98)	4.56

CCI: Coeficiente de correlación intraclase; CV: Coeficiente de variación; CMJ: Salto vertical con contramovimiento; CMJc: salto vertical con cargas de 20 kg y 30 kg.

4.5.2 Diferencias entre los grupos

Se realizó un análisis de la covarianza (ANCOVA) para comprobar si existieron diferencias entre los grupos. Los resultados muestran que únicamente se dieron diferencias significativas en el CMJ ($p < 0.05$) entre el grupo CB y CM, a favor del segundo.

4.5.3 Diferencias intra-grupos

Para analizar las diferencias intra-grupos se realizó la prueba T para muestras relacionadas. A continuación se muestra una tabla resumen con las variables en las que las diferencias fueron significativas.

Tabla 8. Síntesis del análisis de diferencia de medias entre el test inicial (Pre) y test final (Post) según grupos.

Variable	Comparación por pares por grupos		
	Grupo CB Pre-Post	Grupo CM Pre-Post	Grupo CA Pre-Post
Carrera 20 m	Ns	Ns	*
Carrera 30 m	Ns	Ns	**
Carrera 40 m	*	*	*
Carrera 10-40 m	**	Ns	Ns
Carrera 20-30 m	Ns	*	Ns
Carrera 20-40 m	*	*	Ns
CMJ	Ns	*	*
CMJc	Ns	Ns	*
VMP Sentadilla	Ns	*	*

CB: Carga baja; CM: Carga media; CA: Carga alta.

CMJ: salto con contramovimiento; CMJc: salto vertical con cargas; VMP: velocidad media propulsiva con las cargas comunes en el ejercicio de sentadilla.

*Significación estadística con $p < 0.05$

**Significación estadística con $p < 0.001$

Ns: No significativo

4.5.4 Efecto del entrenamiento de arrastres en las variables de carrera

Tras el periodo de entrenamiento con arrastres de 7 semanas, todos los grupos mejoraron la carrera de 10, 20, 30, y 40 m. Sin embargo, estas mejoras fueron estadísticamente significativas en las carreras de 20 m ($p < 0.05$) y de 30 m ($p < 0.01$) en el grupo CA y la carrera de 40 m en los 3 grupos (CB, CM y CA) ($p < 0.05$) (**Figura 12**).

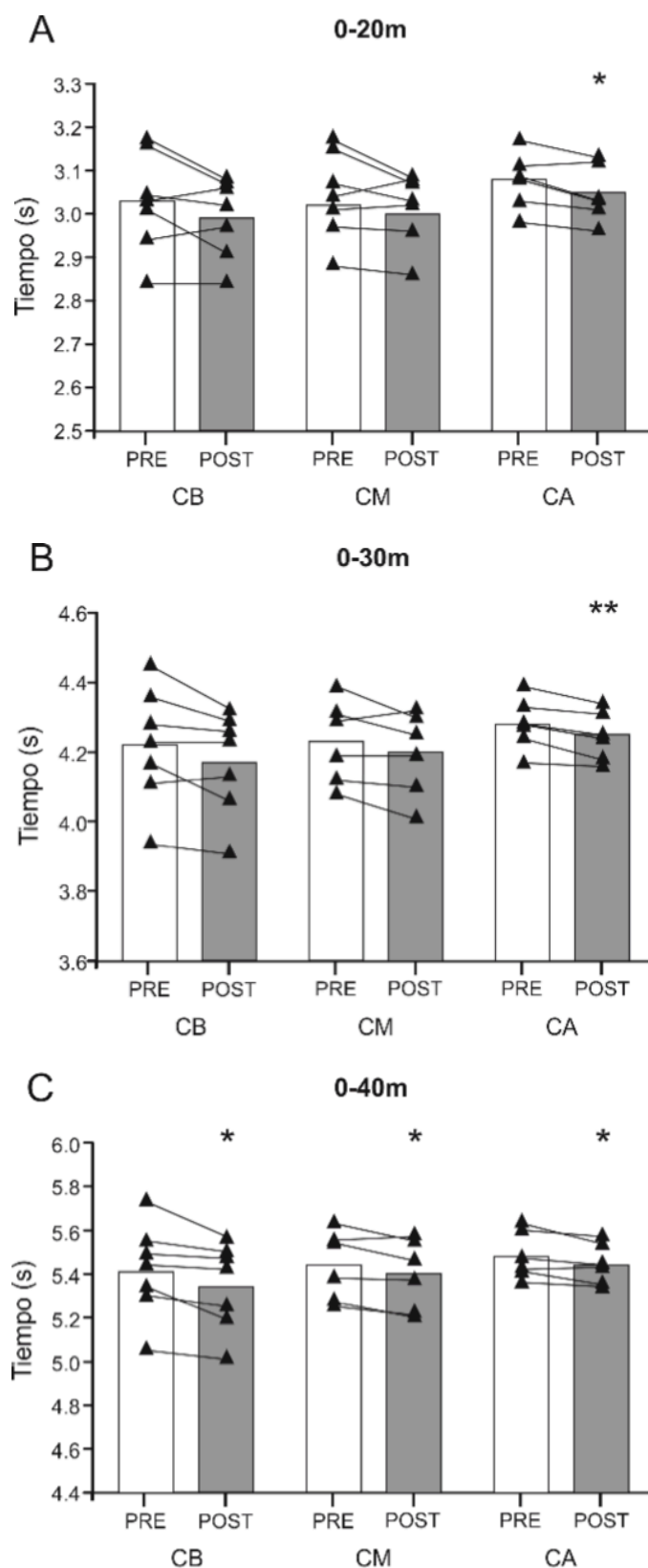


Figura 12. Medidas individuales y media de los tres grupos (CB, CM, CA) en **A)** carrera de 20 m; **B)** carrera de 30 m; **C)** carrera de 40 m, en el test inicial (PRE) y test final (POST) tras 7 semanas de entrenamiento. * $p < 0.05$

Todos los grupos disminuyeron el tiempo en los intervalos: 10-40, 20-30, 20-40 y 30-40 m, pero estas mejoras sólo fueron significativas en el grupo CB en los intervalos 10-40 m ($p < 0.01$) y 20-40 m ($p < 0.05$), y en el grupo CM en los intervalos 20-30 y 20-40 m ($p < 0.05$) (Figura 13 y 14).

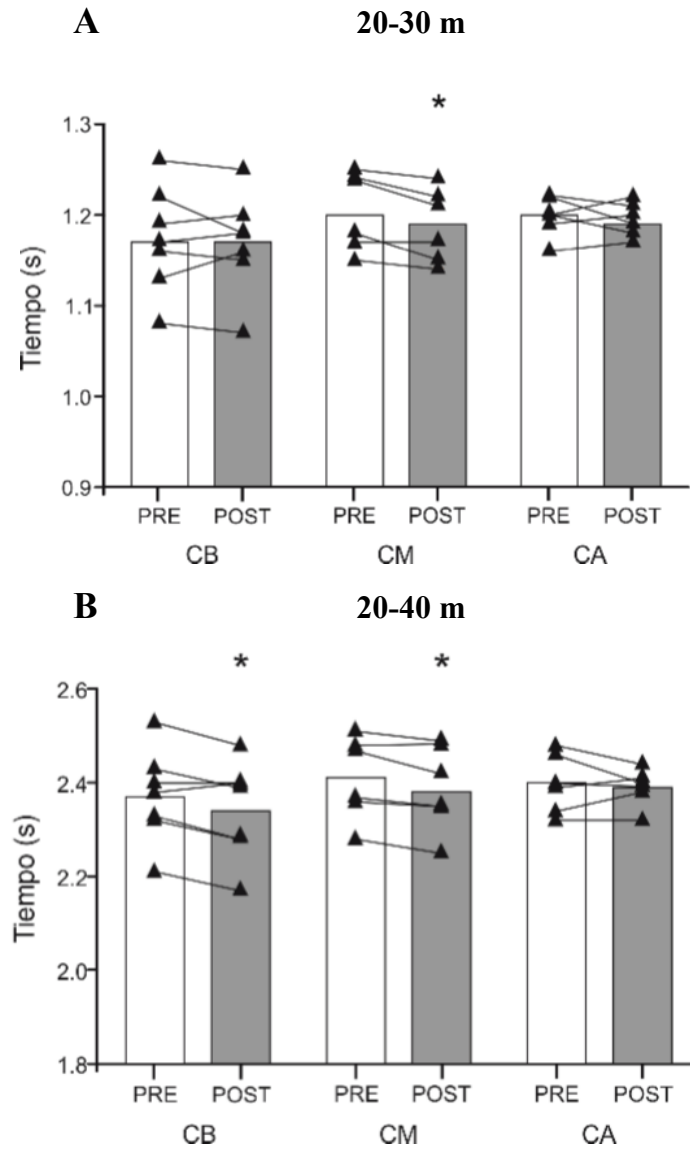


Figura 13. Medidas individuales y media de los tres grupos (CB, CM, CA) en **A**) carrera 20-30 m; **B**) carrera 20-40 m; en el test inicial (PRE) y test final (POST) tras 7 semanas de entrenamiento. * $p < 0.05$

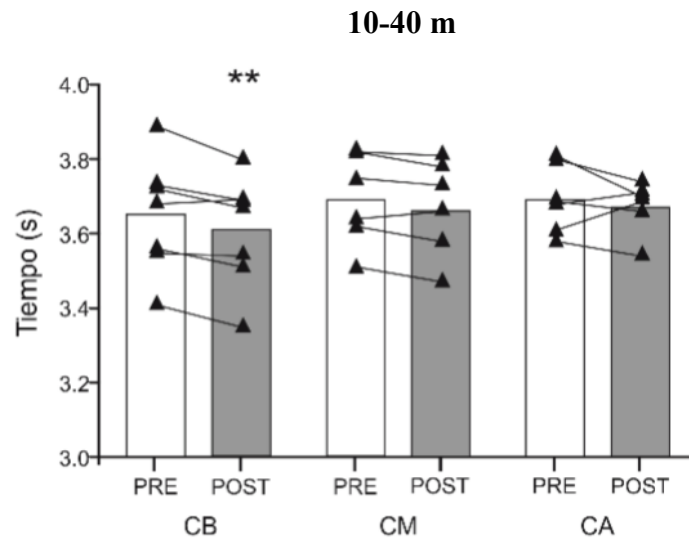


Figura 14. Medidas individuales y media de los tres grupos (CB, CM, CA) en la carrera 10-40 m en el test inicial (PRE) y test final (POST) tras 7 semanas de entrenamiento. ** $p < 0.01$

4.5.5 Efecto del entrenamiento de arrastres en las variables de fuerza

Con respecto al salto CMJ, se produjeron mejoras estadísticamente significativas en los grupos CM y CA ($p < 0.05$) (**Figura 15**).

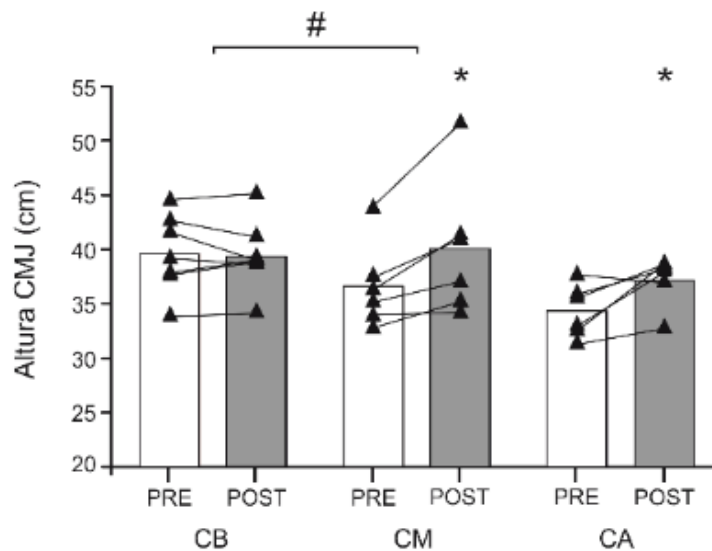


Figura 15. Medidas individuales y media de los tres grupos (CB, CM, CA) en el salto CMJ en el test inicial (PRE) y test final (POST) tras 7 semanas de entrenamiento. * $p < 0.05$; # diferencias entre grupos.

En el CMJc aunque todos los grupos mejoraron, las diferencias significativas se dieron únicamente en el grupo CA ($p < 0.05$) (**Figura 16**).

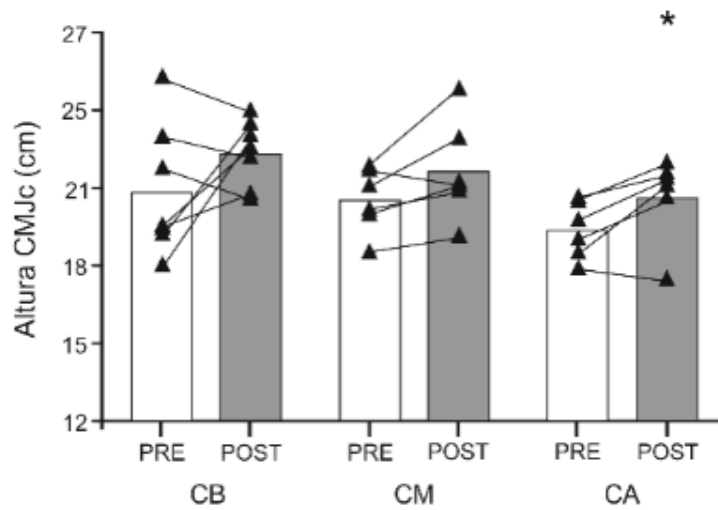


Figura 16. Medidas individuales y media de los tres grupos (CB, CM, CA) en el salto con cargas CMJc en el test inicial (PRE) y test final (POST) tras 7 semanas de entrenamiento. * $p < 0.05$

Con respecto al ejercicio de sentadilla, los 3 grupos mejoraron la media de la velocidad media propulsiva de las cargas comunes (VMP), sin embargo, estas mejoras fueron significativas solamente en los grupos CM y CA ($p < 0.05$) (**Figura 17**).

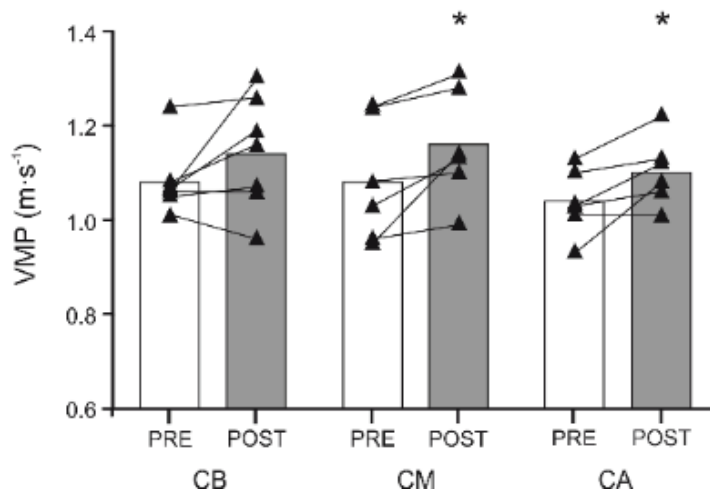


Figura 17. Medidas individuales y media de los tres grupos (CB, CM, CA) en la velocidad media propulsiva (VMP) de las cargas comunes en la sentadilla completa en el test inicial (PRE) y test final (POST) tras 7 semanas de entrenamiento. * $p < 0.05$

4.5.6 Relación entre cambios

Se calculó la relación entre los cambios de todas las variables. Únicamente encontramos relación significativa ($p < 0.01$) entre los cambios en el test de sentadilla (VMP) y los cambios en el CMJc ($r = 0.60$) (**Figura 18**).

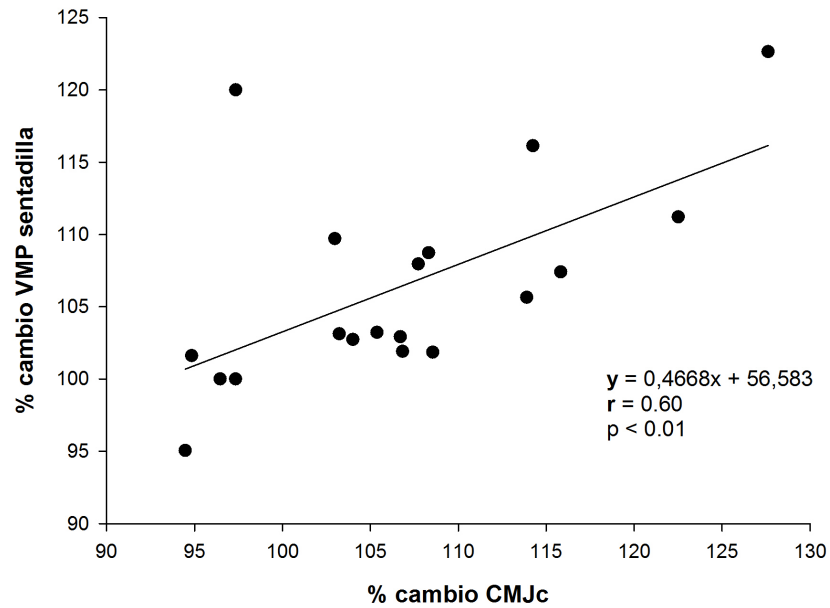


Figura 18. Correlación entre los cambios producidos en el CMJ con cargas y la VMP en el ejercicio de sentadilla. (n=19)

4.5.7 Valores absolutos y porcentajes de cambio entre el test inicial y test final

A modo de síntesis, a continuación se muestran los valores absolutos y los porcentajes de los cambios entre el test inicial (Pre) y el test final (Post) por grupos. (**Tabla 9**)

Tabla 9. Valores absolutos y porcentuales de los cambios entre las mediciones del test inicial (Pre) y el test final (Post) en las carreras, 2° de Triple, CMJ, CMJc y sentadilla para cada grupo.

	Grupo CB	Grupo CM	Grupo CA
Variables	Pre-Post (%)	Pre-Post (%)	Pre-Post (%)
Carreras (s)	(-0.03) -1.0%	(-0.02) -0.7%	(-0.02) -0.7%
2° de Triple (m)	(0.43) 1.5%	(-0.02) -0.1%	(0.22) 0.9%
CMJ (cm)	(-0.23) -0.5%	(3.46) 9%	(2.8) 8.4%
CMJc (cm)	(1.48) 8.4%	(1.09) 5.2%	(1.24) 6.4%
VMP Sentadilla (m·s⁻¹)	(0.06) 5.7%	(0.08) 7.3%	(0.06) 6.4%

CB: Carga baja; CM: Carga media; CA: Carga alta.

CMJ: Salto vertical con contramovimiento; CMJc: salto vertical con cargas de 20 kg y 30 kg; VMP: Velocidad media propulsiva con las cargas comunes en el ejercicio de sentadilla.

4.6 Discusión

Los resultados de nuestro estudio muestran que tras un periodo de entrenamiento con arrastres de 7 semanas con 2 sesiones/semana (2 ses/sem) todos los grupos mejoraron la carrera de 10, 20, 30 y 40 m. Sin embargo, estas mejoras sólo fueron estadísticamente significativas en la carrera de 20 m ($p < 0.05$) y de 30 m ($p < 0.01$) en el grupo CA (20% Pc), y en la carrera de 40 m en los 3 grupos (CB, CM y CA) ($p < 0.05$). Además, el grupo CB obtuvo mejoras significativas en los intervalos 10-40 m ($p < 0.01$) y 20-40 m ($p < 0.05$), mientras que en el grupo CM estas mejoras significativas fueron en los intervalos 20-30 m y 20-40 m ($p < 0.05$).

En un estudio semejante realizado por Zafeiridis et al. (2005), se encontraron mejoras significativas en los 10 y 20 m, es decir, en la fase de aceleración, tras un programa de entrenamiento con arrastres de 8 semanas (3 ses/sem) en el grupo que entrenó con una carga de arrastres de 5 kg. Es razonable pensar que esta carga de 5 kg no representaba la misma carga relativa para todos los sujetos, y que, por tanto, no sería comparable con nuestro estudio. Aunque dicha carga absoluta es un valor próximo a los utilizados por el grupo de CB (de 3 kg a 5 kg), los resultados de este estudio difieren de los nuestros ya que en nuestro caso fue el grupo de cargas altas (20% Pc, ≈ 14 kg) el que mejoró significativamente en 20 y 30 m, es decir, la fase de aceleración, mientras que los grupos de cargas baja y media mejoraron significativamente la fase de alta velocidad (20-40 m). No concuerdan tampoco nuestros resultados con los hallados por Spinks et al. (2007) quienes encontraron mejoras significativas en 15 m tras un entrenamiento de 8 semanas (2 ses/sem) con un arrastre (10% Pc) similar al utilizado por el grupo de cargas medias (12.5% Pc) en nuestro estudio, ya que en nuestro caso este grupo sólo obtuvo mejoras significativas en 40 m y los intervalos 20-30 m y 20-40 m, es decir, en la fase de alta velocidad de carrera. Pero este estudio no es comparable con el nuestro ya que en el estudio citado los sujetos además de entrenar con el arrastre hacían otro tipo de entrenamiento, por lo cual, no se puede determinar en qué medida el efecto sobre los cambios en velocidad se debe a un tipo de entrenamiento u otro. Difieren también nuestros resultados de los de Harrison & Bourke (2009), quienes tras 6 semanas de entrenamiento (2 ses/sem) con arrastre con una carga de aproximadamente el 13% del Pc, no encontraron mejoras significativas en 30 m pero sí en 5 y 10 m. Aunque los resultados se aproximan a los obtenidos por el grupo de nuestro estudio que empleó

cargas altas, no es posible hacer una comparación muy precisa puesto que en el texto del artículo al que nos referimos no se especifica ni distancias, ni series, ni repeticiones durante el entrenamiento.

Nuestros resultados si concuerdan sin embargo con los obtenidos por Kristensen et al. (2006), que tras un entrenamiento durante 6 semanas no encontraron mejoras en el tiempo en 20 m en el grupo que entrenó con arrastres con una carga de 2.7 kg. La carga empleada por este autor está por debajo de la carga mínima utilizada en nuestro estudio en el grupo que entrenó con cargas bajas, por lo que probablemente el estímulo fue demasiado pequeño, dado que en nuestro caso tampoco mejoraron de manera significativa los de cargas intermedias (CM), pero sí los sujetos que entrenaron con cargas superiores (CA). Hemos encontrado un estudio (Clark et al., 2010) en el que se observa una coincidencia parcial con el nuestro. En dicho estudio el grupo que entrenó con arrastres ($\approx 10\%$ Pc) durante 7 semanas mejoró significativamente ($p < 0.05$) el intervalo de carrera de 18-55 m. Este resultado es muy similar al observado en nuestro estudio en el grupo que entrenó con cargas medias (12.5% Pc), que mejoró significativamente ($p < 0.05$) en el intervalo de carrera 20-40 m. No es posible comparar la fase de aceleración puesto que en dicho estudio no se midió.

Los resultados obtenidos en carreras sugieren que la mejora del grupo CA en 40 m se debe a las mejoras en la fase de aceleración hasta 30 m, ya que para este grupo la velocidad de carrera en los intervalos 20-30, 20-40 y 30-40 m se mantuvo estable con respecto al test inicial. Probablemente estos sujetos al haber entrenado con más carga y por tanto a velocidades menores durante el entrenamiento, la velocidad máxima que han podido conseguir con respecto a sus marcas iniciales ha sido menor. Por el contrario, la mejora de carrera del grupo CB y CM en 40 m se puede deber a las mejoras en la fase de alta velocidad y no a la fase de aceleración, lo cual es coherente con lo explicado anteriormente, ya que estos sujetos entrenaron con una resistencia más pequeña (5 y 12.5% Pc) que les permitía perder menos velocidad en cada serie de entrenamiento. Este hecho podría explicar las mejoras significativas de la fase de velocidad alta que tuvieron en los intervalos 10-40 m (-1.1%) y 20-40 m (-1.2%) el grupo CB y en los intervalos 20-30 m (-1.4%) y 20-40 m (-0.9) el grupo CM. Por la misma razón, quizás en la fase de aceleración inicial la carga pequeña y media no produjo mejoras significativas.

Los resultados de nuestro estudio vienen a confirmar que tanto las cargas bajas como las medias y las altas producen mejoras significativas en la carrera de 40 m. No obstante, para los grupos que entrenaron con cargas bajas y medias la mejora total se debió a una mejora en la fase de alta velocidad y no en la aceleración, mientras que en el grupo que entrenó con cargas altas la mejora en la fase de aceleración (20 y 30 m) se manifiesta en una mayor mejora del rendimiento en 40 m. Esto podría justificarse porque los que entrenaron con más carga no pudieron alcanzar una alta velocidad de carrera con esa carga durante el entrenamiento, por tanto estuvieron lejos de la fase de alta velocidad, pero esta carga, sin embargo, sí ha producido efectos positivos sobre la fase de aceleración, que necesariamente se desarrolla a menor velocidad y con mayor tiempo para aplicar fuerza, situación más próxima a la que se produce cuando la carga de arrastre es mayor.

Cabe destacar que aunque las mejoras significativas sólo se dieron en algunos grupos y carreras, todos los grupos mejoraron todas las carreras (10, 20, 30 y 40 m), así como todos los intervalos de carrera (10-20, 10-30, 10-40, 20-30, 20-40 y 30-40 m), aunque no siempre de manera significativa, probablemente por la influencia de una muestra reducida. No obstante, los resultados son de relevancia porque nos informan sobre el efecto del trabajo con distintas resistencias sobre la aceleración en distintas fases de la misma sin una aplicación paralela de entrenamiento sin cargas.

Con respecto a los resultados obtenidos en salto CMJ, ejercicio que no se entrenó, se produjeron mejoras estadísticamente significativas semejantes por la aplicación del entrenamiento con cargas medias (grupo CM) y cargas altas (grupo CA) ($p < 0.05$). El grupo CB sin embargo no obtuvo mejoras, sino que se mantuvo estable con respecto al test inicial. Únicamente en un estudio (Spinks et al., 2007) se analizaron los efectos de un entrenamiento con arrastres sobre el CMJ. En dicho estudio se obtuvieron mejoras significativas en el CMJ tras 8 semanas de entrenamiento con una carga (10% Pc) similar a la utilizada por el grupo de cargas medias (12.5% Pc) en nuestro estudio. No obstante, no podemos profundizar en la comparación de resultados con este estudio ya que en el mismo no se especifican las variables de entrenamiento como distancia, series y repeticiones realizadas. Tradicionalmente se ha considerado que la “fuerza explosiva” de los músculos extensores de la rodilla está fuertemente relacionada con el rendimiento en aceleración en carrera (Mero, Luthanen, Viitasalo, & Komi, 1981; Berthion, Dupont, Mary, & Gerbeaux, 2001; Bret, Rahmani, Dufour, Mesonier, & Lacour, 2002).

Efectivamente, si tenemos en cuenta, por una parte, que la altura conseguida en un CMJ es considerada como una expresión de la “fuerza explosiva” o capacidad de producir fuerza en la unidad de tiempo (RFD), y por otra, que la aceleración consiste en proyectar el cuerpo desde una velocidad cero por la acción de los músculos extensores de las piernas y caderas, se podría deducir que en ambas acciones hay elementos comunes para explicar la varianza de los resultados obtenidos en cada uno de los ejercicios. En efecto, podemos considerar que el entrenamiento con cargas medias y altas disponen de un mayor tiempo de aplicación de fuerza que el de cargas ligeras, lo cual podría considerarse como un tiempo de aplicación de fuerza más próximo al utilizado en la fase concéntrica del salto vertical. Esta característica semejante del entrenamiento y del CMJ, podría explicar que los grupos que entrenaron con cargas medias y altas mejoraran significativamente el CMJ. Admitiendo esta característica común de los dos ejercicios, podría esperarse que la relación entre el CMJ y el tiempo en carrera fuese mayor en los primeros metros que cuando el sujeto se encuentra en una fase lanzada, lo cual ocurrió de manera significativa en el grupo CA y próximo a la significación ($p = 0.06$) en el grupo CM. Este resultado sugiere que en sujetos no entrenados o medianamente entrenados, el entrenamiento de la fuerza de las piernas a través del entrenamiento con arrastres con cargas superiores al 5% del Pc podría aportar una mejora en la capacidad de salto. Las modificaciones en el salto con cargas (CMJc) presentan una tendencia similar a la observada en el CMJ, aunque todos los grupos mejoraron, las diferencias estadísticamente significativas se dieron únicamente en el grupo CA ($p < 0.05$). No hemos encontrado estudios en los que se analicen los efectos del entrenamiento con arrastres sobre la capacidad de salto con cargas. La mayor mejora en el salto con cargas del grupo CA es coherente con la mejora paralela de la fuerza máxima en el ejercicio de sentadilla, ejercicio que tampoco se entrenó. En relación con el resultado en sentadilla, los 3 grupos mejoraron la velocidad media propulsiva de las cargas comunes, sin embargo, estas mejoras sólo fueron significativas en el grupo CM y CA ($p < 0.05$). La explicación de este resultado podría ser la misma que se ha expuesto para el salto con cargas. No conocemos estudios que hayan tratado exclusivamente del efecto del entrenamiento con arrastres sobre las ganancias de fuerza en el ejercicio de sentadilla.

Para el test 2º de triple no se encontraron diferencias estadísticamente significativas tras el periodo de entrenamiento con arrastres para ninguno de los 3 grupos de

entrenamiento. Los grupos CB y CA mejoraron un 1.5 y 0.9% respectivamente con respecto al test inicial, mientras que el grupo CM se mantuvo estable. Estos resultados, confusos, podrían deberse al hecho de que el ejercicio no fue entrenado y tiene una notable dificultad técnica. No obstante, la fiabilidad de este test fue alta y, según los resultados obtenidos en la aceleración, la fuerza de las piernas y la capacidad de salto, sería razonable que también en este ejercicio se hubieran producido mejoras. No hemos encontrado ningún estudio que analice este mismo problema, y tampoco podemos aportar una explicación a este resultado aparentemente contradictorio.

Los resultados obtenidos en las variables de salto y sentadilla sugieren que ha existido una transferencia positiva del ejercicio entrenado (la carrera con arrastres) sobre los ejercicios no entrenados (CMJ, CMJc y sentadilla). Esto quiere decir que el entrenamiento con arrastres no sólo podría tener una influencia positiva sobre la capacidad de aceleración, sino sobre otros indicadores del rendimiento como la capacidad de salto y la fuerza de las piernas. Como hemos indicado anteriormente, no hemos encontrado estudios que analicen este efecto del ejercicio de arrastres. Su aplicación en el entrenamiento, por tanto, podría coadyuvar a aumentar el efecto del entrenamiento de saltos y sentadilla.

En el análisis de las correlaciones entre los cambios de las distintas variables, solamente hemos encontrado una relación significativa entre los cambios en el test de sentadilla y los cambios en el CMJc ($r = 0.60$). Dado que ninguno de estos dos ejercicios se entrenó, esta relación entre los cambios de ambos sugiere que el efecto del entrenamiento de carrera con arrastres tiene un efecto común sobre ambos tipos de rendimiento y es coherente con el grado de transferencia observado sobre ambas variables.

Tras haber analizado los resultados obtenidos, comprobamos como la **Hipótesis 2** enunciada para este estudio (ver apartado 4.3) quedaría confirmada al constatarse que la carga alta (20% Pc), que se corresponde con una pérdida media del 15.5% de la velocidad, proporciona mayor mejora en la fase de aceleración con respecto a las cargas baja y media, así como en los ejercicios de sentadilla, CMJ y CMJc. La **Hipótesis 1**, no obstante, quedaría parcialmente confirmada ya que tanto las cargas medias (12.5% Pc) como las cargas bajas (5% Pc), que se corresponden con una pérdida media del 10 y el 5.6% de la velocidad, respectivamente, producen mejores resultados en los intervalos de alta velocidad de la carrera de 40 m que con la carga alta.

El uso de métodos de entrenamiento resistido es común tanto en atletismo como en la mayoría de deportes en los que la aceleración en carrera es determinante (Cronin et al., 2008). Los diferentes estudios experimentales que han analizado los beneficios y adaptaciones a corto y medio plazo de los métodos resistidos sobre los deportistas (Kristensen et al., 2006; Spinks et al., 2007; Zafeiridis et al., 2005) no han llegado a un acuerdo sobre cuál es la carga que produce los mejores resultados, por lo que la cuantificación de la carga sigue sin estar determinada por la comunidad científica. Este aspecto es el que condiciona la carga real impuesta al deportista, y por lo tanto el que provoca las adaptaciones en una dirección o en otra. Por lo tanto, se deben desarrollar más trabajos de investigación orientados en esta línea. Un paso lógico sería llevar a cabo un estudio de similares características pero con las condiciones más favorables que nos han faltado, como una muestra mayor o el que los sujetos no tuvieran prácticas físicas intensas en las clases durante el desarrollo de las sesiones de entrenamiento. También sería de gran interés conocer si un programa de entrenamiento de estas características puede producir resultados similares en atletas o en deportistas de determinados deportes colectivos, los cuales tienen altos niveles y necesidades de fuerza y mayor experiencia.

4.7 Conclusión

Los resultados de nuestro estudio permiten concluir que el entrenamiento con arrastres durante 7 semanas sin entrenamiento complementario de carreras sin cargas mejora el rendimiento en la carrera de 40 m con las tres cargas empleadas (baja, media y alta). No obstante, la mejora en esta distancia parece depender de efectos diferenciados. Los grupos CB y CM mejoraron significativamente en las fases de más alta velocidad (20-30 y 20-40 m) dentro de los 40 m, y el grupo CA mejoró en la fase inicial de aceleración (0-20 y 0-30 m), pero no en las zonas de máxima velocidad dentro de la distancia recorrida.

El entrenamiento de arrastres con cargas medias y altas sin entrenamiento complementario de carreras sin cargas produce mejoras en el rendimiento en CMJ, CMJc y sentadilla. Estas mejoras fueron significativas en los grupos CM y CA en el CMJ y sentadilla, y en el grupo CA en el ejercicio de saltos con carga.

4.8 Aplicaciones prácticas

Una de las principales aplicaciones prácticas que podría derivarse de los resultados obtenidos en este estudio sería el hecho de que puede que no sea suficiente entrenar únicamente con una sola carga, sino que para obtener un efecto más completo del entrenamiento es probable que se obtenga mayor beneficio alternando las cargas, ya que, según la magnitud de las cargas, los efectos podrían producirse en distintas fases de una aceleración en carrera. Además, el entrenamiento del ejercicio de arrastres puede contribuir a la mejora del salto vertical y de la fuerza de las piernas.

5. ESTUDIO II



Relación entre el rendimiento en 800 metros y el sprint, la capacidad de salto y la fuerza muscular en atletas masculinos de alto nivel nacional e internacional

5. ESTUDIO II. Relación entre el rendimiento en 800 metros y el sprint, la capacidad de salto y la fuerza muscular en atletas masculinos de alto nivel nacional e internacional

5.1 Planteamiento del Problema

Una vez revisada la bibliografía pertinente, podemos ver que en la mayoría de las investigaciones se ha encontrado una clara relación entre la capacidad de sprint, la capacidad de salto y la fuerza muscular en atletas. No obstante, la mayoría de estas investigaciones se han centrado en distancias de carrera muy cortas (entre 50 y 100 m) y en atletas de velocidad. Por otro lado, son escasos los estudios en los que se ha analizado la relación entre diferentes variables de fuerza y salto y el rendimiento específico en pruebas de medio fondo (800 y 1500 m). Se han observado correlaciones significativas entre la capacidad de salto y el tiempo en 800 m en atletas de competición (Hudgins et al., 2013). Además, también se ha encontrado una correlación significativa entre el tiempo en 300 m y el tiempo en 800 m en atletas especialistas (Deason, 1990). Por otro lado, en los últimos años el entrenamiento de fuerza en deportistas de especialidades de resistencia ha ido cobrando importancia gracias a las investigaciones en las que se han encontrado beneficios del entrenamiento de fuerza en el rendimiento en estas pruebas, sugiriendo que el entrenamiento de fuerza podría producir una mejora a largo plazo en la capacidad de resistencia, tanto en deportistas recreacionales como de competición (Taipale et al., 2010, 2014; Aagaard and Andersen, 2010; Sedano et al., 2013). En este sentido, el análisis de correlaciones entre la fuerza muscular, la capacidad de salto, la capacidad de sprint y el rendimiento en 800 m en atletas de alto nivel de competición podría ser de suma importancia para conocer de forma más precisa los factores de rendimiento de esta prueba, y por lo tanto para poder programar de forma adecuada los contenidos y controlar la carga de entrenamiento. Por consiguiente, y debido a la falta de conocimiento que parece existir en torno a esta cuestión, se dan las condiciones necesarias para justificar la formulación de uno o varios problemas de investigación. En nuestro caso, los problemas que nos planteamos son los siguientes:

- ¿Qué relación existe entre el sprint, la capacidad de salto, la fuerza muscular y el rendimiento en 800 m en atletas masculinos de alto nivel?

5.2 Objetivos de la Investigación

Una vez analizado el marco teórico de referencia y definido el problema objeto de estudio, del mismo se deriva el objetivo de esta investigación, que fue el siguiente:

- Analizar la relación existente entre el sprint, la capacidad de salto, la fuerza muscular y el rendimiento en 800 m en atletas masculinos de alto nivel nacional e internacional.

5.3 Hipótesis

Al revisar otros trabajos en los que se han analizado las relaciones entre la capacidad de salto y el rendimiento en 800 m, comprobamos que se han encontrado correlaciones significativas entre la capacidad de salto y el tiempo en 800 m en atletas de competición (Hudgins et al., 2013). Además, también se ha encontrado una correlación significativa entre el tiempo en 300 m y el tiempo en 800 m en atletas especialistas (Deason, 1990). Basándonos en las investigaciones que han encontrado una estrecha relación entre la capacidad de salto y el rendimiento en carreras de 300 y 800 m, y dado que se ha sugerido que el entrenamiento de fuerza contribuye de forma positiva en la mejora de la capacidad de resistencia (Aagaard & Andersen, 2010), es probable que exista correlación significativa entre la fuerza de las piernas y rendimientos caracterizados por una alta y rápida aplicación de fuerza, como el salto y el sprint, y el tiempo en la carrera de 800 m. Por tanto, formulamos la siguiente hipótesis:

Hipótesis 1: Existe correlación significativa entre el tiempo en la carrera de 800 m y la fuerza muscular de las piernas, la capacidad de salto y el sprint.

5.4 Metodología

5.4.1 Tipo de investigación

Dadas las características de los datos, el estudio es una investigación cuantitativa. Por el grado de manipulación de las variables y los objetivos del estudio y por el enfoque del análisis de los datos, la investigación es descriptiva correlacional. El trabajo es de carácter transversal ya que estudiamos la relación entre los datos sincrónicamente.

5.4.2 Muestra

Catorce atletas de nivel nacional e internacional en 800 m participaron en este estudio. Los atletas competían en categorías absoluta, promesa y junior y tenían una marca personal en 800 m entre 1:43 y 1:58 min:ss (media 1:52 min:ss). Las características físicas de los atletas se presentan en la **Tabla 10**. Dos de los atletas participantes en el estudio estaban en la primera y segunda posición del *Ranking Nacional* de 800 m y habían participado en los Juegos Olímpicos de Londres 2012. Todos los participantes habían realizado entrenamientos de fuerza con anterioridad y estaban familiarizados con los ejercicios de los tests. Los tests se llevaron a cabo durante la temporada de aire libre, coincidiendo con un estado físico óptimo de los atletas ya que participaban en competiciones de nivel nacional e internacional. Todos los participantes fueron informados sobre los procedimientos, riesgos potenciales y beneficios del estudio y firmaron un *Consentimiento Informado* (**Anexo 2**) antes de la realización de los tests. El estudio se llevó a cabo de acuerdo con la Declaración de Helsinki II y fue aprobado por el Comité Ético de la Universidad Pablo de Olavide (Sevilla, España).

Tabla 10. Características iniciales de los sujetos del **Estudio II** (medias \pm dt) (n=14)

EDAD (años)	ALTURA(cm)	PESO CORPORAL (Kg)
22.9 \pm 5.3	175.2 \pm 5.5	62.9 \pm 4.4

5.4.3 Diseño del estudio

Los tests físicos se realizaron en dos sesiones separadas por una semana. La sesión 1 consistió en una carrera de sprint (20 m) y tests de fuerza (salto con contramovimiento, CMJ; salto con cargas, CMJc; y sentadilla completa, SQ). En la segunda sesión se realizó el CMJ y un test de 200 m con toma de lactato sanguíneo. Como los tests se realizaron durante la temporada de competición de aire libre, la marca oficial que obtuvieron los atletas en la competición más cercana a la fecha de los tests (en un rango de 2 semanas) se utilizó para los análisis posteriores. Los tests se realizaron después de un día completo de descanso y a la misma hora del día.

5.4.4 Variables objeto de estudio

Las principales variables que se analizaron en este estudio fueron:

- Tiempo en carrera de 10 m (s)
- Tiempo en carrera de 10-20 m (s)
- Tiempo en carrera de 20 m (s)
- Tiempo en carrera de 200 m (s)
- Tiempo en carrera de 800 m (s)
- Altura en el salto vertical con contramovimiento (CMJ) (cm)
- Carga con la que se alcanza una altura en salto vertical de 20 cm (CMJc) (kg)
- Carga desplazada a la velocidad de $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ de la fase propulsiva en el ejercicio de sentadilla completa (SQ) (kg)
- Concentración de lactato tras la carrera de 200 m ($\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)

Control de Variables Extrañas

Al igual que en el **Estudio I**, se trató de tener control sobre posibles variables contaminantes que pudieran afectar a los resultados. El control sobre variables como la validez de los instrumentos de medida, la ejecución técnica y cumplimiento de los protocolos, y la situación ambiental durante la sesión de trabajo han sido descritos durante la metodología del **Estudio I**.

5.4.5 Evaluaciones, tests físicos e instrumentos de medida

Antropometría

Se pesó y midió a los sujetos siguiendo el mismo procedimiento que el anteriormente descrito para el **Estudio I**.

Test de carrera de velocidad de 10, 10-20, 20 y 200 m

Para cronometrar los tiempos en recorrer los 20 y 200 m, así como los intervalos 0-10, 10-20, 0-50, 50-100, 100-150 y 150-200 m, se utilizaron cinco pares de células fotoeléctricas (Polifemo Radio Light, Microgate, Italia). El procedimiento fue el mismo que el seguido en el **Estudio I**. Las carreras se realizaron desde posición bípeda estática, con la línea de salida situada a un metro de la célula fotoeléctrica de salida (inicio del cronometraje). El resto de células fotoeléctricas se situaron a los 10 m en el caso de la carrera de 20 m, y a los 50, 100 y 150 m para la carrera de 200 m, y por último, la célula fotoeléctrica de llegada (fin del cronometraje) se situó a los 20 y 200 m desde la célula de salida. El test de 20 m se realizó en una recta de tartán en un recinto cubierto para evitar la influencia de las condiciones climáticas y especialmente del viento. Mientras que el test de 200 m se realizó en una pista de atletismo al aire libre (Mondo, Zaragoza, España). La posible influencia del viento en la marca realizada por los atletas se controló utilizando un anemómetro (Oregon Scientific WMR-918, Tigard, OR, USA). Para ajustar la posible influencia del viento en las marcas obtenidas por los atletas se utilizó un modelo matemático (Quinn, 2003) que sugiere que un viento en contra de -2.0 o -1.0 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ produce una pérdida de tiempo de 0.121 y 0.059 s, respectivamente, mientras que un viento a favor de $+2.0$ o $+1.0$ proporciona una ganancia de 0.112 y 0.056 s, respectivamente. Se anotó el mejor de 2 intentos para carrera de 20 m y sólo un intento para la carrera de 200 m. Los atletas emplearon zapatillas de clavos para los tests. Para la carrera de 20 m los atletas realizaron un calentamiento con un protocolo estandarizado que consistió en: 10 min de carrera continua suave, 5 min de ejercicios de movilidad articular y técnica de carrera, un sprint de 40 m al 80%, dos sprints de 20 m al 90%, y un sprint de 10 m al 100%, con 2 minutos de recuperación entre cada sprint. Para el 200 m los atletas realizaron su calentamiento habitual en competición, el cual consistió en 10 min de carrera continua suave, 10 min de ejercicios de movilidad articular y técnica de carrera, y 2-4 carreras progresivas de 60-80 m.



Figura 19. Imagen de la realización del test de 20 m en un recinto cubierto con las células fotoeléctricas (Polifemo Radio Light, Microgate, Italia).



Figura 20. Imagen de la realización del test de 200 m en la pista de atletismo con las células fotoeléctricas (Polifemo Radio Light, Microgate, Italia).

Test de salto vertical con contramovimiento (CMJ)

Se utilizó el mismo procedimiento que el anteriormente descrito para el **Estudio I**. Se realizaron cinco saltos, separados por un minuto de descanso aproximadamente, se eliminaron los dos valores extremos (mejor y peor) y se hizo la media de los tres centrales. Además también se realizó el test de CMJ tras la carrera de 200 m (media de los dos saltos ejecutados inmediatamente después de la carrera de 200 m) para evaluar el grado de fatiga.

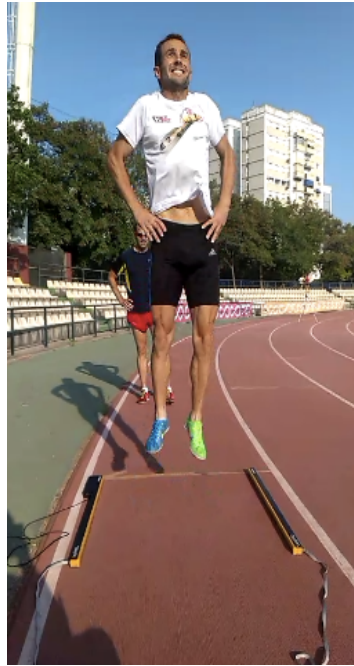


Figura 21. Imagen de la realización del test de CMJ con la plataforma de infrarrojos *Optojump* (Microgate, Italia) tras la carrera de 200 m.

Test de salto vertical con cargas (CMJc)

Se realizó el mismo procedimiento que el anteriormente descrito en el **Estudio I**. Para el análisis de los resultados se consideró la carga (kg) con la que el atleta saltó una altura igual o inferior a 20 cm. La prueba se realizó inmediatamente después de haber terminado el CMJ. Se realizaron dos saltos de calentamiento con la primera carga que se iba a medir, se descansó durante dos minutos y se comenzó el test.



Figura 22. Imagen de la realización del test de CMJc con la plataforma de infrarrojos *Optojump* (Microgate, Italia).

Test de sentadilla completa (SQ)

Se realizó el mismo procedimiento que el anteriormente descrito en el **Estudio I**, con la diferencia de que la carga se aumentó progresivamente hasta alcanzar una velocidad de $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ y que para el análisis de los resultados se consideró la carga (kg) levantada a una velocidad de $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ de la fase propulsiva, que representa aproximadamente el 60% de 1RM (Sánchez-Medina, García-Pallarés, Pérez, & González-Badillo, 2017) y se considera una carga suficiente para evaluar la fuerza de las piernas. El calentamiento para los tests de fuerza consistió en 2x5 sentadillas completas sin carga y 5 saltos CMJ a intensidad progresiva.



Figura 23. Imagen de la realización del test de sentadilla completa con el medidor lineal de velocidad *T-FORCE System* (Ergotech, Murcia, España).

Test de lactato

Se realizaron mediciones de la concentración de lactato a los 3 min de realizar el test de velocidad de 200 m, con la intención de determinar el estrés metabólico ocasionado. Para ello se utilizó un analizador portátil de lactato (Lactate Pro 2, Arkray, Japón). Éste es un analizador portátil que permite determinar la concentración de lactato en sangre total (lactatemia) en un rango de 0.5-25.0 mmol·l⁻¹. El manejo de este analizador es muy sencillo, se introduce una tira reactiva en la parte superior y solo necesita una muestra de sangre de 0.3 µl para mostrar el nivel de lactatemia en sangre a los 15 s. La idoneidad y reproductibilidad de este analizador ha sido previamente establecida con CVs de 7.6, 3.5 y 2.7 % para concentraciones de lactato de ≈ 1, 4 y 12 mmol·l⁻¹ (Bonaventura et al., 2015). La extracción se realizó en el lóbulo de la oreja.



Figura 24. Imagen del analizador de lactato *Lactate Pro 2* (Arkray, Japón).

Test de 800 m

La marca oficial que realizaron los atletas en la competición oficial más cercana a la fecha de los tests (en un rango de 2 semanas) se utilizó para los análisis posteriores. Esta competición debía ser una competición en la que los atletas buscasen su máximo rendimiento en cuanto a marca (competición tipo control o meeting) y no en cuanto a puesto (como puede ocurrir en algunos campeonatos).

5.4.6 Análisis estadístico

Para la descripción de los resultados se utilizaron los cálculos clásicos de tendencia central: medias, de variabilidad: desviaciones típicas y el número de casos. Se analizó la fiabilidad de las medidas aplicando el coeficiente de correlación intraclase (CCI) y el coeficiente de variación (CV). Además de la fiabilidad media e individual se expresó el intervalo de confianza del coeficiente al 95%. Para verificar la normalidad de los datos se realizó el test de Shapiro-Wilk. Dado que las medidas que se van a analizar son de nivel de razón y continuas, la relación entre variables se analizó con el coeficiente de correlación bivariado de Pearson con un 90% de intervalo de confianza. La significatividad estadística se estableció cuando la probabilidad de error fue igual o menor que el 5% ($p \leq 0.05$). Todos los análisis estadísticos se realizaron con el programa SPSS para Mac (Versión 20.0.0).

5.5 Resultados

5.5.1 Fiabilidad de las medidas

En este estudio la capacidad de aceleración mostró una fiabilidad relativa moderada-baja en la prueba de 10 m, debido probablemente a la homogeneidad de los sujetos en sus resultados (CCI = 0.75; IC: 0.25-0.92), pero la fiabilidad absoluta fue muy buena: CV: 1.9%. En el resto de distancias la fiabilidad fue buena o muy buena: 10-20 m (CCI: 0.83; IC: 0.46-0.95; CV: 1.6%) y 20 m (CCI: 0.92; IC: 0.76-0.97; CV: 1.1%). Igualmente el salto vertical CMJ (CCI: 0.99; IC: 0.99-1.00; CV: 1.3%) y el salto vertical con cargas CMJc (CCI: 0.98; IC: 0.92-0.99; CV: 4.0%) mostraron una alta fiabilidad.

5.5.2 Relaciones entre el rendimiento en carrera de 800 m y la capacidad de aceleración, el salto vertical y la fuerza muscular de las piernas

Los resultados de las correlaciones entre el tiempo en 800 m y las distintas distancias de carreras, el salto y la fuerza aparecen en la **Tabla 11**.

Tabla 11. Relaciones entre el rendimiento en 800 m y los tiempos en carrera (10, 20, 10-20, 200, 1^{er} 50, 2^o 50, 3^o 50 y 4^o 50 m), los tests de fuerza y salto vertical (CMJ, CMJc, SQ). (n=14, excepto para el 200 m: n=12)

Test	Media \pm SD	Correlación (r)
10 m (s)	1.67 \pm 0.03	0.59 *
20 m (s)	2.89 \pm 0.06	0.72 **
10-20 m (s)	1.20 \pm 0.03	0.56 *
200 m (s)	23.16 \pm 0.89	0.84 **
1 ^{er} 50 m (0-50 m) (s)	6.20 \pm 0.19	0.71 *
2 ^o 50 m (50-100 m) (s)	5.43 \pm 0.22	0.72 *
3 ^o 50 m (100-150 m) (s)	5.56 \pm 0.25	0.81 **
4 ^o 50 m (150-200 m) (s)	5.91 \pm 0.31	0.85 ***
CMJ (cm)	42.6 \pm 5.6	-0.69 **
CMJc (carga de 20 cm)	34.6 \pm 14.3	-0.65 *
SQ (carga de 1 m·s ⁻¹)	56.3 \pm 9.7	-0.58 *

CMJ = Salto con contramovimiento; CMJc = Salto con cargas, con la carga a la que se alcanza una altura de 20 cm; SQ = Sentadilla completa con la carga que se desplaza a 1 m·s⁻¹.

*Indica correlación significativa al $p < 0.05$; ** Indica correlación significativa al $p < 0.01$; *** Indica correlación significativa al $p < 0.001$

Los resultados muestran que los tiempos en las carreras de velocidad correlacionan significativamente con el rendimiento en 800 m (**Figura 25 y 26**).

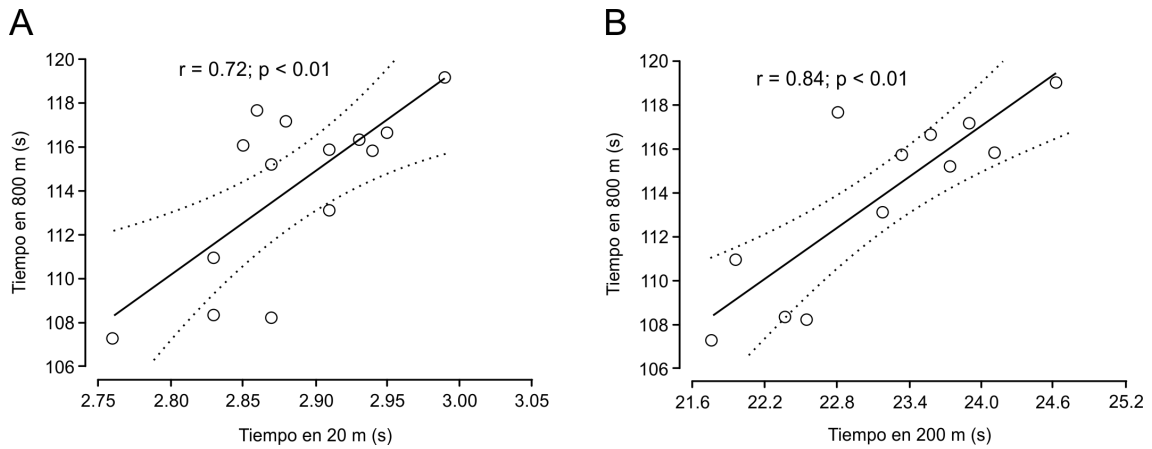


Figura 25. Relaciones entre el tiempo en 800 m y los tiempos en carrera 20 m (**A**) y 200 m (**B**). (n=14, excepto para el 200 m: n=12)

Cuando analizamos la carrera de 200 m, la cual hemos dividido en intervalos de tiempo cada 50 m (1^{er} 50, 2^o 50, 3^o 50 y 4^o 50 m), podemos observar que la magnitud de la correlación tiende a aumentar desde el primer hasta el último tiempo parcial de 50 m (1^{er} 50 m: $r = 0.71$; 2^o 50 m: $r = 0.72$; 3^o 50 m: $r = 0.81$; 4^o 50 m: $r = 0.85$) (**Figura 26**). Además, el rendimiento en 800 m también presentó relación significativa ($p < 0.01 - 0.05$) con las variables de fuerza: CMJ ($r = -0.69$, IC: -0.93 a -0.45), CMJc ($r = -0.65$, IC: -0.91 a -0.39) y SQ ($r = -0.58$, IC: -0.88 a -0.28).

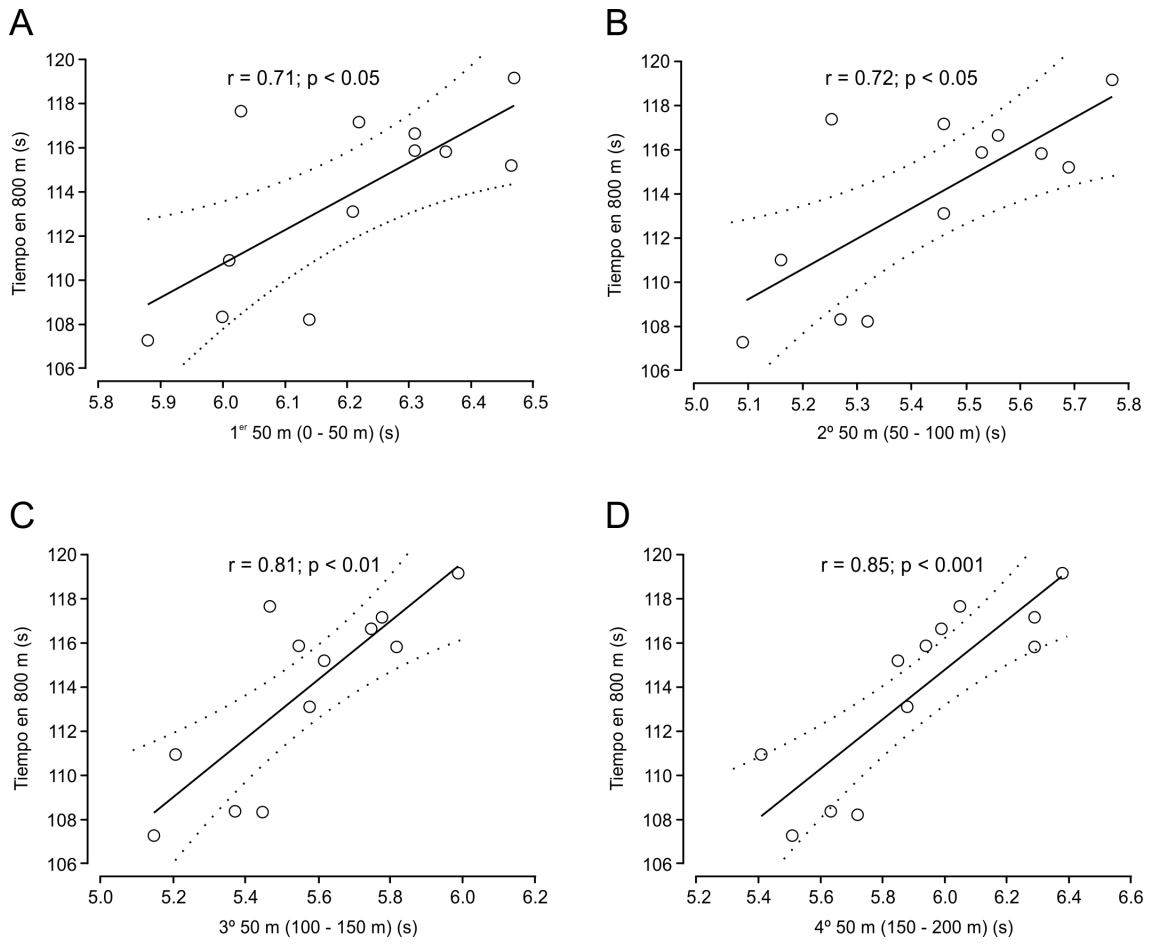


Figura 26. Relaciones entre el rendimiento en 800 m y los intervalos de tiempo parcial del 200 m: A) 1^{er} 50 m (0-50 m); B) 2^o 50 m (50-100 m); C) 3^o 50 m (100-150 m); D) 4^o 50 m (150-200 m), y el rendimiento en 800 m. (n=12)

5.5.3 Relaciones entre la carrera de 200 m, el salto vertical CMJ y la concentración de lactato.

Se analizaron también las correlaciones entre el tiempo en 200 m, el CMJ y la concentración de lactato (n = 12). El tiempo en 200 m mostró una correlación significativa ($p < 0.05$) con el CMJ ($r = -0.57$, IC: -0.91 a -0.27) y la concentración de lactato ($r = -0.59$, IC: -0.90 a -0.24). No se han encontrado correlaciones entre el rendimiento en 800 m y la concentración de lactato tras el test de 200 m ($r = -0.31$, IC: -0.76 a 0.14).

5.6 Discusión

El objetivo de este estudio fue analizar las relaciones existentes entre el rendimiento en 800 m y la capacidad de aceleración, el salto vertical y la fuerza muscular de las piernas en atletas masculinos especialistas en 800 m de alto nivel. Los resultados del estudio indican que el rendimiento en 800 m muestra una correlación significativa con la capacidad de aceleración, salto vertical y fuerza muscular. Además, el rendimiento en 200 m, especialmente el último parcial de 50 m (150-200 m), es la variable que en mayor medida explica la varianza del rendimiento en 800 m. En conjunto, los resultados sugieren que las variables relacionadas con la capacidad de producir fuerza muscular así como la habilidad de mantener altas velocidades de carrera con una cierta fatiga acumulada parecen ser factores determinantes en el rendimiento en 800 m.

En varios estudios se han analizado las relaciones entre la fuerza muscular y la carrera de velocidad (Loturco et al., 2015a, 2015b; Seitz et al., 2014). Sin embargo, hemos encontrado pocos estudios que se hayan centrado en la capacidad de producir fuerza como un factor importante en disciplinas de medio fondo en atletismo (Hudgins et al., 2013). Los resultados de este estudio parecen apoyar los encontrados previamente con respecto a disciplinas de medio fondo, como es el caso del estudio de Hudgins et al. (2013), en el que se encontraron correlaciones elevadas ($r = 0.83$) entre la capacidad de salto, medida a través de 3 saltos consecutivos y el rendimiento en 800 m. En nuestro estudio también se analizaron otras variables relacionadas con la capacidad de producir fuerza muscular, tales como la sentadilla completa, el salto vertical sin cargas y con cargas, y el rendimiento en carreras de velocidad de 20 y 200 m. Encontramos correlaciones significativas entre el tiempo en 800 m y los tests de velocidad (10 m: $r = 0.57$; 20 m: $r = 0.71$; 200 m: $r = 0.84$), de sentadilla completa ($r = -0.58$), y tests de salto vertical (CMJ: $r = -0.69$, CMJc: $r = -0.65$). Estos resultados sugieren que altos niveles de rendimiento en las distintas regiones de la curva fuerza velocidad podrían estar directamente relacionados con altos niveles de rendimiento en algunas disciplinas de medio fondo, como por ejemplo la prueba de 800 m.

En estudios previos se ha observado que el entrenamiento de fuerza con cargas altas así como el entrenamiento de fuerza explosiva, con cargas más ligeras, mejoran el rendimiento en pruebas de resistencia (Mikkola et al., 2007; Taipale et al., 2010, 2014).

Por lo tanto, la correlación observada en este estudio entre el rendimiento en 800 m y la fuerza muscular de las piernas en el ejercicio de sentadilla, el salto vertical CMJ y el salto vertical con cargas CMJc es coherente con estos estudios previos. El mecanismo por el cual la capacidad de producir fuerza muscular puede mejorar el rendimiento en disciplinas de medio fondo y fondo podría estar relacionado con diferentes aspectos de la economía de carrera (Ferrauti et al., 2010). Parece que la economía de carrera podría estar influida por la rigidez del músculo y del tendón, lo que está a menudo relacionado con un aumento de la fuerza muscular (Dumke, Pfaffenroth, McBride, & McCauley, 2010; Fletcher, Esau, & Macintosh, 2010). Sin embargo, en disciplinas como el 800 m el papel que desempeña la fuerza muscular podría estar relacionado con otros factores tales como la ganancia en fuerza máxima y la capacidad de producir fuerza en la unidad de tiempo, así como también con mejoras en la función neuromuscular e incrementos en la proporción de fibras tipo IIA (Aagaard & Andersen, 2010).

Con respecto a los resultados obtenidos en las variables de carreras, podemos observar como la magnitud de las correlaciones aumenta a medida que aumenta la distancia de carrera (10 m: $r = 0.57$, $p < 0.05$; 20 m: $r = 0.71$, $p < 0.05$; 200 m: $r = 0.84$, $p < 0.01$). Deason et al. (1991) encontraron que el tiempo en carrera de 300 m mostró una correlación significativa con el tiempo en competición de 800 m ($r = 0.83$; $p < 0.05$), lo que representa un 68% de la varianza explicada entre estas variables. Esta correlación es muy similar a la observada en nuestro estudio entre el tiempo en 800 m y el tiempo en 200 m ($r = 0.84$; $p < 0.01$).

Por otro lado, cuando analizamos la carrera de 200 m dividida en los diferentes intervalos: 1^{er} 50, 2^o 50, 3^o 50 y 4^o 50 m, podemos observar que existe una tendencia bastante clara a producirse un aumento de la correlación desde el primer hasta el último tiempo de intervalo de 50 m y el tiempo en 800 m (1^{er} 50 m: $r = 0.71$; 2^o 50 m: $r = 0.72$; 3^o 50 m: $r = 0.81$; 4^o 50 m: $r = 0.85$). En este sentido, teniendo en cuenta que en una carrera de 800 m la velocidad disminuye significativamente en el último tramo de carrera, siendo la menor velocidad alcanzada durante el último parcial de 100 m (88% del pico de velocidad) (Hanon & Thomas, 2011), sería lógico pensar que la fatiga ocasionada durante el último parcial de 50 m en la carrera de 200 m (150-200 m) será la que tenga mayor correlación con el rendimiento en 800 m.

Con respecto a los resultados obtenidos en el test de 200 m, podemos observar correlaciones significativas negativas entre el tiempo en 200 m y el salto vertical CMJ ($r = -0.59$; $p < 0.05$) y la concentración de lactato ($r = -0.57$; $p < 0.05$). Esta correlación entre el tiempo en 200 m y el CMJ está en línea con los resultados observados por Hudgins et al. (2013), ya que estos autores encontraron una relación significativa ($r = 0.97$; $p < 0.05$) entre el tiempo en 200 m en atletas velocistas y un test de salto (tres saltos horizontales consecutivos). Sin embargo en ese estudio la muestra fue más heterogénea ya que participaron hombres y mujeres velocistas (tiempo en 200 m: 23.47 ± 2.25 s), mientras que en nuestro estudio la muestra estuvo formada por atletas masculinos de 800 m (tiempo en 200 m: 23.16 ± 0.89 s), y la variabilidad de la muestra ($100 \cdot DT \cdot \text{media}^{-1}$) fue mayor en el estudio de Hudgins et al. (2013) (10%) que en nuestro estudio (4%). Este hecho podría explicar la mayor correlación obtenida por Hudgins et al. (2013), ya que una mayor variabilidad de la muestra maximiza la varianza entre las medidas, dando lugar a una mayor magnitud de las correlaciones. Sin embargo, consideramos que las relaciones observadas en nuestro estudio son relevantes, debido al alto nivel de los atletas evaluados. Por otro lado, en estudios previos realizados con saltadores y velocistas de alto nivel, se encontró que aquellos atletas que tenían un rendimiento inicial superior en un ejercicio de corta duración demostraron tener una mayor susceptibilidad a la fatiga que aquellos atletas con un rendimiento inferior de corta duración (Paavolainen, Häkkinen, Nummela, & Rusko, 1994; Gorostiaga et al., 2010). No obstante, esta tendencia no se ha observado en nuestro estudio al analizar la relación entre los tiempos en 200 m y la pérdida de salto CMJ.

Por otro lado, también se ha observado una correlación significativa ($r = -0.59$) entre el tiempo en 200 m y la concentración de lactato. Esta correlación sugiere que los atletas que son más rápidos en 200 m tienden a ser aquellos que poseen una activación de la glucólisis anaeróbica mayor, y por tanto, valores de concentración de lactato superiores. Una posible explicación a esto podría ser que los atletas que tienen mejor rendimiento en la prueba de 200 m y mayores valores de lactato son probablemente aquellos que tienen una mayor proporción de fibras tipo II. En este sentido, se ha observado que los valores de concentración de lactato más elevados se dan cuando existe un reclutamiento mayor de fibras tipo II, ya que éstas tienen una capacidad glucolítica mayor (Colliander, Dudley, & Tesch, 1988). Estos resultados refuerzan la importancia de la fuerza muscular en atletas de 800 m, ya que el entrenamiento de fuerza induce la hipertrofia y

un área relativa mayor de fibras tipo II (Colliander et al., 1988), así como mejoras en la capacidad de salto y sprint (Seitz et al., 2014). Por lo tanto, tras analizar todos estos resultados, parece lógico pensar que un programa de entrenamiento de fuerza adecuado podría producir mejoras en el rendimiento específico en atletas corredores de 800 m.

5.7 Conclusiones

En conclusión, los hallazgos del presente estudio sugieren que el rendimiento en la prueba de 800 m en atletas de nivel nacional e internacional está relacionado con la capacidad de sprint (20 y 200 m), la fuerza muscular de las piernas (SQ) y la capacidad de salto (CMJ y CMJc). Además, el último parcial de 50 m en la carrera de 200 m fue la variable que más explicó la varianza del rendimiento en 800 m. Por lo tanto los resultados de este estudio sugieren que las variables relacionadas con la capacidad de producir fuerza, la capacidad de mantener altas velocidades de carrera con una cierta fatiga acumulada, así como la capacidad glucolítica anaeróbica parecen ser factores importantes en el rendimiento en la prueba de 800 m.

5.8 Aplicaciones prácticas

De acuerdo con los resultados obtenidos, entrenadores y científicos del deporte deberían considerar programas de entrenamiento que incluyan sesiones que incrementen los niveles de fuerza muscular y velocidad para favorecer la mejora del rendimiento específico en 800 m. Además, se podrían utilizar estas variables como herramientas eficientes y útiles en la evaluación de la condición física en atletas de medio fondo.

6. ESTUDIO III



Evolución de la fuerza, la velocidad y el salto vertical y determinadas variables hematológicas, inmunológicas y hormonales a lo largo de una temporada completa de entrenamiento en corredores de 800 m de alto nivel

6. ESTUDIO III. Evolución de la fuerza, la velocidad y el salto vertical y determinadas variables hematológicas, inmunológicas y hormonales a lo largo de una temporada completa de entrenamiento en corredores de 800 m de alto nivel

6.1 Planteamiento del Problema

De la bibliografía revisada se deduce la importancia de la fuerza muscular no sólo en disciplinas de corta duración y velocidad sino también en disciplinas de resistencia o con un alto componente aeróbico (Taipale et al., 2010, 2014; Aagaard & Andersen, 2010; Sedano et al., 2013). Por un lado, el perfil hematológico de los deportistas es de gran importancia debido al rol esencial que desempeña la sangre en el transporte de O₂, buffering o termorregulación. La capacidad de transporte de O₂ parece estar asociada de manera directa con la capacidad de rendimiento aeróbico (Berglund & Hemmingson, 1987). Por otro lado, los glóbulos blancos desempeñan una función importante en el sistema inmune, pudiendo llegar a influir negativamente en el nivel de actividad o de rendimiento del deportista (Vleck et al., 2014). Además, el ejercicio físico intenso provoca una respuesta de estrés por parte del sistema endocrino (Crewther et al., 2006). Según nuestro conocimiento, la mayoría de los estudios sobre la respuesta hormonal al ejercicio han tratado con atletas relacionados con el entrenamiento de fuerza. Igualmente, a pesar de la estrecha relación existente entre el volumen sanguíneo, VO_{2max}, rendimiento aeróbico y capacidad máxima de ejercicio (Kanstrup & Ekblom, 1984; Calbet et al., 2006), existen escasos estudios en los que se analicen los cambios a largo plazo de variables hematológicas asociadas con el entrenamiento de resistencia. Por tanto, nuestros problemas objeto de estudio fueron los siguientes:

- ¿Cuál es la evolución de la fuerza muscular, velocidad y salto a lo largo de una temporada completa de entrenamiento en atletas corredores de 800 m de alto nivel?
- ¿Cuál es la evolución de las variables hematológicas y hormonales a lo largo de una temporada completa de entrenamiento en atletas corredores de 800 m de alto nivel?
- ¿Existe una relación entre los cambios en diferentes variables mecánicas, hematológicas y hormonales y los cambios en el rendimiento en 800 m a lo largo de una temporada completa de entrenamiento?

6.2 Objetivos de la Investigación

Una vez analizado el marco teórico de referencia y definido los problemas objeto de estudio, de los mismos se derivan los objetivos de esta investigación, que fueron los siguientes:

- Analizar los cambios en los valores de fuerza, velocidad y salto a lo largo de una temporada completa de entrenamiento en atletas corredores de 800 m de alto nivel.
- Analizar los cambios en determinadas variables hematológicas: RBC, Hb, Htc, VCM, HCM, CHCM, RDW, e inmunológicas: leucocitos o glóbulos blancos, neutrófilos, linfocitos, monocitos, eosinófilos, basófilos, plaquetas y VPM a lo largo de una temporada completa de entrenamiento en atletas corredores de 800 m de alto nivel.
- Analizar los cambios en los niveles hormonales de testosterona, cortisol, GH, IGF-1 y PRL a lo largo de una temporada completa de entrenamiento en atletas corredores de 800 m de alto nivel.

6.3 Hipótesis

Las investigaciones recientes han sugerido que el entrenamiento de fuerza podría producir una mejora a largo plazo en la capacidad de resistencia (Taipale et al., 2010, 2014; Aagaard & Andersen, 2010; Sedano et al., 2013). Teniendo en cuenta que la carrera de 800 m se considera una prueba de resistencia, pero que consta de un tiempo de esfuerzo relativamente corto, y que, por tanto, tiende a depender en mayor medida de factores anaeróbicos que cualquier otra prueba de las consideradas como “de resistencia”, lo que se ha comprobado al encontrar altas relaciones entre el rendimiento en la prueba y los rendimientos en 100 y, especialmente, 300 m (Deason et al., 1991), es probable que los valores de fuerza sean más determinantes en esfuerzos considerados de resistencia cuanto menor es el tiempo de esfuerzo, y que, por tanto, los valores de fuerza y los cambios de los mismos presenten relación positiva significativa con el rendimiento en 800 m y con los cambios en dicha prueba. Por tanto, formulamos la siguiente hipótesis:

Hipótesis 1: Los cambios en el rendimiento en 800 m presentan relación significativa positiva con los cambios en el rendimiento en las variables de fuerza, salto y carrera de velocidad.

No disponemos de estudios de referencia como para formular una hipótesis sobre los cambios en las variables hematológicas, inmunológicas y hormonales a lo largo de una temporada completa de entrenamiento en atletas corredores de 800 m de alto nivel. Pero dado que se han encontrado correlaciones entre la capacidad de transporte de O₂ y la capacidad de rendimiento aeróbico (Berglund & Hemmingson, 1987), así como correlaciones elevadas entre la Hb y VO_{2máx} en atletas (Sawka, Convertino, Eichner, Schnieder, & Young, 2000; Schmidt & Prommer, 2010), se puede deducir que poseer una elevada capacidad de transporte de O₂ podría suponer una clara ventaja para el rendimiento en las disciplinas con un elevado componente aeróbico. Por otro lado, se ha encontrado una disminución de las concentraciones de Hb y Hct cuando el periodo de entrenamiento se realiza en verano (Mairbäul, 2013). En cuanto a las adaptaciones hormonales, el entrenamiento de resistencia a largo plazo se caracteriza por una reducción o no cambio en las concentraciones basales de las hormonas (Consitt et al., 2002). Por lo tanto, tomando como referencia los pocos estudios en los que se han abordado estas cuestiones, esperamos que se confirmen los hallazgos encontrados previamente, dado que no encontramos un razonamiento que nos permita proponer otros efectos distintos del entrenamiento. Por ello, formulamos las siguientes hipótesis:

Hipótesis 2: Los cambios en los valores hematológicos relacionados con la capacidad de transporte de O₂ presentan relación significativa negativa con los cambios en el tiempo en 800 m.

Hipótesis 3: La evolución de las variables hormonales a lo largo de la temporada se caracteriza por una reducción o no cambio en las concentraciones basales de estas hormonas.

6.4 Metodología

6.4.1 Tipo de investigación

Dadas las características de los datos, el estudio es una investigación cuantitativa. Por el grado de manipulación de las variables y los objetivos del estudio, la investigación es descriptiva y experimental. El trabajo es de carácter longitudinal ya que, estudiamos la evolución de la relación entre los cambios mecánicos y el rendimiento a través del tiempo.

6.4.2 Diseño del estudio

Durante una temporada completa de atletismo (de octubre a junio) se llevaron a cabo 5 tests físicos (T1, T2, T3, T4, T5) cada 2 meses (**Figura 27**). También se realizaron analíticas para determinar los perfiles hematológicos y hormonales a lo largo de la temporada (T1, T3, T5). Los tests físicos se realizaron en dos sesiones separadas por una semana. La sesión 1 consistió en: 1) analítica de sangre; 2) test de carrera de 20 m; 3) tests de fuerza: CMJ, CMJc, y VMP con las cargas comunes (VMPcc) en el ejercicio de sentadilla. La segunda sesión de test consistió en el test de 200 m. Los tests se realizaron siempre tras un día completo de descanso y a la misma hora del día.

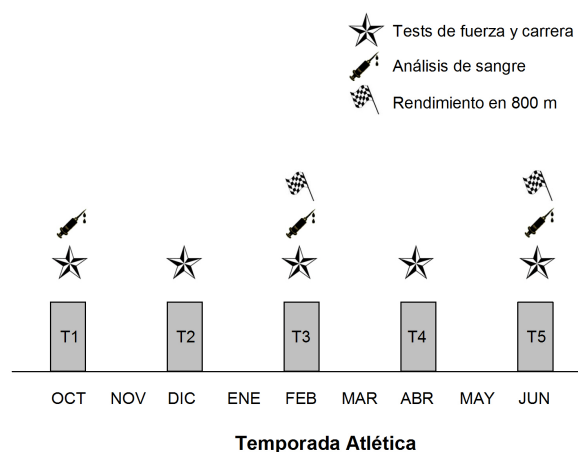


Figura 27. Esquema del diseño experimental. Se realizaron un total de 5 tests (T1, T2, T3, T4, T5) a lo largo de la temporada. Los tests de fuerza y carrera se realizaron en todos los tests, mientras que los análisis de sangre sólo en el T1, T3 y T5. El rendimiento en 800 m se registró en el T3 y T5.

6.4.3 Muestra

Misma muestra que para el estudio II pero con un sujeto menos ($n = 13$). Trece atletas de nivel nacional e internacional en 800 m participaron en este estudio. Las características físicas de los atletas se presentan en la **Tabla 12**. Todos los participantes fueron informados sobre los procedimientos, riesgos potenciales y beneficios del estudio y firmaron un *Consentimiento Informado* (**Anexo 2**) antes de la realización de los tests. El estudio se llevó a cabo de acuerdo con la Declaración de Helsinki II y fue aprobado por el Comité Ético de la Universidad Pablo de Olavide (Sevilla, España).

Tabla 12. Características iniciales de los sujetos del **Estudio III** (medias \pm dt) ($n=13$)

EDAD (años)	ALTURA(cm)	PESO CORPORAL (Kg)
22.9 \pm 5.3	176.0 \pm 5.7	63.1 \pm 4.5

6.4.4 Variables objeto de estudio

Variables mecánicas de fuerza y carrera:

- Tiempo en carrera de 20 m (s) (T20m)
- Tiempo en carrera de 200 m (s) (T200m)
- Tiempo en carrera de 800 m (s) (T800m)
- Altura en el salto vertical con contramovimiento (CMJ) (cm)
- Media de la altura de los dos saltos realizados con cada una de las cargas comunes en el salto vertical con cargas (CMJc) (cm)
- Velocidad media propulsiva de las cargas comunes en el ejercicio de sentadilla completa ($m \cdot s^{-1}$) (VMPcc)

Variables hematológicas

Serie roja:

- Glóbulos rojos (RBC)
- Hemoglobina (Hb)
- Hematocrito (Htc)
- Volumen corpuscular medio (VCM)

- Hemoglobina corpuscular media (HCM)
- Concentración de hemoglobina corpuscular media (CHCM)
- Velocidad de segmentación (RDW)

Serie blanca:

- Leucocitos o glóbulos blancos
- Neutrófilos
- Linfocitos
- Monocitos
- Eosinófilos
- Basófilos

Serie plaquetar:

- Plaquetas
- Volumen plaquetar medio (VPM)

Variables hormonales:

- Testosterona
- Cortisol
- Hormona del crecimiento (GH)
- Somatomedina o IGF-1
- Prolactina (PRL)

Variables bioquímicas:

- Creatin kinasa (CPK)

Control de Variables Extrañas

Al igual que en el **Estudio I** y **II**, se trató de tener control sobre posibles variables contaminantes que pudieran afectar a los resultados. El control sobre variables como la validez de los instrumentos de medida, la ejecución técnica y cumplimiento de los protocolos, y la situación ambiental durante la sesión de trabajo han sido descritos durante la metodología del **Estudio I**.

6.4.5 Evaluaciones, tests físicos, analíticas e instrumentos de medida

Antropometría

Se pesó y midió a los sujetos siguiendo el mismo procedimiento que el anteriormente descrito para el **Estudio I**.

Test de carrera de velocidad de 10, 10-20, 20 y 200 m

El procedimiento fue el mismo que el seguido en el **Estudio II**. Se anotó el mejor de 2 intentos para carrera de 20 m y sólo un intento para la carrera de 200 m. Para la carrera de 20 m los atletas realizaron un calentamiento con un protocolo estandarizado que consistió en: 10 min de carrera continua suave, 5 min de ejercicios de movilidad articular y técnica de carrera, un sprint de 40 m al 80%, dos sprints de 20 m al 90%, y un sprint de 10 m al 100%, con 2 min de recuperación entre cada sprint. Para el test de 200 m los atletas realizaron su calentamiento habitual en competición, el cual consistió en 10 min de carrera continua suave, 10 min de ejercicios de movilidad articular y técnica de carrera, y 2-4 carreras progresivas de 60-80 m.

Test de salto vertical con contramovimiento (CMJ)

Se utilizó el mismo procedimiento que el anteriormente descrito para el **Estudio I y II**. Se realizaron cinco saltos, separados por un minuto de descanso aproximadamente, se eliminaron los dos valores extremos (mejor y peor) y se hizo la media de los tres centrales.

Test de salto vertical con cargas (CMJc):

Se realizó el mismo procedimiento que el anteriormente descrito en el **Estudio I y II**. Para el análisis de los resultados se consideró la media de la altura (cm) de los dos saltos realizados con cada una de las cargas comunes en el salto vertical con cargas (CMJc).

Test de sentadilla completa (VMPcc)

Se realizó el mismo procedimiento que el anteriormente descrito en el **Estudio II**. La carga se aumentó progresivamente hasta alcanzar una velocidad de $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ y para el análisis de los resultados se consideró la media de la velocidad media propulsiva de las cargas comunes en el ejercicio de sentadilla completa (VMPcc) ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$). El calentamiento para los

tests de fuerza consistió en 2x5 sentadillas completas sin carga y 5 saltos CMJ a intensidad progresiva.

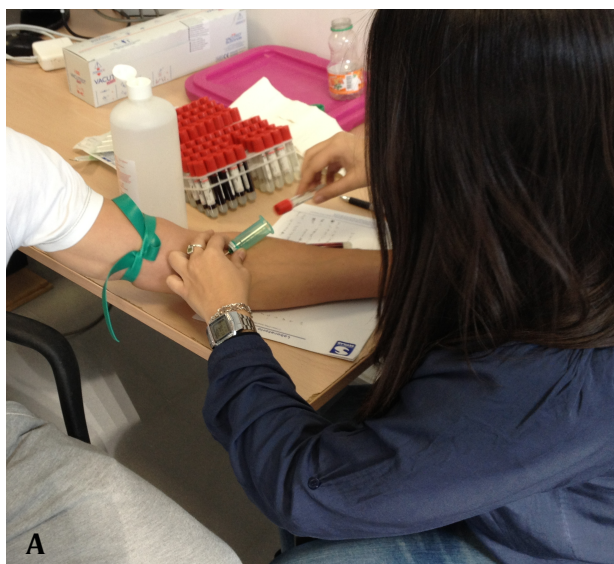
Test de 800 m

La marca oficial que realizaron los atletas en la competición oficial más cercana a la fecha de los tests T3 y T5 (en un rango de 2 semanas) se utilizó para los análisis posteriores. Esta competición debía ser una competición en la que los atletas buscasen su máximo rendimiento en cuanto a marca (competición tipo control o meeting) y no en cuanto a puesto (como puede ocurrir en algunos campeonatos).

Análisis sanguíneo

Se realizaron análisis sanguíneos en el T1, T3 y T5. Las muestras se tomaron siempre a la misma hora del día, debido a las grandes variaciones que se han encontrado en la concentración de las hormonas en función de la hora del día (Gatti & De Palo, 2011). Se pidió a los atletas que descansaran el día anterior a la realización de los tests y a la extracción de sangre. Antes de la extracción sanguínea los atletas permanecieron sentados durante al menos 10 min. La toma de muestra de los atletas se realizó por una enfermera (personal sanitario especializado en extracciones). Las muestras se extrajeron de la vena antecubital con el atleta en posición supina utilizando el sistema Vacuette y tomando las muestras de sangre en tubos de vacío con anticoagulante EDTA K 3 (3 ml) y en tubos con gel sin anticoagulante (5 ml) a cada atleta. Dichas muestras fueron transportadas al Laboratorio inmediatamente, bajo las condiciones de temperatura y humedad controladas y establecidas según la ISO 9001. Una vez que las muestras llegaron al Laboratorio, se distribuyeron a las distintas secciones para su procesamiento. Para la determinación del hemograma en la sección de *Hematología* el tubo de Edta K3 permaneció durante 10 min en agitación continua antes de su procesamiento con la intención de obtener una buena homogenización de la muestra. Una vez pasado este tiempo, se procesó en el módulo XN-9000 (Roche, Diagnostics), el cual realiza un recuento de células sanguíneas (Roja, Blanca y Plaquetar) mediante citometría de flujo fluorescente y con ello se obtuvieron las variables hematológicas. Para la determinación de prolactina, GH, IGF-1, cortisol y testosterona en la sección *Bioquímica/Inmunoquímica* el tubo de gel (5 ml) fue centrifugado durante 5 min a 4500 r.p.m para conseguir la muestra de suero necesaria. Una vez pasado ese tiempo se

procesó por el Autoanalizador Cobas E170 (Roche, Diagnostics) obteniendo dichos parámetros mediante la Técnica ECLIA (Electroquimioluminiscencia y encimoinmunoanálisis), pasado su tiempo de incubación y procesamiento se obtuvieron dichos resultados.





Laboratorio de Análisis Clínicos

C/Cometa 2 (Pág. Herrería) 41013 Sevilla. Tlf. 954 63 63 88 / 954 64 58 97 Fax. 954 63 14 97
www.sevilab.com / info@sevilab.com

N. Pac. : 144406
 DNI : 74737731
 Edad :
 Fecha Ext. : 14/10/2013
 Fecha Imp. : 07/02/2014
 Comentario :

Nombre : ██████████
 Entidad : Dr. RIBAS
 Empresa :
 Médico Dr. :
 Comentario :

Laboratorio de Análisis Clínicos - Sevilab - C/Cometa 2 (Pág. Herrería) 41013 Sevilla. Tlf. 954 63 63 88 / 954 64 58 97 Fax. 954 63 14 97 www.sevilab.com / info@sevilab.com

HEMOGRAMA

	Resultado	Unidades	Valores de Referencia
SERIE ROJA			
HEMATIES	5.17	mil/mm ³	(4.5 - 5.9)
HEMOGLOBINA	14.0	gr/dl	(14 - 18)
HEMATOCRITO	44.4	%	(36.2 - 52)
VOLUMEN CORPUSCULAR MEDIO	86.9	fL	(80 - 96)
HEMOGLOBINA CORPUSCULAR MEDIA	28.8	pg	(28.2 - 33)
COND. HEMOGL. CORP. MEDIA	33.6	%	(30 - 36)
RDW	13.5	%	(12 - 14)
SERIE BLANCA			
LEUCOCITOS	5.7	x mil/ul	(4.5 - 11.3)
NEUTROFILOS%	49.5	%	(36 - 77)
LINFOCITOS%	38.1	%	(20 - 40)
MONOCITOS%	9.1	%	(2 - 9.5)
EOSINOFILOS%	2.8	%	(0 - 4.4)
BASOFILOS%	0.5	%	(0 - 1)
NEUTROFILOS	2.8	x mil/ul	(1.6 - 8.7)
LINFOCITOS	2.2	x mil/ul	(0.9 - 4.5)
MONOCITOS	0.5	x mil/ul	(0.2 - 1)
EOSINOFILOS	0.2	x mil/ul	(0 - 0.5)
BASOFILOS	0.0	x mil/ul	(0 - 0.1)
SERIE PLAQUETAR			
PLAQUETAS	180	x mil/mm ³	(130 - 400)
VOLUMEN PLAQUETARIO MEDIO	10.8	fL	(9 - 13)

Figura 28. A) Imagen de la extracción de sangre para el posterior análisis hematológico y hormonal; B) Ejemplo de informe del Laboratorio especializado con los resultados de las analíticas.

6.4.6 Análisis estadístico

Para la descripción de los resultados se utilizaron los cálculos clásicos de tendencia central: medias y de variabilidad: desviaciones típicas. Se analizó la fiabilidad relativa de las medidas aplicando el coeficiente de correlación intraclase (CCI) y el intervalo de confianza del 95%, y el coeficiente de variación (CV) como indicador de la fiabilidad absoluta. Un CCI de ≥ 0.9 se interpretó como muy fiable (Vincent, 1999). Un CV de $\leq 10\%$ se consideró como de suficiente fiabilidad (Augustsson et al., 2006). Los análisis de fiabilidad se hicieron para el T1. Para verificar la normalidad de los datos se realizó el test de Shapiro-Wilk. Para analizar los cambios a lo largo de la temporada se realizó un ANOVA de medidas repetidas comparando los efectos con la corrección o ajuste de Bonferroni. La significatividad estadística se estableció cuando la probabilidad de error fue igual o menor que el 5% ($p \leq 0.05$). Todos los análisis estadísticos se realizaron con el programa SPSS para Mac (versión 20.0.0).

6.5 Resultados

En las **Tablas 13, 14 y 15**, se presentan los valores medios y la desviación típica de las distintas variables (velocidad y fuerza muscular, hematología y hormonas) analizadas a lo largo de los 5 tests realizados durante la temporada atlética.

6.5.1 Cambios a lo largo de la temporada en las variables de fuerza y carreras de velocidad

Con respecto a las variables de fuerza muscular, el CMJ aumentó significativamente a lo largo de la temporada: del T1 al T5 ($p < 0.01$), del T2 al T5 ($p < 0.01$), y del T3 al T5 ($p < 0.05$). En cuanto al T200m, se produjo igualmente una disminución significativa en el tiempo a lo largo de la temporada: del T2 al T4 ($p < 0.01$), y del T2 al T5 ($p < 0.01$) (este test no se realizó en el primer test T1 de la temporada). En el ejercicio de sentadilla completa, la velocidad media propulsiva a la que se desplazó la barra con las cargas comunes (VMPcc) aumentó a lo largo de la temporada con cambios significativos del T1 al T4 ($p < 0.001$), del T2 al T4 ($p < 0.05$) y del T1 al T5 ($p < 0.05$). No se encontraron diferencias significativas en el T20m ni en el salto vertical con cargas (CMJc) a lo largo de la temporada, no obstante, podemos observar una tendencia a mejorar el rendimiento en estas variables a lo largo de la temporada: el T20m disminuye (T1: 2.93; T2: 2.92; T3: 2.92; T4: 2.91; T5: 2.88 s) y la altura del CMJc aumenta (T1: 21.3 T2: 21.9; T3: 22.6; T4: 22.9; T5: 23.0 cm) (**Tabla 13**).

6.5.2 Cambios a lo largo de la temporada en el rendimiento en 800 m

En la **Tabla 13** se puede observar una disminución significativa ($p < 0.01$) del tiempo en 800 m del T3 (período competitivo de pista cubierta) al T5 (período competitivo de aire libre).

Tabla 13. Cambios a lo largo de la temporada en el rendimiento en las variables de fuerza y carrera (n=13)

Variables de fuerza y carrera	T1	T2	T3	T4	T5
CMJ (cm)	40.0 ± 6.2 ^{##}	40.0 ± 6.6	40.9 ± 7.4	41.9 ± 5.9	43.0 ± 6.4 ^{aa,bb,c}
CMJc (cm)	21.3 ± 2.7	21.9 ± 2.9	22.6 ± 3.8	22.9 ± 3.4	23.0 ± 4.2
VMPcc (m·s ⁻¹)	1.19 ± 0.07 ^{##}	1.23 ± 0.09	1.26 ± 0.10	1.32 ± 0.05 ^{aaa,b}	1.28 ± 0.05 ^a
T20m (s)	2.93 ± 0.10	2.92 ± 0.11	2.92 ± 0.10	2.91 ± 0.08	2.88 ± 0.06
T200m (s)	-	24.12 ± 1.13 [#]	23.89 ± 1.36	23.48 ± 0.86 ^{bb}	23.26 ± 1.03 ^{bb}
T800m (s)	-	-	115.50 ± 4.77 ^{##}	-	113.79 ± 4.14 ^{cc}

a: p < 0.05; aa: p < 0.01; aaa: p < 0.001 (diferencias significativas con respecto al T1); b: p < 0.05; bb: p < 0.01; bbb: p < 0.001 (diferencias significativas con respecto al T2); c: p < 0.05; cc: p < 0.01; ccc: p < 0.001 (diferencias significativas con respecto al T3). Efecto del tiempo: #: p < 0.05; ##: p < 0.01. CMJ: salto con contramovimiento; CMJc: salto vertical con la carga de 20 cm; VMPcc: velocidad media propulsiva alcanzada con las cargas comunes en el ejercicio de sentadilla completa; T20m: tiempo en 20 m; T200m: tiempo en 200 m; T800m: tiempo en 800 m.

6.5.3 Cambios a lo largo de la temporada en las variables hematológicas

Con respecto a las variables hematológicas, el Hct disminuyó significativamente (p < 0.01) del T3 (44.9%) al T5 (42.6%). Igualmente, el VCM disminuyó significativamente del T1 al T5 (p < 0.001), y del T3 al T5 (p < 0.001). Por otro lado, se puede observar un incremento significativo del MCHC del T1 al T5 (p < 0.001) y del T3 al T5 (p < 0.001). El resto de variables hematológicas correspondientes a la serie roja (RBC, Hb, MHC y RDW) no mostraron cambios significativos. Con respecto a la serie blanca, los leucocitos, neutrófilos y monocitos disminuyeron significativamente (p < 0.05) del T3 al T5. El VPM aumentó significativamente del T1 al T5 (p < 0.05) y del T3 al T5 (p < 0.05). No se observaron diferencias significativas en el resto de variables de la serie blanca analizadas: linfocitos, eosinófilos, basófilos, y plaquetas (**Tabla 14**).

Tabla 14. Cambios a lo largo de la temporada en las variables hematológicas (n=13)

Variables	T1	T3	T5
hematológicas			
RBC (mill·mm³)	5.05 ± 0.41	5.14 ± 0.29	5.09 ± 0.38
Hb (g·dl⁻¹)	15.11 ± 0.75	15.32 ± 0.64	15.46 ± 0.88
Hct (%)	43.83 ± 2.32 ^{##}	44.86 ± 1.51	42.64 ± 2.11 ^{cc}
VCM (fl)	87.04 ± 4.73 ^{###}	87.52 ± 4.21	84.02 ± 3.64 ^{aaa,ccc}
HCM (pg)	30.10 ± 1.71	30.22 ± 1.16	30.50 ± 1.78
CHCM (%)	34.49 ± 1.18 ^{###}	34.17 ± 1.36	36.26 ± 1.08 ^{aaa,ccc}
RDW (%)	12.72 ± 0.53	12.77 ± 0.41	12.81 ± 0.50
Leucocitos (mil·uL⁻¹)	6.78 ± 1.92 [#]	6.83 ± 2.24	5.92 ± 1.65 ^c
Neutrófilos (mil·uL⁻¹)	3.51 ± 1.42 [#]	3.58 ± 1.45	2.91 ± 0.92 ^c
Linfocitos (mil·uL⁻¹)	2.48 ± 1.03	2.46 ± 0.83	2.32 ± 0.73
Monocitos (mil·uL⁻¹)	0.59 ± 0.18 [#]	0.61 ± 0.18	0.52 ± 0.13 ^c
Eosinófilos (mil·uL⁻¹)	0.16 ± 0.08	0.14 ± 0.07	0.14 ± 0.07
Basófilos (mil·uL⁻¹)	0.03 ± 0.05	0.03 ± 0.05	0.05 ± 0.05
Plaquetas (mil·mm³)	224.38 ± 56.62	225.15 ± 57.00	209.77 ± 56.83
VPM (fl)	11.34 ± 1.03 [#]	11.34 ± 1.01	11.68 ± 1.15 ^{a,c}

a: p < 0.05; aa: p < 0.01; aaa: p < 0.001 (respecto al T1); b: p < 0.05; bb: p < 0.01; bbb: p < 0.001 (respecto al T2); c: p < 0.05; cc: p < 0.01; ccc: p < 0.001 (respecto al T3). Efecto del tiempo: #: p < 0.05; ##: p < 0.01; ###: p < 0.001. RBC: glóbulos rojos; Hb: hemoglobina; Hct: hematocrito; VCM: volumen corpuscular medio; HCM: hemoglobina corpuscular media; CHCM: concentración de hemoglobina corpuscular media; RDW: amplitud de distribución eritrocitaria; VPM: volumen plaquetario medio.

6.5.4 Cambios a lo largo de la temporada en las variables hormonales y bioquímicas

La IGF-1 mostró una disminución significativa a lo largo de la temporada (p = 0.02). Además, el cortisol mostró un descenso próximo a la significación (p = 0.09). No se observaron cambios significativos en el resto de variables hormonales analizadas durante la temporada (**Tabla 15**). La CPK tampoco mostró cambios significativos a lo largo de la temporada (**Tabla 15**).

Tabla 15. Cambios a lo largo de la temporada en las variables hormonales y bioquímicas (n=13)

Variables hormonales y bioquímicas	T1	T3	T5
CPK (U·L ⁻¹)	234.1 ± 142.6	257.9 ± 101.6	202.0 ± 111.5
PRL (ng·ml ⁻¹)	11.1 ± 6.0	12.3 ± 6.0	12.5 ± 4.3
GH (μg·L ⁻¹)	0.75 ± 0.94	0.74 ± 1.66	0.56 ± 1.31
IGF-1 (nmol·L ⁻¹)	37.7 ± 12.5 [#]	36.4 ± 12.7	33.8 ± 3.2
Cortisol (nmol·L ⁻¹)	367.8 ± 98.5	322.8 ± 77.8	347.9 ± 88.6
Testosterona (nmol·L ⁻¹)	19.4 ± 4.4	18.3 ± 4.8	20.6 ± 6.7

Efecto del tiempo: #: $P < 0.05$. CPK: creatin kinasa; PRL: prolactina; GH: hormona del crecimiento; IGF-1: somatomedina.

6.5.5 Relación entre los cambios en el rendimiento en 800 m y el resto de variables

Se calculó la relación entre los cambios en el rendimiento en 800 m y el resto de variables analizadas (mecánicas, hematológicas y hormonales). En cuanto a las variables mecánicas únicamente hemos encontrado una correlación significativa negativa entre los cambios en el rendimiento en 800 m y los cambios en la VMPcc en el ejercicio de sentadilla, entre el T3 y el T5 ($r = -0.65$, $p \leq 0.05$) (**Figura 29**).

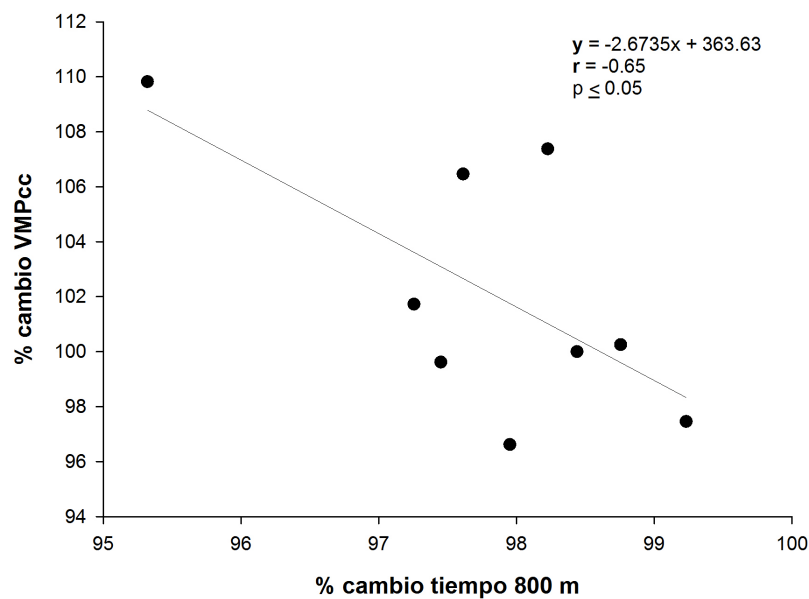


Figura 29. Correlación entre los cambios producidos en el tiempo en 800 m y los cambios en la velocidad media propulsiva con las cargas comunes en el ejercicio de sentadilla completa (VMPcc) entre el T3 y el T5. (n = 9)

En cuanto a las variables hematológicas hemos encontrado correlaciones significativas positiva entre los cambios en el tiempo en 800 m y los cambios en RBC ($r = 0.76$; $p \leq 0.01$) (**Figura 30**), y en Hct ($r = 0.64$; $p < 0.05$) (**Figura 31**), y una correlación próxima a la significación entre los cambios en el tiempo en 800 m y los cambios en la Hb ($r = 0.60$, $p = 0.06$) (**Figura 32**).

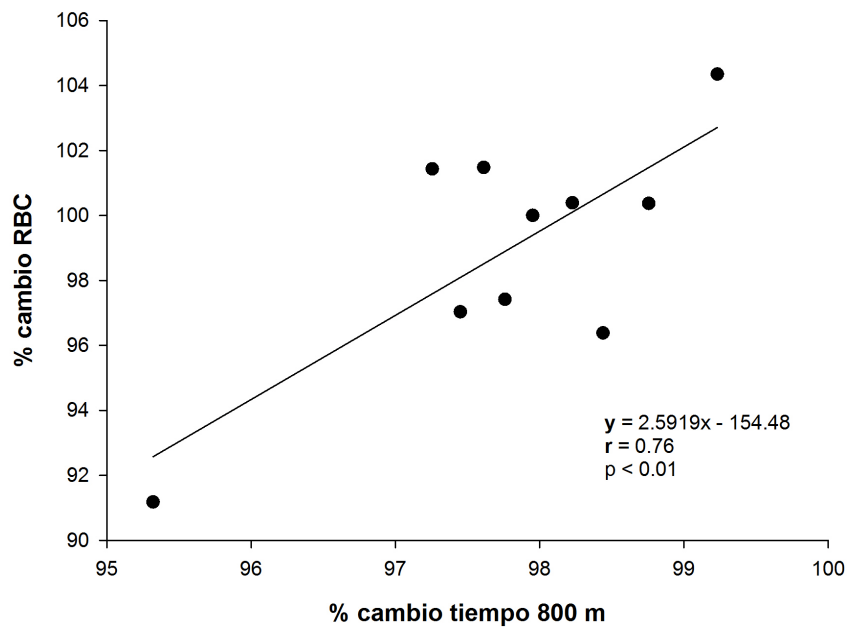


Figura 30. Correlación entre los cambios producidos en el tiempo en 800 m y los cambios en la concentración de glóbulos rojos (RBC) entre el T3 y el T5. ($n = 10$)

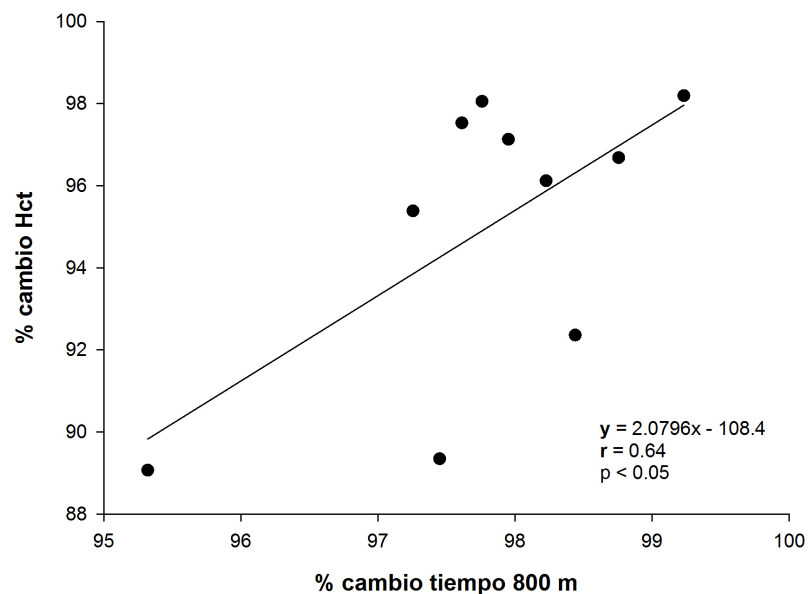


Figura 31. Correlación entre los cambios producidos en el tiempo en 800 m y los cambios en la concentración de hematocrito (Hct) entre el T3 y el T5. ($n = 10$)

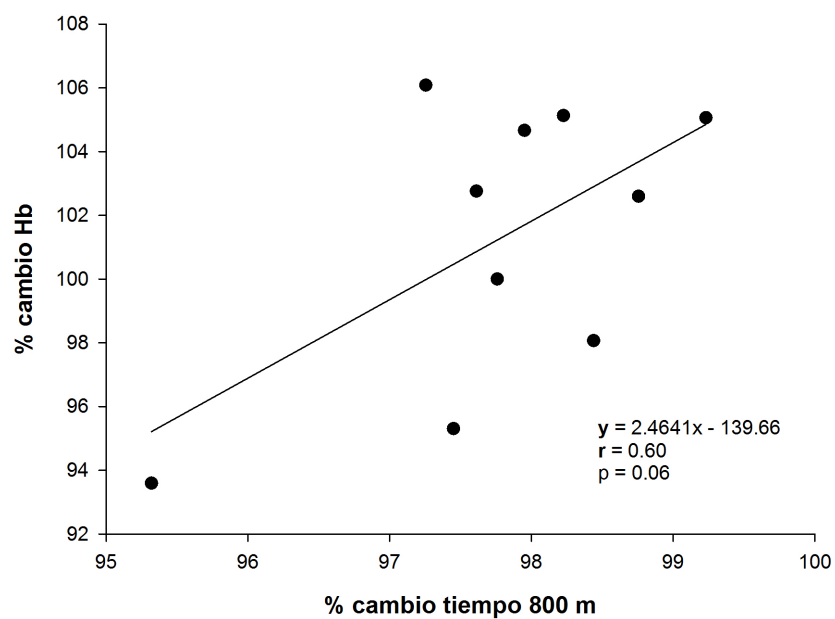


Figura 32. Correlación entre los cambios producidos en el tiempo en 800 m y los cambios en la concentración de hemoglobina (Hb) entre el T3 y el T5. (n = 10)

6.6 Discusión

El principal objetivo de este estudio fue analizar la evolución de la fuerza, la velocidad y el salto vertical y determinadas variables hematológicas, inmunológicas y hormonales a lo largo de una temporada completa de entrenamiento en corredores de 800 m de alto nivel. Se observó un aumento de la fuerza muscular y del rendimiento en velocidad a lo largo de la temporada. Esta mejora se acompañó de una mejora significativa del rendimiento en 800 m del T3 al T5. Del mismo modo, se detectaron cambios significativos en algunas variables hematológicas analizadas (Hct, VCM, CHCM, leucocitos, neutrófilos, monocitos y VPM). Por otro lado, la respuesta hormonal y la CPK no mostraron variaciones significativas durante la temporada, excepto la IGF-1. Para nuestro conocimiento, este es el primer estudio que analiza las respuestas mecánicas, hematológicas y hormonales a largo plazo durante el entrenamiento en atletas de medio fondo.

Las investigaciones recientes indican que una mejora de la fuerza muscular de las piernas podría beneficiar el rendimiento en medio fondo y fondo (Aagaard & Andersen, 2010; Beattie, Kenny, Lyons, & Carson, 2014; Ronnestad & Mujika, 2014; Saunders, Pyne, Telford, & Hawley, 2004; Taipale et al., 2010, 2014). Nuestros hallazgos apoyan esta hipótesis ya que la mejora de la fuerza presentó relación con la mejora en el rendimiento en 800 m.

La mejora que se produjo en el rendimiento específico en 800 m del T3 (115.50 ± 4.77 s) al T5 (113.79 ± 4.14 s), inicialmente, podría estar justificada porque las marcas obtenidas en el T3 que se corresponden con la temporada de invierno se realizaron en una pista cubierta, mientras que las marcas obtenidas en el T5 que se corresponde con la temporada de verano se realizaron al aire libre, existiendo diferencias generalmente favorables a las marcas en pista al aire libre. La pista cubierta tiene la desventaja de que cada vuelta tiene una longitud de 200 m frente a los 400 m que tienen las pistas al aire libre, lo que hace que el radio de las curvas sea mucho menor, y que haya que dar más vueltas para completar los 800 m, no obstante tiene la ventaja frente a las pistas de aire libre de que las marcas no se ven afectadas por las posibles inclemencias meteorológicas que puedan tener lugar cuando se compite al aire libre, como por ejemplo el viento o la lluvia. La posible ventaja de correr en pista de 400 m no está

cuantificada, por lo que no es posible mostrar los resultados con un determinado coeficiente de corrección. Por tanto, teniendo en cuenta que el estudio se hizo con una muestra de 13 atletas y que todos los atletas realizaron las marcas en las mismas condiciones de pista cubierta y pista al aire libre, este posible factor contaminante quedaría controlado, pues beneficiaría o perjudicaría a todos en la misma medida. Por tanto, las relaciones entre los cambios en la prueba de 800 m y en las distintas variables pueden ser consideradas representativas de los verdaderos cambios producidos en el rendimiento físico y fisiológico. De hecho, junto con esta mejora en el rendimiento en 800 m se produjeron también mejoras en el CMJ, VMPcc y el rendimiento en 200 m a lo largo de la temporada. En esta línea, Jiménez-Reyes et al. (2011) encontraron que los mejores rendimientos obtenidos en competición por un grupo de atletas velocistas (100, 200 y 400 m) se alcanzaron durante el mismo periodo en el que dichos atletas obtuvieron sus mejores rendimientos en CMJ, CMJc y VMPcc. Lo mismo ocurrió con los peores rendimientos en competición, que coincidieron con los peores resultados de CMJ, CMJc y VMPcc de la temporada. No obstante, estas pruebas eran de una distancia inferior al 800 m. En relación con nuestros resultados, Hudgins et al. (2013) observaron correlaciones significativas entre la capacidad de salto (tres saltos horizontales consecutivos) y el tiempo en 800 m en atletas. Por otro lado, no concuerdan con nuestros resultados los obtenidos por Balsalobre-Fernández, Tejero-González, & del Campo-Vecino (2015), ya que estos autores no encontraron mejoras significativas en las variables de fuerza durante una temporada completa en atletas de medio fondo y fondo. Los cambios significativos observados en la producción de fuerza en los atletas de nuestro estudio podrían estar explicados por el hecho de que durante la temporada la mayoría de los atletas siguieron programas de entrenamiento de fuerza además del entrenamiento específico de carrera de 800 m. Además, estos programas de entrenamiento de fuerza consistieron principalmente en cargas moderadas y bajas y bajo número de repeticiones. Mientras que en el estudio de Balsalobre-Fernández et al. (2015) los atletas realizaron programas de entrenamiento de fuerza conocidos como “fuerza-resistencia” y caracterizados por múltiples ejercicios y un número elevado de repeticiones por serie (hasta 20 RM) en los ejercicios de media sentadilla, saltos con cargas, extensión de piernas, curl de piernas y gemelos. Las diferencias encontradas en los programas de entrenamiento de fuerza así como las diferencias en la muestra (atletas de 800 m vs. atletas de 1500 m) podrían explicar las discrepancias observadas en la evolución de las variables mecánicas durante la temporada en ambos estudios.

Con respecto a la evolución del rendimiento en las carreras de velocidad, se observó una mejora significativa del rendimiento en 200 m a lo largo de la temporada (T200m: T2: 24.12, T3: 23.89, T4: 23.48, T5: 23.26 s). Este resultado indica que la distancia de 200 m está probablemente más relacionada con el rendimiento en 800 m que otras distancias de carrera de velocidad más cortas, como el sprint en 20 m (T20m: T1: 2.93, T2: 2.92, T3: 2.92, T4: 2.91, T5: 2.88 s). En esta línea, Deason et al. (1991) encontraron correlaciones significativas de mayor valor entre los tiempos obtenidos en 800 m y los tiempos en 300 m que con distancias inferiores. Por lo tanto, las variables de fuerza y carrera analizadas parecen ser importantes en el rendimiento en 800 m.

Con respecto a las variables hematológicas, uno de los principales hallazgos de este estudio es la disminución del Hct en la temporada de aire libre (del T3 al T5). Rietjens et al. (2002) observaron que los valores de Hct tendían a ser más elevados durante la época de entrenamiento que durante la época de competición en triatletas de alto nivel de distancia olímpica. Estos resultados podrían explicarse por las considerables variaciones estacionales que tienen lugar en el Hct (cambio relativo de hasta un 15%), ya que se suelen observar valores inferiores en verano que en invierno, con cambios de un 48% en invierno a un 42% en verano (Mairbäurl, 2013). Los estudios sobre los cambios estacionales del Hct en atletas son escasos pero indican que el Hct podría verse disminuido en otro 1-2% en verano si añadimos el efecto del entrenamiento (Mairbäurl, 2013). Además, otra posible explicación a la disminución del Hct durante la temporada de verano podría ser la expansión del volumen plasmático debido a las repetidas exposiciones al calor, sin influenciar el volumen eritrocitario (Sawka et al., 2000). Junto con el Hct también se ha observado una disminución significativa del VCM a lo largo de la temporada, probablemente también influida por una hemodilución. Por otro lado, la CHCM aumentó de manera significativa a lo largo de la temporada. La CHCM es una variable relacionada con la Hb y el Hct, ya que es la medida de la concentración de Hb en un volumen de glóbulos rojos determinado. En este sentido, un aumento de CHCM podría explicarse por un aumento de la Hb y una disminución del Hct, dando lugar a una mayor capacidad de transporte de O₂, lo que podría favorecer el rendimiento en carrera. No se encontraron diferencias significativas entre los tests realizados a lo largo de la temporada en el resto de variables hematológicas relacionadas con el transporte de O₂ (RBC, Hb, HCM, y RDW). En relación con el comportamiento en estas variables, Rietjens et al. (2002) encontraron una disminución significativa de RBC medios del

periodo preparatorio al periodo competitivo en triatletas de alto nivel. Esta disminución observada en RBC está también en línea con otros estudios en corredores, ciclistas, nadadores y triatletas (Schumacher et al., 2000; O'Toole, Hiller, Roalstad, & Douglas, 1988; Guglielmini et al., 1989). Shumacher et al. (2000) observaron disminuciones significativas de Hb, Htc y RBC en ciclistas masculinos cuando se aumentó la carga de entrenamiento. La Hb es una de las variables fisiológicas más estudiadas en relación a las adaptaciones producidas por el entrenamiento de resistencia. En este estudio la Hb no mostró cambios significativos a lo largo de la temporada ($p = 0.2$). Igualmente, otros estudios realizados con entrenamientos a largo plazo (4-12 meses) mostraron ningunos o muy pequeños cambios en la Hb (Ray, Cureton, & Ouzts, 1990; Green et al., 1991); sin embargo, un estudio longitudinal sobre deportistas recreacionales reveló un incremento de la Hb del 6% tras 9 meses de entrenamiento de resistencia (Schmidt & Prommer, 2008), sugiriendo que los cambios en la Hb y RBC inducidos por el entrenamiento son lentos y que hacen falta varios años de entrenamiento para observar aumentos pronunciados. El hecho de que la muestra de nuestro estudio estuviera compuesta por corredores de 800 m de alto nivel con elevados valores iniciales de Hb ($15.11 \pm 0.75 \text{ g}\cdot\text{dl}^{-1}$) podría explicar las pequeñas modificaciones no significativas ocurridas en esta variable a lo largo de la temporada. Por tanto, el comportamiento observado por estas variables puede considerarse normal y semejante a los observados en otros estudios.

En relación a la serie blanca, mientras que por un lado periodos agudos de ejercicio han sido los responsables de un aumento del estado inflamatorio (Kakanis et al., 2010), por otro lado, altos niveles de condición física se han relacionado con una disminución de la inflamación sistémica, y el entrenamiento aeróbico ha mostrado disminuciones en el número de leucocitos o glóbulos blancos (Michishita, Shono, Inoue, Tsuruta, & Node, 2010) y su asociación con marcadores inflamatorios (De Gonzalo-Calvo et al., 2012). En nuestro estudio observamos una disminución significativa de los leucocitos o glóbulos blancos, neutrófilos y monocitos del T3 al T5, es decir, del periodo competitivo de pista cubierta al periodo competitivo de aire libre, sugiriendo una depresión del sistema inmune al final de temporada. Varios autores han encontrado valores inferiores de glóbulos blancos o leucocitos en deportes de resistencia comparado con deportes de equipo o deportes más anaeróbicos (Horn, Pyne, Hopkins, & Barnes, 2010; Parisotto et al., 2003; Telford & Cunningham, 1991). Del mismo modo, se ha

observado una neutropenia o disminución del número de neutrófilos en diferentes grupos de deportistas que incluyen corredores de resistencia, ciclistas y triatletas (Bain, Phillips, Thompson, Richardson, & Gabriel, 2000; Parisotto et al., 2003; Horn et al., 2010). Los resultados de nuestro estudio están en relación con esta neutropenia que parece ocurrir con relativa frecuencia en deportistas de resistencia, aunque no podemos considerar que la prueba de 800 m es una disciplina únicamente de resistencia, ya que a pesar de la elevada contribución del metabolismo aeróbico se combina con esfuerzos cortos de alta intensidad o anaeróbicos, y, según el **Estudio II** de esta Tesis Doctoral, se destaca también la importancia de la fuerza muscular. Esta respuesta depresora del sistema inmune observada en nuestro estudio podría ser debido al aumento de la intensidad y especificidad de los ejercicios realizados durante el periodo competitivo de aire libre, lo que podría a su vez aumentar el riesgo de lesión, enfermedad o infección, ya que se ha sugerido que, en los atletas de elite con exceso de entrenamiento, la mayor susceptibilidad a las infecciones podría deberse a una inmunosupresión más acusada y duradera provocada por la acumulación de un exceso de carga de trabajo (Scott, 2002). Otra posible explicación a la disminución observada en algunas variables de la serie blanca podría estar relacionada con una expansión del volumen plasmático que tiene lugar en verano debido a la exposición al calor (Convertino, 1991). Otros estudios han encontrado también una disminución en el número de linfocitos en ciclistas (Lesesve, Guinot, Andolfatto, Bene, & Dine, 2000) y canoistas (Horn et al., 2010). En nuestro estudio sin embargo, los valores de linfocitos se mantuvieron estables a lo largo de la temporada. Los monocitos son potentes células de defensa que protegen el cuerpo contra los invasores extraños como bacterias y virus dañinos. Cuando hay una disminución del número de monocitos en la sangre, el cuerpo es más susceptible a las enfermedades. En el estudio de Horn et al. (2010) se observó una disminución en el número de monocitos del 2% en aquellos deportes que habían mostrado una disminución en el número de neutrófilos. Esto parece tener sentido si tenemos en cuenta que tanto los monocitos como los neutrófilos tienen un precursor común en la médula ósea. Sin embargo, se ha sugerido que una disminución en los valores de neutrófilos y monocitos en triatletas es debido principalmente a las adaptaciones fisiológicas producidas por el entrenamiento más que a una respuesta patológica o depresión del sistema inmune (Díaz, Montalvo, & Banfi, 2011). Por tanto, los cambios significativos en las concentraciones de leucocitos o glóbulos blancos, neutrófilos y monocitos observados en nuestro estudio podrían considerarse propios del tipo de esfuerzo

realizado y no necesariamente como una consecuencia de un entrenamiento excesivo o un estado de fatiga crónica provocada por el mismo.

Por otro lado y con respecto a la función plaquetaria, encontramos un aumento significativo del VPM durante la temporada. En varios estudios se ha observado una activación de las plaquetas tras un ejercicio agudo e intenso (Kestin et al., 1993; Coppola et al., 2005; Whittaker, Linden, & Coffey, 2013). No obstante, se ha encontrado que el entrenamiento físico regular provoca como adaptación una disminución del número de plaquetas circulantes, así como una disminución de amplitud de la distribución plaquetaria. La consecuencia de este proceso es el descenso del platelecrito (producto del número de plaquetas por el volumen plaquetar medio) (López-Chicharro & Fernández-Vaquero, 2006). Aunque en nuestro estudio se produjo un aumento significativo del VPM, los valores (11.68 ± 1.15 fl) se mantienen dentro del rango de normalidad (9 – 13 fl). Un elevado VPM indicaría que la sangre tiene mayor tendencia a coagular y por lo tanto aumenta el riesgo de trombosis, accidente cerebrovascular y otros problemas cardiovasculares (Chu et al., 2009). Se ha encontrado un incremento de la activación plaquetaria más acentuado en actividades anaeróbicas que en actividades aeróbicas, habiéndose relacionado la acidosis metabólica desarrollada en actividades físicas intensas con la liberación del factor plaquetario-4 y con la activación del sistema simpático adrenal. Además, factores mecánicos y microlesiones endoteliales se han considerado como causas de la activación plaquetaria como respuesta al ejercicio (López-Chicharro & Fernández-Vaquero, 2006). Aunque estas respuestas son de carácter agudo, el hecho de que los entrenamientos fueron más intensos y específicos durante la época de competición de aire libre, con un incremento en las sesiones de tipo anaeróbicas, podría haber sido la causa de ese aumento significativo observado en el VPM.

Con respecto a la respuesta hormonal, la IGF-1 mostró una disminución significativa a lo largo de la temporada. Los estudios en los que se han analizado los efectos crónicos del ejercicio en la IGF-1 circulante han dado lugar a resultados contradictorios. En algunos estudios transversales se han encontrado asociaciones positivas entre el $VO_{2\text{máx}}$ y los niveles de IGF-1 (Eliakim et al., 1996; Poehlman & Copeland, 1990; Poehlman et al., 1994), sugiriendo que una mejora en la condición física podría resultar en unos niveles superiores de IGF-1 (Frystik, 2010). Por el contrario, otros estudios han

mostrado una disminución en los niveles de IGF-1 tras varias semanas de entrenamiento a pesar de una mejora en el rendimiento físico (fuerza muscular y/o $VO_{2m\acute{a}x}$) (Eliakim et al., 1996; 1998). Estos resultados estarían en línea con los nuestros, ya que se produjo una disminución significativa de la IGF-1 a lo largo de la temporada junto con una mejora en el rendimiento físico de los atletas (fuerza muscular y rendimiento específico de 800 m).

El resto de las variables hormonales analizadas no han mostrado cambios significativos. La PRL y la GH comparten la misma secuencia y actividades en el sistema inmune (Gala, 1991) y son, por tanto, factores importantes en la recuperación del ejercicio que provoca alteraciones musculares. En esta línea, Smallridge, Whorton, Burman, & Fergusson (1985) encontraron que la respuesta de la PRL plasmática estimulada por la liberación de la hormona tirotrópica aumentó en corredores de resistencia y maratonianos en comparación con un grupo control de sedentarios. En nuestro estudio, a pesar de que los cambios no fueron significativos se produjo un ligero aumento de la PRL a lo largo de la temporada. Por otro lado, el cortisol y la testosterona son hormonas que se utilizan como indicadores del estrés psicofisiológico durante el ejercicio. En nuestro estudio, el cortisol y la testosterona no mostraron cambios significativos a pesar de los cambios que se dieron en la carga de entrenamiento durante los diferentes periodos de entrenamiento a lo largo de la temporada. Similar a este resultado, otros autores tampoco han encontrado cambios en el cortisol durante la temporada en atletas (Guilhem et al., 2015). No obstante, en nuestro estudio el cortisol mostró un aumento próximo a la significación al final de la temporada ($p = 0.09$), lo que estaría en línea con los resultados de un estudio con atletas corredores de 1500 m, en el que los autores encontraron un aumento significativo del cortisol al final de la temporada durante el periodo competitivo (Balsalobre-Fernández et al., 2015). Ese aumento del cortisol en nuestro estudio próximo a la significación al final de la temporada podría ser debido al aumento de la intensidad y especificidad de las sesiones de entrenamiento, lo que indicaría un mayor estrés en ese periodo de la temporada. Guilhem et al. (2015) analizaron las hormonas en saliva en atletas de diferentes disciplinas (velocistas, saltadores, y corredores de medio-fondo) durante un periodo de 4.5 meses que incluía un periodo preparatorio de 3 meses y un periodo precompetitivo de 1.5 meses. Estos autores encontraron un aumento significativo de la testosterona en la semana 5 con respecto a la semana 2, 3 y 4 del periodo precompetitivo, lo que podría explicarse por

una disminución de la carga de entrenamiento durante el periodo precompetitivo. Igualmente, Taipale et al. (2014) encontraron aumentos significativos de la testosterona en corredores recreacionales de resistencia entre la semana 0 y 12 de entrenamiento de fuerza máxima y explosiva, seguido de una disminución a los valores iniciales entre la semana 12 y 16, sin embargo el cortisol permaneció inalterado. Contrariamente a nuestro estudio, en los estudios que acabamos de mencionar los valores de testosterona y de cortisol se obtuvieron a través de marcadores en saliva, lo que podría explicar algunas de las diferencias en los resultados. Aunque en nuestro estudio la testosterona no cambió de manera significativa, se puede observar un ligero aumento que quizás también esté en relación con una disminución del volumen de entrenamiento al final de la temporada.

Con respecto a la respuesta bioquímica, que se analizó a través de los marcadores del daño muscular (CPK), no hemos encontrado cambios significativos durante la temporada. En Guilhem et al. (2015) la CPK aumentó significativamente del periodo preparatorio al periodo precompetitivo en atletas de diferentes disciplinas (velocistas, saltadores y corredores de medio fondo), debido posiblemente a la mayor intensidad y especificidad de los ejercicios durante este periodo, lo que podría haber aumentado el daño muscular inducido por el ejercicio (Fiorentino, Rehorn, Chumanov, Thelen, & Blemker, 2014). No obstante, se ha estudiado que los niveles de CPK podrían estar influenciados por otros factores distintos del nivel de daño muscular, como por ejemplo, el traumatismo del tejido blando, o la hemoconcentración o hemodilución inducida por el ejercicio (Beakley et al., 2012). En nuestro estudio se produjo un ligero descenso de la CPK del T3 al T5, que aunque no fue significativo, podría interpretarse como algo positivo para el rendimiento de los atletas.

En cuanto al análisis de las correlaciones entre los cambios, se encontró una correlación significativa entre los cambios en el rendimiento en 800 m y los cambios en la VMPcc en el ejercicio de sentadilla entre el T3 y el T5 ($r = -0.65$, $p < 0.05$). Este resultado nos sugiere que existen unos mecanismos responsables de la mejora en el rendimiento en 800 m que son en parte comunes a los mecanismos responsables de la mejora de la fuerza muscular de las piernas. Por otro lado, las correlaciones positivas encontradas entre los cambios en el rendimiento en 800 m (menor tiempo) y los cambios en las variables hematológicas de la serie roja: RBC ($r = 0.75$, $p \leq 0.01$), Hct ($r = 0.64$, $p <$

0.05) y Hb ($r = 0.60$, $p = 0.06$) no coinciden con la **Hipótesis 2** previamente formulada (véase apartado 6.3). Estos resultados nos indican que una disminución del tiempo en 800 m, o, lo que es lo mismo, una mejora del rendimiento en 800 m se corresponde con una disminución de la concentración de glóbulos rojos, Hct o Hb. Es decir, que los atletas que más mejoraron su rendimiento en 800 m tendían a disminuir las concentraciones de RBC, Hct y Hb. Este resultado podría parecer contradictorio si consideramos la clara evidencia científica que existe en cuanto a la relación entre el rendimiento en resistencia y la capacidad de transporte de O_2 (Heinicke et al., 2001). No obstante, este hecho aparentemente contradictorio podría venir explicado por lo que hemos indicado anteriormente con respecto a las adaptaciones hematológicas que se producen con el cambio de estación de invierno a verano, encontrando disminuciones de hasta un 15% en el Hct, que podría haberse visto disminuido en otro 1-2% en verano si añadimos el efecto del entrenamiento (Mairbäurl, 2013). Es decir, según los resultados de algunos estudios y del nuestro propio, la mejora del rendimiento en 800 m podría producirse a pesar de un efecto negativo sobre algunos factores relacionados con el transporte y consumo de oxígeno, lo cual podría poner de manifiesto que los factores anaeróbicos, relacionados con la capacidad de los deportistas para aplicar fuerza en la unidad de tiempo, podrían jugar también un papel relevante en este tipo de rendimiento.

6.7 Conclusiones

En conclusión, los hallazgos de este estudio indican que los cambios ocurridos en las variables mecánicas, hematológicas y hormonales analizadas reflejan una respuesta compleja al entrenamiento durante la temporada completa de atletismo en atletas de 800 m de alto nivel. Se observó un aumento general del rendimiento en las variables de fuerza muscular de las piernas y velocidad (CMJ, CMJc, VMPcc, T20m y T200m) durante la temporada. Esta mejora en las variables de fuerza y velocidad estuvieron acompañadas de una mejora en el rendimiento específico en la prueba de 800 m. Al mismo tiempo, las disminuciones significativas observadas en determinadas variables hematológicas de la serie roja (Hct, VCM, CHCM) del T2 al T3, y la relación positiva encontrada entre los cambios de éstas y el tiempo en 800 m, así como las disminuciones en la serie blanca (leucocitos, neutrófilos, monocitos) y plaquetas (VPM), indican que la mejora del rendimiento en 800 m podría producirse a pesar de un efecto negativo sobre algunos factores relacionados con la capacidad de transporte de oxígeno y una depresión del sistema inmune, lo cual podría poner de manifiesto que los factores anaeróbicos, relacionados con la capacidad de los deportistas para aplicar fuerza en la unidad de tiempo, podrían jugar también un papel relevante en este tipo de rendimiento. Por otro lado, la respuesta hormonal y bioquímica permaneció estable durante la temporada excepto para la IGF-1. Los resultados de este estudio indican que las adaptaciones neuromusculares responsables de la mejora de la fuerza muscular de las piernas y la carrera de velocidad tienden a favorecer el rendimiento en la prueba de 800 m, lo que refleja la importancia de estimular el desarrollo de la fuerza muscular en atletas corredores de 800 m.

6.8 Aplicaciones prácticas

Nuestros resultados sugieren que el control de las respuestas mecánica, hematológica y hormonal en atletas corredores de 800 m podría ser de gran utilidad y ayuda para los entrenadores y atletas con la intención de regular la carga de entrenamiento a lo largo de la temporada, además de servir para detectar posibles estados de sobrecarga o excesiva fatiga en los atletas. Por tanto, este tipo de control debería ser el camino a seguir por los técnicos deportivos si se proponen aproximarse a la búsqueda de la carga que más se ajuste a las necesidades individuales y generales de esta disciplina y otras semejantes, así como el medio más apropiado para prevenir estados físicos no deseados que pudieran afectar al rendimiento en atletas de alto nivel.

7. ESTUDIO IV



Efecto de un entrenamiento de fuerza en el rendimiento físico y en la respuesta hormonal en atletas de 800 m de alto nivel durante una temporada atlética

7. ESTUDIO IV. Efecto de un entrenamiento de fuerza en el rendimiento físico y en la respuesta hormonal en atletas de 800 m de alto nivel durante una temporada atlética

7.1 Planteamiento del Problema

La prueba de 800 m es una disciplina de medio fondo, cuyo entrenamiento se basa en general en la programación de sesiones de entrenamiento de carrera (con esfuerzos de tipo aeróbico y anaeróbico) y además de sesiones de entrenamiento de fuerza. A pesar de la extensa bibliografía científica que confirma los efectos positivos del entrenamiento de fuerza sobre el rendimiento en resistencia (Mikkola et al., 2007; Taipale et al., 2010, 2014), en la mayoría de los estudios se han analizado estos efectos sobre el rendimiento en resistencia en pruebas superiores a 3 km, con periodos de intervención inferiores a 8 semanas y sobre todo en deportistas recreacionales o de nivel medio. Sin embargo, no conocemos estudios que analicen el efecto del entrenamiento de fuerza a largo plazo en el rendimiento específico de 800 m en atletas de alto nivel. Por consiguiente, debido a la falta de conocimiento que parece existir en torno a esta cuestión y a que disponemos de los medios y un grupo de deportistas de alto nivel a los que aplicar un tratamiento, se dan las condiciones necesarias para justificar la formulación de uno o varios problemas de investigación. En nuestro caso, los problemas que nos planteamos son los siguientes:

- ¿Cuáles son los efectos de un entrenamiento de fuerza de 25 semanas en la condición física y rendimiento en 800 m en un grupo de atletas de alto nivel?
- ¿Cuáles son los efectos de un entrenamiento de fuerza de 25 semanas en la respuesta hormonal en un grupo de atletas de 800 m de alto nivel?
- ¿Existe relación entre los cambios en las diferentes variables de fuerza, de carrera y hormonales y los cambios en el rendimiento en 800 m en el grupo que realizó el entrenamiento de fuerza?

7.2 Objetivos de la Investigación

Una vez analizado el marco teórico de referencia y definidos los problemas objeto de estudio, de los mismos se derivan los objetivos de esta investigación, que fueron los siguientes:

- Analizar el efecto de un entrenamiento de fuerza aplicado durante 25 semanas sobre el rendimiento en 800 m y en las propias variables de fuerza en atletas de alto nivel.
- Analizar el efecto de un entrenamiento de fuerza aplicado durante 25 semanas sobre la respuesta hormonal en atletas de alto nivel.

7.3 Hipótesis

Al revisar los trabajos que han analizado el efecto del entrenamiento de fuerza sobre la capacidad de resistencia, podemos comprobar que en la mayoría de los estudios se han encontrado efectos positivos del entrenamiento de fuerza sobre el rendimiento en resistencia y en las propias variables de fuerza (Mikkola et al., 2007; Taipale et al., 2010, 2014). En este sentido, los entrenamientos, aunque mal llamados, de fuerza de tipo “fuerza máxima” o con cargas altas y de tipo “fuerza explosiva” o de cargas ligeras-medias, son los que han dado mejores resultados en el rendimiento en resistencia, en comparación con entrenamientos de fuerza de tipo “fuerza-resistencia”. En cuanto a la respuesta hormonal, en investigaciones previas se ha encontrado que el entrenamiento concurrente de fuerza y resistencia puede provocar un aumento en los niveles de cortisol (Bell, Syrotuik, Socha, Maclean, & Quinney, 1997; Kraemer et al., 1995; Jones, Howatson, Russell, & French, 2016). Por otro lado, las adaptaciones hormonales a largo plazo del entrenamiento de resistencia se han caracterizado por una disminución o no cambio en las concentraciones basales de las hormonas (Consitt et al., 2002). Por lo tanto, teniendo en cuenta que el entrenamiento de fuerza que se va a proponer consiste en un entrenamiento con cargas ligeras (40-55% RM) y con un número de series y repeticiones bajo pero realizado a la máxima velocidad de ejecución posible, es probable que un entrenamiento de fuerza realizado con cargas que permitan una alta velocidad de ejecución y con escasa fatiga mejore la fuerza muscular sin alteraciones significativas en las concentraciones basales de hormonas. Por tanto, se formularon las siguientes hipótesis:

Hipótesis 1: Un entrenamiento de fuerza con cargas ligeras y escasa fatiga en la serie, realizado a la máxima velocidad posible, produce mejoras en el rendimiento físico, y estas mejoras presentan relación positiva con el rendimiento específico en la prueba de 800 m en atletas de alto nivel durante 25 semanas.

Hipótesis 2: Un entrenamiento de fuerza con cargas ligeras y escasa fatiga en la serie, realizado a la máxima velocidad posible, no produce cambios significativos en las concentraciones basales de hormonas en atletas de 800 m de alto nivel.

7.4 Metodología

7.4.1 Tipo de investigación

Dadas las características de los datos, el estudio es una investigación cuantitativa. Por el grado de manipulación de las variables y los objetivos del estudio, la investigación es experimental. Por el enfoque del análisis de los datos, la investigación es inferencial y correlacional. El trabajo es de carácter longitudinal ya que estudiamos la evolución de la relación entre los cambios mecánicos y el rendimiento a través del tiempo.

7.4.2 Diseño del estudio

Se llevó a cabo un diseño experimental para analizar los efectos de un programa de entrenamiento de fuerza durante 25 semanas sobre el rendimiento físico y deportivo en atletas de 800 m de alto nivel. La muestra se dividió en dos grupos, un grupo siguió el programa de entrenamiento de fuerza propuesto durante 25 semanas (GF, $n = 6$), el cual se dividió en dos ciclos de 11 y 14 semanas, mientras que otro grupo se tomó como grupo control, el cual siguió su entrenamiento de fuerza habitual (GC, $n = 7$). El entrenamiento de fuerza del GF consistió en un entrenamiento con cargas bajas (40-55% de 1RM) y bajo volumen (2-3 series de 4-6 repeticiones) en el ejercicio de sentadilla completa, combinado con entrenamiento pliométrico o de saltos y carrera resistida. El GC siguió su entrenamiento de fuerza habitual, tradicionalmente considerado como un entrenamiento de tipo fuerza-resistencia y utilizado por muchos atletas especialistas en pruebas de resistencia. Este entrenamiento no seguía una estructura clara y era de tipo circuito. Se realizaron 3 tests a lo largo del período de entrenamiento, uno antes del entrenamiento (T1), otro a las 11 semanas durante el programa de entrenamiento (T2) y el último al finalizar el programa de entrenamiento de fuerza (T3). Estos tests consistieron en: test de carrera de 20 y 200 m, tests de fuerza: CMJ, CMJc, sentadilla completa (SQ) y análisis de hormonas. Se tomó también la marca realizada en 800 m en competición oficial como referencia para los análisis posteriores. El T1 se realizó en octubre, al comienzo de la temporada atlética, el T2 se realizó en febrero, durante la temporada de competición de pista cubierta y el T3 se realizó en junio, durante la temporada de competición de aire libre.

7.4.3 Muestra

Misma muestra que para el **Estudio II** y **III**, aunque se dividieron en dos grupos, un grupo experimental al que se le aplicó un entrenamiento de fuerza (GF) y un grupo control (GC) (**Tabla 16**).

Tabla 16. Características iniciales de los sujetos del **Estudio IV** (medias \pm dt) (n = 13)

Grupo	EDAD (años)	ALTURA(cm)	PESO CORPORAL (Kg)
GF (n = 6)	22.0 \pm 5.5	178.7 \pm 3.9	64.8 \pm 5.5
GC (n = 7)	22.6 \pm 5.9	172.0 \pm 5.9	62.2 \pm 4.8

GF: Grupo que realizó el entrenamiento de fuerza propuesto; GC: Grupo control.

7.4.4 Variables objeto de estudio

Variables dependientes

Variables mecánicas de fuerza y carrera

- Tiempo en carrera de 20 m (s) (T20m)
- Tiempo en carrera de 200 m (s) (T200m)
- Tiempo en carrera de 800 m (s) (T800m)
- Altura en el salto vertical con contramovimiento (CMJ) (cm)
- Carga con la que se alcanza una altura en salto vertical de 20 cm (CMJc) (kg)
- Carga desplazada a la velocidad de $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ($V_{1\text{carga}}$) de la fase propulsiva en el ejercicio de sentadilla completa (kg)
- Producción de fuerza en la unidad de tiempo (RFD) de los flexores plantares en el ejercicio de flexión plantar ($\text{N}\cdot\text{s}^{-1}$)

Variables hormonales

- Testosterona
- Cortisol
- Hormona del crecimiento (GH)
- Somatomedina o IGF-1

Variables independientes

- La carga de entrenamiento para el grupo que realizó el entrenamiento de fuerza propuesto (**Tabla 17**)

Control de Variables Extrañas

Al igual que en el **Estudio I, II y III**, se trató de tener control sobre posibles variables contaminantes que pudieran afectar a los resultados. El control sobre variables como la validez de los instrumentos de medida, la ejecución técnica y cumplimiento de los protocolos y la situación ambiental durante la sesión de trabajo han sido descritos durante la metodología del **Estudio I**.

7.4.5 Evaluaciones, tests físicos, analíticas e instrumentos de medida

Para la evaluación de las variables mecánicas de fuerza (salto CMJ, CMJc y test de sentadilla completa), carrera y las variables hormonales se utilizaron los mismos protocolos e instrumentos que los ya descritos anteriormente para el **Estudio II y III**, y además:

Test de flexión plantar o producción de fuerza en la unidad de tiempo (RFD)

Este test se realizó en una máquina tipo *Smith* (Multipower Fitness Line, Murcia, España) utilizando una plataforma de fuerza (Isonet, JLML, España). Los atletas realizaron 2x5 repeticiones de una contracción máxima concéntrica en el ejercicio de flexión plantar con el 80% de su peso corporal. Para la ejecución los atletas se colocaron de pie con las rodillas y las caderas completamente extendidas y con la barra reposando sobre los hombros a nivel del acromion. Desde esta posición se realizaba una flexión plantar (activación (acortamiento) brusca de los gemelos) elevando los talones lo más rápido posible y sin flexionar las rodillas. La producción de fuerza en la unidad de tiempo (RFD) se calculó en intervalos de 50 ms de la curva fuerza-tiempo. El valor medio de las 10 repeticiones (5 en la primera serie y 5 en la segunda serie) realizadas se utilizó para los análisis.



Figura 33. Imagen de la realización del test de flexión plantar utilizando la plataforma de fuerza *Isonet* (JLML, España) en una máquina tipo *Smith Multipower* (Murcia, España).

7.4.6 Protocolo de entrenamiento de fuerza

El entrenamiento de fuerza seguido por el GF consistió en los siguientes ejercicios: sentadilla completa, salto con cargas, salto vertical con contramovimiento y segundos de triple. El periodo de entrenamiento fue de 25 semanas, divididas en dos ciclos de 11 y 14 semanas, y se realizaron 2 sesiones por semana de entrenamiento de fuerza. En la **Tabla 17** se muestra con detalle las características del entrenamiento seguido por GF. La intensidad de la carga en el ejercicio de sentadilla completa y salto con cargas se ajustó en función de los resultados obtenidos en cada test precedente. La intensidad relativa del ejercicio de sentadilla completa aumentó progresivamente desde el 40 al 55% de 1RM en el primer ciclo de entrenamiento y desde el 45 al 55% de 1RM en el segundo ciclo de entrenamiento. El volumen de entrenamiento fue siempre bajo (2-3 series de 4-6 repeticiones por serie) y cada repetición se realizaba a la máxima velocidad posible. El GC siguió un entrenamiento de numerosas repeticiones con cargas ligeras, del tipo de entrenamiento llamado habitualmente como de “fuerza-resistencia”, con una frecuencia de 1 sesión por semana. Este entrenamiento se caracterizó por un elevado número de repeticiones no realizadas a la máxima velocidad y sin progresión de

carga (<40% de 1RM). Los principales ejercicios realizados por este grupo fueron: media-sentadilla, fondos con barra, salto vertical con cargas, saltos, y cuádriceps, isquiotibiales y gemelos en máquina.

Tabla 17. Características del entrenamiento de fuerza de GF.

		Ciclo 1 (T1 al T2)	Ciclo 2 (T2 al T3)
Semanas		11	14
Sesiones		19-22	25-28
SQ	%1RM	40-55	45-55
	Series	2-3	2-3
	Rep	4-6	4-6
CMJc	%carga 20cm	50-70	50-70
	Series	3-4	3-4
	Rep	4-5	4-5
Arrastres	Distancia (m)	20-40	20-40
	Series	3-5	3-5
	Carga (%Pc)	10	10
Segundos de triple	Nº de zancadas	12-16	12-16
	Series	3-5	3-5

GF: Grupo de fuerza; T1: test 1; T2: test 2; T3: test 3; SQ: ejercicio de sentadilla completa; JS: ejercicio de salto con cargas; %1RM: porcentaje de una repetición máxima; Rep: n° de repeticiones; %carga 20cm: porcentaje de la carga de 20 cm; %Pc: porcentaje del peso corporal.

7.4.7 Análisis estadístico

Para la descripción de los resultados se utilizaron los cálculos clásicos de tendencia central: medias y de variabilidad: desviaciones típicas. Se analizó la fiabilidad de las medidas aplicando el mismo procedimiento que en el **Estudio III**. Para verificar la normalidad de los datos se realizó el test de Shapiro-Wilk. Para analizar los datos se realizó un ANOVA de medidas repetidas 2x3, con un factor para comparar las diferencias entre grupos y otro para comparar las diferencias entre los tres tests realizados, aplicando la corrección o ajuste de Bonferroni. La significatividad estadística se estableció cuando la probabilidad de error fue igual o menor que el 5% ($p \leq 0.05$). Todos los análisis estadísticos se realizaron con el programa SPSS para Mac (versión 20.0.0). Además de este análisis de hipótesis nula, se realizó un análisis basado en la magnitud de cambio (Hopkins, 2006; Hopkins et al., 2009). Las diferencias estandarizadas o tamaños del efecto (TE) para los cambios en las variables dependientes

entre grupos (GF vs. GC) se calcularon usando los valores de la DT del Test 1 combinada de ambos grupos (Cohen, 1988). Para las comparaciones entre grupos, se calculó la probabilidad de que los valores reales (desconocido) para cada grupo experimental fuesen *beneficioso/mejor* [mayor que el mínimo cambio apreciable ($0.2 \times$ DT entre-sujetos del Test 1, basado en el principio de TE de Cohen (Cohen, 1988))], *no claro*, *perjudicial/peor* para el rendimiento. La probabilidad cuantitativa de que un efecto fuese *beneficioso/mejor* o *perjudicial/peor* se calculó cualitativamente como sigue: <1%, casi seguro que no; 1-5%, muy poco probable; 5-25%, poco probable; 25-75%, posible; 75-95%, probable; 95-99%, muy probable; y >99%, casi seguro. Si las probabilidades de tener un efecto *beneficioso/mejor* o *perjudicial/peor* fueron ambas >10%, la verdadera diferencia fue evaluada como *no clara* (Hopkins, et al., 2009).

7.5 Resultados

En las **Tablas 18** y **19** se presentan los valores medios y la desviación típica de las distintas variables de fuerza, carrera y variables hormonales analizadas. En las **Figuras 34** y **35** se presentan los tamaños del efecto intra-grupo y entre grupos de las variables de fuerza y carrera para los diferentes tests, así como las probabilidades de un mejor efecto (T1 vs. T2, T1 vs. T3, T2 vs. T3). No se encontraron diferencias significativas entre grupos en el T1 en ninguna variable excepto en la RFD, a favor del grupo control.

Tabla 18. Cambios en las variables de fuerza y carrera durante la temporada (T1, T2, T3) en GF y GC.

	GF			GC		
	T1	T2	T3	T1	T2	T3
T20m (s)	2.91 ± 0.12	2.91 ± 0.14	2.87 ± 0.08	2.95 ± 0.08	2.93 ± 0.07	2.90 ± 0.06
T200m (s)	23.78 ± 1.98	23.78 ± 1.98	22.90 ± 1.18 ^b		23.70 ± 0.44	23.48 ± 0.59
T800m (s)	112.79 ± 6.42	112.79 ± 6.42	111.35 ± 5.79 ^{bb}		117.97 ± 1.97	116.11 ± 1.17 ^{bb}
CMJ (cm)	41.9 ± 6.9	42.4 ± 9.1	45.1 ± 7.2 ^{aabb}	38.3 ± 3.2	38.7 ± 4.7	40.1 ± 3.7
CMJc (kg)	29.2 ± 18.9	38.3 ± 18.6	40.0 ± 19.5	30.7 ± 12.4	30.7 ± 11.7	30.0 ± 10.0
V ₁ carga (kg)	52.4 ± 15.5	56.7 ± 15.5	59.4 ± 10.4 ^a	55.2 ± 13.5	54.5 ± 11.7	53.60 ± 11.7
RFD (N·s ⁻¹)	5405.7 ± 1213.5 [#]	6495.6 ± 1270.5	6049.6 ± 1128.2 [#]	8497.4 ± 1910.3	8204.5 ± 1894.0	8083.2 ± 1522.9

GF: Grupo de fuerza (n = 6); GC: Grupo control (n = 7); T1: test 1; T2: test 2; T3: test 3; T20m: tiempo en 20 m; T200m: tiempo en 200 m; T800m: tiempo en 800 m; CMJ: salto vertical con contramovimiento; CMJc: salto con la carga de 20 cm; V₁carga: carga desplazada a la velocidad de 1 m·s⁻¹ en el ejercicio de sentadilla completa; RFD: producción de fuerza en la unidad de tiempo (50 ms) en el ejercicio de flexión plantar.
 Diferencias significativas intra-grupo: ^a: p < 0.05; ^{aa}: p < 0.01 (respecto al T1); ^b: p < 0.05; ^{bb}: p < 0.01 (respecto al T2)
 Diferencias significativas entre grupos con respecto al grupo control: [#]: p < 0.05

Tabla 19. Cambios en las variables hormonales durante la temporada (T1, T2, T3) en GF y GC.

	GF			GC		
	T1	T2	T3	T1	T2	T3
Testosterona (nmol·L ⁻¹)	5.3 ± 1.3	5.2 ± 1.1	6.0 ± 1.9	6.1 ± 1.2	5.6 ± 1.7	6.3 ± 2.0
Cortisol (nmol·L ⁻¹)	12.8 ± 3.3	12.4 ± 2.8	12.6 ± 3.1	13.1 ± 3.8	11.0 ± 3.2	12.9 ± 3.9
IGF-1 (nmol·L ⁻¹)	309.2 ± 117.0	317.3 ± 125.0	291.7 ± 126.2 ^b	266.0 ± 84.5	245.0 ± 59.4	239.5 ± 71.6
GH (µg·L ⁻¹)	0.28 ± 0.26	0.22 ± 0.25	0.24 ± 0.20	1.27 ± 1.19	1.25 ± 2.44	0.92 ± 1.95

GF: Grupo de fuerza (n = 6); GC: Grupo control (n = 7); T1: test 1; T2: test 2; T3: test 3; IGF-1: somatomedina; GH: hormona del crecimiento.
 Diferencias significativas intra-grupo: ^b: p < 0.05 (respecto al T2)

7.5.1 Efecto del entrenamiento de fuerza sobre las variables de carrera

No se observaron cambios significativos en ninguna de las variables de carrera (T20m, T200m, T800m) cuando se compararon los grupos (**Tabla 18**). Sin embargo, se observó un efecto *probablemente positivo* en T200m a favor del GF del T2 al T3 (75/22/2%) (**Figura 35**). Por otro lado, cuando se analizaron los cambios intra-grupo encontramos que el entrenamiento de fuerza tuvo un efecto *posiblemente positivo* (T1 vs. T3) y *probablemente positivo* (T2 vs. T3) en el T20m para GF y GC, respectivamente. El GF mostró una mejora significativa en T200m ($p < 0.05$; 85/15/0%) y en T800m ($p \leq 0.01$; 80/20/0%) del T2 al T3, mientras que el GC sólo mejoró en el T800m ($p < 0.01$; 98/2/0%) (**Figura 34**).

7.5.2 Efecto del entrenamiento de fuerza sobre las propias variables de fuerza y la capacidad de salto

El GF obtuvo un efecto del entrenamiento mayor que el GC en las siguientes variables (**Figura 35**): *posiblemente* en el CMJ (T1 vs. T3 y T2 vs. T3); *probablemente* en el CMJc (T1 vs. T2 y T1 vs. T3); *posiblemente* (T1 vs. T2) y *muy probablemente* (T1 vs. T3) en V_{1carga} ; y *probablemente* en la RFD (T1 vs. T3). En el análisis intra-grupo se puede observar que GF mejoró el CMJ ($p < 0.01$; 98/2/0%; 87/12/0%; del T1 al T3 y del T2 a T3, respectivamente) y V_{1carga} ($p < 0.05$; 91/9/0%; del T1 al T3), mientras que GC no mejoró significativamente ninguna de las variables analizadas (**Tabla 18** y **Figura 34**). Además GF mostró efectos *probablemente positivos* en CMJc del T1 al T2 y del T1 al T3, mientras que GC mostró efectos *no claros*. Se observó un mayor tamaño del efecto en GF para la variable RFD que en el GC (diferencia estandarizada de *muy probablemente/probablemente positivo* para GF y *no claro/posiblemente negativo* para GC del T1 al T2 y del T1 al T3, respectivamente) (**Figura 34**).

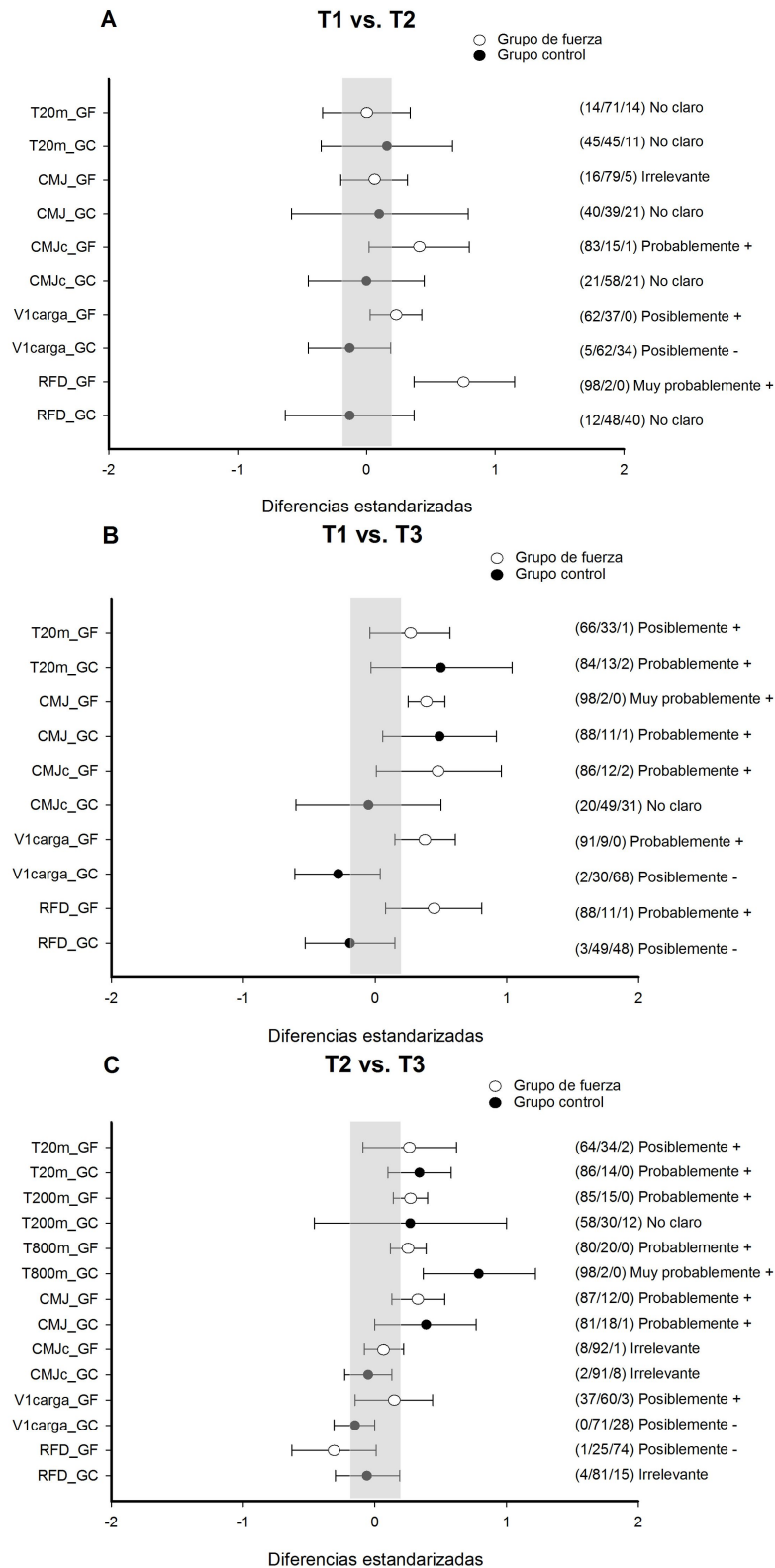


Figura 34. Cambios intra-grupo en T20m, T200m, T800m, CMJ, CMJc, V₁carga y RFD en el grupo de fuerza (GF) y grupo control (GC). A) T1 vs. T2; B) T1 vs. T3; C) T2 vs. T3. Las barras indican la incertidumbre de los cambios con un 90% de intervalo de confianza. El área sombreada indica el mínimo cambio apreciable. La disminución del tiempo en las variables de carrera se han interpretado como un efecto positivo.

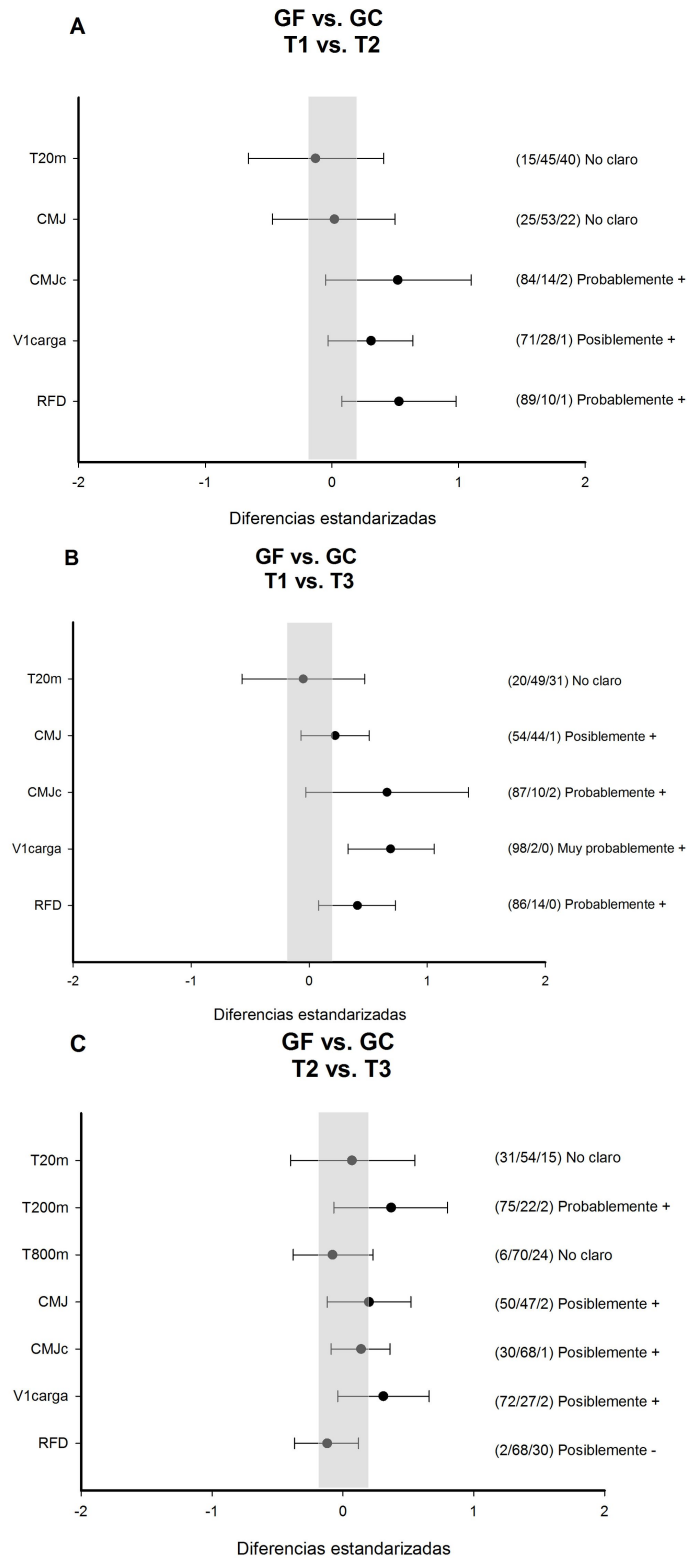


Figura 35. Cambios entre grupos en T20m, T200m, T800m, CMJ, CMJc, V₁carga y RFD en el grupo de fuerza (GF) y grupo control (GC). A) T1 vs. T2; B) T1 vs. T3; C) T2 vs. T3. Las barras indican la incertidumbre de los cambios con un 90% de intervalo de confianza. El área sombreada indica el mínimo cambio apreciable.

7.5.3 Efecto del entrenamiento de fuerza sobre variables hormonales

Con respecto a las variables hormonales, sólo el GF mostró una disminución significativa ($p < 0.05$) en IGF-1 del T2 al T3 (de 317.3 ± 125.0 a 291.7 ± 126.2 $\text{nmol}\cdot\text{L}^{-1}$) (**Tabla 19**). El resto de variables hormonales no mostraron variaciones significativas (**Tabla 19**). Además, el GF mostró un efecto de *probable aumento* de la testosterona del T1 al T3 (de 5.3 ± 1.3 a 6.0 ± 1.9 $\text{nmol}\cdot\text{L}^{-1}$) y del T2 al T3 (de 5.2 ± 1.1 a 6.0 ± 1.9 $\text{nmol}\cdot\text{L}^{-1}$), mientras que el GC mostró un *probable aumento* en el cortisol del T2 al T3 (de 11.0 ± 3.2 a 12.9 ± 3.9 $\text{nmol}\cdot\text{L}^{-1}$). Cuando se compararon las diferencias entre grupos se observó un *probable mayor aumento* de IGF-1 en GF del T1 al T2, mientras que las diferencias entre grupos en el resto de las hormonas analizadas *no están claras*.

7.5.4 Relación entre los cambios en el rendimiento en 800 m, la fuerza muscular, las carreras de velocidad y las variables hormonales en el GF

Se calculó la relación entre los cambios en el rendimiento en 800 m y las variables de fuerza, carrera y hormonales en el GF. En cuanto a las variables de fuerza y carrera, únicamente hemos encontrado una correlación significativa positiva entre los cambios en el tiempo en 800 m y los cambios en T10-20m en el GF ($r = 0.91$, $p = 0.03$) (**Figura 36**). Además, hemos encontrado una correlación negativa moderada, pero no significativa entre los cambios en T800m y los cambios en el CMJ ($r = -0.64$, $p = 0.2$) (**Figura 37**).

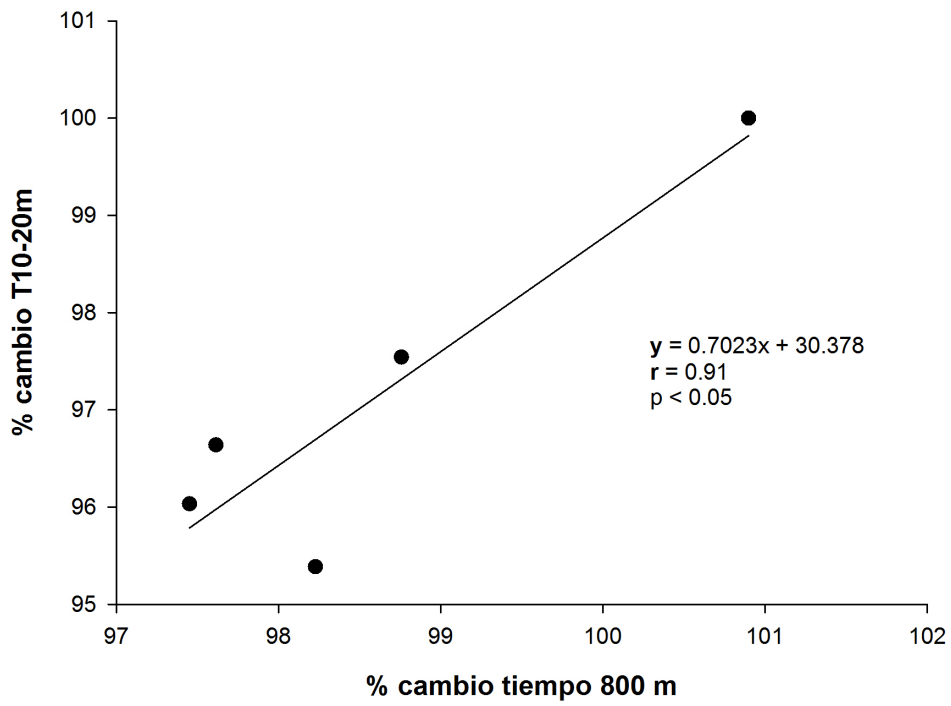


Figura 36. Correlación entre los cambios en el tiempo en 800 m y los cambios en T10-20m en el GF.

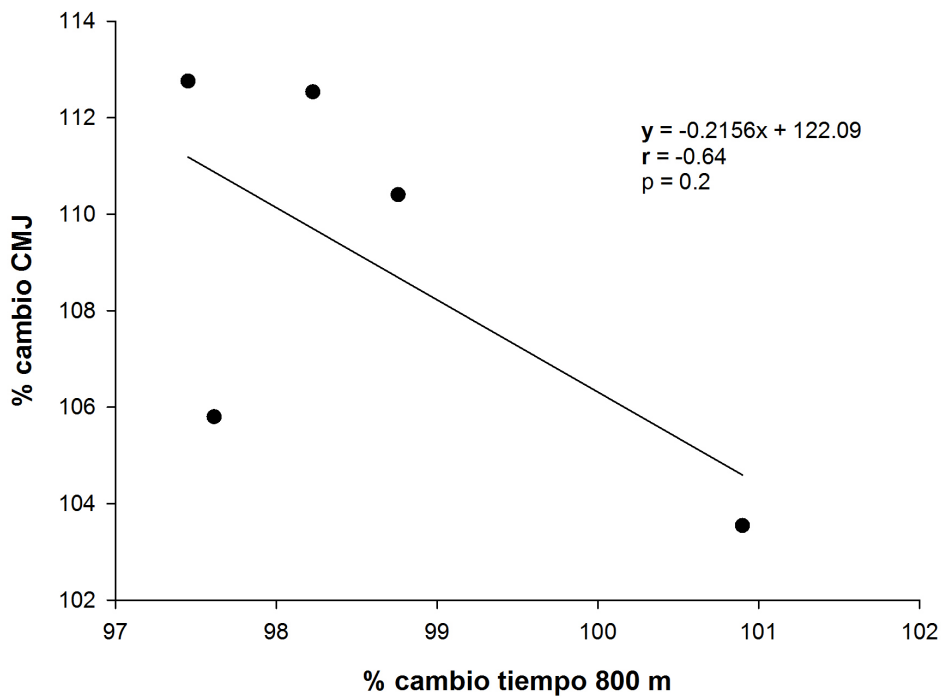


Figura 37. Correlación entre los cambios en el tiempo en 800 m y los cambios en el CMJ en el GF.

Por otro lado, observamos correlaciones significativas negativas entre los cambios en el CMJ y los cambios en T10 ($r = -0.83$, $p < 0.05$), T10-20m ($r = -0.82$, $p < 0.05$) y T20m ($r = -0.81$, $p < 0.05$).

En cuanto a las hormonas, observamos una correlación negativa entre los cambios en la IGF-1 y los cambios en T800m ($r = -0.81$, $p = 0.09$) (**Figura 38**), T20m ($r = -0.76$, $p = 0.08$), T10-20m ($r = -0.89$, $p = 0.01$) y T200m ($r = -0.93$, $p = 0.07$), y positiva con V_1 carga ($r = 0.92$, $p = 0.009$).

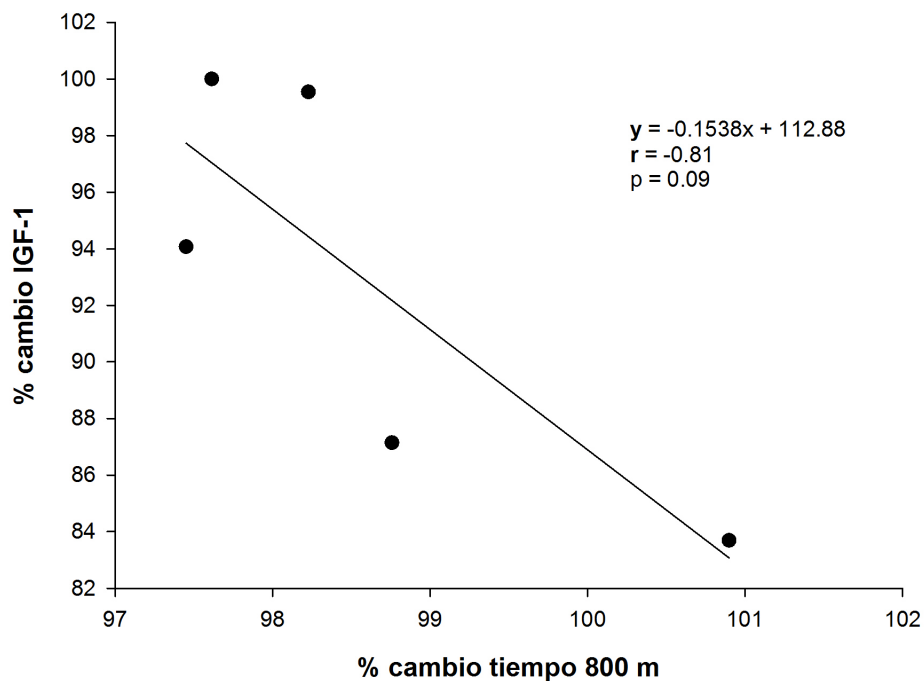


Figura 38. Correlación entre los cambios en el tiempo en 800 m y los cambios en la IGF-1 en el GF.

7.6 Discusión

El principal objetivo de este estudio fue analizar los efectos de un entrenamiento de fuerza caracterizado por una alta velocidad de ejecución y un bajo volumen en atletas de 800 m de alto nivel durante una temporada atlética. Los principales hallazgos de este estudio sugieren que el entrenamiento de fuerza con las características mencionadas anteriormente realizado por el GF, combinado con ejercicios de saltos y carrera resistida produjeron mejoras en las variables de fuerza y carrera analizadas. Estos resultados se acompañaron de pequeños cambios o ausencia de los mismos en la respuesta hormonal.

En estudios previos se ha encontrado que una mejora de la fuerza muscular de las piernas podría beneficiar el rendimiento en atletas de media y larga distancia (Aagard & Andersen, 2010; Beattie et al., 2014; Taipale et al., 2010, 2014; Mikkola et al., 2011). Nuestros resultados apoyan esta hipótesis, ya que hemos encontrado mejoras en el rendimiento en CMJ, V_1 carga en el ejercicio de sentadilla y T200m en el GF. Además estas mejoras ocurrieron acompañadas de una mejora en el rendimiento 800 m. Sin embargo el GC, aunque también mejoró el rendimiento en 800 m, no obtuvo mejoras en las variables relacionadas con la fuerza muscular.

En el análisis entre grupos no se observaron cambios significativos en ninguna de las variables de carrera (T20m, T200m, T800m) (**Tabla 18**). Sin embargo, se observó un efecto *probablemente positivo* en T200m a favor del GF del T2 al T3 (75/22/2%) (**Figura 35**). Además, el GF obtuvo un efecto del entrenamiento mayor que el GC en las siguientes variables (**Figura 35**): CMJ (T1 vs. T3 y T2 vs. T3), CMJc (T1 vs. T2 y T1 vs. T3), V_1 carga y RFD (T1 vs. T2 y T1 vs. T3). Las mejoras en el GF en las variables de fuerza (CMJ y V_1 carga) y carrera (T200m) analizadas muestran que se produjo una respuesta inducida por el entrenamiento de fuerza llevado a cabo (caracterizado por una alta velocidad de ejecución y un bajo volumen de entrenamiento) y sugieren que un adecuado programa de entrenamiento de fuerza podría tener importancia en el rendimiento específico en 800 m, y especialmente en carreras de 800 m en las que el resultado se decide en el sprint final o como se conoce habitualmente en carreras “lentas”. En esta misma línea, en estudios previos se han encontrado mejoras tanto en la fuerza muscular como en el rendimiento en resistencia tras realizar un programa de entrenamiento de fuerza con cargas altas o un entrenamiento de cargas ligeras, llamado

por los autores como entrenamiento de “fuerza explosiva” (Taipale et al., 2010, 2014; Mikkola et al., 2011). De acuerdo con nuestros resultados, Taipale et al. (2010) encontraron que los entrenamientos de “fuerza máxima” y “explosiva” realizados de forma concurrente con el entrenamiento de resistencia fueron más efectivos en la mejora de la fuerza muscular de las piernas (1RM y CMJ) y el rendimiento en resistencia en corredores recreacionales que el entrenamiento de tipo circuito. Estos autores compararon los efectos de un entrenamiento al que llamaron de “fuerza máxima” (80-85% de 1RM), con un entrenamiento al que llamaron de “fuerza explosiva” (30-40% de 1RM) y un entrenamiento al que llamaron de “fuerza-resistencia” tipo circuito (3x40-50 s, con intensidad relativa no especificada) realizado de forma concurrente con un entrenamiento de resistencia. En nuestro estudio ocurrió algo similar, ya que el entrenamiento que realizó el GF, con intensidades similares al grupo de “fuerza explosiva” del estudio anterior (40-55% de 1RM) resultó ser más efectivo en la mejora de la fuerza muscular de las piernas que el GC que realizó un entrenamiento tipo circuito o fuerza-resistencia, no obstante ambos grupos mejoraron el rendimiento en 800 m. Sin embargo, en otro estudio realizado por Mikkola et al. (2007) en el que se analizaron los efectos de un entrenamiento concurrente de resistencia y “fuerza explosiva” (sprint, saltos y ejercicios de fuerza con cargas bajas y velocidades de ejecución elevadas), no se encontraron mejoras en el rendimiento en resistencia (VO₂máx, economía de carrera y velocidad aeróbica máxima) pero si mejoras en las variables de fuerza (fuerza isométrica y RFD en el ejercicio de press de piernas) sprint de 30 m y capacidad anaeróbica (test de MART). Esta mejora en la capacidad anaeróbica el estudio descrito podría compararse en cierto modo con la mejora del GF en nuestro estudio del rendimiento en 800 m, el cual depende también en gran medida de la capacidad anaeróbica.

Por otro lado, en estudios previos en los que se ha analizado el efecto de un entrenamiento de fuerza, tradicionalmente conocido como de “fuerza-resistencia”, caracterizado por un elevado número de repeticiones por serie y no realizado a la máxima velocidad de ejecución, no se encontraron mejoras significativas en las variables de fuerza analizadas durante una temporada completa en atletas de medio fondo y fondo (Balsalobre et al., 2015). En nuestro estudio ocurrió algo similar en el entrenamiento de fuerza que realizó el GC. Sin embargo, se ha observado que un entrenamiento de fuerza caracterizado por una intensidad de carga baja-media y con un

bajo volumen siempre realizado a la máxima velocidad posible de ejecución combinado con saltos y carreras de velocidad (González-Badillo et al., 2015; Franco-Márquez et al., 2015), similar al realizado por el GF en nuestro estudio, favorecieron las adaptaciones neuromusculares relacionadas con el rendimiento en las variables de fuerza muscular y carrera de velocidad analizadas. Además, en un estudio previo (González-Badillo et al., 2015) se encontró que un entrenamiento de fuerza caracterizado por una alta velocidad de ejecución y un bajo volumen no produjo ningún potencial efecto negativo en el rendimiento aeróbico, de hecho, podría haber contribuido sustancialmente en la mejora del mismo.

En este sentido, se ha sugerido que las mejoras en el rendimiento en carrera producidas por el entrenamiento de fuerza podrían ser consecuencia de varios mecanismos entre los que se encuentran: una mayor coordinación y co-activación de los músculos implicados en el gesto específico de carrera, un aumento de la rigidez músculo-tendinosa de las piernas y una disminución en los tiempos de contacto (Paavolainen et al., 1999; Kyrolainen et al., 2001), así como una mejora en la eficiencia biomecánica inducida por los cambios positivos en los aspectos mecánicos del gesto de correr permitiendo a un corredor realizar un menor coste de trabajo para una velocidad de carrera dada (Johnson et al., 1997). Por lo tanto, el entrenamiento de fuerza realizado por GF y caracterizado por una intensidad baja-media y un bajo volumen, realizado a la máxima velocidad de ejecución posible, podría haber tenido efectos de carácter neural y haber estimulado los procesos facilitadores e inhibidores de la activación muscular incidiendo en una mayor coordinación de los músculos implicados en el gesto específico de carrera, aumentando la rigidez músculo-tendinosa y disminuyendo los tiempos de contacto, y favoreciendo, por tanto, el rendimiento específico en 800 m. Además, es probable que debido al bajo carácter del esfuerzo de este tipo de entrenamiento, las posibles interferencias con el entrenamiento de carrera hayan sido menores.

En cuanto a la respuesta hormonal a lo largo del periodo de entrenamiento, sólo observamos cambios a largo plazo en la IGF-1 en el GF, que mostró una disminución significativa ($p < 0.05$) del T2 al T3 (317.3 ± 125.0 a 291.7 ± 126.2 nmol·L⁻¹). Los estudios en los que se han investigado los efectos crónicos del ejercicio en la IGF-1 circulante han dado lugar a resultados contradictorios. Algunos estudios han mostrado disminuciones en los niveles de IGF-1 tras varias semanas de entrenamiento a pesar de

una mejora en la condición física general (fuerza muscular y/o $VO_{2m\acute{a}x}$) (Eliakim et al., 1996; Eliakim et al., 1998). Esta misma tendencia se dió en nuestro estudio, ya que en el grupo de atletas que entrenó fuerza (GF) se produjo una disminución significativa de la IGF-1 del T2 al T3 que se acompañó de una mejora en algunas variables de fuerza y carrera: CMJ, T200m y el rendimiento específico en 800 m. Por el contrario, en otros estudios se ha encontrado un aumento de la IGF-1 con el entrenamiento de resistencia en jóvenes (Koziris et al., 1999; Roelen et al., 1997) o no cambio tras un entrenamiento concurrente (Taipale et al., 2014). Estas discrepancias en los estudios podrían ser debidas a diferencias en las poblaciones utilizadas, así como a las diferencias en los programas de entrenamiento. La disminución encontrada en los niveles circulantes de IGF-1 en nuestro estudio podrían haber sido consecuencia de una reducción en la producción hepática inducida por la GH (Lowe, 1991), hormona que aunque no mostró cambios significativos tuvo una tendencia a la disminución. Por otro lado, en estudios previos se ha llegado a la conclusión de que el entrenamiento concurrente podría ser responsable de un incremento en los niveles de cortisol (Bell et al., 1997; Kraemer et al., 1995), sin cambios (Bell et al., 1997) o con cambios mínimos (Kraemer et al., 1995) en el resto de hormonas anabólicas. En un estudio con atletas hombres y mujeres de elite de resistencia, los autores encontraron un aumento significativo del cortisol en el periodo competitivo con respecto al inicio de temporada en el grupo de mujeres pero no en hombres (Tsai et al., 1991). En nuestro estudio, aunque no significativo, el GC mostró un *probable aumento* del cortisol del T2 al T3. Este *probable aumento* en el cortisol nos indica que se produjo un aumento del estado catabólico en el organismo que podría ser consecuencia de un aumento en la intensidad de los ejercicios de carrera que se realizaron en la época de competición al aire libre (T3).

Taipale et al. (2014) encontraron un aumento significativo de la testosterona en corredores recreacionales de resistencia tras 12 semanas de entrenamiento de fuerza mixto de fuerza máxima y explosiva. Del mismo modo, Guilhem et al. (2015) encontraron un aumento significativo de la testosterona medida en saliva en atletas de diferentes disciplinas (velocistas, saltadores, medio fondistas) durante el periodo precompetitivo. Estos autores dieron como posible explicación a ese aumento de la testosterona la disminución en la carga de entrenamiento durante ese periodo. En nuestro estudio ocurrió algo similar, ya que el GF resultó en un *probable aumento* de testosterona del T1 al T2 y del T2 al T3, lo que concuerda con los resultados del estudio

anteriormente descrito y que podría tener relación también con la disminución de la carga de entrenamiento que se produce cuando llega el periodo competitivo, que en nuestro caso fue en el T2 (periodo competitivo de pista cubierta) y T3 (periodo competitivo de aire libre).

En nuestro estudio, la respuesta hormonal a largo plazo parece no haber sido influida por el programa de entrenamiento realizado. En general, el programa de entrenamiento de fuerza seguido por GF no alteró las concentraciones basales de las distintas hormonas analizadas. Esto se podría deber a las características del entrenamiento de fuerza propuesto, el cual consistió en intensidades bajas-medias (40-55% de 1RM), bajo volumen (2-3 series de 4-6 repeticiones) y bajo carácter del esfuerzo, realizado a la máxima velocidad de ejecución posible.

En cuanto al análisis de las correlaciones entre cambios en el GF, se encontró una correlación significativa positiva entre los cambios en T800m y los cambios en T10-20m entre el T2 y el T3 ($r = 0.91$, $p = 0.03$), y una correlación negativa próxima a la significación entre los cambios en T800m y los cambios en el CMJ ($r = -0.64$, $p = 0.2$). Estos resultados nos sugieren que existen unos mecanismos responsables de la mejora en el rendimiento en 800 m en el GF que son en parte comunes a los mecanismos responsables de la mejora de la capacidad de sprint (T10-20m) y de salto (CMJ). Por otro lado, las correlaciones significativas negativas encontradas entre los cambios en el CMJ y los cambios en T10 ($r = -0.83$, $p < 0.05$), T10-20m ($r = -0.82$, $p < 0.05$) y T20m ($r = -0.81$, $p < 0.05$) apoyan la clara evidencia científica que existe en cuanto a la relación entre la capacidad de salto y la capacidad de sprint. Con respecto a las hormonas, encontramos una tendencia a presentar correlación negativa entre los cambios en la IGF-1 y los cambios en T800m ($r = -0.81$, $p = 0.09$), T20m ($r = -0.76$, $p = 0.08$), T10-20m ($r = -0.89$, $p = 0.01$) y T200m ($r = -0.93$, $p = 0.07$), y una correlación positiva con V_{1carga} ($r = 0.92$, $p = 0.009$). Estos resultados sugieren que los atletas que más mejoraron su rendimiento en las carreras y fuerza tendían a aumentar los valores de IGF-1.

7.7 Conclusiones

En conclusión, un entrenamiento de fuerza caracterizado por una alta velocidad de ejecución y un bajo volumen de entrenamiento realizado durante 25 semanas produjo mejoras significativas en las variables de fuerza (CMJ y V_{1carga}) y carrera (T200m). Sin embargo, la respuesta hormonal permaneció en general inalterada en ambos grupos, excepto la IGF-1 en el GF del T2 al T3. Además, se observó una correlación significativa positiva entre los cambios en el T800m y los cambios en el T10-20m en el GF.

7.8 Aplicaciones prácticas

Los hallazgos de este estudio contribuyen a mejorar el conocimiento sobre los efectos del entrenamiento de fuerza en atletas de medio fondo de alto nivel. Según nuestros resultados, la aplicación de este tipo de entrenamiento de fuerza podría incrementar la fuerza muscular de las piernas y la velocidad de carrera, y por tanto tener un probable efecto positivo en el rendimiento específico en 800 m, al mismo tiempo que se podrían evitar o reducir las posibles interferencias con el entrenamiento de resistencia y las sesiones específicas de carrera dado el bajo volumen e intensidad baja-media del entrenamiento de fuerza.

8. CONCLUSIONES GENERALES / GENERAL CONCLUSIONS

8. CONCLUSIONES GENERALES / GENERAL CONCLUSIONS

ESTUDIO I / STUDY I

- El entrenamiento con arrastres durante 7 semanas sin entrenamiento complementario de carreras sin cargas mejora el rendimiento en la carrera de 40 m con las tres cargas empleadas (baja, media y alta). No obstante, la mejora en esta distancia parece depender de efectos diferenciados. Los grupos CB y CM mejoraron significativamente en las fases de más alta velocidad (20-30 y 20-40 m) dentro de los 40 m, y el grupo CA mejoró en la fase inicial de aceleración (0-20 y 0-30 m), pero no en las zonas de máxima velocidad dentro de la distancia recorrida.
- *A 7-week of resisted sprint training without additional unloaded sprint training has shown improvement in 40 m sprint performance with the three loads assigned (low, medium and high). However, the improvement for this distance seems to be dependent on differentiated effects. The LL and ML groups improved significantly in the highest velocity phase (20-30 and 20-40 m) within the 40 m, whereas the HL group improved in the initial phase of acceleration (0-20 and 0-30 m), but not so in the maximum velocity zone within the distance covered.*
- El entrenamiento de arrastres con cargas medias y altas sin entrenamiento complementario de carreras sin cargas produce mejoras en el rendimiento en CMJ, CMJc y sentadilla. Estas mejoras fueron significativas en los grupos CM y CA en el CMJ y sentadilla, y en el grupo CA en el ejercicio de saltos con carga.
- *Resisted sprint training with medium and high loads without additional unloaded sprint training entails improvements in CMJ, JS and full squat performances. These improvements were significant in the ML and HL groups in CMJ and full squat exercise, as well as for the HL group in the loaded jump exercise.*

ESTUDIO II / STUDY II

- El rendimiento en la prueba de 800 m en atletas de nivel nacional e internacional está relacionado con la capacidad de sprint (20 y 200 m), la fuerza muscular de las piernas (SQ) y la capacidad de salto (CMJ y CMJc).
- *The 800 m running performance in athletes of national and international levels is related to sprint (20 m and 200 m), muscle strength (SQ), and jumping abilities (CMJ and JS).*
- El último parcial de 50 m en la carrera de 200 m fue la variable que más explicó la varianza del rendimiento en 800 m.
- *The last split of the 50 m in the 200 m run represented the variable that most explained the variance of the 800 m performance.*
- Los resultados de este estudio sugieren que las variables relacionadas con la capacidad de producir fuerza, la capacidad de mantener altas velocidades de carrera con una cierta fatiga acumulada, así como la capacidad glucolítica anaeróbica parecen ser factores importantes en el rendimiento en la prueba de 800 m.
- *According to the results of this study, the variables related to strength-power abilities, the ability to maintain high running velocities with certain accumulated fatigue, and the glycolytic anaerobic capacity seem to be determinant factors in 800 m running performance.*

ESTUDIO III / STUDY III

- Los cambios ocurridos en las variables mecánicas, hematológicas y hormonales analizadas reflejan una respuesta compleja al entrenamiento durante la temporada completa de atletismo en atletas de 800 m de alto nivel.
- *The changes in the analysed mechanical, haematological and hormonal variables show a complex induced-training response over a complete athletics season in 800 m high level athletes.*
- Se observó un aumento general del rendimiento en las variables de fuerza muscular de las piernas y velocidad (CMJ, CMJc, VMPcc, T20m y T200m) durante la temporada. Esta mejora en las variables de fuerza y velocidad estuvieron acompañadas de una mejora en el rendimiento específico en la prueba de 800 m.
- *A general increase in the performance of the leg strength and sprint variables analysed (CMJ, JS, SQ, T20m and T200m) was observed throughout the season. This improvement was accompanied by a significant enhancement of the specific 800 m performance.*
- Se observaron disminuciones significativas en determinadas variables hematológicas de la serie roja (Hct, VCM, CHCM) del T2 al T3, y una relación positiva entre los cambios de éstas y el tiempo en 800 m. Además, se observaron disminuciones en la serie blanca (leucocitos, neutrófilos, monocitos) y plaquetas (VPM), que indican que la mejora del rendimiento en 800 m podría producirse a pesar de un efecto negativo sobre algunos factores relacionados con la capacidad de transporte de oxígeno y una depresión del sistema inmune, lo cual podría poner de manifiesto que los factores anaeróbicos, relacionados con la capacidad de los deportistas para aplicar fuerza en la unidad de tiempo, podrían jugar también un papel relevante en este tipo de rendimiento.

- *Significant decreases in certain haematological variables of the red blood (Hct, MCV, MCHC) from T2 to T3, together with a positive relationship between such decreases and time in 800 m were observed. Decreases were also observed in the white cells (leucocytes, neutrophils, monocytes) and platelets (VPM), indicating that the improvement of the 800 m performance might be achieved despite a negative effect on some factors related to the O₂ capacity transport, and to a depression of the immune system, which, in turn, could reveal that the anaerobic factors, linked with the athletes' ability to apply force during the time unit, could also play a relevant role in this type of event.*
- La respuesta hormonal y bioquímica permaneció estable durante la temporada excepto para la IGF-1.
- *The hormonal and biochemical response remained unaltered throughout the season except for the IGF-1.*
- Los resultados de este estudio indican que las adaptaciones neuromusculares responsables de la mejora de la fuerza muscular de las piernas y la carrera de velocidad tienden a favorecer el rendimiento en la prueba de 800 m, lo que refleja la importancia de estimular el desarrollo de la fuerza muscular en atletas corredores de 800 m.
- *The results of this study may indicate that the neuromuscular adaptations responsible for the improvement in lower limb strength and sprint tend to favour the 800 m performance, which reflects how important it is to enhance the development of muscle strength in 800 m runners.*

ESTUDIO IV / STUDY IV

- Un entrenamiento de fuerza caracterizado por una alta velocidad de ejecución y un bajo volumen de entrenamiento, combinado con saltos y entrenamiento resistido durante 25 semanas produjo mejoras significativas en las variables de fuerza (CMJ y V_{1carga}) y carrera (T200m).
- *A strength training program characterised by high-speed intensity and low volume, combined with jumps and resisted sprint training during 25 weeks improved significantly both the strength (CMJ y V_{1load}) and sprint running (T200m) variables.*
- La respuesta hormonal permaneció en general inalterada en ambos grupos, excepto la IGF-1 en el GF del T2 al T3.
- *The hormonal response remained unchanged, in general, in both groups, except for the IGF-1 in the SG from T2 to T3.*
- Se observó una correlación significativa positiva entre los cambios en el T800m y los cambios en el T10-20m en el GF.
- *A significant positive correlation between the changes in T800m and those in T10-20m were observed in the SG.*

9. LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN

9. LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN

Una de las principales limitaciones de estos estudios ha sido el reducido tamaño de la muestra: **Estudio I** ($n = 19$, $n = 7$, 6 y 6 sujetos para los grupos CB, CM, y CA respectivamente), **Estudio II** ($n = 14$), **Estudio III** ($n = 13$) y **Estudio IV** ($n = 13$, $n = 6$ para el GF y $n = 7$ para el GC), lo cual podría haber dificultado la significatividad de los cambios, así como la posibilidad de generalizar los resultados. No obstante, para los **Estudios I, II, y III** esto quedaría justificado porque se trata de una muestra de atletas de alto nivel en 800 m. Lógicamente, los resultados de esta investigación son aplicables a deportistas con un rendimiento y un grado de entrenamiento similar a los que poseían los participantes de los estudios.

En el **Estudio I**, otra posible limitación podría ser la influencia de algunas variables extrañas ajenas a nuestro control: durante algunas sesiones de entrenamiento los sujetos manifestaron encontrarse bastante cansados, probablemente por el hecho de que tuvieron prácticas físicas intensas en sus clases del Grado en Ciencias de la Actividad Física y del Deporte, lo cual pudo suponer un grado de estrés no previsto y no provocado por el entrenamiento. Además, el hecho de que la muestra estuviera compuesta por sujetos estudiantes y no deportistas de competición podría considerarse una limitación a la hora de generalizar los resultados a sujetos entrenados.

En el **Estudio III**, otra posible limitación ha sido el no haber podido determinar los valores de $VO_{2máx}$, y, especialmente, la velocidad aeróbica máxima, en los tests en cada atleta como dos más de las variables analizadas. Esto podría haber aportado una información mayor así como haber reforzado los resultados obtenidos en el rendimiento en 800 m. Sin embargo, el $VO_{2máx}$ no se pudo medir debido a la dificultad de disponer de los atletas en tantos tests y con tanta frecuencia durante la temporada, lo que provocaba modificaciones en los planes de entrenamiento de los entrenadores. Otra limitación de este estudio ha sido el no haber tenido en cuenta la cuantificación de la carga de entrenamiento de cada uno de los atletas y haber podido comprobar su posible relación con los diferentes resultados obtenidos en las variables analizadas. A pesar de que se pidió a los entrenadores y atletas información sobre la cuantificación de la carga de entrenamiento, aún no hemos podido analizarla adecuadamente, debido principalmente a la dificultad de que se trataba de atletas que entrenaban de manera

independiente y con diferentes entrenadores.

En el **Estudio IV**, otra limitación ha sido el no haber dispuesto con más detalle de los programas de entrenamiento de fuerza seguidos por el GC. Además, habría sido interesante, al igual que en el **Estudio III**, haber tenido en cuenta la cuantificación de la carga del entrenamiento de carrera cada uno de los atletas y haber podido comprobar su posible relación con los diferentes resultados obtenidos en las variables analizadas. Asimismo, la medición de la actividad electromiográfica nos hubiese dado información relevante con respecto a las adaptaciones neuromusculares inducidas por el entrenamiento realizado.

10. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

10. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Tras la conclusión de los estudios que han conformado esta Tesis Doctoral, y una vez descrita la importante relación entre la fuerza muscular y el rendimiento en carrera en atletas especialistas de 800 m, así como la importancia de controlar las diferentes respuestas mecánicas, hematológicas y hormonales en atletas corredores de 800 m a lo largo de la temporada de entrenamiento para poder regular la carga de entrenamiento y detectar posibles estados de sobrecarga o excesiva fatiga, a continuación se exponen algunas de las cuestiones a resolver en esta misma línea a medio y corto plazo.

Dado que el uso de métodos de entrenamiento resistido es común tanto en atletismo como en la mayoría de deportes en los que la aceleración en carrera es determinante, sería interesante seguir comprobando los efectos de cargas en el arrastre diferentes a las utilizadas en esta investigación, así como conocer si un programa de entrenamiento de estas características puede producir resultados similares en atletas o en deportistas de determinados deportes colectivos, los cuales tienen altos niveles y necesidades de fuerza y mayor experiencia.

Por otro lado, y debido a las relaciones que hemos observado que existen entre el rendimiento en 800 m y las diferentes variables de carrera, salto y fuerza muscular analizadas, creemos que sería interesante realizar estudios similares con atletas de alto nivel especialistas en distancias superiores (1500, 3000, 5000 y 1000 m), y analizar del mismo modo las respuestas hematológicas y hormonales. Además, se podrían incluir otras variables relacionadas con el rendimiento en resistencia tales como la velocidad aeróbica máxima o el $VO_{2máx}$. También sería interesante estudiar las diferentes respuestas no sólo durante una temporada atlética sino a lo largo de un período de mayor duración, como por ejemplo durante un ciclo olímpico de 4 años. También pensamos que se debería estudiar la relación entre las diferentes respuestas mecánicas, hematológicas y hormonales y la carga de entrenamiento individual de cada deportista.

Por último y en relación con el Estudio IV, sería interesante analizar los efectos de un entrenamiento de fuerza con estas características en atletas de otras disciplinas.

11. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aagaard, P., & Andersen, J. L. (2010). Effects of strength training on endurance capacity in top level endurance athletes. *Scand J Med Sci Sports*, *20*, 39-47.
- Alcaraz, P. E., Palao, J. M., Elvira, J. L., & Linthorne, N. P. (2008). Effects of three types of resisted sprint training devices on the kinematics of sprinting at maximum velocity. *J Strength Cond Res*, *22*, 890-897.
- Alcaraz, P. E., Palao, J. M., & Elvira, J. L. (2009). Determining the optimal load for resisted sprint training with sled towing. *J Strength Cond Res*, *23*, 480-485.
- Anderson, T. (1996). Biomechanics and running economy. *Sports Med*, *22*, 76-89.
- Arcelli, E., Bianchi, A., Tebaldini, J., Bonato, M., & La Torre, A. (2012). Energy Production in the 800m. *New Stud Athl*, *27*, 49-56.
- Astrand, P. O., & Rodhal, K. (1992). *Fisiología del trabajo físico*. Buenos Aires, Argentina: Panamericana.
- Augustsson, J., Thomeé, R., Lindén, C., Folkesson, M., Tranberg, R., & Karlsson, J. (2006). Single-leg hop testing following fatiguing exercise: reliability and biomechanical analysis. *Scand J Med Sci Sports*, *16*, 111-120.
- Bain, B., Phillips, D., Thomson, K., Richardson, D., & Gabriel, I. (2000). Investigation of the effect of marathon running on leukocyte counts of subjects of different ethnic origins: relevance to the etiology of ethnic neutropenia. *Br J Haematol*, *108*, 483-487.
- Balsalobre-Fernández, C., Tejero-González, C. M., & del Campo-Vecino, J. (2014). Relationships between training load, salivary cortisol responses and performance during season training in middle and long distance runners. *PLoS One*, *9*, e106066.
- Balsalobre-Fernández, C., Tejero-González, C. M., & del Campo-Vecino, J. (2015). Seasonal strength performance and its relationship with training load on elite runners. *J Sports Sci Med*, *14*, 9-15.
- Barr, M. J., & Nolte, V. W. (2011). Which measure of drop jump performance best predicts sprinting speed?. *J Strength Cond Res*, *25*, 1976-1982.
- Beattie, K., Kenny, I. C., Lyons, M., & Carson, B. P. (2014). The effect of strength training on performance in endurance athletes. *Sports Med*, *44*, 845-865.
- Bell, G., Syrotuik, D., Socha, T., Maclean, I., & Quinney, H. A. (1997). Effect of strength training and concurrent strength and endurance training on strength, testosterone, and cortisol. *J Strength Cond Res*, *11*, 57-64.

Berglund, B., & Hemmingson, P. (1987). Effect of reinfusion of autologous blood on exercise performance in cross-country skiers. *Int J Sports Med*, 8, 231–233.

Berryman, N., Maurel, D., & Bosquet, L. (2010). Effect of plyometric vs. dynamic weight training on the energy cost of running. *J Strength Cond Res*, 24, 1818–1825.

Berthion, S., Dupont, G., Mary, P. & Gerbeaux, M. (2001). Predicting sprint kinematic parameters from anaerobic field tests in physical education students. *J Strength Cond Res*, 15, 75–80.

Billat, V., Hamard, L., Koralsztein, J. P., & Morton, R. H. (2009). Differential modeling of anaerobic and aerobic metabolism in the 800-m and 1,500-m run. *J Appl Physiol*, 107, 478–487.

Bleakley, C., McDonough, S., Gardner, E., Baxter, G. D., Hopkins, J. T., & Davison, G.W. (2012). Cold- water immersion (cryotherapy) for preventing and treating muscle soreness after exercise. *Cochrane Database Syst Rev*, 15, CD008262.

Bogdanis, G. C., Nevill, M. E., Boobis, L. H., & Lakomy, H. K. (1996). Contribution of phosphocreatine and aerobic metabolism to energy supply during repeated sprint exercise. *J Appl Physiol*, 80, 876–884.

Bonaventura, J. M., Sharpe, K., Knight, E., Fuller, K. L., Tanner, R. K., & Gore, C. J. (2015). Reliability and Accuracy of Six Hand-Held Blood Lactate Analysers. *J Sports Sci Med*, 14, 203–214.

Brechue, W. F., Mayhew, J. L., & Piper, F. C. (2010). Characteristics of sprint performance in college football players. *J Strength Cond Res*, 24, 1169–1178.

Brenner, I., Shek, P. N., & Shephard, R. J. (1993). Infection in athletes. *Sports Med*, 17, 86-107.

Bret, C., Rahmani, A., Dufour, A. B., Messonnier, L., & Lacour, J. R. (2002). Leg strength and stiffness as ability factors in 100m sprint running. *J Sports Med Phys Fitness*, 42, 274-81.

Buchheit, M., Spencer, M., & Ahmaidi, S. (2010). Reliability, Usefulness, and Validity of a Repeated Sprint and Jump Ability Test. *Int J Sport Physiol Perform*, 5, 3-17.

Calbet, J. A., Lundby, C., Koskolou, M., & Boushel, R. (2006). Importance of hemoglobin concentration to exercise: acute manipulations. *Respir Physiol Neurobiol*, 151, 132–140.

Carroll, S. B. (2007). *The Making of the Fittest*. New York, NY: Norton.

- Casey, A., Constantin-Teodosiu, D., Howell, S., Hultman, E., & Greenhaff, P. L. (1996). Metabolic response of type I and II muscle fibers during repeated bouts of maximal exercise in humans. *Am J Physiol*, 27, E38–E43.
- Chelly, M. S., Cherif, N., Amar, M. B., Hermassi, S., Fathloun, M., Bouhlel, E., Tabka, Z., & Shephard, R. J. (2010). Relationships of peak leg power, 1 maximal repetition half back squat, and leg muscle volumen to 5-m sprint performance of junior soccer players. *J Strength Cond Res*, 24, 266–271.
- Chromiak, J. A., & Mulvaney, D. R. (1990). A review: The effects of combined strength and endurance training on strength development. *J Appl Sport Sci Res*, 4, 55-60.
- Chu, S. G., Becker, R. C., Berger, P. B., Bhatt, D. L., Elkelboom, J. W., Konkle, B., et al. (2010). Mean platelet volume as a predictor of cardiovascular risk: a systematic review and meta-analysis. *J Thromb Haemost*, 8, 148–156.
- Clark, D. A., Sabick, M. B., Pfeiffer, R. P., Kuhlman, S. M., Knigge, N. A., & Shea, K. G. (2009). Influence of towing force magnitude on the kinematics of supramaximal sprinting. *J Strength Cond Res*, 23, 1162-1168.
- Clark, K. P., Stearne, D. J., Walts, C. T., & Miller, A. D. (2010). The longitudinal effects of resisted sprint training using weighted sleds vs. weighted vests. *J Strength Cond Res*, 24, 3287-3295.
- Clow, A., & Hucklebridge, F. (2001). The impact of psychological stress on immune function in athletic population. *Exer Immunol Rev*, 7, 5-15.
- Cohen, J. (1988). *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences*. Hillsdale, MI: Lawrence Erlbaum.
- Colliander, E. B., Dudley, G. A., & Tesch, P. A. (1988). Skeletal muscle fiber type composition and performance during repeated bouts of maximal, concentric contractions. *Eur J Appl Physiol*, 58, 81-86.
- Consitt, L. A., Copeland, J. L., & Tremblay, M. S. (2002). Endogenous anabolic hormone responses to endurance versus resistance exercise and training in women. *Sports Med*, 32, 1–22.
- Constantini, N. W., Eliakim, A., Rigel, L., Yaaron, M., & Falk, B. (2000). Iron Status of Highly Active Adolescents: Evidence of Depleted Iron Stores in Gymnasts. *Int J Sport Nutr Exerc Metab*, 10, 62-70.
- Convertino, V. A. (1991). Blood volume: its adaptation to endurance training. *Med Sci Sports Exerc*, 23, 1338–1348.

Coppola, L. Coppola, L. dallaMora, L., Limongelli, F. M., Grassia, A. Mastrolorenzo, L., Gombos, G., & Lucivero, G. (2005). Vigorous exercise acutely changes platelet and B-lymphocyte CD39 expression. *J Appl Physiol*, *98*, 1414–1419.

Córdova, A. (2003). *Fisiología dinámica*. Barcelona, España: Masson.

Cormie, P., McBride, J. M., & McGaulley, G. O. (2009). Power-time, force-time, and velocity time curve analysis of the countermovement jump: impact of training. *J Strength Cond Res*, *23*, 177-186.

Corn, R. J., & Knudson, D. (2003). Effect of elastic-cord towing on the kinematics of the acceleration phase of sprinting. *J Strength Cond Res*, *17*, 72-75.

Costello, F. (1985). Training for speed using resisted and assisted methods. *NSCA Journal*, *7*, 74- 75.

Craig, I., & Morgan, D. (1998). Relationship between 800-m running performance and accumulated oxygen deficit in middle-distance runners. *Med Sci Sports Exerc*, *30*, 1631-1636.

Crewther, B. T., Keogh, J., Cronin, J., & Cook, C. (2006). Possible stimuli for strength and power adaptation: acute hormonal responses. *Sports Med*, *36*, 215-238.

Crewther, B. T., Cook, C., Cardinale, M., Weatherby, R. P., & Lowe, T. (2011). Two emerging concepts for elite athletes: the short-term effects of testosterone and cortisol on the neuromuscular system and the dose-response training role of these endogenous hormones. *Sports Med*, *41*, 103-123.

Cronin, J., Hansen, K., Kawamori, N., & McNair, P. (2008). Effects of weighted vests and sled towing on sprint kinematics. *Sports Biomechanics*, *7*, 160-172.

De Gonzalo-Calvo, D., Fernandez-Garcia, B., de Luxan-Delgado, B., Rodriguez-Gonzalez, S., Garcia-Macia, M., et al. (2012). Long-term training induces a healthy inflammatory and endocrine emergent biomarker profile in elderly men. *Age*, *34*, 761-771.

De Koning, J.J., Bobbert, M.F., & Foster, C. (1999). Determination of optimal pacing strategy in track cycling with an energy flow model. *J Sci Med Sport*, *2*, 266–277.

De Souza, M. J., Maguire, M. S., Maresh, C. M., et al. (1991). Adrenal activation and the prolactin response to exercise in eumenorrheic and amenorrheic runners. *J Appl Physiol*, *70*, 2378– 2387.

Deason, J., Powers, S., Lawler, J., Ayers, D., & Stuart, M. (1991). Physiological correlates to 800 meter running performance. *J Sports Med Phys Fitness*, *31*, 499-504

- Delecluse, C., Van Coppenolle, H., Willens, E., Van Leemputte, D., Diels, R., & Gordis, M. (1995). Influence of high-resistance and high-velocity training on sprint performance. *Med Sci Sports Exerc*, *27*, 1203-1209.
- Díaz, V., Montalvo, Z., & Banfi, G. (2011). White blood cell counts in elite triathletes over four consecutive seasons. *Eur J Appl Physiol*, *111*, 893-894
- Donati, A. (1996). The association between the development of strength and speed. *New Stud Athl*, *11*, 51-58.
- Duffield, R., Dawson, B., & Goodman, C. (2005). Energy system contribution to 400-metre and 800-metre track running. *J Sports Sci*, *23*, 299-307.
- Dumke, C., Pfaffenroth, C. M., McBride, J. M., & McCauley, G. O. (2010). Relationship between muscle strength, power and stiffness and running economy in trained male runners. *Int J Sports Physiol Perform*, *5*, 249-261.
- Earp, J. E., & Newton, R. U. (2012). Advances in electronic timing systems considerations for selecting an appropriate timing system. *J Strength Cond Res*, *26*, 1245-1248.
- Eliakim, A., Brasel, J. A., Mohan, S., Barstow, T. J., Berman, N., & Cooper, D. M. (1996). Physical fitness, endurance training, and the growth hormone-insulin-like growth factor I system in adolescent females. *J Clin Endocrinol Metab*, *81*, 3986-3992.
- Eliakim, A., Brasel, J. A., Mohan, S., Wong, W. L., & Cooper, D. M. (1998). Increased physical activity and the growth hormone-IGF-I axis in adolescent males. *Am J Physiol*, *275*, R308-14.
- Faccioni, A. (1994a). Assisted and resisted methods for speed development (part I) - Resisted speed methods. *Mod Athlete Coach*, *32*, 3-6.
- Faccioni, A. (1994b). Assisted and resisted methods for speed development (part II) - Resisted speed methods. *Mod Athlete Coach*, *32*, 8-12.
- Faude, O., Koch, T., & Meyer, T. (2012). Straight sprinting is the most frequent action in goal situations in professional football. *J Sports Sci*, *30*, 625-631.
- Favero, T. G., Zable, A. C., Bowman, M. B., Thompson, A., & Abramson, J. J. (1995). Metabolic end products inhibit sarcoplasmic reticulum Ca²⁺ release and [3H] ryanodine binding. *J Appl Physiol*, *78*, 1665-1672.
- Ferguson, E. W., & Guest, M. M. (1974). Exercise, physical conditioning, blood coagulation and fibrinolysis. *Thrombos Diathes Haemorrh*, *31*, 63-71.

- Ferrauti, A., Bergermann, M., Fernandez-Fernandez, J. (2010). Effects of a concurrent strength and endurance training on running performance and running economy in recreational marathon runners. *J Strength Cond Res*, 24, 2770-2778.
- Fiorentino, N. M., Rehorn, M. R., Chumanov, E. S., Thelen, D. G., & Blemker, S. S. (2014). Computational models predict larger muscle tissue strains at faster sprinting speeds. *Med Sci Sports Exerc*, 46, 776–786.
- Fletcher, J. R., Esau, S. P., & Macintosh, B. R. (2010). Changes in tendon stiffness and running economy in highly trained distance runners. *Eur J Appl Physiol*, 110, 1037-1046.
- Folland, J. P., & Williams, A. G. (2007). The adaptations to strength training: morphological and neurological contributions to increased strength. *Sports Med*, 37, 145–168.
- Foster, C., Schrage, M., & Snyder, A. C. (1994). Pacing strategy and athletic performance. *Sports Med*, 17, 77–85.
- Franco-Márquez, F., Rodríguez-Rosell, D., González-Suárez, J. M., Pareja-Blanco, F., Mora-Custodio, R., Yáñez-García, J. M., & González-Badillo, J. J. (2015). Effects of combined resistance training and plyometrics on physical performance in young soccer players. *Int J Sports Med*, 36, 906-914.
- Frystyk, J. (2010). Exercise and the growth hormone-insulin-like growth factor axis. *Med Sci Sports Exerc*, 42, 58-66.
- Gajer, B., Hanon, C., Marajo, J., & Vollmer, J. C. (2001). *Le 800 mètres: Analyse descriptive et entraînement*. Paris, France: Edition INSEP-Federation Française d'Athletisme, Collection Entraînement.
- Gala, R. D. (1991). Prolactin and growth hormone in the regulation of the immune system. *Proc Soc Exp Biol Med*, 198, 513–527.
- Gatti, R., & De Palo, E. F. (2011). An update: salivary hormones and physical exercise. *Scand J Med Sci Sports*, 21, 157–169.
- Glatthorn, J. F., Gouge, S., Nussbaumer, S., Stauffacher S., Impellizzeri, F. M., & Maffiuletti, N. A. (2011). Validity and reliability of Optojump photoelectric cells for estimating vertical jump height. *J Strength Cond Res*, 25, 555-560.
- Gollnick, P. D., & Hermansen, L. (1973). Biochemical adaptations to exercise: Anaerobic Metabolism. *Exerc Sports Sci Rev*, 1, 1-43.

González-Alonso, J., Olsen, D. B., & Saltin, B. (2002). Erythrocyte and the regulation of human skeletal muscle blood flow and oxygen delivery: role of circulating ATP. *Circ Res*, 29;91, 1046-55.

González-Badillo, J. J., & Ribas-Serna, J. (2002). *Bases de la programación del entrenamiento de fuerza*. Barcelona, España: INDE.

González-Badillo, J., & Sánchez-Medina, L. (2010). Movement Velocity as a Measure of Loading Intensity in Resistance Training. *Int J Sports Med*, 31, 347-352.

González-Badillo, J. J., Pareja-Blanco, F., Rodríguez-Rosell, D., Abad-Herencia, J. L., Del Ojo-López, J. J., & Sánchez-Medina L. (2015). Effects of velocity-based resistance training on young soccer players of different ages. *J Strength Cond Res*, 29, 1329–1338.

Gorostiaga, E., Asiáin, X., Izquierdo, M., Postigo, A., Aguado, R., Alonso, J. M. & Ibáñez, J. (2010). Vertical jump performance and blood ammonia and lactate levels during typical training sessions in elite 400-m runners. *J Strength Cond Res*, 24, 1138-1149.

Gray, A. B., Telford, R. D., & Weidemann, M. J. (1993). Endocrine response to intense interval exercise. *Eur J Appl Physiol*, 66, 366–371.

Green, H. J. (1978). Glycogen depletion patterns during continuous and intermittent ice skating. *Med Sci in Sports Exerc*, 10, 183–187.

Green, H. J., Sutton, J. R., Coates, G., Ali, M., & Jones, S. (1991). Response of red cell and plasma volume to prolonged training in humans. *J Appl Physiol*, 70, 1810– 1815.

Green, S., Dawson, B. T., Goodman, C., & Carey, M. F. (1996). Anaerobic ATP production and accumulated O₂ Deficit in cyclists. *Med Sci Sports Exerc*, 28, 315-321.

Guglielmini, C., Casoni, I., Patracchini, M., Manfredini, F., Grazi, G., Ferrari, M., & Conconi, F. (1989). Reduction of Hb levels during the racing season in nonsideropenic professional cyclists. *Int J Sports Med*, 10, 352–356.

Guglielmo, L. G., Greco, C. C., & Denadai, B. S. (2009). Effects of strength training on running economy. *Int J Sports Med*, 30, 27–32.

Guilhem G., Hanon, C., Gendreau, N., Bonneau, D., Guével, A., & Chennaoui, M. (2015). Salivary hormones response to preparation and pre-competitive training of world-class level athletes. *Front Physiol*, 6, 333.

Hackney, A. C., Szczepanowska, E., & Viru, A. M. (2003). Basal testicular testosterone production in endurance-trained males is suppressed. *Eur J Appl Physiol*, 89, 198–201.

- Hakkinen, K. (1994). Neuromuscular adaptation during strength-training, aging, detraining, and immobilization. *Crit Rev Phys Rehabil Med*, 6, 161–98.
- Hanel, B., Clifford, P. S., & Secher, N. H. (1994). Restricted postexercise pulmonary diffusion capacity does not impair maximal transport for O₂. *J Appl Physiol*, 77, 2408–2412.
- Hanon, C., Thomas, C., Le Chevalier, J. M., Gajer, B., & Vandewalle, H. (2002). How does VO₂ evolve during the 800m? *New studies in Athl*, 17:2, 61-6.
- Hanon, C., Leveque, J. M., Thomas, C., & Vivier, L. (2008). Pacing strategy and VO₂ kinetics during a 1500-m race. *Int J Sports Med*, 29, 206–211.
- Hanon, C., & Gajer, B. (2009). Velocity and stride parameters of world-class 400-meter athletes compared with less experienced runners. *J Strength Cond Res*, 23, 524–531.
- Hanon, C., & Thomas, C. (2011). Effects of optimal pacing strategies for 400-, 800-, and 1500-m races on the VO₂ response. *J Sports Sci*, 29: 905-912.
- Harrison, A. J., & Bourke, G. (2009). The effect of resisted sprint training on speed and strength performance in male rugby players. *J Strength Cond Res*, 23, 275-283.
- Hauger, T. A., Tønnessen, E., & Seiler, S. (2012). Speed and Countermovement-Jump Characteristics of Elite Female Soccer Players. *Int J Sport Physiol Perform*, 7, 340-349.
- Hayes, P. R., French, D. N., & Thomas, K. (2011). The effect of muscular endurance on running economy. *J Strength Cond Res*, 25, 2464–9.
- Heinicke, K., Wolfarth, B., Winchenbach, P., Biermann, B., Schmid, A., Huber, G., et al. (2001). Blood volume and hemoglobin mass in elite athletes of different disciplines. *Int J Sports Med*, 22, 504–512.
- Heugas, A. M., Brisswalter, J., & Vallier, J. M. (1997). Effect of a three month training period on the maximal oxygen deficiency in high level performance sprinters. *Can J Appl Physiol*, 22, 171-181.
- Hickson, R. C. (1980). Interference of strength development by simultaneously training for strength and endurance. *Eur J Appl Physiol*, 45, 255–263.
- Hickson, R. C., Dvorak, B. A., Gorostiaga, E. M., Kurowski, T. T., & Foster, C. (1988). Potential for strength and endurance training to amplify endurance performance. *J Appl Physiol*, 65, 2285–2290.

- Hickson, R. C., Hidaka, K., Foster, C., Falduto, M. T., & Chatterton, R. T. (1994). Successive time courses of strength development and steroid hormone responses to heavy-resistance training. *J Appl Physiol*, *76*, 663–670.
- Hill, D. W. Energy system contributions in middle-distance running events. (1999). *J Sports Sci*, *17*, 477-483.
- Hoff, J., Helgerud, J., & Wisloff, U. (1999). Maximal strength training improves work economy in trained female cross-country skiers. *Med Sci Sports Exerc*, *31*, 870–7.
- Hoff, J., Gran, A., & Helgerud, J. (2002). Maximal strength training improves aerobic endurance performance. *Scand J Med Sci Sports*, *12*, 288–295.
- Hopker, J. G., Coleman, D. A., Wiles, J. D., & Galbraith, A. (2009). Familiarisation and reliability of sprint test indices during laboratory and field assessment. *J Sport Sci Med*, *8*, 528-532.
- Hopkins, W. G. (2006). Spreadsheets for analysis of controlled trials, with adjustment for a subject characteristic. *Sportscience*, *10*, 46-50.
- Hopkins, W., Marshall, S., Batterham, A., & Hanin, J. (2009). Progressive statistics for studies in sports medicine and exercise science. *Med Sci Sports Exerc*, *41*, 3-13.
- Horn, P. L., Pyne, D. B., Hopkins, W. G., & Barnes, C. J. (2010). Lower white blood cell counts in elite athletes training for highly aerobic sports. *Eur J Appl Physiol*, *110*, 925–932.
- Houmard, J. A., Costill, D. L., Mitchell, J. B., Park, S. H., & Chenier, T. C. (1991). The role of anaerobic ability in middle distance running performance. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, *62*, 40-43.
- Hrysomallis, C. (2012). The effectiveness of resisted movement training on sprinting and jumping performance. *J Strength Cond Res*, *26*, 299-306.
- Hu M., & Lin W. (2012). Effects of exercise training on red blood cell production: implications for anemia. *Acta Haematol*, *127*, 156–164.
- Hudgins, B., Scharfenberg, J., Triplett, N. T., & McBride, J. M. (2013). Relationship between jumping ability and running performance in events of varying distance. *J Strength Cond Res*, *27*, 563-567.
- Hunter, J. P., Marshall, R. N., & McNair, P. J. (2005). Relationships between ground reaction force impulse and kinematics of sprint-running acceleration. *J Appl Biomech*, *21*, 31–43.

- Jakalski, K. (1998). The pros and cons of using resisted and assisted training. Acknowledgments methods with high school sprinters: Parachutes, tubing and towing. *Track Coach, 144*, 4585–4589.
- James, D. V., Sandals, L. E., Draper, S. B., Maldonado-Martin, S., & Wood, D. M. (2007). VO₂ attained during treadmill running: The influence of a specialist (400-m or 800-m) event. *Int J Sports Physiol Perform, 2*, 128-136.
- Jiménez-Reyes, P., & González-Badillo, J. J. (2011). Monitoring training load through the CMJ in sprints and jump events for optimizing performance in athletics. *CCD, 6*, 207-217.
- Jiménez-Reyes, P., Samozino, P., Cuadrado-Peñañiel, V., Conceição, F., González-Badillo, J., et al. (2014). Effect of countermovement on power–force–velocity profile. *Eur J Appl Physiol, 114*, 2281-2288.
- Johnston, R., Quinn, T., Kertzer, R., et al. (1997). Strength training in female distance runners: impact on running economy. *J Strength Cond Res, 11*, 224–229.
- Jones, P. P., Davy, K. P., De Souza, C. A., van Pelt, R. E., & Seals, D. R. (1997). Absence of age-related decline in total blood volume in physically active females. *Am J Physiol, 272*, H2534-40.
- Jones, T. W., Howatson, G., Russell, M., & French, D. N. (2016). Performance and endocrine responses to differing ratios of concurrent strength and endurance training. *J Strength Cond Res, 30*, 693–702.
- Jubrias, S. A., Crowther, G. J., Shankland, E. G., Gronka, R. K., & Conley, K. E. (2003). Acidosis inhibits oxidative phosphorylation in contracting human skeletal muscle in vivo. *J Physiol, 553*, 589–599.
- Jung, A. P. (2003). The impact of resistance training on distance running performance. *Sports Med, 33*, 539-552.
- Kakanis, M. W., Peake, J., Brenu, E. W., Simmonds, M., Gray, B., et al. (2010). The open window of susceptibility to infection after acute exercise in healthy young male elite athletes. *Exerc Immunol Rev, 16*, 119–137.
- Kale, M., Asci, A., Bayrak, C., & Acikada, C. (2009). Relationships among jumping performances and sprint parameters during maximum speed phase in sprinters. *J Strength Cond Res, 23*, 2272– 2279.
- Kanstrup, I. L., & Ekblom, B. (1984). Blood volume and hemoglobin concentration as determinants of maximal aerobic power. *Med Sci Sports Exerc, 16*, 256–262.

Karlssohn, J., & Saltin, B. (1970). Lactate, ATP and CP in working muscles during exhaustive exercise in man. *J Appl Physiol*, 29, 598-602.

Kawamori, N., Newton, R. U., Hori, N., & Nosaka, K. (2014). Effects of weighted sled towing with heavy versus light load on sprint acceleration ability. *J Strength Cond Res*, 28, 2738-2745.

Kelly, C. M., Burnett, A. F., & Newton, M. J. (2008). The effect of strength training on three-kilometer performance in recreational women endurance runners. *J Strength Cond Res*, 22, 396-403.

Kestin, A. S., Ellis, P. A., Barnard, M. R., Errichetti, A., Rosner, B. A., & Michelson, A. D. (1993). Effect of strenuous exercise on platelet activation state and reactivity. *Circulation*, 88, 1502-1511.

Knez, W. L., Coombes, J. S., Jenkins, D. G. (2006). Ultra-endurance exercise and oxidative damage: implications for cardiovascular health. *Sports Med*, 36, 429-441.

Koziris, L. P., Hickson, R. C., Chatterton, R. T., et al. (1999). Serum levels of total and free IGF-1 and IGFBP-3 are increased and maintained in long-term training. *J Appl Physiol*, 86, 1436-42.

Kraemer, W. J., Marchitelli, L., Gordon, S. E., et al. (1990). Hormonal and growth factor responses to heavy resistance exercise protocols. *J Appl Physiol*, 69, 1442-1450.

Kraemer, W. J., Patton, J. F., Gordon, S. E., Harman, E. A., Deschenes, M. R., Reynolds, K., Newton, R. U., Tripplett, N. T., & Dziados, J. E. (1995). Compatibility of high-intensity strength and endurance training on hormonal and skeletal muscle adaptations. *J Appl Physiol*, 78, 976-989.

Kraemer, W. J., Fleck, S. J., & Evans, W. J. (1996). Strength and power training: physiological mechanisms of adaptation. *Exerc Sport Sci Rev*, 24, 363-97.

Kraemer, W. J., Volek, J. S., Bush, J. A., Putukian, M., & Sebastianelli, W. J. (1998). Hormonal responses to consecutive days of heavy-resistance exercise with or without nutritional supplementation. *J Appl Physiol*, 85, 1544-1555.

Kristensen, G. O., van den Tillaar, R., & Ettema, G. J. (2006). Velocity specificity in early-phase sprint training. *J Strength Cond Res*, 20, 833-837.

Kyrolainen, H., Belli, A., & Komi, P.V. (2001). Biomechanical factors affecting running economy. *Med Sci Sports Exerc*, 33, 1330-1337.

- Lacour, J., Bouvat, E., & Barthelemy, J. (1990). Post-competition blood lactate concentrations as indicators of anaerobic energy expenditure during 400-m and 800-m races. *Eur J Appl Physiol*, *61*, 172-176.
- Lesesve, J., Guinot, M., Andolfatto, S., Bene, M., & Dine, G. (2000). Effect of elite cycling on leukocyte counts. *Br J Haematol*, *110*, 1006–1014.
- Letzelter, M., Sauerwein, G., & Burger, R. (1995). Resistance runs in speed development. *Mod Athlete Coach*, *33*, 7-12.
- Lockie, R. G., Murphy, A. J., & Spinks, C. D. (2003). Effects of resisted sled towing on sprint kinematics in field-sport athletes. *J Strength Cond Res*, *17*, 760-767.
- Lockie, R. G., Murphy, A. J., Schultz, A. B., Knight, T. J., & Janse de Jonge, X. A. (2012). The effects of different speed training protocols on sprint acceleration kinematics and muscle strength and power in field sport athletes. *J Strength Cond Res*, *26*, 1539-50.
- López-Chicharro, J., & Fernández-Vaquero, A. (2006). *Fisiología del ejercicio*. 3ª Edición, Madrid, España: Panamericana.
- Loturco, I., Pereira, L. A., Cal, A. C., D'Angelo, R. A., Fernandes, V., Kitamura, K., Kobal, R., & Nakamura, F. Y. (2015a). Vertical and horizontal jump tests are strongly associated with competitive performance in 100-m dash events. *J Strength Cond Res*, *29*, 1966-1971.
- Loturco, I., D'Angelo, R. A., Fernandes, V., Gil, S., Kobal, R., Cal, C. C., Kitamura, K., & Nakamura, F. Y. (2015b). Relationship between sprint ability and loaded/unloaded jump tests in elite sprinters. *J Strength Cond Res*, *29*, 758-764.
- Lowe, W. L. (1991). *Biological actions of the insulin-like growth factors*. In: *Insulin-Like Growth Factors: Molecular and Cellular Aspects*, eds D. Le Roith. Boca Raton, FL: CRC, 49–86.
- Luger, A., Watschinger, B., Deuster, P., Svoboda, T., Clodi, M., & Chrousos, G. P. (1992). Plasma growth hormone and prolactin responses to graded levels of acute exercise and to a lactate infusion. *Neuroendocrinology*, *56*, 112–117.
- MacDougall, J. D., Wenger, H. A., & Green, H. J. (1991). *Physiological testing of the high-performance athlete*. Champaign, IL: Human Kinetics.
- Mairbäurl, H. (2013). Red blood cells in sports: effects of exercise and training on oxygen supply by red blood cells. *Front Physiol*, *4*, 332.

- Markovic, G., Dizdar, D., Jukic, I., & Cardinale, M. (2004). Reliability and factorial validity of squat and countermovement jump tests. *J Strength Cond Res*, *18*, 551-555.
- McBride, J. M., Blow, D., Kirby, T. J., Haines, T. L., Dayne, A. M., & Triplett, N. T. (2009). Relationship between maximal squat strength and five, ten, and forty yard sprint times. *J Strength Cond Res*, *23*, 1633–1636.
- McMaster, D., Gill, N., Cronin, J., & McGuigan, M. (2014). A Brief Review of Strength and Ballistic Assessment Methodologies in Sport. *Sports Med*, *44*, 603-623.
- Medbo, J. I., Mohn, A. C., Tabata, I., Bahr, R., Vaage, O., & Sejersted, O. M. (1988). Anaerobic capacity determined by maximal accumulated O₂ deficit. *J Appl Physiol*, *64*, 50-60.
- Medbo, J. I., & Tabata, I. (1993). Anaerobic energy release in working muscle during 30 s to 3 min of exhausting bicycling. *J Appl Physiol*, *75*, 1654-1660.
- Mero, A., Luthanen, P., Viitasalo, J. T., & Komi, P. V. (1981). Relationships between the maximal running velocity, muscle fiber characteristics, force production and force relaxation of sprinters. *Scand J Sports Sci*, *3*, 16-22.
- Michishita, R., Shono, N., Inoue, T., Tsuruta, T., & Node, K. (2010). Effect of exercise therapy on monocyte and neutrophil counts in overweight women. *Am J Med Sci*, *339*, 152–156.
- Mikkola, J., Rusko, H., Nummela, A., Pollari, T., & Hakkinen, K. (2007). Concurrent endurance and explosive type strength training improves neuromuscular and anaerobic characteristics in young distance runners. *Int J Sports Med*, *28*, 602-611.
- Mikkola, J. S., Rusko, H. K., Nummela, A. T., Paavolainen, L. M., & Häkkinen, K. (2007). Concurrent endurance and explosive type strength training increases activations and Fast force production of leg extensor muscles in endurance athletes. *J Strength Cond Res*, *21*, 613–620.
- Mikkola, J., Vesterinen, V., Taipale, R., Capostagno, B., Häkkinen, K., & Nummela, A. (2011). Effect of resistance training regimens on treadmill running and neuromuscular performance in recreational endurance runners. *J Sports Sci*, *29*, 1359-1371.
- Millet, G. P., Jaouen, B., Borrani, F., et al. (2002). Effects of concurrent endurance and strength training on running economy and VO₂ kinetics. *Med Sci Sports Exerc*, *34*, 1351–1359.
- Morin, J. B., Petrakos, G., Jiménez-Reyes, P., Brown, S. R., Samozino, P., & Cross, M. R. (2016). Very-heavy sled training for improving horizontal force output in soccer players. *Int J Sports Physiol Perform*, *11*, 1-13.

- Moritani, T., & deVries, H. A. (1979). Neural factors versus hypertrophy in the time course of muscle strength gain. *Am J Phys Med*, *58*, 115–30.
- Morrow, J. R., Jackson, A. W., Disch, J. G., & Mood, D. P. (1995). *Measurement and Evaluation in Human Performance*. Champaign, IL: Human Kinetics.
- Mouchbahani, R., Gollhofer, A., & Dickhuth, H. (2004). Pulley Systems in sprint training. *Mod Athlete Coach*, *42*, 14-16.
- Murray, A., Aitchison, T. C., Ross, G., Sutherland, K., Watt, I., McLean, D., et al. (2005). The effect of towing a range of relative resistances on sprint performance. *J Sports Sci*, *23*, 927-935.
- Myer, G. D., Ford, K. R., Brent, J. L., Divine, J. G., & Hewett, T. E. (2007). Predictors of sprint start speed: The effects of resistive ground-based vs. inclined treadmill training. *J Strength Cond Res*, *21*, 831-836.
- Nielsen, H. B. (2003). Arterial desaturation during exercise in man: implication for O₂ uptake and work capacity. *Scand J Med Sci Sports*, *13*, 339–358.
- Nikolaidis, M. G., Protosygiellou, M. D., Petridou, A., Tsalis, G., Tsigilis, N., & Mougios, V. (2003). Hematologic and biochemical profile of juvenile and adult athletes of both sexes: implications for clinical evaluation. *Int J Sports Med*, *24*, 506-511.
- Nishida, Y., Matsubara, T., Tobina, T., Shindo, M., Tokuyama, K., Tanaka, K., & Tanaka, H. (2010). Effect of low-intensity aerobic exercise on insulin-like growth factor-I and insulin-like growth factor-binding proteins in healthy men. *Int J Endocrinol*, *10*, 452820.
- Novacheck, T. F. (1998). The biomechanics of running. *Gait Posture*, *7*, 77–95.
- Nummela, A. T., Paavolainen, L. M., Sharwood, K. A., Lambert, M. I., Noakes, T. D., et al. (2006). Neuromuscular factors determining 5 km running performance and running economy in well-trained athletes. *Eur J Appl Physiol*, *97*, 1-8.
- Olesen, H. L., Raabo, E., Bangsbo, J., & Secher, N. H. (1994). Maximal oxygen deficit of sprint and middle distance runners. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, *69*, 140-146.
- O'Toole, M. L., Hiller, W. D., Roalstad, M. S., & Douglas, P. S. (1988). Hemolysis during triathlon races: its relation to race distance. *Med Sci Sports Exerc*, *20*, 272–275.
- Paavolainen, L., Häkkinen, K., & Rusko, H. (1991). Effects of explosive type strength training on physical performance characteristics in cross-country skiers. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, *62*, 251–255.

- Paavolainen, L., Häkkinen, K., Nummela, A., & Rusko, H. K. (1994). Neuromuscular characteristics and fatigue in endurance and sprint athletes during a new anaerobic power test. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, *69*, 119–126.
- Paavolainen, L. M., Hakkinen, K., Hamalainen, I., et al. (1999a). Explosive strength training improves 5-km running time by improving running economy and muscle power. *J Appl Physiol*, *86*, 1527–33.
- Paavolainen, L., Nummela, A., & Rusko, H. (1999b). Neuromuscular characteristics and muscle power as determinants of 5km running performance. *Med Sci Sports Exerc*, *31*, 124–130.
- Paavolainen, L. M., Nummela, A., Rusko, H., et al. (1999c). Neuromuscular characteristics and fatigue during 10 km running. *Int J Sports Med*, *20*, 516–521.
- Pareja-Blanco, F., Rodriguez-Rosell, D., Sanchez-Medina, L., Gorostiaga, E. M., & Gonzalez-Badillo, J. J. (2014). Effect of movement velocity during resistance training on neuromuscular performance. *Int J Sports Med*, *35*, 916-924.
- Parisotto, R., Pyne, D., Martin, D., Gore, C., Fallon, K., Fricker, P., & Hahn, A. (2003). Neutropenia in elite male cyclists. *Clin J Sport Med*, *13*, 303–305.
- Paulson, S., & Braun, W. A. (2011). The influence of parachute-resisted sprinting on running mechanics in collegiate track athletes. *J Strength Cond Res*, *25*, 1680-1685.
- Petrakos, G., Morin, J. B., & Egan, B. (2016). Resisted sled sprint training to improve sprint performance: a systematic review. *Sports Med*, *43*, 381-400.
- Plisk, S. S. (2000). *Speed, agility, and speed-endurance development*. In: Baechle, T. R., & Earle, R. W., eds. *Essentials of strength training and conditioning*. Champaign, IL: Human Kinetics, 474-485.
- Poehlman, E. T., & Copeland, K. C. (1990). Influence of physical activity on insulin-like growth factor-I in healthy younger and older men. *J Clin Endocrinol Metab*, *71*, 1468–1473.
- Poehlman, E. T., Rosen, C. J., & Copeland, K. C. (1994). The influence of endurance training on insulin-like growth factor-1 in older individuals. *Metabolism*, *43*, 1401–1405.
- Quinn, M. D. (2003). The effects of wind and altitude in the 200-m sprint. *J Appl Biomech*, *19*, 49-59.
- Rasmussen, J., Hanel, B., Diamant, B., & Secher, N. H. (1991). Muscle mass effect on arterial desaturation after maximal exercise. *Med Sci Sports Exerc*, *23*, 1349–1352.

Ray, C. A., Cureton, K. J., & Ouzts, H. G. (1990). Postural specificity of cardiovascular adaptations to exercise training. *J Appl Physiol*, *69*, 2202–2208.

Rietjens, G. J. W. M., Kuipers, H., Hartgens, F., & Keizer, H. A. (2002). Red blood cell profile of elite Olympic distance triathletes. A three-year follow-up. *Int J Sports Med*, *23*, 391-396.

Roelen, C. A., de Vries, W. R., Koppeschaar, H. P., et al. (1997). Plasma insulin-like growth factor-I and high affinity growth hormonebinding protein levels increase after two weeks of strenuous physical training. *Int J Sports Med*, *18*, 238-41.

Rønnestad, B. R., & Mujika, I. (2014). Optimizing strength training for running and cycling endurance performance: A review. *Scand J Med Sci Sports*, *24*, 603-612.

Sahlin, K. (1992). Metabolic factors in fatigue. *Sports Med*, *13*, 99–107.

Sale, D. G. (1988). Neural adaptation to resistance training. *Med Sci Sports Exerc*, *20*, S135–45.

Sandals, L. E., Word, D. M., Draper S. B., & James, D. V. B. (2006). Influence of pacing strategy on oxygen uptake during treadmill middle-distance running, *Int J Sports Med*, *27*, 37-42.

Sánchez-Medina, L., García-Pallarés, J., Pérez, C., & González-Badillo, J. J. (2017). Estimation of relative load from bar velocity in the full back squat exercise. *Sports Med Int Open*, *1*, E80-E87.

Saunders, P. U., Pyne, D. B., Telford, R. D., & Hawley, J. A. (2004). Factors affecting running economy in trained distance runners. *Sports Med*, *34*, 465-485.

Sawka, M. N., Convertino, V. A., Eichner, E. R., Schnieder, S. M., & Young, A. J. (2000). Blood volume: importance and adaptations to exercise training, environmental stresses, and trauma/sickness. *Med Sci Sports Exerc*, *32*, 332–348.

Schmidt, W., & Prommer, N. (2008). Effects of various straining modalities on blood volume. *Scand J Med Sci Sports*, *18*, 57-69.

Schmidt, W., & Prommer, N. (2010). Impact of alterations in total hemoglobin mass on VO₂max. *Exerc Sport Sci Rev*, *38*, 68–75.

Schumacher, Y. O., Grathwohl, D., Barturen, J. M., Wollenweber, M., Heinrich, L., Schmid, A., Huber, G., & Keul, J. (2000). Haemoglobin, haematocrit and red blood cell indices in elite cyclists. Are the control values for blood testing valid? *Int J Sports Med*, *21*, 380–385.

- Schumacher, Y. O., Jankovits, R., Bultermann, D., Schmid, A., & Berg A. (2002). Hematological indices in elite cyclists. *Scand J Med Sci Sports*, *12*, 301–308.
- Scott, W. A. (2002). Maximizing performance and the prevention of injuries in competitive athletes. *Curr Sports Med Rep*, *1*, 184-190.
- Seagrave, L. (1996). Introduction to sprinting. *New Stud Athl*, *11*, 93-113.
- Sedano, S., Marin, P. J., Cuadrado, G., et al. (2013). Concurrent training in elite male runners: the influence of strength versus muscular endurance training on performance outcomes. *J Strength Cond Res*, *27*, 2433–2443.
- Seitz, L. B., Reyes, A., Tran, T. T., de Villarreal, E. S., & Haff, G. G. (2014). Increases in lower-body strength transfer positively to sprint performance: a systematic review with meta-analysis. *Sports Med*, *44*, 1693-1702.
- Sharpe, K., Hopkins, W., Emslie, K. R., Howe, C., Trout, G. J., Kazlauskas, R., et al. (2002). Development of reference ranges in elite athletes for markers of altered erythropoiesis. *Haematologica*, *87*, 1248–1257.
- Shephard, R. J., Shek, P. N. (1993). Exercise and infection. *Clin J Sports Med*, *3*, 75-7.
- Sinnett, A. M., Berg, K., Latin, R. W., Noble, J. M. (2001). The relationship between field tests of anaerobic power and 10-km run performance. *J Strength Cond Res*, *15*, 405-412.
- Smallridge, R. C., Whorton, N. E., Burman, K. D., & Fergusson, E. W. (1985). Effects of exercise and physical fitness on the pituitary-thyroid axis and on prolactin secretion in male runners. *Metabolism*, *34*, 949–954.
- Smirniotou, A., Katsikas, C., Paradisis, G., Argeitaki, P., Zacharogiannis, E., & Tziortzis, S. (2008). Strength-power parameters as predictors of sprinting performance. *J Sports Med Phys Fitness*, *48*, 447–454.
- Spencer, M. R., & Gastin, P. B. (2001). Energy system contribution during 200- to 1500-m running in highly trained athletes. *Med Sci Sports Exerc*, *33*, 157-162.
- Spinks, C. D., Murphy, A. J., Spinks, W. L., & Lockie, R. G. (2007). The effects of resisted sprint training on acceleration performance and kinematics in soccer, rugby union, and australian football players. *J Strength Cond Res*, *21*, 77-85.
- Spurrs, R. W., Murphy, A. J., & Watsford, M. L. (2003). The effect of plyometric training on distance running performance. *Eur J Appl Physiol*, *89*, 1–7.

- Staron, R. S., Karapondo, D. L., Kraemer, W. J., et al. (1994). Skeletal muscle adaptations during early phase of heavy-resistance training in men and women. *J Appl Physiol*, 76, 1247–55.
- Staron, R. S., Leonardi, M. J., Karapondo, D. L., et al. (1991). Strength and skeletal muscle adaptations in heavy-resistance-trained women after detraining and retraining. *J Appl Physiol*, 70, 631–40.
- Storen, O., Helgerud, J., Stoa, E. M., et al. (2008). Maximal strength training improves running economy in distance runners. *Med Sci Sports Exerc*, 40, 1087–1092.
- Taipale, R., Mikkola, J., Nummela, A., Vesterinen, V., Capostagno, B., Walker, S., Gitonga, D., Kraemer, W., & Häkkinen, K. (2010). Strength training in endurance runners. *Int J Sports Med*, 31, 468-476.
- Taipale, R. S., Mikkola, J., Vesterinen, V., Nummela, A., & Häkkinen, K. (2013). Neuromuscular adaptations during combined strength and endurance training in endurance runners: maximal versus explosive strength training or a mix of both. *Eur J Appl Physiol*, 113, 325-335.
- Taipale, R. S., Mikkola, J., Salo, T., Hokka, L., Vesterinen, V., Kraemer, W. J., Nummela, A., & Häkkinen, K. (2014). Mixed maximal and explosive strength training in recreational endurance runners. *J Strength Cond Res*, 28, 689-699.
- Telford, R. D., & Cunningham, R. B. (1991). Sex, sport and body-size dependency of hematology in highly trained athletes. *Med Sci Sports Exerc*, 23, 788–794.
- Tesch, P. A., & Karlsson, J. (1984). Muscle metabolite accumulation following maximal exercise. A comparison between short-term and prolonged kayak performance. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 52, 243-246.
- Thirup, P. Haematocrit: within-subject and seasonal variation. (2003). *Sports Med*, 33, 231–243.
- Thomas, C., Hanon, C., Perrey, S., Le Chevalier, J. M., Couturier, A., & Vandewalle, H. (2005). Oxygen uptake response to an 800-m running race. *Int J Sports Med*, 26, 268-273.
- Tremblay, M. S., Copeland, J. L., & Van Helder, W. (2005). Influence of exercise duration on post-exercise steroid hormone responses in trained males. *Eur J Appl Physiol*, 94, 505–513.
- Tsai, L., Johansson, C., Pousette A, Tegelman, R., Carlström, K., & Hemmingsson, P. (1991). Cortisol and androgen concentrations in female and male elite endurance athletes in relation to physical activity. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 63, 308-11.

- Tucker, R., Lambert, M., & Noakes, T. D. (2006). An analysis of pacing strategies during men's World-record performances in track athletics. *Int J Sports Physiol Perform*, *1*, 223–245.
- Tucker, R., & Noakes, T. D. (2009). The physiological regulation of pacing strategy during exercise: A critical review. *British J Sports Med*, *43* (6), e1.
- Turner, A. M., Owings, M., & Schwane, J. A. (2003). Improvement in running economy after 6 weeks of plyometric training. *J Strength Cond Res*, *17*, 60–7.
- Verkhoshansky, Y. (1983). Una nueva concepción del entrenamiento especial de fuerza de saltadores y lanzadores. *Cuadernos de atletismo, Acondicionamiento físico atlético*, *10*, 13-20.
- Verkhoshansky, Y. (1990). *Entrenamiento deportivo*. Barcelona, España: M. Roca.
- Vescovi, J. D., & McGuigan, M. R. (2008). Relationships between sprinting, agility, and jump ability in female athletes. *J Sports Sci*, *26*, 97–107.
- Viitasalo, J. T. (1985). Measurement of force-velocity characteristics for sports-men in field conditions. In D. A. Winter, R. W., Norman, R. P., Wells, K. C., & Hayes, A. E. Patla (Eds.), *Biomechanics IX-A*. Champaign, IL: Human Kinetics, 96-101.
- Vikmoen, O., Raastad, T., Seynnes, O., Bergstrøm, K., Ellefsen, S., & Rønnestad, B. R. (2016). Effects of heavy strength training on running performance and determinants of running performance in female endurance athletes. *Plos One*, *11*, e0150799.
- Vincent, W. J. (1999). *Statistics in kinesiology*. Champaign, IL: Human Kinetics.
- Vitiello, M. V., Wilkinson, C. W., Merriam, G. R., Moe, K. E., Prinz, P. N., Ralph, D. D., Colasurdo, E. A., & Schwartz, R. S. (1997). Successful 6-month endurance training does not alter insulin-like growth factor-I in healthy older men and women. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci*, *52*, M149–M154.
- Viru, A. (1995). *Adaptation in sports training*. Boca Raton, Ann Arbor, London, Tokyo: CRC Press.
- Vleck, V., Millet, G. P., & Alves, F. B. (2014). The impact of triathlon training and racing on athletes' general health. *Sports Med*, *44*, 1659–1692.
- Warburton, D. E., Mark, J., Haykowsky, H., Quinney, H. A., Blackmore, D., Teo, K. K., Taylor, D. A., McGavock, J., & Humen, D. P. (2004). Blood volume expansion and cardiorespiratory function: effects of training modality. *Med Sci Sports Exerc*, *36*, 991-1000.

Weight, L. M., Klein, M., Noakes, T. D., & Jacobs, P. (1992). Sports anemia: a real or apparent phenomenon in endurance-trained athletes? *Int J Sports Med*, *13*, 334-347.

Weyand, P. G., Cureton, K. J., Conley, D. S., Sloniger, M. A., & Liu, Y. (1994). Peak oxygen deficit predicts sprint and middle-distance track performance. *Med Sci Sports Exerc*, *26*, 1174-1180.

Whittaker, J. P., Linden, M. D., & Coffey, V. G. (2013). Effect of aerobic interval training and caffeine on blood platelet function. *Med Sci Sports Exerc*, *45*, 342-350.

Wilkinson, J. G., Martin, D. T., Adams, A. A., & Liebman, M. (2002). Iron status in cyclists during high-intensity interval training and recovery. *Int J Sports Med*, *23*, 544-548.

Wilson, J. M., Marin, P. J., Rhea, M. R., Wilson, S. M. C., Loenneke, J. P. & Anderson, J. C. (2012). Concurrent training: a meta analysis examining interference of aerobic and resistance exercise. *J Strength Cond Res*, *26*, 2293-2307.

Withers, R. T., Sherman, V. M., Clark, D. G., & Brinkman, M. (1991). Muscle metabolism during 30, 60 and 90 s of maximal cycling on an air-braked ergometer. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, *63*, 354-362.

Young, W. B. (2006). Transfer of strength and power training to sports performance. *Int J Sports Physiol Perform*, *1*, 74-83.

Young, W., Cormack, S., & Crichton, M. (2011). Which jump variables should be used to assess explosive leg muscle function? *Int J Sports Physiol Perform*, *6*, 51-57.

Zafeiridis, A., Saraslanidis, P., Manou, V., Ioakimidis, P., Dipla, K., & Kellis, S. (2005). The effects of resisted sled-pulling sprint training on acceleration and maximum speed performance. *J Sports Med Phys Fitness*, *45*, 284-290.

Zatsiorsky, V. (1995). *Science and practice of strength training*. Champaign, IL: Human Kinetics.

12. GLOSARIO DE ACRÓNIMOS

GLOSARIO DE ACRÓNIMOS

IRM	Una repetición máxima
ANOVA	Modelo estadístico de Análisis de la Varianza
ANCOVA	Modelo estadístico de Análisis de la Covarianza
ATP	Adenosin trifosfato
CA	Carga alta
CB	Carga baja
CEA	Ciclo de Estiramiento-Acortamiento (Stretch Shortening Cycle, SSC)
CCI	Coefficiente de correlación intraclase
CHCM	Concentración de hemoglobina corpuscular media
CK	Creatin quinasa
CM	Carga media
CMJ	Salto vertical con contramovimiento
CMJc	Salto vertical con cargas
CV	Coefficiente de variación
CO₂	Dióxido de carbono
DT	Desviación típica
EPO	Eritropoyetina
FC	Frecuencia cardíaca
GC	Grupo control
GF	Grupo de fuerza
GH	Hormona del crecimiento
H⁺	Hidrogenión
Hb	Hemoglobina
HCM	Hemoglobina corpuscular media
Hct	Hematocrito
IC	Intervalo de confianza
IGF-1	Factor de crecimiento insulínico tipo 1 o somatomedina-C
[La-]	Concentración de lactato
NO	Óxido nítrico
O₂	Oxígeno
Pc	Peso corporal
PCr	Fosfocreatina

Post	Post-test
Pre	Pre-test
PRL	Prolactina
rep	Repeticiones realizadas en la serie
rep/ser	Número de repeticiones por serie
RBC	Glóbulos rojos, eritrocitos o hematíes
RDW	Velocidad de segmentación
RFD	Producción de fuerza por unidad de tiempo o “rate of force development”
ses/sem	Sesiones por semana
SPSS	Paquete Estadístico (Statistical Package for the Social Sciences)
SQ	Sentadilla completa
T1	Test 1
T2	Test 2
T3	Test 3
T4	Test 4
T5	Test 5
T10m	Tiempo en recorrer 10 m
T20m	Tiempo en recorrer 20 m
T200m	Tiempo en recorrer 200 m
T800m	Tiempo en recorrer 800 m
V_{1carga}	Carga que se desplaza a la velocidad de $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ en el ejercicio de sentadilla
VCM	Volumen corpuscular medio
VMP	Velocidad medida propulsiva
VMP_{cc}	Velocidad media propulsiva con las cargas absolutas comunes en los tests
VO₂	Consumo de oxígeno
VO_{2máx}	Consumo máximo de oxígeno
VPM	Volumen plaquetar medio
%1RM	Porcentaje de una repetición máxima
%carga20cm	Porcentaje de la carga con la que se saltó 20 cm

13. RELACIÓN DE TABLAS Y FIGURAS

RELACIÓN DE TABLAS

Número	Título	Página
1	Velocidades, tiempos y porcentajes medios, inicial y final en tramos de 100 m en carreras de 400, 800 y 1500 m. (Hanon et al., 2011)	33
2	Ecuación para determinar la carga óptima en el arrastre según Lockie et al. (2003)	64
3	Características iniciales de los sujetos del Estudio I (medias \pm dt) (n=19)	72
4	Distribución de la carga de los arrastres	79
5	Resumen del diseño del Estudio I	79
6	Programación del entrenamiento específico de carreras con arrastre durante el entrenamiento de 7 semanas. Las cargas se expresan en volumen e intensidad	80
7	Fiabilidad de las medidas	82
8	Síntesis del análisis de diferencia de medias entre el test inicial (Pre) y test final (Post) según grupos	83
9	Valores absolutos y porcentuales de los cambios entre las mediciones del test inicial (Pre) y el test final (Post) en las carreras, 2º de Triple, CMJ, CMJc y sentadilla para cada grupo	89
10	Características iniciales de los sujetos del Estudio II (medias \pm dt) (n=14)	101
11	Relaciones entre el rendimiento en 800 m y los tiempos en carrera (10 m, 20 m, 10-20 m, 200 m, 1º 50 m, 2º 50 m, 3º 50 m, 4º 50 m), los tests de fuerza y salto vertical (CMJ, CMJc, SQ). (n=14, excepto para el 200 m: n=12)	109
12	Características iniciales de los sujetos del Estudio III (medias \pm dt) (n=13)	123
13	Cambios a lo largo de la temporada en el rendimiento en las variables de fuerza y carrera (n=13)	129
14	Cambios a lo largo de la temporada en las variables hematológicas (n=13)	130
15	Cambios a lo largo de la temporada en las variables hormonales y bioquímicas (n=13)	131
16	Características iniciales de los sujetos del Estudio IV (medias \pm dt) (n = 13)	150
17	Características del entrenamiento de fuerza de GF	153
18	Cambios en las variables de fuerza y carrera durante la temporada (T1, T2, T3) en GF y GC	156
19	Cambios en las variables hormonales durante la temporada (T1, T2, T3) en GF y GC	156

RELACIÓN DE FIGURAS

Número	Título	Página
1	Evolución de la velocidad de carrera durante una competición de 400, 800 y 1500 m en atletas de élite. Las velocidades están expresadas en porcentajes relativos con respecto al pico de velocidad de cada distancia. (Hanon et al., 2011)	33
2	Evolución de los valores medios de VO ₂ , cada 11 s durante una prueba realizada en tapiz rodante hasta el agotamiento por 11 atletas de 400 m (tiempo: 1:51.6 ± 3 min:ss) (Heugas et al., 1997)	34
3	Evolución de los valores medios de velocidad (círculos negros) y VO ₂ (cuadrados negros) a lo largo de una carrera de 800 m, realizada en pista de atletismo por 5 atletas de nivel regional y nacional (tiempo: 2:00 ± 3 min:ss) (Thomas et al., 2005)	36
4	Evolución de los valores medios de FC a lo largo de una carrera de 800 m, realizada en pista de atletismo por 5 atletas de nivel regional y nacional (tiempo: 2:00 ± 3 min:ss) (Thomas et al., 2005)	36
5	Imagen de la ejecución del ejercicio de sentadilla con el medidor lineal de velocidad (T-FORCE System, Murcia, Spain)	75
6	Imagen de la ejecución del test de salto CMJ con la plataforma de infrarrojos (Optojump, Microgate, Italia)	76
7	Imagen de la ejecución del test de salto CMJ _c con la plataforma de infrarrojos (Optojump, Microgate, Italia)	77
8	Imagen de la ejecución del ejercicio de 2º de triple	77
9	Imagen de la realización del test de velocidad de 40 m y tiempos parciales con las células fotoeléctricas (Polifemo Radio Light, Microgate, Italia)	78
10	Imagen de una sesión de entrenamiento con arrastres	80
11	Imagen del arrastre de trineo utilizado en las sesiones de entrenamiento con sus respectivos discos de pesas.	81
12	Medidas individuales y media de los tres grupos (CB, CM, CA) en A) carrera de 20 m; B) carrera de 30 m; C) carrera de 40 m, en el test inicial (PRE) y test final (POST) tras 7 semanas de entrenamiento. * p < 0.05	84
13	Medidas individuales y media de los tres grupos (CB, CM, CA) en A) carrera 20-30 m; B) carrera 20-40 m; en el test inicial (PRE) y test final (POST) tras 7 semanas de entrenamiento. * p < 0.05	85
14	Medidas individuales y media de los tres grupos (CB, CM, CA) en la carrera 10-40 m en el test inicial (PRE) y test final (POST) tras 7 semanas de entrenamiento. ** p < 0.01	86
15	Medidas individuales y media de los tres grupos (CB, CM, CA) en el salto CMJ en el test inicial (PRE) y test final (POST) tras 7 semanas de entrenamiento. * p < 0.05; # diferencias entre grupos.	86
16	Medidas individuales y media de los tres grupos (CB, CM, CA) en el salto con cargas CMJ _c en el test inicial (PRE) y test final (POST) tras 7 semanas de entrenamiento. * p < 0.05	87
17	Medidas individuales y media de los tres grupos (CB, CM, CA) en la velocidad media propulsiva (VMP) de las cargas comunes en la sentadilla completa en el test inicial (PRE) y test final (POST) tras 7 semanas de entrenamiento. * p < 0.05	87
18	Correlación entre los cambios producidos en el CMJ con cargas y la VMP en el ejercicio de sentadilla. (n=19)	88

19	Imagen de la realización del test de 20 m en un recinto cubierto con las células fotoeléctricas (Polifemo Radio Light, Microgate, Italia)	104
20	Imagen de la realización del test de 200 m en la pista de atletismo con las células fotoeléctricas (Polifemo Radio Light, Microgate, Italia)	104
21	Imagen de la realización del test de CMJ con la plataforma de infrarrojos <i>Optojump</i> (Microgate, Italia) tras la carrera de 200 m	105
22	Imagen de la realización del test de CMJc con la plataforma de infrarrojos <i>Optojump</i> (Microgate, Italia)	106
23	Imagen de la realización del test de sentadilla completa con el medidor lineal de velocidad <i>T-FORCE System</i> (Ergotech, Murcia, España)	106
24	Imagen del analizador de lactato <i>Lactate Pro 2</i> (Arkray, Japón)	107
25	Relaciones entre el tiempo en 800 m y los tiempos en carrera 20 m (A) y 200 m (B) (n=14, excepto para el 200 m: n=12)	110
26	Relaciones entre el rendimiento en 800 m y los intervalos de tiempo parcial del 200 m: A) 1 ^{er} 50 m (0-50 m); B) 2 ^o 50 m (50-100 m); C) 3 ^{er} 50 m (100-150 m); D) 4 ^o 50 m (150-200 m), y el rendimiento en 800 m. (n=12)	111
27	Esquema del diseño experimental. Se realizaron un total de 5 tests (T1, T2, T3, T4, T5) a lo largo de la temporada. Los tests de fuerza y carrera se realizaron en todos los tests, mientras que los análisis de sangre sólo en el T1, T3 y T5. El rendimiento en 800 m se registró en el T3 y T5	122
28	A) Imagen de la extracción de sangre para el posterior análisis hematológico y hormonal; B) Ejemplo de informe del Laboratorio especializado con los resultados de las analíticas	127
29	Correlación entre los cambios producidos en el rendimiento en 800 m y los cambios en la velocidad media propulsiva con las cargas comunes en el ejercicio de sentadilla completa (VMPcc) entre el T3 y el T5. (n = 9)	131
30	Correlación entre los cambios producidos en el rendimiento en 800 m y los cambios en la concentración de glóbulos rojos (RBC) entre el T3 y el T5. (n = 10)	132
31	Correlación entre los cambios producidos en el rendimiento en 800 m y los cambios en la concentración de hematocrito (Hct) entre el T3 y el T5. (n = 10)	132
32	Correlación entre los cambios producidos en el rendimiento en 800 m y los cambios en la concentración de hemoglobina (Hb) entre el T3 y el T5. (n = 10)	133
33	Imagen de la realización del test de flexión plantar utilizando la plataforma de fuerza <i>Isonet</i> (JLML, España) en una máquina tipo <i>Smith Multipower</i> (Murcia, España)	152
34	Cambios intra-grupo en T20m, T200m, T800m, CMJ, CMJc, V ₁ carga y RFD en el grupo de fuerza (GF) y grupo control (GC). A) T1 vs. T2; B) T1 vs. T3; C) T2 vs. T3	158
35	Cambios entre grupos en T20m, T200m, T800m, CMJ, CMJc, V ₁ carga y RFD en el grupo de fuerza (GF) y grupo control (GC). A) T1 vs. T2; B) T1 vs. T3; C) T2 vs. T3	159
36	Correlación entre los cambios en el tiempo en 800 m y los cambios en T10-20m en el GF	161
37	Correlación entre los cambios en el tiempo en 800 m y los cambios en el CMJ en el GF	161
38	Correlación entre los cambios en el tiempo en 800 m y los cambios en la IGF-1 en el GF	162

14. ANEXOS

14. 1 ANEXO 1. Consentimiento Informado **Estudio I**

CONSENTIMIENTO INFORMADO para los tests físicos

D.....
mayor de edad, con D.N.I. actuando en nombre propio,

DECLARO:

Que he sido informado por el Dr. Juan José González Badillo sobre las posibles consecuencias de la realización de los tests físicos de sentadilla, de saltos con cargas y sin cargas y test de velocidad en 40 metros, así como de los riesgos potenciales y molestias que podrían derivarse de los mismos, a la vez que he podido realizar todas las preguntas que he considerado necesarias, respondiéndome a todas ellas de manera comprensible para mí.

También me ha informado de mi derecho a rechazar el tratamiento o revocar este consentimiento.

Por lo tanto, CONSIENTO en someterme a los protocolos indicados.

Si mi caso puede ser de utilidad científica y para tal fin se publican artículos científicos, autorizo su publicación siempre y cuando se garantice el más absoluto respeto a mi intimidad y anonimato.

Firma del sujeto

Firma del responsable del estudio

En Sevilla, a de del 20 .

14.2 ANEXO 2. Consentimiento Informado Estudios II, III y IV

Yo, D.,
 mayor de edad, con D.N.I. nº y domicilio en
 de (Teléf.)
 declaro que:

Dña. Beatriz Bachero Mena, doctorando en la Universidad Pablo de Olavide de Sevilla, me ha ofrecido participar como voluntario en este Estudio de Investigación y me ha explicado el propósito, naturaleza, beneficios y posibles riesgos de tomar parte en el mismo.

Sé que el Dr. D. Juan José González Badillo, Profesor Catedrático de Universidad, en la Licenciatura en Ciencias de la Actividad Física y del Deporte de la Universidad Pablo de Olavide de Sevilla es el director de este Estudio, y supervisa su realización.
 y también que:

- He decidido colaborar voluntariamente en este Estudio.
- Sé que, si así lo deseo, puedo dejar de colaborar en cualquier momento sin ningún problema.
- Estoy de acuerdo en que mis datos se guarden por el investigador principal, de forma confidencial, para su posterior análisis.
- Sé que los resultados de esta investigación, en caso de publicarse, no estarán referidos a mi persona, respetándose la confidencialidad de los mismos y mi intimidad.
- Soy consciente de las molestias y riesgos potenciales que podrían derivarse de la realización de las pruebas físicas.
- Informaré al experimentador de cualquier malestar que sienta.
- Sé que se mantendrá en secreto mi identidad y que se identificará mi sangre y mis muestras de DNA con un número único.
- Las muestras obtenidas sólo serán utilizadas con los fines descritos en la investigación y serán destruidas pasados antes del final de 2025.
- He tenido la oportunidad de hacer preguntas.
- He leído esta información, la considero suficientemente clara, y estoy de acuerdo en participar en el Estudio.
- Se me ha dado una copia de esta Declaración de Consentimiento.

Por tanto, y estando conforme con todo lo anterior, otorgo mi consentimiento:

En a de de

Firma.....

14.3 ANEXO 3. Publicaciones científicas y divulgación de los resultados

EFFECTS OF RESISTED SPRINT TRAINING ON ACCELERATION WITH THREE DIFFERENT LOADS ACCOUNTING FOR 5, 12.5, AND 20% OF BODY MASS

BEATRIZ BACHERO-MENA AND JUAN JOSÉ GONZÁLEZ-BADILLO

Faculty of Sport, Pablo de Olavide University, Seville, Spain

ABSTRACT

Bachero-Mena, B and González-Badillo, JJ. Effects of resisted sprint training on acceleration with three different loads accounting for 5, 12.5, and 20% of body mass. *J Strength Cond Res* 28(10): 2954–2960, 2014—The optimal resisted load for sprint training has not been established yet, although it has been suggested that a resistance reducing the athlete's velocity by more than 10% from unloaded sprinting would entail substantial changes in the athlete's sprinting mechanics. This investigation has evaluated the effects of a 7-week, 14-session, sled-resisted sprint training on acceleration with 3 different loads according to a % of body mass (BM): low load (LL: 5% BM, $n = 7$), medium load (ML: 12.5% BM, $n = 6$), and high load (HL: 20% BM, $n = 6$), in young male students. Besides, the effects on untrained exercises: countermovement jump (CMJ), loaded vertical jump squat (JS), and full squat (SQ) were analyzed. The 3 groups followed the same training program consisting in maximal effort sprint accelerations with the respective loads assigned. Significant differences between groups only occurred between LL and ML in CMJ ($p \leq 0.05$), favoring ML. Paired *t*-tests demonstrated statistical improvements in 0–40 m sprint times for the 3 groups ($p \leq 0.05$), and in 0–20 m ($p \leq 0.05$) and 0–30 m ($p < 0.01$) sprint times for HL. Sprint times in 10–40 m ($p < 0.01$) and 20–40 m ($p \leq 0.05$) were improved in LL. Time intervals in 20–30 m and 20–40 m ($p \leq 0.05$) were statistically reduced in ML. As regards, the untrained exercises, CMJ and SQ for ML and HL ($p \leq 0.05$) and JS for HL were improved. The results show that depending on the magnitude of load used, the related effects will be attained in different phases of the 40 m. It would seem that to improve the initial phase of acceleration up to 30 m, loads around 20% of BM should be used, whereas to improve high-speed acceleration phases, loads around 5–12.5% of BM

should be preferred. Moreover, sprint-resisted training with ML and HL would enhance vertical jump and leg strength in moderately trained subjects.

KEY WORDS sled, velocity loss, strength training, running

INTRODUCTION

The ability to run at maximum speed for short period of time and the ability to jump are important performance factors, both in individual sports such as athletics and in numerous team sports such as football, basketball, and rugby. Most sprint training programs include strength-specific exercises, in which the athlete reproduces the technical movement with an added resistance (resisted sprint training) (16).

The main objective of resisted training exercises is to produce an additional load in the sprint muscles involved, as it is considered that this additional load produces a neural activation and a larger recruitment of fast motor units (7,9,10). Most studies have investigated the influence of resisted sprint training on physical education students (19,31) and field sports athletes such as lacrosse players (6), football (or soccer) players, (28) and rugby players (15). The training frequencies in those studies were 2–3 days per week over 6–8 weeks; the weighed sled resistances were 7–13% of the body mass. The sprint training and testing distances ranged from 9.1 to 55 m, and usually the number of training sets varied from 3 to 9 per session (16). Some studies have found that resisted sprint training increases sprint speed; although there are no significant differences for sprint speed when compared with normal sprint training (5,19,23,28). However, Harrison and Bourke (15), and Zafeiridis et al. (31) showed that resisted training increased sprint speed more than normal sprint training. These improvements were mostly visible during the initial acceleration phase (31); nonetheless, Spinks et al. (28) did not find any statistical improvements in the above-mentioned phase. Resisted sprint training has not been reported to lead to better results for distances >20 m. In fact, normal sprint training has been shown to produce better results than those of resisted sprint training for distances of ≥ 20 m (19,31).

Research on resisted sprint training methods has mainly dealt with towing weighted sleds (6,15,28,31), weighted vests

Address correspondence to Beatriz Bachero-Mena, beatriz.bachero@hotmail.com.

28(10)/2954–2960

Journal of Strength and Conditioning Research
© 2014 National Strength and Conditioning Association

(6), and parachutes (24). Most of this research compares the effect of different types of resisted speed training with normal running training (28,30,31), or with assisted sprint training (19). We have found only 1 longitudinal study comparing 2 different loads (heavy [30% decrease in sprint velocity] vs. light load [10% decrease in sprint velocity]) (18). Besides, we have found just 1 study (28) analyzing the effects of a weighted sled-training period on CMJ. In that study, statistical improvements were observed in CMJ after 8 weeks of resisted sprint training with a 10% load of body mass.

It has been suggested that to achieve a positive effect, without changing the athlete's sprinting mechanics, the resistance when towing a sled should not reduce the athlete's velocity by more than 10% from unloaded sprinting (1,17,20,21). Nevertheless, the optimal load for resisted sprint training has not been established yet by longitudinal studies.

Therefore, the objective in this study was to compare the effects of resisted sprint training on acceleration with 3 different loads accounting for 5, 12.5, and 20% of the body mass. Besides, a secondary question addressed in this study was to analyze the effects of resisted sprint training on untrained exercises like CMJ, JS, and SQ.

METHODS

Experimental Approach to the Problem

A longitudinal experimental study comparing 3 different loads of resisted sprint training on acceleration and strength variables was performed. The participants were randomly assigned to 1 of 3 intervention groups: LL (5% of BM), ML (12.5% of BM), and HL (20% of BM). Loads equivalent to 5, 12.5, and 20% of BM entailed, respectively, a mean velocity loss of 5.6, 10, and 15.5%. The participants performed 0–40 m

sprint test, with running times being measured each 10 m, and strength tests (CMJ, JS, and SQ), before and after a 7-week resisted training period of 2 nonconsecutive sessions per week, that is, a total of 14 sessions. The 3 groups completed identical training activities (same number of sets, repetitions, and running distances). The testing was performed with 2 pretraining and 2 posttraining sessions. Session 1 consisted of a 0–40 m sprint test, and session 2 consisted of CMJ, JS, and SQ tests. Pre- and posttests were performed under the same conditions: time of the day, facilities, and moment of the week. Sprint tests were conducted on a synthetic running track in an indoor hall. Differences between groups were determined, and intragroup differences were compared between pretest and posttest.

Subjects

Nineteen male students in sport science (age 20.9 ± 2.08 years), physically active, were selected for this study. The participants were divided into 3 training groups: low load group (LL, $n = 7$; age: 21.9 ± 2.27 years; height: 180.9 ± 6.78 cm; weight: 75.8 ± 10.73 kg), medium load group (ML, $n = 6$; age: 20.8 ± 2.04 years; height: 173.8 ± 4.58 cm; weight: 66.8 ± 8.53 kg), and high load group (HL, $n = 6$; age: 19.8 ± 1.60 years; height: 175.4 ± 6.79 cm; weight: 70.2 ± 11.91 kg). None of the participants had previous experience with specific sprint training. To take part in the study, the participants had to fulfill the following requirements: (a) to be healthy and not to suffer any illness that could be a risk under intense physical activity, (b) to be generally well trained, and (c) not to perform any physical training activity other than that of the resisted sprint training program. All the participants were fully informed about procedures, and written informed consent after the risks and benefits of the study were explained to them before the first tests. The experiments were performed in accordance with the ethical standards laid down in the 1964 Declaration of Helsinki.

Procedures

Test Preparation. During the first testing day (0–40 m sprint test), all the participants completed a 15-minute standard warm-up consisting of 8 minutes of low-intensity jogging, stretching, and one 0–40 m sprint at 80% effort and two 0–20 m at 90% effort. The second day (strength tests), in addition to the standard warm-up, the participants did 5 CMJ jumps and SQ without load.

Squat and Jump Measurements. The protocols about the test performance were fully explained to all participants before starting the test; and they

TABLE 1. Resisted sprint training program for the 3 resisted sprint groups: LL ($n = 7$), ML ($n = 6$), and HL ($n = 6$).*

Week	Session	Distance (m)	Repetitions	Total distance (m)	Total week distance (m)	Recovery (min)
1	1	20	5	100	250	3
	2	30	5	150		4
2	3	20	6	120	300	3
	4	30	6	180		4
3	5	20	8	160	340	3
	6	30	6	180		4
4	7	20	8	160	335	3
	8	35	5	175		5
5	9	20	8	160	370	3
	10	35	6	210		5
6	11	20	8	160	280	3
	12	20	6	120		3
7	13	30	4	120	240	4
	14	20	6	120		3

*LL = low load; ML = medium load; HL = high load.

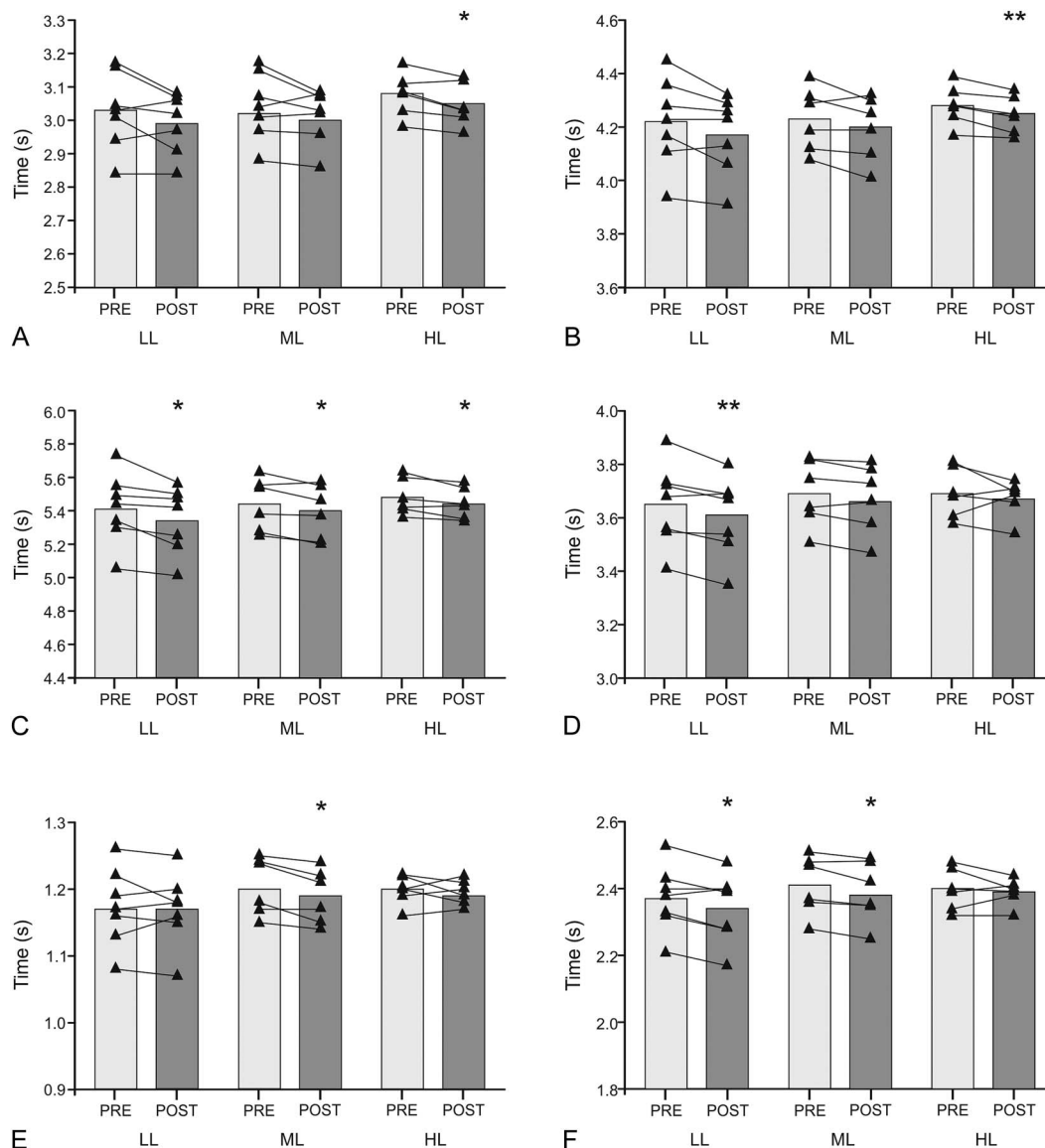


Figure 1. Mean sprint times and individual values for each subject in the unloaded running sprinting tests: (A) 20 m; (B) 30 m; (C) 40 m; (D) 10–40 m sprint; (E) 20–30 m split; (F) 20–40 m split. Training groups: Low load (LL), medium load (ML), and high load (HL). Significant differences from pre- to posttraining: * $p \leq 0.05$; ** $p < 0.01$.

completed 2 sessions to become familiarized with the exercises. The CMJ and JS were performed on an Optojump (Microgate, Bolzano, Italy) Measurement System. This system has proved to produce reliable results for jumping activities (11). The CMJ was performed with both hands on the waist. The participants were required to do 3 trials, mean height being scored. The JS test was performed with progressive loads from the bar weight (20 kg) up to the load allowing the subject to jump up no more than 20 cm high or less. For data analysis, mean heights of pretest and posttest common loads were adopted. As for the SQ test, the movement

velocity of each load in the concentric phase was measured. A dynamic measurement system (T-Force System; Ergotech, Murcia, Spain) automatically calculated the relevant kinematic parameters of every repetition. This system consists of a linear velocity transducer. Instantaneous velocity was sampled at a frequency of 1,000 Hz. Both the reliability and validity of the system have already been established (26). In the SQ test, the participants started from the upright position with their knees and hips fully extended in a Smith machine (Multi-power Fitness Line; Peroga, Murcia, Spain) that ensures a smooth vertical displacement of the bar along a fixed

pathway, the barbell resting across their back at the level of the acromion. The participants were always required to execute the concentric phase of SQ in an explosive manner, at maximal intended velocity. After a warm-up, initial load was set at 20 kg for all participants and was gradually increased in 10 or 5 kg increments until the attained mean propulsive velocity (MPV) was $<0.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. This velocity of $0.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ corresponds approximately to 70% RM and was considered sufficient load to analyze the effects of the training program on leg strength (25). For each load, the repetition correctly performed at the highest velocity was scored. The velocities reported in this study correspond to the mean velocity of the propulsive phase (27) for each common load, from 20 kg to the load of $0.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Sprint Testing. Two 0–40 m trials were performed. To time, the sprint trials, 5 couples of photocells (Polifemo Radio Light; Microgate) based on a radio impulse transmission system and a reflection system were used. This device is completely accepted and widely used in electronic timekeeping systems (8). Runs were performed from static biped start position with the start line located 1 m behind the start photocell. The rest of the photocell pairs were placed at 10, 20, 30, and 40 m. The best time of the two 0–40 m trials was scored. The rest period between sets typically lasted about 6 minutes, which is sufficient for full recovery from repeated maximal sprints of short duration (14).

Training Protocol. The participants completed 2 training sessions per week for a period of 7 weeks, completing 14 training sessions. The training sessions were held with an interval of at least 2 days. The participants began with the same standardized warm-up before the training session, which included 8 minutes of low-intensity jogging, stretching, and one 0–40 m sprint at 80% effort and two 0–20 m sprints at 90% effort. Each subject trained with the load previously determined according to the load group he had been

assigned to. Training sessions consisted of 4–8 sets ranging from 20 to 35 m, always at maximal effort, with 3–5 minutes of recovery time (Table 1).

Statistical Analyses

The variables are reported as mean \pm SD. The reliability of all measures was set with the intraclass correlation coefficient (ICC) and the coefficient of variation (CV). Confidence interval (CI) was set at 95%. The correlations between variable changes were analyzed using the Pearson’s correlation coefficient. The differences between groups were determined through the analysis of variance with test 1 as covariable. Significant differences were determined by a Scheffé post hoc test. A Student’s dependent *t*-test for paired samples (CI: 95%) was performed to compare the pretest with posttest intragroup differences. Statistical significance was set at $p \leq 0.05$. SPSS for Mac (IBM Corporation, New York, NY, USA) (release 20.0.0) was used for all statistical analyses.

RESULTS

Reliability was set with ICC and CV for all the distances and jumps. In the study, the sprints and jumps were generally reliable. For all running distances ICC was higher than 0.9 except in 0–10 m (ICC: 0.87). The maximum CV value for running distances was 2.61 (in 20–30 m), and the minimum CV value was 0.58 (in 0–40 m). For countermovement jump (CMJ), the ICC value was 0.99, and the CV value was 1.74. For the loaded vertical jump squat (JS), the ICC and CV values were 0.97 and 3.98 for JS_{20kg}, and 0.92 and 5.54 for JS_{30kg}, respectively.

All groups reduced their times in the 0–10, 0–20, 0–30, and 0–40 m sprints, but the changes were only statistically significant in the 0–40 m sprint ($p \leq 0.05$) for the 3 groups and in the 0–20 m ($p \leq 0.05$) and 0–30 m sprints ($p < 0.01$) in the HL group (Figures 1A, B, C). All groups reduced their times in 10–40, 20–30, 20–40, and 30–40 m intervals. These changes

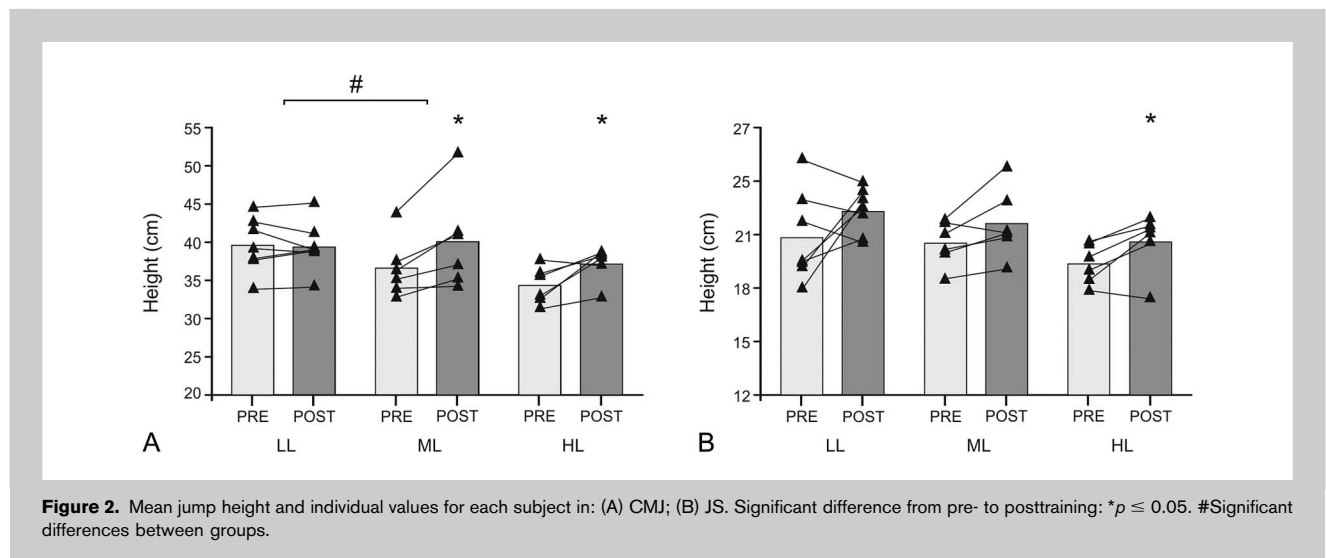


Figure 2. Mean jump height and individual values for each subject in: (A) CMJ; (B) JS. Significant difference from pre- to posttraining: * $p \leq 0.05$. #Significant differences between groups.

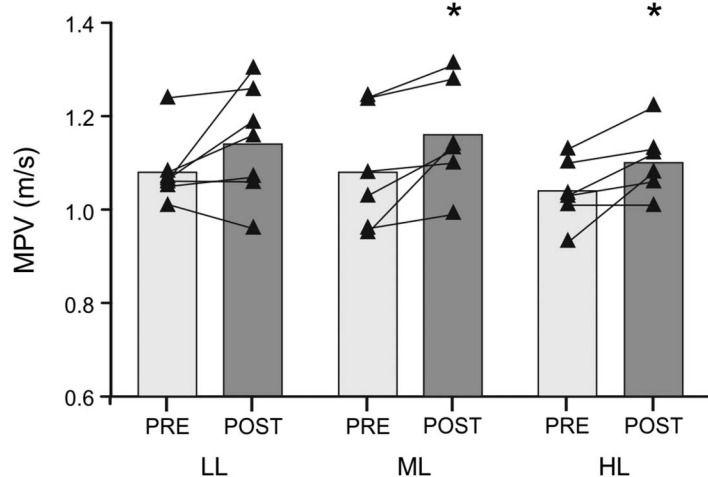


Figure 3. Mean propulsive velocity attained with common absolute loads at the pre- and posttests in the full SQ exercise, and individual values for each subject. Significant difference from pre- to posttraining: * $p \leq 0.05$. SQ = full squat.

were significant in 10–40 m ($p < 0.01$) and 20–40 m ($p \leq 0.05$) intervals in LL (Figures 1D, F). In ML, the significant improvements were in 20–30 and 20–40 m ($p \leq 0.05$) sprint interval times (Figures 1E, F), but there were no significant differences in HL in any of these interval distances.

With respect to the CMJ, statistically significant improvements were only seen in ML and HL ($p \leq 0.05$) (Figure 2A). In JS, although all groups increased the height of the jump, significant statistical differences were only observed in HL ($p \leq 0.05$) (Figure 2B). Significant differences between groups only occurred between LL and ML in CMJ ($p \leq 0.05$), favoring the latter (Figure 2A). For the SQ exercise, the 3 groups increased the average MPV of the common loads but only significantly in ML and HL ($p \leq 0.05$) (Figure 3).

The correlations between the changes in times in 0–20 m, and those in 10–20 m ($r = 0.46$; $p \leq 0.05$), 10–30 m ($r = 0.25$; not significant [ns]), 10–40 m ($r = 0.12$; ns), 20–30 m ($r = 0.004$; ns), 20–40 m ($r = -0.19$; ns), and 30–40 m ($r = 0.07$; ns) showed a downward trend as the distance covered increased.

DISCUSSION

The results of our study show that after a 7-week period of resistance sprint training with sleds (2 sess. per week), all groups improved statistically the time in 0–40 m sprint. The HL group also improved statistically the times in 0–20 and 0–40 m but not in 0–10 m. The ML and LL groups improved statistically the interval times (LL: 10–40 and 20–40 m; ML: 20–30 and 20–40 m) but not in 0–10, 0–20, and 0–30 m.

Our results partially coincide with those of Zafeiridis et al. (31) who, after an 8-week of resistance sprint training program (3 sessions per week), also found significant improvements in 0–10 and 0–20 m sprint times in the group that

trained with sleds. Because all of the participants, there, trained with the same absolute load (5 kg), it is reasonable to think that the relative resistance to movement was different in each subject. By contrast, in our study, 3 different loads were used and adjusted according to body weight. There is another difference in the results because, in our case, it was the HL group (20% BM, with an average of 14 kg), which improved significantly in 0–20 and 0–30 m sprint times, that is, when acceleration is measured from zero velocity. Likewise, the LL (5% BM, average 3.8 kg) and ML groups (12.5% BM, average 8.4 kg), who trained with loads closer to those of the above-mentioned

study (31) improved sprint times significantly in a flying phase, when velocity is higher (LL in 10–40 and 20–40 m, and ML in 20–30 and 20–40 m). These discrepancies in the range in which significant gains were seen could be due to the total number of meters covered during training in both studies. The distance covered was much higher in the study by Zafeiridis et al. (31) (280 m per session, 3 times a week, of which 71% were a 50 m series), whereas in our case, there were 2 sessions per week, and the distance covered ranged between 100 and 210 m, the latter being performed on only 1 occasion. The explanation for this difference could be the greater distance covered in training, which may have caused excessive fatigue. As it has been observed, the duration of muscular contraction increases with fatigue (2,12,13), which might have reduced the rate of force development (RFD) and produced a greater contact time in the sprint (4,29). Therefore, the effect of fatigue is expressed especially in the maximum speed phase, in which the contact time is reduced, and the RFD is more critical (29). This could be the reason why significant improvements were found in the maximum speed phase with low-load training in our case but not in the aforementioned study.

Spinks et al. (28) found significant improvements in 0–15 m sprint time after 8 weeks of resisted sprint training (2 sessions per week) with a load (10% of BM) similar to that used by our ML group (12.5% BM), but the improvements in the results were seen in the initial phase of the sprint, which did not occur in our study. It should be underlined that in the study by Spinks et al. (28), the participants did additional exercises, such as football training, strength training, plus a match per week, then the observed discrepancy in the results could be attributable to many different variables; therefore, both studies are not directly

comparable. Likewise, the effect of the resisted sprint training on the flying phases cannot be compared between the 2 studies since Spinks et al. (28) only measured the time in 0–15 m.

Kawamori et al. (18) also found significant improvements in 0–10 m sprint time after 8 weeks of resisted sprint training (2 sessions per week) in both light (10% decrease in sprint velocity) and heavy loads group (30% decrease in sprint velocity). The improvements were higher in the heavy group, and significant improvements were found in 0–5 m sprint time only for this group, but this heavy group cannot be compared with our HL group because the training load was higher than the one used by our HL group (15.5% decrease in sprint velocity). The light group used a load with 10% decrease in sprint velocity, which is similar to that used by our ML group; but although our ML group reduced time in all distances, those improvements were not significant in 0–10 m. It should be pointed out that the participants in that study performed not only weighted sled towing but also a considerable volume of unresisted sprints both within the training program as part of the warm-up and sled mass adjustment procedure, and outside the program during skill practice sessions and competitions.

Another recent study (30) compared the effects of combined sled towing and sprint training with traditional sprint training groups on 0–10 and 0–30 m sprints in professional rugby players during a 6-week training period (2 sessions per week). In that study, the 0–10 and 0–30 m sprint times were significantly improved in the combined sled towing and sprint training group. The sled load was 12.6% BM, similar to our ML group. Those results support ours; however, they do not indicate to what extent the improvements were due to the resisted sprint training or to normal sprint training. Instead, our study shows that the improvements were exclusively due to the resisted sprint training with load. In this sense, our study differs from West et al. (30) because it provides specific information about the effect of the exclusive use of resisted sprint training with load.

The results of Harrison and Bourke (15) differ from ours as, after 6 weeks of resisted sprint training (2 sessions per week) with a load of approximately 13% BM, similar to that used by our ML group, no significant gains were found in 0–30 m sprint times; still, these seemed in 0–5 and 0–10 m sprint times. Although the distances for which better results were observed correspond approximately to those at which our HL group also improved; these results are not directly comparable because the participants, who were rugby players, performed speed-training drills every week as part of their habitual training.

The results obtained by Kristensen et al. (19) are similar to those obtained by the LL and ML groups in our study because, in both cases, no significant improvements were found in 0–20 m acceleration times. The similarity between the results could be due to the fact that the resistance to movement was similar, as the velocity loss during the training sprints was almost the same in both studies. The training load used by Kristensen et al.

(19), consisting of a traction system in the direction of movement without towing, entailed a velocity loss of 8.5% with respect to the speed without load. This velocity loss would correspond, in our study groups, to a medium load between LL (5.6% velocity loss) and ML (10% velocity loss).

Our results partially coincide with those of Clark et al. (6), in which the group that trained with towing (approximately 10% BM) over 7 weeks obtained trivial improvements in times in 18–55 m sprint interval. These results are very similar to those of our study for the ML group (12.5% BM), which improved significantly ($p \leq 0.05$) in 20–40 m sprint interval time. However, it is not possible to compare the acceleration phase, which was not measured in that study (6).

According to the sprint results, the improvement of the HL group in 0–40 m sprint time was due to enhanced 0–20 and 0–30 m acceleration phases (Figures 1A, B), because, for this group, the sprint times in the 20–30, 20–40, and 30–40 m flying intervals were stable with respect to the initial test. These participants, having trained with greater loads, that is, at lower speeds during training, did not improve times in those flying intervals with respect to their initial results. These significant improvements in the HL group in 0–30 m ($p < 0.01$) were reinforced by the fact that all participants (6 of 6, 100%) achieved a better time in 0–30 m (Figure 1B). By contrast, the performance in 0–40 m sprint times in LL and ML groups was essentially due to improvements in the 10–40 and 20–40 m flying phases for LL, and 20–30 and 20–40 m for ML, and not in the acceleration phase 0–30 m. This is coherent with the above because these participants trained with a smaller load (5 and 12.5% of BM), which resulted in their losing less speed in each training series. These loads were perhaps too light to allow improvements in the acceleration time in 0–30 m, in which the force application time is greater.

It has been observed that during the acceleration phase (from a standing start), the participants who reduce most the time in 0–20 m tend to be the same as those who reduce least the time in the flying phases, but these changes are not significant. This would suggest that the improvement achieved in the first 0–20 m is unrelated to the improvements achieved in the flying phases (10–40, 20–30, and 20–40 m), where speed was higher.

As regards, the jump and strength variables (CMJ, JS, and SQ), for which no specific training was performed, all groups improved, although no significant differences between pre- and posttests were found in LL. ML and HL groups improved significantly in CMJ and SQ; besides, the HL group also improved in JS. Sled resisted training with 12.5 and 20% of BM turned out to be true strength training in moderately trained subjects. These results suggest the following positive lineal tendency: the higher the training load in the sled (between 5 and 20% of BM), the bigger the effect on these untrained exercises. This could be explained by the fact that the “explosive force” of the knee extensor muscles has traditionally been closely related to jump and acceleration in the sprint (2,3,22).

As a conclusion, these results highlight that the different acceleration phases can be improved without parallel use of training without loads. So, it would seem that training with sleds for 7 weeks with the 3 loads used, and without additional unloaded sprint training would improve the 0–40 m sprint performance (LL, ML, and HL). Such improvement could be related to the use of different training loads. As a matter of fact, the LL and ML groups reduced times significantly in the flying phases (LL: 10–40 and 20–40 m, ML: 20–30 and 20–40 m), whereas the HL group reduced times in the 0–20 and 0–30 m accelerations, but not in the flying phases. Furthermore, resisted sprint training tends to produce improvements in exercises that were not trained such as CMJ, JS, and SQ with high loads (20% BM) and in CMJ and SQ with medium loads (12.5% BM). The higher the load within the range of loads used in our study, the greater the improvement.

PRACTICAL APPLICATIONS

The results of our study would suggest that to improve the acceleration phase over short distances, it is advisable to train with different towed loads. To improve the initial acceleration phase up to 30 m, it would be advisable to train with loads about 20% of BM. However, to improve the flying phases within 40 m, loads between 5 and 12.5% should be used.

REFERENCES

- Behrens, MJ and Simonson, SR. A comparison of the various methods used to enhance sprint speed. *Strength Cond J* 33: 64–71, 2011.
- Berthoin, S, Dupont, G, Mary, P, and Gerbeaux, M. Predicting sprint kinematic parameters from anaerobic field tests in physical education students. *J Strength Cond Res* 15: 75–80, 2001.
- Bret, C, Rahmani, A, Dufour, AB, Messonnier, L, and Lacour, JR. Leg strength and stiffness as ability factors in 100 m sprint running. *J Sports Med Phys Fitness* 42: 274–281, 2002.
- Chapman, AE. Hierarchy of changes induced by fatigue in sprinting. *Can J Appl Sport Sci* 7: 116–122, 1982.
- Clark, DA, Sabick, MB, Pfeiffer, RP, Kuhlman, SM, Knigge, NA, and Shea, KG. Influence of towing force magnitude on the kinematics of supramaximal sprinting. *J Strength Cond Res* 23: 1162–1168, 2009.
- Clark, KP, Stearne, DJ, Walts, CT, and Miller, AD. The longitudinal effects of resisted sprint training using weighted sleds vs. weighted vests. *J Strength Cond Res* 24: 3287–3295, 2010.
- Donati, A. The association between the development of strength and speed. *New Stud Athl* 11: 51–58, 1996.
- Earp, JE and Newton, RU. Advances in electronic timing systems: Considerations for selecting an appropriate timing system. *J Strength Cond Res* 26: 1245–1248, 2012.
- Faccioni, A. Assisted and resisted methods for speed development (part I): Resisted speed methods. *Mod Athl Coach* 32: 3–6, 1994.
- Faccioni, A. Assisted and resisted methods for speed development (part II): Resisted speed methods. *Mod Athl Coach* 32: 8–12, 1994.
- Glatthorn, JF, Gouge, S, Nussbaumer, S, Stauffacher, S, Impellizzeri, FM, and Maffioletti, NA. Validity and reliability of optojump photoelectric cells for estimating vertical jump height. *J Strength Cond Res* 25: 556–560, 2011.
- Hakkinen, K and Kauhainen, H. Daily changes in neural activation, force-time and relaxation-time characteristics in athletes during very intense training for one week. *Electromyogr Clin Neurophysiol* 29: 243–249, 1989.
- Hakkinen, K, Komi, PV, and Kauhainen, H. Electromyographic and force production characteristics of leg extensor muscles of elite weight lifters during isometric, concentric, and various stretch-shortening cycle exercises. *Int J Sports Med* 7: 144–151, 1986.
- Harris, RC, Edwards, RH, Hultman, E, Nordesjo, LO, Ny Lind, B, and Sahlin, K. The time course of phosphorylcreatine resynthesis during recovery of the quadriceps muscle in man. *Pflugers Arch* 367: 137–142, 1976.
- Harrison, AJ and Bourke, G. The effect of resisted sprint training on speed and strength performance in male rugby players. *J Strength Cond Res* 23: 275–283, 2009.
- Hrysomallis, C. The effectiveness of resisted movement training on sprinting and jumping performance. *J Strength Cond Res* 26: 299–306, 2012.
- Jakalski, K. The pros and cons of using resisted and assisted training. Acknowledgments methods with high school sprinters: Parachutes, tubing and towing. *Track Coach* 144: 4585–4589, 4612, 1998.
- Kawamori, N, Newton, RU, Hori, N, and Nosaka, K. Effects of weighted sled towing with heavy versus light load on sprint acceleration ability. *J Strength Cond Res*. doi:10.1519/JSC.0b013e3182915ed4. 2013 Mar 27. epub ahead of print.
- Kristensen, GO, van den Tillaar, R, and Ettema, GJ. Velocity specificity in early-phase sprint training. *J Strength Cond Res* 20: 833–837, 2006.
- Letzelter, M, Sauerwein, G, and Burger, R. Resistance runs in speed development. *Mod Athl Coach* 33: 7–12, 1995.
- Lockie, RG, Murphy, AJ, and Spinks, CD. Effects of resisted sled towing on sprint kinematics in field-sport athletes. *J Strength Cond Res* 17: 760–767, 2003.
- Mero, A, Luthanen, P, Viitasalo, JT, and Komi, PV. Relationships between the maximal running velocity, muscle fiber characteristics, force production and force relaxation of sprinters. *Scand J Med Sci Sports* 3: 16–22, 1981.
- Myer, GD, Ford, KR, Brent, JL, Divine, JG, and Hewett, TE. Predictors of sprint start speed: The effects of resistive ground-based vs. inclined treadmill training. *J Strength Cond Res* 21: 831–836, 2007.
- Paulson, S and Braun, WA. The influence of parachute-resisted sprinting on running mechanics in collegiate track athletes. *J Strength Cond Res* 25: 1680–1685, 2011.
- Sánchez-Medina, L, García-Pallarés, J, Pérez, CE, Fernandes, J, and González-Badillo, JJ. Estimation of relative load from mean velocity in the full squat exercise. Paper presented at: 16th Annual Congress of the European College of Sport Sciences (ECSS); July 6th–9th, 2011; Liverpool, United Kingdom.
- Sanchez-Medina, L and Gonzalez-Badillo, JJ. Velocity loss as an indicator of neuromuscular fatigue during resistance training. *Med Sci Sports Exerc* 43: 1725–1734, 2011.
- Sanchez-Medina, L, Perez, CE, and Gonzalez-Badillo, JJ. Importance of the propulsive phase in strength assessment. *Int J Sports Med* 31: 123–129, 2010.
- Spinks, CD, Murphy, AJ, Spinks, WL, and Lockie, RG. The effects of resisted sprint training on acceleration performance and kinematics in soccer, rugby union, and Australian football players. *J Strength Cond Res* 21: 77–85, 2007.
- Sprague, P and Mann, RV. The effects of muscular fatigue on the kinetics of sprint running. *Res Q Exerc Sport* 54: 60–66, 1983.
- West, DJ, Cunningham, DJ, Bracken, RM, Bevan, HR, Crewther, BT, Cook, CJ, and Kilduff, LP. Effects of resisted sprint training on acceleration in professional rugby union players. *J Strength Cond Res* 27: 1014–1018, 2013.
- Zafeiridis, A, Saraslanidis, P, Manou, V, Ioakimidis, P, Dipla, K, and Kellis, S. The effects of resisted sled-pulling sprint training on acceleration and maximum speed performance. *J Sports Med Phys Fitness* 45: 284–290, 2005.

1 ACCEPTED IN JOURNAL OF HUMAN KINETICS

2 Dear Authors,

3 Please be informed that your paper has been accepted for print, however, first you
4 are requested to consider and approve the changes made by editors and perform some
5 additional ones as suggested.

6 Please provide us with the final copy of the manuscript when carefully revised. If
7 you decide to introduce any further changes in the paper, **please mark them in red** so they
8 could be easily followed by editors.

9 With regard to publishing procedures, your manuscript has been accepted for print
10 in one of the following issues of the JHK (probably in the September's issue, 2017), thus,
11 please expect information from the Editorial Office with regard to further proceeding.

12 Best regards,

13 Editors

14 **Relationships between sprint, jumping and strength abilities, and 800**
15 **m performance in male athletes of national and international levels**

16

17 *Beatriz Bachero-Mena^{1,2}, Fernando Pareja-Blanco², David Rodríguez-Rosell², Juan Manuel Yáñez-*
18 *García², Ricardo Mora-Custodio², Juan José González-Badillo²*

19 ¹ *Faculty of Sport, Pablo de Olavide University, Seville, Spain.*

20 ² *Centro de Investigación en Rendimiento Físico y Deportivo, Pablo de Olavide University, Seville,*
21 *Spain.*

22

23 **Contact Details of the Corresponding Author:** Beatriz Bachero-Mena, Faculty of Sport, Pablo de
24 Olavide University, Ctra. de Utrera, km. 1, 41013, Seville, Spain. Phone: (+34) 627578913. E-mail:
25 beatriz.bachero@hotmail.com.

26

27 **Acknowledgments**

28 The authors would like to thank the coaches and athletes who participated in the study. This study
29 was supported in part by a grant from the FPU Program of the Education, Culture and Sport
30 Ministry of Spain.

31 **Abstract**

32 This study analysed the relationships between sprinting, jumping and strength abilities, with
33 regard to 800 m running performance. Fourteen athletes of national and international levels in 800
34 m (personal best: 1:43-1:58 min:ss) completed sprint tests (20 m and 200 m), a countermovement
35 jump, jump squat and full squat test as well as an 800 m race. Significant relationships ($p < 0.01$)
36 were observed between 800 m performance and sprint tests: 20 m ($r = 0.72$) and 200 m ($r = 0.84$).
37 Analysing the 200 m run, the magnitude of the relationship between the first to the last 50 m
38 interval times and the 800 m time tended to increase (1st 50 m: $r = 0.71$; 2nd 50 m: $r = 0.72$; 3rd 50
39 m: $r = 0.81$; 4th 50 m: $r = 0.85$). Performance in 800 m also correlated significantly ($p < 0.01-0.05$)
40 with strength variables: the countermovement jump ($r = -0.69$), jump squat ($r = -0.65$), and full
41 squat test ($r = -0.58$). Performance of 800 m in high-level athletes was related to sprint, strength and
42 jumping abilities, with 200 m and the latest 50 m of the 200 m being the variables that most
43 explained the variance of the 800 m performance.

44 **Keywords:** Middle-distance running, countermovement jump, squat, competition, anaerobic
45 pathways.

46

47

48 **Introduction**

49 Eight hundred meter running is an extremely demanding event that requires substantial
50 contributions from both the aerobic and anaerobic systems, due to high relative values of oxygen
51 uptake (VO_2) (Hill, 1999; Spencer and Gastin, 2001) and high blood lactate concentrations (above
52 $15 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$) attained after the 800 m run (Hanon and Thomas, 2011; Hill, 1999; Lacour et al.,
53 1990). These high levels of blood lactate have been associated both with increased muscle lactate
54 production (Bogdanis et al., 1996) and large reductions in muscle glycogen (Green, 1978);
55 particularly in IIX fibres (Casey, 1996). This suggests that anaerobic glycogenolysis is extensively
56 activated during this type of effort, preferably in IIX fibres (Green, 1978). Different relative
57 percentages of aerobic/anaerobic contribution to 800 m track event were previously reported as:
58 73/27% (Craig and Morgan, 1998), 71/29% (Weyand et al., 1994), 66/34% (Spencer and Gastin,
59 2001), 59/41% (Lacour et al., 1990), 58/42% (Hill, 1999), and 60/40% (Duffield et al., 2005). Other
60 variables such as $\text{VO}_{2\text{max}}$ or VO_2 response to middle-distance track running events have also been
61 widely investigated (Hanon and Thomas, 2011; James et al., 2007). However, other possible
62 determinant factors related to the 800 m performance such as strength, power, and sprinting
63 capacities have received less scientific attention (Hudgins et al., 2013).

64 Research has shown a clear relationship between sprinting, strength and jumping
65 performance in athletes. However, most of these investigations have focused their analysis on very
66 short running distances (i.e., 50 and 100 m) (Loturco et al., 2015a, 2015b; Seitz et al., 2014). In
67 regard to middle-distance track and field events, Hudgins et al. (2013) observed significant
68 correlations between jumping ability and 800 m race time in competitive runners. Moreover,
69 Deason et al. (1991) found a significant relationship between 800 and 300 m running times. Other
70 studies have also investigated the effects of strength-power training on middle and long-distance
71 running performance (Mikkola et al., 2007; Taipale et al., 2010, 2014). For instance, Mikkola et al.
72 (2007) reported that both heavy and explosive resistance training programs were able to improve
73 maximal endurance capacity in long-distance runners. In addition, Taipale et al. (2010) showed a
74 positive effect of strength training on the specific performance of endurance athletes. Improvements
75 in peak running speed have also been reported after mixed maximal and explosive strength training
76 performed concurrently with endurance training in recreational endurance runners (Taipale et al.,
77 2014).

78 To date, coaches and sports scientists have shown keen interest in variables related to the
79 metabolic contribution and energetic substrates to explain the 800 m performance (Craig and
80 Morgan, 1998; Duffield et al., 2005; Hill, 1999; Lacour et al., 1990; Spencer and Gastin, 2001).

81 Actually, very few studies have examined the importance of different neuromuscular variables on
82 middle-distance running performance (Hudgins et al., 2013). In addition, it has been suggested that
83 strength training could lead to enhanced long-term endurance capacity both in well-trained
84 individuals and elite endurance athletes (Aagaard and Andersen, 2010). Thus, the purpose of this
85 investigation was to examine the relationships between lower limb strength, sprint times, jumping
86 ability and 800 m running times in male athletes of national and international performance levels.
87 Based on extensive data confirming the strong correlation between strength variables versus
88 endurance performance (Mikkola et al., 2007; Taipale et al., 2010, 2014), and sprinting ability
89 (Loturco et al., 2015a, 2015b; Seitz et al., 2014), we hypothesised that lower limb strength, jumping
90 performance and sprint ability would be significantly correlated with 800 m times.

91 **Material and Methods**

92 *Participants*

93 Fourteen male athletes of national and international levels in 800 m competing in elite,
94 junior, and youth categories, with personal best ranging from 1:43 to 1:58 min:ss (average 1:52
95 min:ss) participated in this study (age: 22.9 ± 5.3 years; body height: 175.2 ± 5.5 cm; body mass:
96 62.9 ± 4.4 kg). Two of them were classified 1st and 2nd in the national championship and national
97 ranking; they had also participated in London 2012 and Rio 2016 Olympic Games. All athletes had
98 completed strength-training programs in the past and were familiarized with testing procedures. The
99 athletes participated in national and international competitions during the period of testing. The
100 tests were carried out during the outdoor athletic season; i.e. at the point of their peak performance.
101 No physical limitations or musculoskeletal injuries that could affect testing were reported. All
102 participants were fully informed about procedures, potential risks and benefits of the study and they
103 all signed written informed consent prior to the tests. The study was conducted in accordance with
104 the Declaration of Helsinki II and approved by the Ethics Committee of the Pablo de Olavide
105 University (Seville, Spain).

106 *Design*

107 A cross-sectional experimental design was used. Testing was performed in two sessions
108 separated by 1 week. Session 1 consisted of sprint (20 m) and strength tests (countermovement
109 jump (CMJ), jump squat (JS), and full squat (SQ) tests). Session 2 comprised the CMJ, 200 m test,
110 and blood lactate measurements. As the tests were performed during outdoor athletics competition
111 season, the official 800 m performance time obtained by the athletes in the nearest competition to
112 the tests (within 2 weeks) was recorded for the analysis. A competition was chosen where the
113 athletes tried to attain their best possible result. Testing sessions were always carried out after a full

114 day of rest, at the same time of the day (18:00-20:00 h).

115 ***Procedures***

116 *Test Preparation*

117 During the first testing day, all the participants completed a 20 min standardized warm-up
118 protocol consisting of 10 min of low intensity jogging, 5 min of joint mobilization exercises, and
119 one 40 m sprint at 80% effort, two 20 m sprints at 90% effort, and one 10 m sprint at 100% effort
120 with 2 min rest periods between them. After the sprint test, the athletes performed strength tests in
121 the following order: CMJ, JS, and SQ; in addition to the standardized warm-up, the participants did
122 SQ without an external load and 5 progressive CMJ. On the second testing day, the athletes
123 performed the 200 m test with CMJ and blood lactate measurements.

124

125 *Sprint testing*

126 On the first day two 20 m trials were performed. The sprint trials were recorded by
127 photocells (Polifemo Radio Light; Microgate, Bolzano, Italy), based on a radio impulse
128 transmission system and a reflection system. Runs were performed from a static biped starting
129 position with the start line located 1 m behind the first photocell. The rest of the photocells were
130 placed at 10 and 20 m. The best time of the two 20 m trials was recorded for further analysis. The
131 rest period between trials lasted 3 min. The sprint test (20 m) was conducted on a synthetic running
132 track in an indoor hall.

133

134 *Jump measurements (CMJ and JS)*

135 The CMJ and JS were performed on an infrared plate Optojump (Microgate, Bolzano, Italy)
136 that calculated jump height (h) through flight time (t) and acceleration due to gravity (g) as follows:
137 $h = t^2 \times g / 8$. The CMJ was performed with both hands on the waist, while performing a downward
138 movement until 90°-knee flexion followed by a vertical jump of maximum effort. The participants
139 were required to perform 3 trials separated by 1 min rest, mean height being recorded. Just after the
140 CMJ test, the JS test was conducted with progressive loads ranging from 20 kg up to the load
141 allowing the subject to jump up not higher than 20 cm. The jump squat test was performed using a
142 Smith machine (Multipower Fitness Line, Peroga, Murcia, Spain), which allowed a smooth vertical
143 displacement of the bar along a fixed pathway. The athletes performed two JS separated by 2 min
144 rest with each load. The average value of the 2 jumps was used for the subsequent statistical
145 analysis.

146

147 *Full Squat test*

148 After the JS test, an incremental loading full squat test was performed on a Smith machine
149 (Multipower Fitness Line, Peroga, Murcia, Spain) using a linear velocity transducer (T-Force
150 System; Ergotech, Murcia, Spain). Instantaneous velocity was sampled at a frequency of 1,000 Hz.
151 After a warm-up, the initial load was set at 20 kg for all participants and was gradually increased by
152 10 or 5 kg until the attained mean propulsive velocity (MPV) was $<1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. This velocity of $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
153 corresponded approximately to 55-60% of 1RM and was considered a sufficient load to evaluate
154 lower limb strength (Conceição et al., 2015). The participants started from the upright position with
155 their knees and hips fully extended, the barbell resting across their back at the level of the acromion.
156 Each subject descended in a continuous motion until the top of the thighs got below the horizontal
157 plane, and then they immediately reversed the motion and ascended back to the upright position.
158 The participants were always required to execute the concentric phase of the SQ in an explosive
159 manner, at maximal intended velocity. For each load, the repetition correctly performed at the
160 highest velocity was recorded. The loads reported in this study corresponded to the load reached at
161 $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ velocity of the propulsive phase (Sánchez-Medina et al., 2010).

162

163 *200 m running test*

164 This test was performed on a synthetic running outdoor track (Mondo). Wind conditions
165 were monitored constantly by an Oregon Scientific WMR-918 (Oregon Scientific, Tigard, OR,
166 USA) meteorological station. A mathematical model (Quinn, 2003) was used in order to adjust the
167 potential influence of wind on the performance. This mathematical model suggests that a head wind
168 of -2.0 or $-1.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ causes a time loss of 0.121 and 0.059 s, respectively, and that a tail wind of
169 $+2.0$ or $+1.0$ provides a time gain of 0.112 and 0.056 s, respectively. Only one 200 m trial was
170 performed. The procedures were the same as the aforementioned ones for the 20 m test. Partial
171 times were recorded for each 50 m split. Five pairs of photocells (Polifemo Radio Light; Microgate,
172 Bolzano, Italy) were used for timing. Measurements of CMJ height were taken before the 200 m
173 test. In addition, capillary blood samples for the determination of lactate concentrations (Lactate Pro
174 2, Arkray, Kyoto, Japan) were obtained from the earlobe before the exercise and 3 min after the
175 completion of the 200 m sprint.

176 *Statistical Analyses*

177 All data are reported as means \pm SD. Test-retest absolute reliability was measured by the
178 coefficient of variation (CV), whereas relative reliability was assessed by the intraclass correlation
179 coefficient (ICC) and a confidence interval (CI) at 95% was calculated using the one-way random
180 effects model. The normal distribution of the data was verified with the Shapiro-Wilk test. The
181 relationships with Pearson's coefficients (r) and 90% CI were used to calculate the respective

182 correlations between the different performance variables analysed. The magnitude of correlation
 183 was assessed with the following thresholds: <0.1 , *trivial*; $<0.1-0.3$, *small*; $<0.3-0.5$, *moderate*;
 184 $<0.5-0.7$, *large*; $<0.7-0.9$, *very large*; and $<0.9-1.0$, *almost perfect* (Hopkins et al., 2009).
 185 Statistical significance was set at $p \leq 0.05$. SPSS for Mac (IBM Corporation, New York, NY, USA)
 186 (release 20.0.0) was used for all statistical analyses.

187 **Results**

188 Reliability was set with the ICC and CV for all the distances and jumps. Sprints were
 189 generally reliable: 10 m (ICC: 0.75; CI: 0.25-0.92; CV: 1.9%). 10-20 m (ICC: 0.83; CI: 0.46-0.95;
 190 CV: 1.6%), and 20 m (ICC: 0.92; CI: 0.76-0.97; CV: 1.1%). Both CMJ (ICC: 0.99; CI: 0.99-1.00;
 191 CV: 1.3%) and JS (ICC: 0.98; CI: 0.92-0.99; CV: 4.0%) showed good reliability.

192 *Relationships between sprint and strength variables and performance in the 800 m run*

193 The relationships between sprinting, strength variables and performance in 800 m are shown
 194 in **Table 1**. Sprint tests correlated significantly with the performance in 800 m: 10 m ($r = 0.59$, CI:
 195 0.29 to 0.89, $p < 0.05$), 20 m ($r = 0.72$, CI: 0.50 to 0.94, $p < 0.05$), 10-20 m ($r = 0.56$, CI: 0.25 to
 196 0.87, $p < 0.05$), and 200 m ($r = 0.84$, CI: 0.69 to 0.99, $p < 0.01$) (**Figure 1**). When analysing the 200
 197 m sprint intervals, divided into 1st 50 m, 2nd 50 m, 3rd 50 m, and 4th 50 m, it was observed that the
 198 magnitude of the relationship between the first to the last 50 m interval times and the 800 m time
 199 tended to increase (1st 50 m: $r = 0.71$, CI: 0.46 to 0.96, $p < 0.05$; 2nd 50 m: $r = 0.72$, CI: 0.48 to 0.96,
 200 $p < 0.05$; 3rd 50 m: $r = 0.81$, CI: 0.64 to 0.98, $p < 0.01$; 4th 50 m: $r = 0.85$, CI: 0.71 to 0.99, $p <$
 201 0.001) (**Figure 2**). In addition, performance in 800 m also correlated significantly ($p < 0.01 - 0.05$)
 202 with strength variables: CMJ ($r = -0.69$, CI: -0.93 to -0.45), JS ($r = -0.65$, CI: -0.91 to -0.39), and
 203 SQ ($r = -0.58$, CI: -0.88 to -0.28) (**Figure 3**).

204 (Table 1 near here)

205 (Figure 1 near here)

206 (Figure 2 near here)

207 (Figure 3 near here)

208 *Relationships between the 200 m sprint, CMJ and lactate concentration*

209 Relationships between the 200 m sprint, CMJ and lactate concentration were analysed ($n =$
 210 12). Sprint time in 200 m showed a significant ($p < 0.05$) correlation with the CMJ ($r = -0.57$, CI: -
 211 0.91 to -0.27) and lactate concentration ($r = -0.59$, CI: -0.90 to -0.24). No significant relationship
 212 was found between the 800 m performance and lactate concentration after the 200 m test ($r = -0.31$,

213 CI: -0.76 to 0.14).

214 **Discussion**

215 The present study analysed the relationships between lower limb strength, sprinting and
216 jumping abilities and 800 m performance in male athletes of national and international levels. The
217 results of this study indicate that 800 m performance is significantly related to sprinting, jumping
218 and strength abilities. Furthermore, performance in 200 m, especially the last 50 m split, is the
219 variable that most explains the variance of 800 m performance. Altogether, our results suggest that
220 variables related to strength-power abilities and the ability to maintain high velocities with
221 accumulated fatigue seem to be determinant factors in 800 m running performance.

222 Many studies have examined the relationship between strength and sprint running (Loturco
223 et al., 2015a, 2015b; Seitz et al., 2014). However, little research has focused on strength or power
224 production as a major component in middle-distance running events (Hudgins et al., 2013). The
225 results of the present study seem to support previously reported data concerning middle-distance
226 running events. Correlations of 0.83 were reported between the standing triple jump test and 800 m
227 performance (Hudgins et al., 2013). In the present study, other variables related to strength (SQ),
228 jumping (CMJ and JS) and sprint performance (20 m and 200 m) were examined as well. We
229 observed *large to very large* relationships between the 800 m time and sprint tests (10 m: $r = 0.57$;
230 20 m: $r = 0.71$; 200 m: $r = 0.84$), full squat test ($r = -0.58$), and jump tests (CMJ: $r = -0.69$, JS: $r = -$
231 0.65). These results indicate that higher levels of performance in distinct regions of the force-
232 velocity curve can be directly related to higher levels of performance in some middle-distance track
233 and field events, such as 800 m running.

234 Previous studies have shown that heavy and explosive resistance training improves
235 endurance performance (Mikkola et al., 2007; Taipale et al., 2010, 2014). Therefore, the correlation
236 between the SQ, CMJ and JS and the 800 m performance may not be surprising. The mechanism by
237 which strength and power production can improve middle and long-distance performance may
238 relate to varying abilities in running economy (Ferrauti et al., 2010). Running economy can be a
239 factor influenced by muscle and tendon stiffness, which is often associated with increased strength
240 and power (Dumke et al., 2010; Fletcher et al., 2010). Yet, in 800 m running events, the role of
241 muscle strength might be related to other factors such as gains in maximal muscle strength and the
242 rate of force development, while likely also involving enhancements in neuromuscular function as
243 well as increases in the proportion of type IIA muscle fibres (Aagaard and Andersen, 2010).

244 Concerning running performance, strength of the correlations increased with the sprint
245 distance (10 m: $r = 0.57$, $p < 0.05$; 20 m: $r = 0.71$, $p < 0.05$; 200 m: $r = 0.84$, $p < 0.01$). In the study

246 of Deason et al. (1991), 300 m run time significantly correlated to 800 m competition time ($r =$
247 0.83 ; $p < 0.05$), accounting for 68% of the variance between these measures. This correlation is
248 very similar to the one obtained in our study between 200 m and 800 m running times ($r = 0.84$, $p <$
249 0.01). However, in our study a slightly shorter distance (200 m run) was performed. On the other
250 hand, when analysing the 200 m sprint intervals divided into 1st 50 m, 2nd 50 m, 3rd 50 m, and 4th 50
251 m, a clear tendency for increased correlation between the first to the latest 50 m interval times and
252 the 800 m performance was observed (1st 50 m: $r = 0.71$; 2nd 50 m: $r = 0.72$; 3rd 50 m: $r = 0.81$; 4th
253 50 m: $r = 0.85$). A previous study showed that the final velocity decreased significantly for 800 m,
254 attaining the slowest velocity in the last 100 m (88% of the peak velocity) (Hanon and Thomas,
255 2011). Thus, it seems logical that fatigue during the latest 50 m of the 200 m run is more likely to
256 be related to the 800 m performance.

257 Regarding the results obtained in the 200 m test, significant negative correlations were
258 found between the 200 m time and both the CMJ ($r = -0.59$; $p < 0.05$) and blood lactate
259 concentration ($r = -0.57$; $p < 0.05$). This correlation between the 200 m time and CMJ is supported
260 by Hudgins et al. (2013), who found a significant relationship between the 200 m and three-jump
261 tests ($r = 0.97$; $p < 0.05$). Nonetheless, in such a study, the sample was more heterogeneous (male
262 and female sprinters with a 200 m performance of 23.47 ± 2.25 s) than the one used in the present
263 study (high-level 800 m male athletes with a 200 m performance of 23.16 ± 0.89 s) and the
264 variability of the sample ($SD \cdot \text{mean value}^{-1}$) in that study (0.10) was higher compared with ours
265 (0.04). This fact may explain the higher correlation obtained by Hudgins et al. (2013), since greater
266 variability of the sample maximizes the variance between the variables, thus enabling greater
267 magnitude of the relationships. However, the relationships observed in our study are of utmost
268 importance due to the high-level of tested athletes. In addition, a *large* relationship ($r = -0.59$) was
269 observed between the 200 m time and blood lactate concentration. This relationship suggests that
270 the 800 m athletes who are the fastest in 200 m tend to be those with higher anaerobic glycolysis
271 activation and therefore, higher blood lactate concentration values. The reason might be that the
272 athletes with the best performance in the 200 m run and highest values of blood lactate
273 concentration are probably the ones with a higher proportion of type II fibres, thus, those with
274 higher values of blood lactate concentration. It is common to observe higher blood lactate
275 concentrations when more type II fibres are recruited since these have greater glycolytic power
276 (Colliander et al., 1988). These results may reinforce the importance of strength training in high-
277 level 800 m athletes. Resistance training induces hypertrophy and a greater relative area of type II
278 fibres (Colliander et al., 1988), as well as enhancements in jumping and sprinting abilities (Seitz et
279 al., 2014). After analysing all these data, it is plausible to consider that a proper strength training

280 program may enhance the specific performance of high-level 800 m runners.

281 In conclusion, the present study indicates that running performance in the 800 m event in
282 athletes of national and international levels is related to sprinting (20 m and 200 m), strength (SQ),
283 and jumping abilities (CMJ and JS). In addition, the last split of the 50 m in the 200 m run is the
284 variable that most explains the variance of 800 m performance. Our results suggest that variables
285 related to strength-power abilities and the ability to maintain high velocities with certain
286 accumulated fatigue seem to be determinant factors in 800 m running performance. Therefore,
287 according to our results, both coaches and sport scientists should consider implementing training
288 programs aiming at increasing levels of sprinting speed to improve the specific performance of elite
289 800 m runners. Furthermore, it may be possible to use these variables as an efficient and immediate
290 assessment tool for middle-distance running performance. As a limitation, we should indicate that
291 strong correlations do not necessarily imply a cause-effect relationship, thus, this information
292 should be interpreted cautiously. Therefore, further studies analysing the effects of resistance
293 training on 800 m performance are necessary.

294

295 **References**

- 296 Aagaard P, Andersen JL. Effects of strength training on endurance capacity in top level endurance
297 athletes. *Scand J Med Sci Sports*, 2010; 20: 39-47
- 298 Bogdanis GC, Nevill ME, Boobis LH, Lakomy HK. Contribution of phosphocreatine and aerobic
299 metabolism to energy supply during repeated sprint exercise. *J Appl Physiol*, 1996; 80: 876–884
- 300 Casey A, Constantin-Teodosiu D, Howell S, Hultman E, Greenhaff PL. Metabolic response of type
301 I and II muscle fibers during repeated bouts of maximal exercise in humans. *Am J Physiol*, 1996;
302 27: E38–E43
- 303 Colliander EB, Dudley GA, Tesch PA. Skeletal muscle fiber type composition and performance
304 during repeated bouts of maximal, concentric contractions. *Eur J Appl Physiol*, 1988; 58: 81-86
- 305 Conceição F, Fernandes J, Lewis M, González-Badillo JJ, Jiménez-Reyes P. Movement velocity as
306 a measure of exercise intensity in three lower limb exercises. *J Sports Sci*, 2016; 34: 1099-106.
- 307 Craig I, Morgan D. Relationship between 800-m running performance and accumulated oxygen
308 deficit in middle-distance runners. *Med Sci Sports Exerc*, 1998; 30: 1631-1636
- 309 Deason J, Powers S, Lawler J, Ayers D, Stuart M. Physiological correlates to 800 meter running
310 performance. *J Sports Med Phys Fitness*, 1991; 31: 499-504
- 311 Duffield R, Dawson B, Goodman C. Energy system contribution to 400-metre and 800-metre track

- 312 running. *J Sports Sci*, 2005; 23: 299-307
- 313 Dumke C, Pfaffenroth CM, McBride JM, McCauley GO. Relationship between muscle strength,
314 power and stiffness and running economy in trained male runners. *Int J Sports Physiol Perform*,
315 2010; 5: 249-261
- 316 Ferrauti A, Bergermann M, Fernandez-Fernandez J. Effects of a concurrent strength and endurance
317 training on running performance and running economy in recreational marathon runners. *J Strength*
318 *Cond Res*, 2010; 24: 2770-2778
- 319 Fletcher JR, Esau SP, Macintosh BR. Changes in tendon stiffness and running economy in highly
320 trained distance runners. *Eur J Appl Physiol*, 2010; 110: 1037-1046
- 321 Green HJ. Glycogen depletion patterns during continuous and intermittent ice skating. *Med Sci in*
322 *Sports Exerc*, 1978; 10: 183-187
- 323 Hanon C, Thomas C. Effects of optimal pacing strategies for 400-, 800-, and 1500-m races on the
324 VO₂ response. *J Sports Sci*, 2011; 29: 905-912
- 325 Hill DW. Energy system contributions in middle-distance running events. *J Sports Sci*, 1999; 17:
326 477-483
- 327 Hopkins W, Marshall S, Batterham A, Hanin J. Progressive statistics for studies in sports medicine
328 and exercise science. *Med Sci Sports Exerc*, 2009; 41: 3-13
- 329 Hudgins B, Scharfenberg J, Triplett NT, McBride JM. Relationship between jumping ability and
330 running performance in events of varying distance. *J Strength Cond Res*, 2013; 27: 563-567
- 331 James DV, Sandals LE, Draper SB, Maldonado-Martin S, Wood DM. VO₂ attained during treadmill
332 running: The influence of a specialist (400-m or 800-m) event. *Int J Sports Physiol Perform*, 2007;
333 2: 128-136
- 334 Lacour J, Bouvat E, Barthelemy J. Post-competition blood lactate concentrations as indicators of
335 anaerobic energy expenditure during 400-m and 800-m races. *Eur J Appl Physiol*, 1990; 61: 172-
336 176
- 337 Loturco I, Pereira LA, Cal AC, D'Angelo RA, Fernandes V, Kitamura K, Kobal R, Nakamura FY.
338 Vertical and horizontal jump tests are strongly associated with competitive performance in 100-m
339 dash events. *J Strength Cond Res*, 2015a; 29: 1966-1971
- 340 Loturco I, D'Angelo RA, Fernandes V, Gil S, Kobal R, Cal Abad CC, Kitamura K, Nakamura FY.
341 Relationship between sprint ability and loaded/unloaded jump tests in elite sprinters. *J Strength*
342 *Cond Res*, 2015b; 29: 758-764

- 343 Mikkola J, Rusko H, Nummela A, Pollari T, Hakkinen K. Concurrent endurance and explosive
344 type strength training improves neuromuscular and anaerobic characteristics in young distance
345 runners. *Int J Sports Med*, 2007; 28: 602-611
- 346 Mikkola J, Vesterinen V, Taipale R, Capostagno B, Häkkinen K, Nummela A. Effect of resistance
347 training regimens on treadmill running and neuromuscular performance in recreational endurance
348 runners. *J Sports Sci*, 2011; 29: 1359-1371
- 349 Quinn MD. The effects of wind and altitude in the 200-m sprint. *J Appl Biomech*, 2003; 19: 49-59
- 350 Sánchez-Medina L, Pérez C, González-Badillo J. Importance of the propulsive phase in strength
351 assessment. *Int J Sports Med*, 2010; 31: 123-129
- 352 Seitz LB, Reyes A, Tran TT, de Villarreal ES, and Haff GG. Increases in Lower-Body Strength
353 Transfer Positively to Sprint Performance: A Systematic Review with Meta-Analysis. *Sports Med*,
354 2014; 44: 1693-1702
- 355 Spencer MR, Gastin PB. Energy system contribution during 200- to 1500-m running in highly
356 trained athletes. *Med Sci Sports Exerc*, 2001; 33: 157-162
- 357 Taipale R, Mikkola J, Nummela A, Vesterinen V, Capostagno B, Walker S, Gitonga D, Kraemer W,
358 Häkkinen K. Strength training in endurance runners. *Int J Sports Med*, 2010; 31: 468-476
- 359 Taipale RS, Mikkola J, Salo T, Hokka L, Vesterinen V, Kraemer WJ, Nummela A, Häkkinen K.
360 Mixed maximal and explosive strength training in recreational endurance runners. *J Strength Cond*
361 *Res*, 2014; 28: 689-699
- 362 Weyand PG, Cureton KJ, Conley DS, Sloniger MA, Liu Y. Peak oxygen deficit predicts sprint and
363 middle-distance track performance. *Med Sci Sports Exerc*, 1994; 26: 1174-1180
- 364

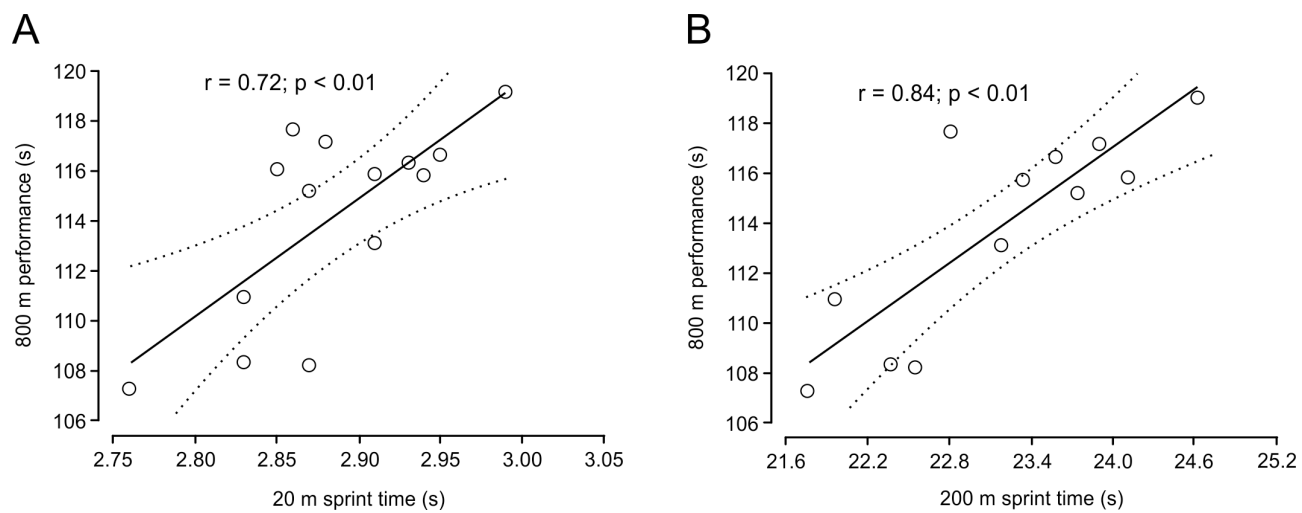
365
366**Table 1**367 *Relationships between sprint times (10 m, 20 m, 10-20 m, 200 m, 1st 50 m, 2nd 50 m, 3rd 50 m, 4th 50*
368 *m), strength tests (CMJ, JS, SQ) and 800 m performance (n=14, except for 200 m n=12)*

Test	Mean \pm SD	Correlation (r)
10 m (s)	1.67 \pm 0.03	0.59 *
20 m (s)	2.89 \pm 0.06	0.72 **
10-20 m (s)	1.20 \pm 0.03	0.56 *
200 m (s)	23.16 \pm 0.89	0.84 **
1 st 50 m (0-50 m) (s)	6.20 \pm 0.19	0.71*
2 nd 50 m (50-100 m) (s)	5.43 \pm 0.22	0.72*
3 rd 50 m (100-150 m) (s)	5.56 \pm 0.25	0.81**
4 th 50 m (150-200 m) (s)	5.91 \pm 0.31	0.85***
CMJ (cm)	42.6 \pm 5.6	-0.69 **
JS (load 20 cm)	34.6 \pm 14.3	-0.65 *
SQ (load 1 m·s ⁻¹)	56.3 \pm 9.7	-0.58 *

369 *Abbreviations: CMJ = Countermovement jump; JS = Jump squat with the load of 20 cm height; SQ = full*
370 *squat with the load reached at 1 m·s⁻¹ velocity.*371 **Indicates significant correlation at $p < 0.05$; **Indicates significant correlation at $p < 0.01$; ***Indicates significant*
372 *correlation at $p < 0.001$.*

373

374



375

376 **Figure 1**377 *Relationships between sprint times: A) 20 m; B) 200 m, and 800 m performance (n=14, except for*

378

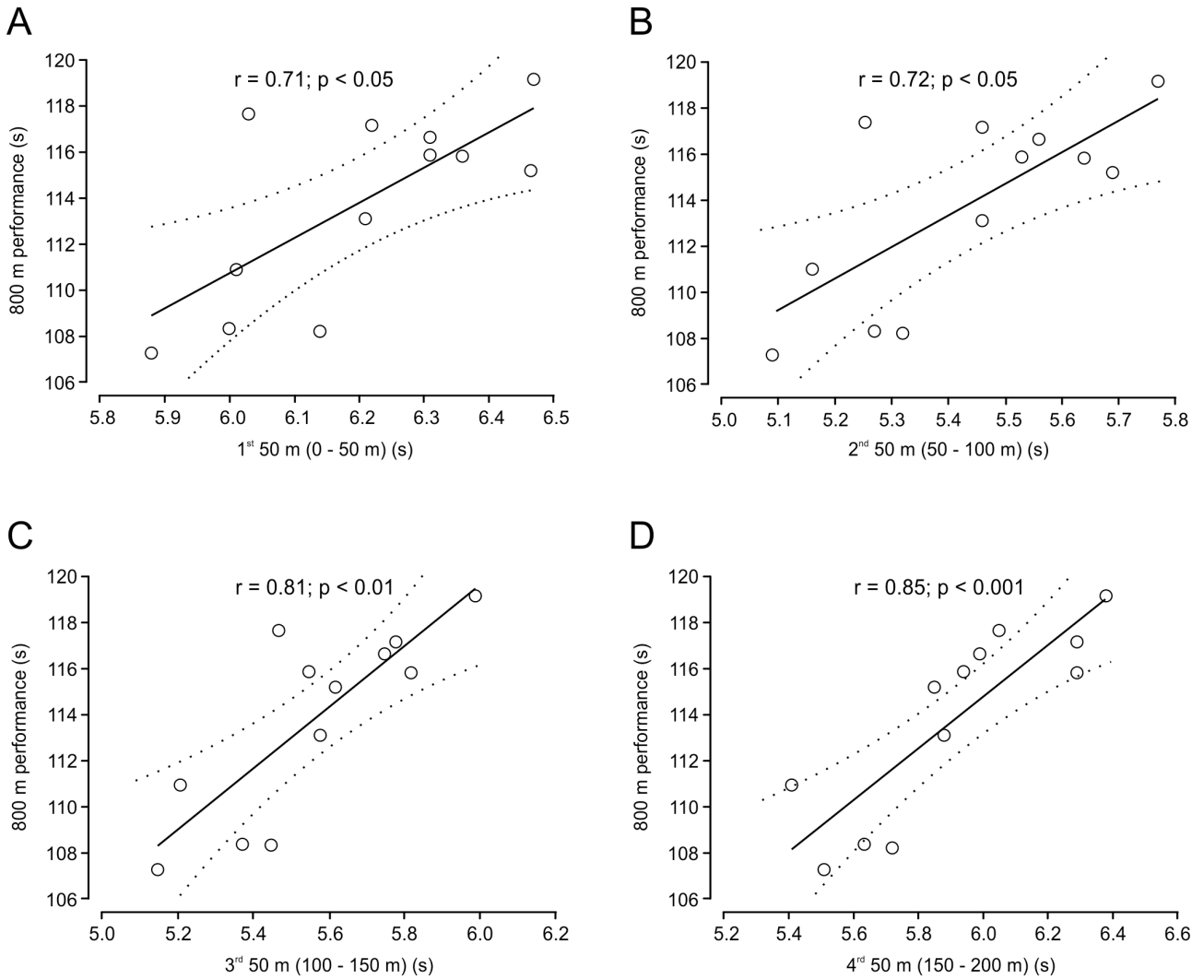
200 m n=12)

379

380

381

382

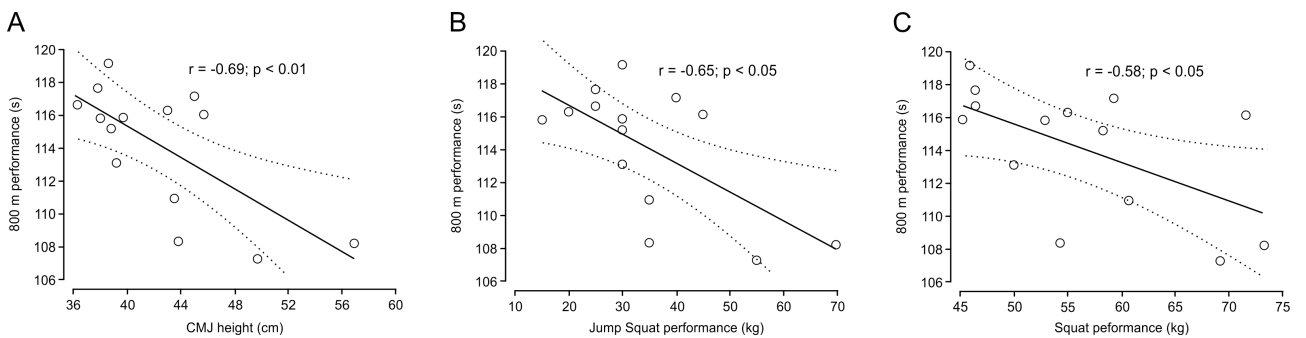


383

384 **Figure 2**

385 *Relationships between 200 m split times: A) 1st 50 m (0-50 m); B) 2nd 50 m (50-100 m); C) 3rd 50 m*
 386 *(100-150 m); D) 4th 50 m (150-200 m), and 800 m performance (n=12)*

387



388

389

390 **Figure 3**

391 *Relationships between strength tests: A) CMJ height; B) Jump Squat; C) Squat performance, and*
 392 *800 m performance (n=14)*

393

Enhanced Strength and Sprint Levels, and Changes in Blood Parameters During a Complete Athletics Season in 800 m High-Level Athletes.

Beatriz Bachero-Mena^{1, 2*}, Fernando Pareja-Blanco^{1, 2}, Juan José González-Badillo²

¹Faculty of Sport, Pablo de Olavide University, Spain, ²Physical and Athletic Performance Research Centre, Pablo de Olavide University, Spain

Submitted to Journal:
Frontiers in Physiology

Specialty Section:
Exercise Physiology

Article type:
Original Research Article

Manuscript ID:
232973

Received on:
30 Sep 2016

Revised on:
21 Feb 2017

Frontiers website link:
www.frontiersin.org

In review

Conflict of interest statement

The authors declare that the research was conducted in the absence of any commercial or financial relationships that could be construed as a potential conflict of interest

Author contribution statement

Substantial contributions to the conception or design of the work: BB, JJ. Acquisition, analysis, or interpretation of data for the work: BB, FP, JJ. Drafting the work or revising it critically for important intellectual content: BB, FP, JJ. Final approval of the version to be published: BB, FP, JJ. Agreement to be accountable for all aspects of the work in ensuring that questions related to the accuracy or integrity of any part of the work are appropriately investigated and resolved: BB, FP, JJ.

Keywords

Middle-distance, Resistance-training, Countermovement jump, competition, Hematocrit, IGF-1

Abstract

Word count: 333

The purpose of this study was to analyze changes in sprint, strength, hematological, and hormonal parameters in high-level 800 m athletes during a complete athletics season. Thirteen male athletes of national and international level in 800 m (personal best ranging from 1:43 to 1:58 min:ss) participated in this study. A total of 5 tests were conducted during a complete athletics season. Athletes performed sprint tests (20 m and 200 m), countermovement jump (CMJ), jump squat (JS), and full squat (SQ) tests. Blood samples (red and white blood profile) and hormones were collected in test 1 (T1), test 3 (T3) and test 5 (T5). A general increase in the performance of the strength and sprint parameters analyzed (CMJ, JS, SQ, 20 m, and 200 m) during the season was observed, with a significant time effect in CMJ ($P < 0.01$), SQ ($P < 0.01$), and 200 m ($P < 0.05$). This improvement was accompanied by a significant enhancement of the 800 m performance from T3 to T5 ($P < 0.01$). Significant changes in some hematological variables: hematocrit (Hct) ($P < 0.01$), mean corpuscular volume (MCV) ($P < 0.001$), mean corpuscular hemoglobin content (MCHC) ($P < 0.001$), white blood cells count (WBC) ($P < 0.05$), neutrophils ($P < 0.05$), monocytes ($P < 0.05$), and mean platelet volume (MPV) ($P < 0.05$) were observed throughout the season. The hormonal response and creatin kinase (CK) did not show significant variations during the season, except for insulin-like growth factor I (IGF-1) ($P < 0.05$). In conclusion, our results suggest the importance of strength levels in middle-distance athletes. On the other hand, the variations in the hematological parameters analyzed may have an influence on 800 m performance. A depression of the immune system occurred at the end of the season. Therefore, monitoring of the mechanical, hematological and hormonal response in athletes may help coaches and athletes to optimize the regulation of training contents and may be useful to diagnose states of overreaching or overtraining in athletes throughout the season.

Funding statement

This study was supported in part by a grant from the FPU Program of the Education, Culture and Sport Ministry of Spain.

Ethics statements

(Authors are required to state the ethical considerations of their study in the manuscript, including for cases where the study was exempt from ethical approval procedures)

Does the study presented in the manuscript involve human or animal subjects: Yes

Please provide the complete ethics statement for your manuscript. Note that the statement will be directly added to the manuscript file for peer-review, and should include the following information:

- Full name of the ethics committee that approved the study
- Consent procedure used for human participants or for animal owners
- Any additional considerations of the study in cases where vulnerable populations were involved, for example minors, persons with disabilities or endangered animal species

As per the Frontiers authors guidelines, you are required to use the following format for statements involving human subjects:

This study was carried out in accordance with the recommendations of 'name of guidelines, name of committee' with written informed consent from all subjects. All subjects gave written informed consent in accordance with the Declaration of Helsinki. The protocol was approved by the 'name of committee'.

For statements involving animal subjects, please use:

This study was carried out in accordance with the recommendations of 'name of guidelines, name of committee'. The protocol was approved by the 'name of committee'.

If the study was exempt from one or more of the above requirements, please provide a statement with the reason for the exemption(s).

Ensure that your statement is phrased in a complete way, with clear and concise sentences.

All participants were fully informed about procedures, potential risks and benefits of the study and they all signed written informed consent prior to the tests. The study was conducted in accordance with the Declaration of Helsinki II and approved by the Ethics Committee of Pablo de Olavide University, Seville, Spain.

In review

1 **Enhanced Strength and Sprint Levels, and Changes in Blood**
2 **Parameters During a Complete Athletics Season in 800 m**
3 **High-Level Athletes.**

4

5

6 **ABSTRACT**

7 The purpose of this study was to analyze changes in sprint, strength, hematological, and
8 hormonal parameters in high-level 800 m athletes during a complete athletics season.
9 Thirteen male athletes of national and international level in 800 m (personal best
10 ranging from 1:43 to 1:58 min:ss) participated in this study. A total of 5 tests were
11 conducted during a complete athletics season. Athletes performed sprint tests (20 m and
12 200 m), countermovement jump (CMJ), jump squat (JS), and full squat (SQ) tests.
13 Blood samples (red and white blood profile) and hormones were collected in test 1 (T1),
14 test 3 (T3) and test 5 (T5). A general increase in the performance of the strength and
15 sprint parameters analyzed (CMJ, JS, SQ, 20 m, and 200 m) during the season was
16 observed, with a significant time effect in CMJ ($P < 0.01$), SQ ($P < 0.01$), and 200 m (P
17 < 0.05). This improvement was accompanied by a significant enhancement of the 800 m
18 performance from T3 to T5 ($P < 0.01$). Significant changes in some hematological
19 variables: hematocrit (Hct) ($P < 0.01$), mean corpuscular volume (MCV) ($P < 0.001$),
20 mean corpuscular hemoglobin content (MCHC) ($P < 0.001$), white blood cells count
21 (WBC) ($P < 0.05$), neutrophils ($P < 0.05$), monocytes ($P < 0.05$), and mean platelet
22 volume (MPV) ($P < 0.05$) were observed throughout the season. The hormonal response
23 and creatin kinase (CK) did not show significant variations during the season, except for
24 insulin-like growth factor I (IGF-1) ($P < 0.05$). In conclusion, our results suggest the
25 importance of strength levels in middle-distance athletes. On the other hand, the
26 variations in the hematological parameters analyzed may have an influence on 800 m
27 performance. A depression of the immune system occurred at the end of the season.
28 Therefore, monitoring of the mechanical, hematological and hormonal response in
29 athletes may help coaches and athletes to optimize the regulation of training contents
30 and may be useful to diagnose states of overreaching or overtraining in athletes
31 throughout the season.

32

33 **Keywords: middle-distance, resistance-training, competition, countermovement**
34 **jump, hematocrit, IGF-1.**

35

36

37

38

39 INTRODUCTION

40 Eight hundred-meter running is a middle-distance event where usually both strength and
41 endurance training are performed concurrently. Positive adaptations to concurrent
42 strength and endurance training have been reported in high-level endurance athletes
43 (Hoff et al., 2002; Mikkola et al., 2007; Paavolainen et al., 1999).

44 Recently, there has been a growing interest in assessing muscle strength in middle and
45 long-distance athletes, due to the demonstrated benefits of resistance training in such
46 athletes (Aagaard and Andersen, 2010; Beattie et al., 2014; Ronnestad and Mujika,
47 2014; Saunders et al., 2004; Taipale et al., 2010, 2014). For instance, Mikkola et al.
48 (2007) reported that both heavy and explosive resistance training induced improvements
49 in maximal endurance capacity in long-distance runners. Taipale et al. (2010, 2014)
50 showed a positive effect of maximal and explosive strength training performed
51 concurrently with endurance training on the specific performance in recreational
52 endurance runners. Some studies indicate that strength training might positively
53 influence on long-distance running performance by improving running economy
54 (Ferrauti et al., 2010; Kelly et al., 2008). Likewise, plyometric training has been shown
55 to increase muscle tendon stiffness with a coincidental increase in running economy in
56 long-distance runners (Spurrs et al., 2003). Thus, strength training has been proposed as
57 an important complementary training to increase performance in endurance events by
58 improving other factors, such as running economy (Jung, 2003; Legaz-Arrese et al.,
59 2005). On the other hand, vertical jump tests have been widely proposed as an efficient
60 and immediate assessment tool for lower limbs explosive strength (Cormie et al., 2009;
61 Jiménez-Reyes et al., 2014). The countermovement jump (CMJ) test is one of the most
62 common jump tests used because of its validity, reliability and specificity (Jiménez-
63 Reyes et al., 2014; Markovic et al., 2004). Jiménez-Reyes et al. (2011) analyzed the
64 evolution of jump parameters throughout a complete season in sprint track and field
65 athletes; as a result, they observed that the best performances were obtained in CMJ
66 when the best running performances were achieved during the same period. The same
67 occurred with the worst running competition, which was followed by the worst CMJ
68 performances of the season. Recently, Bachero-Mena et al. (2016) have found
69 significant correlations between running performance in 800 m event and sprint times
70 (20 and 200 m), squat strength and loaded and unloaded jumps height in 800 m high-
71 level athletes. Despite the extensive published data confirming the strong correlation
72 between strength manifestations and endurance performance (Mikkola et al., 2007;
73 Taipale et al., 2010, 2014), there are limited data on the long-term changes in strength
74 variables associated with long-term middle-distance training.

75 Although it is well known that the hematological status in athletes is important due to
76 the essential role of blood which facilitates gas transport, buffering and
77 thermoregulation; to our knowledge, there is no available data describing the blood
78 profile among middle-distance athletes during a complete athletics season. The oxygen
79 (O_2) transport capacity has been found to correlate directly with aerobic performance
80 (Berglund and Hemmingson, 1987). Likewise, a strong correlation between total
81 hemoglobin (Hb) and maximal O_2 uptake (VO_{2max}) has been found in athletes (Sawka et
82 al. 2000; Schmidt and Prommer, 2010). Thus, a high O_2 transport capacity is a clear
83 advantage for aerobic athletic performance. Some parameters required to evaluate O_2
84 transport capacity are: Hb and hematocrit (Hct), as well as total Hb mass and total red
85 blood cell count (RBC) in circulation. Hb and RBC indicate the total amount of O_2 that

86 can be transported by blood, redirecting O₂ to organs with a high O₂ demand while
87 maintaining basal O₂ supply in less active tissues (Mairbäurl, 2013). An acute reduction
88 of blood Hb concentration, even when the circulating blood volume is maintained,
89 results in lower VO_{2max} and endurance performance, due to the reduction of the O₂
90 carrying capacity of blood (Calbet et al., 2006). Conversely, an increase of Hb
91 concentration is associated with enhanced VO_{2max} and endurance capacity that is also
92 proportional to the increase in the O₂ carrying capacity of blood (Calbet et al., 2006). In
93 this line, Rietjens et al. (2002) evaluated the red blood profile of elite olympic distance
94 triathletes during three years to find out that long term endurance training did not
95 largely alter hematological status, but that regular screening of hematological variables
96 was desirable to control the normal range. Despite the well-established relationship
97 existing between packed cell volume, VO_{2max}, aerobic performance and maximal
98 exercise capacity (Kanstrup and Ekblom, 1984; Calbet et al., 2006), there is limited data
99 on the long-term changes in hematological variables associated with endurance training.
100 On the other hand, white cells are an important part of the immune system. The immune
101 system may be affected by the level of activity in which an athlete is engaged (Vleck et
102 al., 2014). Through several mechanisms, the immune system may be depressed during
103 intense endurance activity, resulting in an increased risk of illness or infection (Knez et
104 al., 2006).

105 Strenuous physical exercise promotes a stress-activated response from the endocrine
106 system (Crewther et al., 2006). During long-term training, these responses may be
107 modulated by the physical conditioning that occurs with chronic training (De Souza et
108 al., 1991). Long-term hormonal adaptations to endurance training have been
109 characterized by a decrease, or no change, in the basal concentrations of hormones
110 (Consitt et al., 2002). One of the most studied hormones in response to exercise is
111 testosterone (T), considered as a primary anabolic hormone since it increases protein
112 synthesis and decreases protein degradation (Crewther et al., 2011). Fatigue-induced
113 variations in salivary T have been found in relation to the intensity and duration of a
114 preceding physical load, indicating a catabolic state (Gatti and De Palo, 2011). On the
115 contrary, cortisol (C) is one of the primary catabolic hormones, as it increases protein
116 degradation and decreases protein synthesis (Crewther et al., 2011). In that way, C can
117 be used to determine psychophysiological stress during single and repeated exercise
118 sessions even if a non-univocal relationship has been found between stress and C
119 concentration (Gatti and De Palo, 2011). In relation to middle-distance athletes,
120 Balsalobre-Fernández et al. (2014) found a trend in which the weeks with higher
121 salivary free C concentrations were those in which higher CMJ scores were recorded,
122 suggesting that higher C concentrations (lower than 15.7 ng·ml⁻¹) boost CMJ
123 performance. Research has indicated that chronic hormonal adaptations in endurance
124 athletes involve depressed T levels and increased levels of C (Hackney et al., 2003),
125 which indicate a catabolic state in the body that could negatively affect the performance.
126 The reduction in training load and fatigue induces a lower adrenocortical response as
127 well as an improvement of the immunity status, without significant correlations of
128 salivary hormones with training load (Guilhem et al., 2015). On the other hand,
129 previous studies have shown an increase in prolactin (PRL) induced by exercise (Gray
130 et al., 1993; Hickson et al., 1994; Kraemer et al., 1998), which appears to be related to
131 the intensity of exercise (Luger et al., 1992). However, there is controversial literature
132 about the changes of resting and exercise-induced PRL concentration and its association
133 to overtraining states (Rojas-Vega et al., 2011). Growth hormone (GH) and its primary
134 downstream mediator, insulin-like growth factor I (IGF-I), play an important role in

135 formation, maintenance, and regeneration of skeletal muscles (Frystik, 2010). Positive
136 correlations between circulating IGF-I levels and GH secretion, respectively, and
137 indices of fitness have been observed (Frystik, 2010). Most studies involving hormonal
138 responses used strength-related athletes. So, to our knowledge, there are no studies
139 monitoring the hormonal response in middle-distance athletes during a complete
140 athletics season.

141
142 Therefore, the aim of this study was to analyze the changes in sprint and strength
143 parameters, as well as hematological and hormonal variables during a complete athletics
144 training season in 800 m high-level athletes.

145 **METHODS**

146 **Participants**

147 Thirteen male athletes of national and international level in 800 m (with personal best
148 ranging from 1:43 to 1:58 min:ss) participated in this study (age: 22.9 ± 5.3 years;
149 height: 175.2 ± 5.5 cm; body mass: 62.9 ± 4.4 kg). Two of them were classified 1st and
150 2nd in the national championship and national ranking; they also had participated in the
151 last Olympic Games. All athletes had completed strength-training programs in the past
152 and were familiarized with the testing procedures. The athletes participated in national
153 and international competitions during the period of testing. Due to the characteristics of
154 the sample (national and international level 800 m athletes), conditioning and training
155 programs were determined entirely by the coaches. No physical limitations or
156 musculoskeletal injuries that could affect testing were reported. All participants were
157 fully informed about procedures, potential risks and benefits of the study and they all
158 signed written informed consent prior to the tests. The study was conducted in
159 accordance with the Declaration of Helsinki II and approved by the Ethics Committee
160 of Pablo de Olavide University, Seville, Spain.

161 **Experimental Design**

162 During a complete athletics season, strength and sprint tests were carried out every two
163 months (a total of 5 tests were performed) from October to June (Figure 1). Likewise,
164 blood samples for determining basal hematological and hormonal profile were collected
165 in T1, T3, and T5, completing a total of 3 samples during the whole athletics season.
166 The testing was performed in two sessions separated by 1 week. Session 1 consisted of
167 blood sampling, sprint test (20 m) and strength tests: countermovement jump (CMJ),
168 jump squat (JS), and full squat (SQ). Session 2 consisted of 200 m test. Testing sessions
169 were always carried out after a full day of rest, at the same time of the day.

170 **Procedures**

171 *Test Preparation.* During the first testing day, all the participants completed a 20 min
172 standardized warm-up protocol consisting of 10 min of low intensity jogging, 5 min of
173 joint mobilization exercises, and one 40 m sprint at 80% effort, two 20 m sprint at 90%
174 effort, and one 10 m sprint at 100% effort with 2 min rest between them. After the
175 sprint test, the athletes performed the strength tests in the following order: CMJ, JS, and
176 SQ; in addition to the standardized warm-up, the participants did SQ without external
177 load and 5 progressive CMJ. On the second testing day, the athletes performed the 200

178 m.

179 *Sprint testing.* In the first day two 20 m trials were performed. The sprint trials were
180 recorded by photocells (Racetime 2; Microgate, Bolzano, Italy), based on a radio
181 impulse transmission system and a reflection system. Runs were performed from static
182 biped start position with the start line located 1 m behind the first photocell. The rest of
183 the photocells were placed at 10 and 20 m. The best time of the two 20 m trials was
184 recorded. The rest period between sets lasted 3 min. The sprint test (20 m) was
185 conducted on a synthetic running track in an indoor hall.

186 *Jump measurements (CMJ and JS).* The CMJ and JS were performed on an infrared
187 platform Optojump (Microgate, Bolzano, Italy) that calculated jump height (h) through
188 flight time (t) and the acceleration due to gravity (g) as follows: $h = t^2 \times g / 8$. The CMJ
189 was performed with both hands on the waist, while making a downward movement
190 approximately to 90°-knee flexion followed by a vertical jump of maximum effort. The
191 participants were required to do 3 trials separated by 1 min rest, mean height being
192 recorded. Just after the CMJ test, the JS test was performed with progressive loads
193 ranging from 20 kg up to the load allowing the participant to jump up no more than 20
194 cm high. The JS test was performed using a Smith machine (Multipower Fitness Line,
195 Peroga, Murcia, Spain), which allows a smooth vertical displacement of the bar along a
196 fixed pathway. The athletes performed two JS separated by 2 min rest with each load.
197 The mean heights of the 2 jumps of each of the common loads performed in the 5 tests
198 were used for the subsequent statistical analysis.
199

200 *Full Squat test (SQ).* After the JS test, an incremental loading full SQ test was
201 performed on a Smith machine (Multipower Fitness Line, Peroga, Murcia, Spain) using
202 a linear velocity transducer (T-Force System; Ergotech, Murcia, Spain). Instantaneous
203 velocity was sampled at a frequency of 1,000 Hz. After a warm-up, initial load was set
204 at 20 kg for all participants and was gradually increased in 10 or 5 kg increments until
205 the attained mean propulsive velocity was $\sim 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (55-60% 1RM), which was
206 considered a sufficient load to evaluate lower limb strength (Conceição et al., 2015).
207 This resulted in a total of 4.1 ± 0.7 increasing loads performed by each athlete. The
208 participants started from the upright position with their knees and hips fully extended,
209 the barbell resting across their back at the level of the acromion. Each participant
210 descended in a continuous motion until the top of the thighs got below the horizontal
211 plane, and then they immediately reversed the motion and ascended back to the upright
212 position. The participants were always required to execute the concentric phase of SQ in
213 an explosive manner, at maximal intended velocity. For each load, the repetition
214 correctly performed at the highest velocity was recorded. The velocities reported in this
215 study correspond to the average velocity of the propulsive phase (Sánchez-Medina et al.,
216 2010) for each common load performed in the 5 tests, from 20 kg to the load of $\sim 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.
217

218 *200 m running test.* This test was performed on a synthetic running outdoor track
219 (Mondo). Wind conditions were monitored constantly by an Oregon Scientific WMR-
220 918 (Oregon Scientific, Tigard, OR, USA) meteorological station. A mathematical
221 model (Quinn, 2003) was used in order to adjust the potential influence of wind in the
222 time performances. This mathematical model suggests that a head wind of -2.0 or -1.0
223 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ causes a time lost of 0.121 and 0.059 s respectively, and that a tail wind of +2.0 or
224 +1.0 causes a time gain of 0.112 and 0.056 s respectively. Just one 200 m trial was
225 performed. The procedures were the same as the above mentioned for the 20 m test.

226 Two pairs of photocells (Racetime 2; Microgate, Bolzano, Italy) were used for timing
227 recordings.

228

229 *800 m performance.* The best 800 m time performance of the athletes during the winter
230 competition season (T3) and the summer competition season (T5) was recorded.

231 *Blood sampling.* Blood samples were collected during T1, T3, and T5. In view of large
232 fluctuations that steroids concentration may exhibit (Gatti and De Palo, 2011), blood
233 samples were always collected at the same time in the afternoon, when hormones
234 concentrations exhibit reduced fluctuations in comparison with morning measurements.
235 The participants were asked to rest from training the day before the sampling and the
236 tests. Before blood sampling the athletes rested on a bed for at least 10 minutes. Blood
237 samples were taken from the athlete in supine position from the antecubital vein by a
238 qualified laboratory technician using the Vacuette system and collected in tubes
239 containing EDTA K 3 (3 ml) or no anticoagulant (5 ml), for hematological and
240 hormonal analysis, respectively. Hematological analysis was performed using an XN-
241 9000 analyzer (Roche Diagnostics, Indianapolis, USA). The following hematological
242 variables were determined: hemoglobin (Hb), hematocrit (Hct), red blood cell count
243 (RBC), mean corpuscular hemoglobin (MCH), mean corpuscular hemoglobin content
244 (MCHC), mean corpuscular volume (MCV), red blood cell distribution width (RDW),
245 white blood cells count (WBC), neutrophils, lymphocytes, monocytes, eosinophils,
246 basophils, platelets, and mean platelet volume (MPV). Concentrations of total
247 testosterone (T), cortisol (C), insulin-like growth factor I (IGF-1), human growth
248 hormone (GH), prolactin (PRL), and creatin kinase (CK) were measured using
249 electrochemiluminescence immunoassays on the Cobas E170 autoanalyzer (Roche
250 Diagnostics, Indianapolis, USA).

251 **Statistical Analyses**

252 All the data are reported as mean value \pm standard deviation (SD). Test-retest absolute
253 reliability was measured by the coefficient of variation (CV), whereas relative reliability
254 was assessed by the intraclass correlation coefficient (ICC) using the one-way random
255 effects model, and confidence interval (CI) at 95%. ICC values ≥ 0.9 were interpreted as
256 very reliable (Vincent, 1999). A CV of $\leq 10\%$ was set at the criterion to declare a
257 variable as reliable (Augustsson et al., 2006). Reliability analyses were done from T1
258 data. The normal distribution of the data was verified with the Shapiro-Wilk test.
259 Statistical analyses for changes throughout the season were assessed using one-way
260 repeated measures analysis of variance (ANOVA). The main effects were compared
261 using the post-hoc Bonferroni method. Statistical significance was set at $P \leq 0.05$. SPSS
262 for Mac (IBM Corporation, New York, NY, USA) (release 20.0.0) was used for all
263 statistical analyses.

264 **RESULTS**

265 Mean and SD data of the different parameters (sprint and strength, hematological, and
266 hormonal) measured during the 5 tests throughout the complete athletics season are
267 presented in tables 1, 2 and 3, respectively.

268 Reliability was set with ICC and CV for the 20 m sprint and jump tests. Sprint in 20 m
269 was very reliable (ICC: 0.97; CI: 0.92-0.99; CV: 0.7%). Both CMJ (ICC: 0.99; CI:

270 0.99-1.00; CV: 1.8%) and JS (ICC: 0.97; CI: 0.90-0.99; CV: 5.2%) showed good
271 reliability as well.

272 *Strength and sprint variables*

273 Concerning the strength variables, significant increases in CMJ from T1 to T5 ($P <$
274 0.01), from T2 to T5 ($P < 0.01$), and from T3 to T5 ($P < 0.05$) have been found,
275 indicating a tendency to increase throughout the season. As regards the 200 m, a
276 significant decrease in time from T2 to T4 ($P < 0.01$) and to T5 ($P < 0.01$) was observed
277 (during T1 200 m was not performed). The tendency is a decreasing time in 200 m as
278 the season goes on. In the SQ, the average velocity tended to increase throughout the
279 tests, with significant differences from T1 to T4 ($P < 0.001$), from T2 to T4 ($P < 0.05$),
280 and from T1 to T5 ($P < 0.05$). No significant differences were found in 20 m and JS
281 during the season, however, we can observe a progressive tendency to a decrease of the
282 20 m sprint time throughout the season (T1: 2.93; T2: 2.92; T3: 2.92; T4: 2.91; T5: 2.88
283 s), and to an increase of the performance in the JS with common loads (T1: 21.3 T2:
284 21.9; T3: 22.6; T4: 22.9; T5: 23.0 cm) (Table 1).

285 *800 m performance*

286 A significant decrease in 800 m time from T3 (winter competition season) to T5
287 (summer competition season) can be observed ($P < 0.01$) (Table 1).

288 *Hematological variables*

289 Concerning the hematological variables, a significant decrease occurred in Hct ($P <$
290 0.01) from T3 (44.9%) to T5 (42.6%). Likewise, MCV decreased significantly from T1
291 to T5 ($P < 0.001$), and from T3 to T5 ($P < 0.001$). A significant increase in MCHC from
292 T1 to T5 ($P < 0.001$) and from T3 to T5 ($P < 0.001$) can be observed. RBC, Hb, MCH,
293 and RDW remained statistically unaltered. Significant decreases can be observed from
294 T3 to T5 in WBC, neutrophils, and monocytes ($P < 0.05$). Significant increases in MPV
295 occurred from T1 to T5 ($P < 0.05$) and from T3 to T5 ($P < 0.05$). No significant
296 differences between tests have been found in lymphocytes, eosinophils, basophils, and
297 platelets (Table 2).

298 *Hormonal and biochemical response*

299 IGF-1 showed a significant decrease throughout the season ($P = 0.02$). Besides, C
300 showed variations near to significance during the season ($P = 0.09$). No significant
301 differences were found in the rest of the hormonal variables analyzed and CK during the
302 season (Table 3).

303 **DISCUSSION**

304 The main purpose of this study was to analyze changes in sprint, strength,
305 hematological, and hormonal parameters during a complete athletics season in 800 m
306 high-level athletes. On the one hand, we observed an increase in strength and sprint
307 performance during the season. This improvement was accompanied by a significant
308 enhancement of the 800 m performance from T3 to T5. At the same time, significant
309 changes in some hematological variables (Hct, MCV, MCHC, WBC, neutrophils,

310 monocytes, and MPV) were detected. On the other hand, the hormonal response and CK
311 did not show significant variations during the season, except for IGF-1. To our
312 knowledge, this is the first study to present the mechanical, hematological and hormonal
313 response to long-term elite athletic middle-distance training.

314 The current data indicate that an improvement in lower limb strength could benefit
315 performance in middle and long-distance athletes (Aagaard and Andersen, 2010; Beattie
316 et al., 2014; Ronnestad and Mujika, 2014; Saunders et al., 2004; Taipale et al., 2010,
317 2014). Our findings support this hypothesis since significant increases in CMJ, SQ, and
318 200 m performance occurred throughout the season, together with an improvement in
319 800 m performance. In this line, Jiménez-Reyes et al. (2011) found out that the best
320 performances in sprinters from 100 m, 200 m, and 400 m events were achieved during
321 the same period as when the best performances in CMJ, JS, and SQ were obtained. The
322 same occurred with the worst running competition, which was followed by the worst
323 CMJ, JS, and SQ performances of the season. However, these events are shorter than
324 the 800 m. In accordance with our findings, Hudgins et al. (2013) observed significant
325 correlations between jumping ability and 800 m race time in competitive runners.
326 Likewise, significant correlations between CMJ, JS, and SQ with performance in 800 m
327 in high-level athletes have been found (Bachero-Mena et al., 2016). Contrary to our
328 study, Balsalobre-Fernández et al. (2015) did not find significant improvements in
329 strength parameters during an athletics season in middle and long-distance athletes.
330 Those significant changes in force production in the athletes in our study may be
331 explained by the fact that most of the athletes followed strength-training programs in
332 addition to the typical specific endurance training sessions throughout the season. These
333 strength-training programs consisted mostly in moderate load and low number of
334 repetitions, each repetition always being performed at maximal velocity. However, in
335 Balsalobre-Fernández et al. (2015) athletes conducted a resistance-training program
336 based on strength-endurance with multiple exercises and high repetitions per set (up to
337 20 RM). The differences observed between the resistance-training programs and the
338 differences in the sample (800 vs. 1500 m athletes) could explain the discrepancies
339 reported in the evolution of the mechanical parameters throughout the season in both
340 studies. Regarding the sprint variables, a significant improvement of performance in
341 200 m throughout the season can be observed. This result shows that the distance of 200
342 m is probably more related to the performance in 800 m than other shorter distances as
343 20 m. Similarly, significant correlations between 800 m and 300 m running times
344 (Deason et al., 1991), and between 800 m and 200 m have been found (Bachero-Mena
345 et al., 2016). Therefore, strength and sprint-related variables seem to be relevant in the
346 800 m performance.

347 Concerning the hematological variables, a significant decrease in Hct occurred during
348 the summer competition season (from T3 to T5). Rietjens et al. (2002) observed that
349 Hct values tended to be highest during the training season compared to the competitive
350 season in elite olympic distance triathletes. Those results could be explained by the
351 quite large seasonal variations in Hct (relative change up to 15%), since the values
352 observed in summer were lower than those observed in winter, which might result in
353 seasonal changes from $\approx 48\%$ in winter to $\approx 42\%$ in summer (Mairbäurl, 2013). Studies
354 of seasonal changes in Hct of athletes are sparse but indicate that Hct might be
355 decreased by another 1-2% in summer by the addition of a training effect (Mairbäurl,
356 2013). In addition, the decrease in Hct during the summer season could be explained by
357 an expansion of the plasma volume due to the repeated heat exposure, without influence

358 on erythrocyte volume (Sawka et al., 2000). Together with Hct, MCV decreased
359 significantly throughout the season, probably also influenced by hemodilution.
360 Additionally, MCHC increased significantly throughout the season. MCHC is a related
361 variable to Hb and Hct, being a measure of the concentration of hemoglobin in a given
362 volume of packed red blood cell. In that sense, an increase in MCHC would be
363 explained by an increase in Hb and a decrease in Hct, leading to a better O₂ transport
364 capacity, which might improve performance. No significant differences between tests
365 were found in the other blood parameters related to O₂ transport (RBC, Hb, MCH, and
366 RDW). In this regard, Rietjens et al. (2002) found a significant reduction of mean RBC
367 from the preparatory to the competitive season. This observed reduction in RBC is also
368 in line with other studies in elite runners, cyclists, swimmers and triathletes
369 (Schumacher et al., 2000; O'Toole et al., 1988; Guglielmini et al., 1989). Hb is one of
370 the most studied physiological variables in relation to induced-endurance training
371 adaptations. In our study, non-significant changes occurred in Hb ($P = 0.2$). Similarly,
372 studies on long term (4-12 months) training showed no or only small effects in Hb (Ray
373 et al., 1990; Green et al., 1991); however, a longitudinal study on 'leisure sportsmen'
374 revealed an increase in Hb by 6% during a 9-month endurance training (Schmidt and
375 Prommer, 2008), suggesting that changes of Hb and RBC by training are slow, and that
376 several years of training may be required for a pronounced increase. The fact that our
377 sample consisted of high-level 800 m athletes with high baseline values of Hb ($15.11 \pm$
378 $0.75 \text{ g} \cdot \text{dl}^{-1}$) could explain the only small changes of this variable during the season. On
379 the other hand, significant decreases of Hb, Hct and RBC have been observed in male
380 cyclists when increasing the training load (Shumacher et al., 2000). In regard to white
381 cells, while acute exercise bouts have been implicated in an augmented inflammatory
382 state (Kakanis et al., 2010), high levels of physical activity have been linked to reduced
383 systemic inflammation, and aerobic exercise training has been shown to decrease WBC
384 counts (Michishita et al., 2010) and it is associated to inflammatory biomarkers (De
385 Gonzalo-Calvo et al., 2012). In our study significant decreases occurred in WBC,
386 Neutrophils, and Monocytes from T3 to T5, suggesting a depression of the immune
387 system at the end of the season. This finding is in line with Horn et al. (2010), who
388 observed a decreased number of Monocytes and WBC in triathletes. This depressed
389 response observed in our study could be due to the more intense and specialized
390 exercises performed during the summer competition period, and could increase the risk
391 of illness or infection. Besides, the significant increase of MPV throughout the season is
392 consistent with the well-established evidence that aerobic physical activity is effective
393 to enhance circulating activated platelets (Knudsen et al., 1982; Whittaker et al., 2013;
394 Hilberg et al., 2008).

395 As regards the hormonal and biochemical response, IGF-1 showed a significant
396 decrease throughout the season. Studies of the chronic effects of exercise on the
397 circulating IGF-I have yielded inconsistent results. Some cross-sectional studies
398 reported positive associations between VO_{2max} and immunoreactive IGF-I levels
399 (Eliakim et al., 1996; Poehlman and Copeland, 1990; Poehlman et al., 1994), suggesting
400 that an improvement in fitness would result in a higher serum IGF-I (Frystik, 2010). By
401 contrast, other studies have shown reductions in immunoreactive IGF-I levels after
402 several weeks of exercise despite an improved physical performance (muscle strength
403 and/or VO_{2max}) (Eliakim et al., 1996; 1998). The rest of the hormonal parameters did
404 not show significant variations. PRL and GH share similar sequence homology and
405 immune system activities (Gala, 1991), and therefore may be important factors involved
406 in the recovery from exercise-induced muscle disruption. In this line, Smallridge et al.

407 (1985) found that plasma PRL response after thyrotropin-releasing hormone challenge
408 was augmented in endurance-trained male joggers and marathoners compared to male
409 sedentary controls. On the other hand, C and T are hormonal parameters used to
410 determine psychophysiological stress during exercise. In our study, C and T did not
411 show significant variations in spite of the changes of training load during the different
412 training periods in the season. Similarly to our results, other authors did not find
413 significant changes in C during the season in track and field athletes (Guilhem et al.,
414 2015). Nevertheless, in our study C showed a near to significance increase at the end of
415 the season ($P = 0.09$). Balsalobre-Fernández et al. (2015) showed as well a significant
416 increase in C at the end of the season during the competition period. Guilhem et al.
417 (2015) analyzed salivary hormones in track and field athletes of different disciplines
418 (sprinters, jumpers, and middle distance athletes) during a 4.5 months period including
419 a preparation period of 3 months and a pre-competitive period of 1.5 month. They found
420 significant increase of salivary T at week 5 in comparison to week 2, week 3, and week
421 4 of the pre-competitive period, which could be explained by the load diminution during
422 the competition season. Similarly, Taipale et al. (2014) found a significant increase in T
423 in recreational endurance runners between weeks 0 and 12 after mixed maximal and
424 explosive training, followed by a significant return to baseline between weeks 12 and
425 16; however C remained statistically unaltered. Contrary to our study, in the studies
426 referred to above, T and C were obtained by salivary markers, which could explain
427 some differences in the results. Regarding the muscle damage markers (CK), no
428 significant changes were found during the season. In Guilhem et al. (2015) significant
429 increase in CK activity occurred from the preparation to the pre-competitive period,
430 which could be due to higher intensity and specialized exercises during this period,
431 which could have increased the exercise-induced muscle damage (Fiorentino et al.,
432 2014). Nonetheless, CK is recognized for being influenced by factors other than the
433 level of muscle damage (e.g., soft tissue trauma, exercise-induced hemoconcentration
434 and/or hemodilution, alterations of tissue clearance) (Beakley et al., 2012).

435 In conclusion, a complex induced-training response was observed during the complete
436 athletics season in high-level middle-distance athletes, indicated by changes in the
437 mechanical, hematological and hormonal parameters measured. There was a general
438 increase in strength and sprint parameters analyzed (CMJ, JS, SQ, 20 m, and 200 m)
439 during the season. This improvement in the strength and sprint parameters was
440 accompanied by a significant enhancement in the 800 m performance. At the same time,
441 the significant variations in the hematological parameters analyzed (Hct, MCV, MCHC,
442 WBC, Neutrophils, Monocytes, and MPV) and the depression of the immune system at
443 the end of the season may have an influence on 800 m performance. On the other hand,
444 the hormonal response and CK remained unaltered during the season, except for IGF-1.
445 These interesting results may indicate that the neuromuscular adaptations responsible
446 for the improvement in lower limb strength and sprint could have partially influenced
447 the enhancement of the 800 m performance, which reflects the importance of strength
448 levels in middle-distance athletes. Important physiological adaptations also occurred
449 during the complete athletics season in 800 m high-level athletes. Our findings suggest
450 that the monitoring of the mechanical, hematological and hormonal response in athletes
451 may help coaches and athletes to optimize the regulation of training contents throughout
452 the season and may be useful to diagnose states of overreaching or overtraining in
453 athletes. More exhaustive analysis of different athletics events or other sports modalities
454 should be considered in the future in order to optimize training contents and prevent
455 non-desirable physical states that could affect performance in high-level athletes.

456 **AUTHOR CONTRIBUTIONS**

457 Substantial contributions to the conception or design of the work: BB, JJ. Acquisition,
458 analysis, or interpretation of data for the work: BB, FP, JJ. Drafting the work or revising
459 it critically for important intellectual content: BB, FP, JJ. Final approval of the version
460 to be published: BB, FP, JJ. Agreement to be accountable for all aspects of the work in
461 ensuring that questions related to the accuracy or integrity of any part of the work are
462 appropriately investigated and resolved: BB, FP, JJ.

463 **FUNDING**

464 This study was supported in part by a grant from the FPU Program of the Education,
465 Culture and Sport Ministry of Spain.

466 **ACKNOWLEDGMENTS**

467 The authors would like to thank the coaches and athletes who have participated in the
468 study.

469 **REFERENCES**

470 Aagaard, P., and Andersen, J. L. (2010). Effects of strength training on endurance
471 capacity in top level endurance athletes. *Scand. J. Med. Sci. Sports.* 20, 39-47. doi:
472 10.1111/j.1600-0838.2010.01197.x.

473 Augustsson, J., Thomeé, R., Lindén, C., Folkesson, M., Tranberg, R., Karlsson, J.
474 (2006). Single-leg hop testing following fatiguing exercise: reliability and
475 biomechanical analysis. *Scand. J. Med. Sci. Sports.* 16, 111-120.

476 Bachero-Mena, B., Pareja-Blanco, F., Rodríguez-Rosell, D., Yáñez-García, J. M.,
477 Mora-Custodio, R., González-Badillo, J. J. (2017). Relationships between sprint,
478 jumping and strength abilities, and 800 m performance in male athletes of national and
479 international levels. *J. Hum. Kinet.* "In Press"

480 Balsalobre-Fernández, C., Tejero-González, C. M., and del Campo-Vecino, J. (2014).
481 Relationships between training load, salivary cortisol responses and performance during
482 season training in middle and long distance runners. *PLoS One.* 9, e106066.
483 doi: 10.1371/journal.pone.0106066

484
485 Balsalobre-Fernández, C., Tejero-González, C. M., and del Campo-Vecino, J. (2015).
486 Seasonal strength performance and its relationship with training load on elite runners. *J.*
487 *Sports Sci. Med.* 14, 9-15.

488
489 Bleakley, C., McDonough, S., Gardner, E., Baxter, G. D., Hopkins, J. T., Davison, G.W.
490 (2012). Cold- water immersion (cryotherapy) for preventing and treating muscle
491 soreness after exercise. *Cochrane Database Syst Rev.* 2, CD008262. doi:
492 10.1002/14651858.CD008262.pub2.

493
494 Beattie, K., Kenny, I. C., Lyons, M., and Carson, B. P. (2014). The effect of strength
495 training on performance in endurance athletes. *Sports Med.* 44, 845-865. doi:

- 496 10.1007/s40279-014-0157-y
- 497 Berglund, B., and Hemmingson, P. (1987). Effect of reinfusion of autologous blood on
498 exercise performance in cross-country skiers. *Int. J. Sports Med.* 8, 231–233. doi:
499 10.1055/s-2008-1025661
- 500 Calbet, J. A., Lundby, C., Koskolou, M., Boushel, R. (2006). Importance of hemoglobin
501 concentration to exercise: acute manipulations. *Respir. Physiol. Neurobiol.* 151, 132–
502 140. doi: 10.1016/j.resp.2006.01.014
- 503 Conceição, F., Fernandes, J., Lewis, M., González-Badillo, J. J., Jiménez-Reyes, P.
504 (2015). Movement velocity as a measure of exercise intensity in three lower limb
505 exercises. *J. Sports Sci.* 34, 1099-1106. doi: 10.1080/02640414.2015.1090010
- 506 Consitt, L. A., Copeland, J. L., and Tremblay, M. S. (2002). Endogenous anabolic
507 hormone responses to endurance versus resistance exercise and training in women.
508 *Sports Med.* 32, 1–22.
- 509 Cormie, P., McBride, J. M., McGaulley, G. O. (2009). Power-time, force-time, and
510 velocity time curve analysis of the countermovement jump: impact of training. *J.*
511 *Strength Cond. Res.* 23, 177-186. doi: 10.1519/JSC.0b013e3181889324
- 512 Crewther, B. T., Keogh, J., Cronin, J., Cook, C. (2006). Possible stimuli for strength
513 and power adaptation: acute hormonal responses. *Sports Med.* 36, 215-238.
- 514 Crewther, B. T., Cook, C., Cardinale, M., Weatherby, R. P., Lowe, T. (2011). Two
515 emerging concepts for elite athletes: the short-term effects of testosterone and cortisol
516 on the neuromuscular system and the dose-response training role of these endogenous
517 hormones. *Sports Med.* 41, 103-123. doi: 10.2165/11539170-000000000-00000
- 518 De Gonzalo-Calvo, D., Fernandez-Garcia, B., de Luxan-Delgado, B., Rodriguez-
519 Gonzalez, S., Garcia-Macia, M., et al. (2012). Long-term training induces a healthy
520 inflammatory and endocrine emergent biomarker profile in elderly men. *Age.* 34, 761-
521 771. doi: 10.1007/s11357-011-9266-9. doi: 10.1007/s11357-011-9266-9
- 522 De Souza, M. J., Maguire, M. S., Maresh, C. M. et al. (1991). Adrenal activation and
523 the prolactin response to exercise in eumenorrheic and amenorrheic runners. *J. Appl.*
524 *Physiol.* 70, 2378– 2387.
- 525 Deason, J., Powers, S., Lawler, J., Ayers, D., and Stuart, M. (1991). Physiological
526 correlates to 800 meter running performance. *J. Sports Med. Phys. Fitness.* 31, 499-504.
- 527 Eliakim, A., Brasel, J. A., Mohan, S., Barstow, T. J., Berman, N., Cooper, D. M. (1996).
528 Physical fitness, endurance training, and the growth hormone-insulin-like growth factor
529 I system in adolescent females. *J. Clin. Endocrinol. Metab.* 81, 3986–3992. doi:
530 10.1210/jcem.81.11.8923848
- 531 Eliakim, A., Brasel, J. A., Mohan, S., Wong, W. L., Cooper, D. M. (1998). Increased
532 physical activity and the growth hormone-IGF-I axis in adolescent males. *Am. J.*
533 *Physiol.* 275(1 Pt 2), R308–14.

- 534 Ferrauti, A., Bergermann, M., and Fernandez-Fernandez, J. (2010). Effects of a
535 concurrent strength and endurance training on running performance and running
536 economy in recreational marathon runners. *J. Strength Cond. Res.* 24, 2770-2778. doi:
537 10.1519/JSC.0b013e3181d64e9c
- 538 Fiorentino, N. M., Rehorn, M. R., Chumanov, E. S., Thelen, D. G., and Blemker, S. S.
539 (2014). Computational models predict larger muscle tissue strains at faster sprinting
540 speeds. *Med. Sci. Sports Exerc.* 46, 776–786. doi: 10.1249/MSS.0000000000000172
- 541 Frystyk, J. (2010). Exercise and the growth hormone-insulin-like growth factor axis.
542 *Med. Sci. Sports Exerc.* 42, 58-66. doi: 10.1249/MSS.0b013e3181b07d2d
- 543 Gala, R. D. (1991). Prolactin and growth hormone in the regulation of the immune
544 system. *Proc. Soc. Exp. Biol. Med.* 198, 513–527.
- 545 Gatti, R., and De Palo, E. F. (2011). An update: salivary hormones and physical
546 exercise. *Scand. J. Med. Sci. Sports.* 21, 157–169. doi: 10.1111/j.1600-
547 0838.2010.01252.x
- 548 Gray, A. B., Telford, R. D., and Weidemann, M. J. (1993). Endocrine response to
549 intense interval exercise. *Eur. J. Appl. Physiol.* 66, 366–371. doi: 10.1007/BF00237784
- 550 Green, H. J., Sutton, J. R., Coates, G., Ali, M., Jones, S. (1991). Response of red cell
551 and plasma volume to prolonged training in humans. *J. Appl. Physiol.* 70, 1810– 1815.
- 552 Guglielmini, C., Casoni, I., Patracchini, M., Manfredini, F., Grazi, G., Ferrari, M.,
553 Conconi, F. (1989). Reduction of Hb levels during the racing season in nonsideropenic
554 professional cyclists. *Int. J. Sports Med.* 10, 352–356.
- 555 Guilhem G., Hanon, C., Gendreau, N., Bonneau, D., Guével, A., and Chennaoui, M.
556 (2015). Salivary hormones response to preparation and pre-competitive training of
557 world-class level athletes. *Front. Physiol.* 6, 333. doi: 10.3389/fphys.2015.00333
- 558 Hackney, A. C., Szczepanowska, E., and Viru, A. M. (2003). Basal testicular
559 testosterone production in endurance-trained males is suppressed. *Eur. J. Appl. Physiol.*
560 89, 198–201. doi: 10.1007/s00421-003-0794-6
- 561 Hickson, R. C., Hidaka, K., Foster, C., Falduto, M. T., and Chatterton, R. T. (1994).
562 Successive time courses of strength development and steroid hormone responses to
563 heavy-resistance training. *J. Appl. Physiol.* 76, 663–670.
- 564 Hilberg, T., Menzel, K., Glaser, D., Zimmermann, S., Gabriel, H. H. (2008). Exercise
565 intensity: platelet function and platelet-leukocyte conjugate formation in untrained
566 subjects. *Thromb. Res.* 122, 77–84. doi:
567 <http://dx.doi.org/10.1016/j.thromres.2007.08.018>
- 568 Hoff, J., Gran, A., and Helgerud, J. (2002). Maximal strength training improves aerobic
569 endurance performance. *Scand. J. Med. Sci. Sports.* 12, 288–295.
- 570 Horn, P. L., Pyne, D. B., Hopkins, W. G., and Barnes, C. J. (2010). Lower white blood

- 571 cell counts in elite athletes training for highly aerobic sports. *Eur. J. Appl. Physiol.* 110,
572 925–932. <http://doi.org/10.1007/s00421-010-1573-9>
- 573 Hudgins, B., Scharfenberg, J., Triplett, N. T., and McBride, J. M. (2013). Relationship
574 between jumping ability and running performance in events of varying distance. *J*
575 *Strength Cond Res*, 27, 563-567. doi: 10.1519/JSC.0b013e31827e136f
- 576 Jiménez-Reyes, P., and González-Badillo, J. J. (2011). Monitoring training load through
577 the CMJ in sprints and jump events for optimizing performance in athletics. *CCD.* 6,
578 207-217.
- 579 Jiménez-Reyes, P., Samozino, P., Cuadrado-Peñafiel, V., Conceição, F., González-
580 Badillo, J., et al. (2014). Effect of countermovement on power–force–velocity profile.
581 *Eur. J. Appl. Physiol.* 114, 2281-2288. doi: 10.1007/s00421-014-2947-1
- 582 Jung, A. P. (2003). The impact of resistance training on distance running performance.
583 *Sports Med.* 33, 539-552.
- 584 Kakanis, M. W., Peake, J., Brenu, E. W., Simmonds, M., Gray, B., et al. (2010). The
585 open window of susceptibility to infection after acute exercise in healthy young male
586 elite athletes. *Exerc. Immunol. Rev.* 16, 119–137.
- 587 Kanstrup, I. L., Ekblom, B. (1984). Blood volume and hemoglobin concentration as
588 determinants of maximal aerobic power. *Med. Sci. Sports Exerc.* 16, 256–262.
- 589 Kelly, C. M., Burnett, A. F., and Newton, M. J. (2008). The effect of strength training
590 on three-kilometer performance in recreational women endurance runners. *J. Strength*
591 *Cond. Res.* 22, 396–403. doi: 10.1519/JSC.0b013e318163534a
- 592 Knez, W. L., Coombes, J. S., Jenkins, D. G. (2006). Ultra-endurance exercise and
593 oxidative damage: implications for cardiovascular health. *Sports Med.* 36, 429–41.
- 594 Knudsen, J. B., Brodthagen, U., Gormsen, J., Jordal, R., Nørregaard-Hansen, K., et al.
595 (1982). Platelet function and fibrinolytic activity following distance running. *Scand. J.*
596 *Haematol.* 29, 425–430.
- 597 Kraemer, W. J., Volek, J. S., Bush, J. A., Putukian, M., and Sebastianelli, W. J. (1998).
598 Hormonal responses to consecutive days of heavy-resistance exercise with or without
599 nutritional supplementation. *J. Appl. Physiol.* 85, 1544–1555.
- 600 Legaz-Arrese, A., Serrano-Ostariz, E., Casajus-Mallen, J. A., and Munguia-Izquierdo,
601 D. (2005). The changes in running performance and maximal oxygen uptake after long-
602 term training in elite athletes. *J. Sports Med. Phys. Fitness.* 45, 435-440.
- 603 Luger, A., Watschinger, B., Deuster, P., Svoboda, T., Clodi, M., and Chrousos, G. P.
604 (1992). Plasma growth hormone and prolactin responses to graded levels of acute
605 exercise and to a lactate infusion. *Neuroendocrinology.* 56, 112–117. doi:
606 10.1159/000126912
- 607 Mairbäurl, H. (2013). Red blood cells in sports: effects of exercise and training on

- 608 oxygen supply by red blood cells. *Front. Physiol.* 4, 332. doi:
609 10.3389/fphys.2013.00332
- 610 Markovic, G., Dizdar, D., Jukic, I., Cardinale, M. (2004). Reliability and factorial
611 validity of squat and countermovement jump tests. *J. Strength Cond. Res.* 18, 551-555.
612 doi: 10.1519/1533-4287(2004)18<551:RAFVOS>2.0.CO;2
- 613 Mikkola, J. S., Rusko, H. K., Nummela, A. T., Paavolainen, L. M., and Häkkinen, K.
614 (2007). Concurrent endurance and explosive type strength training increases activations
615 and Fast force production of leg extensor muscles in endurance athletes. *J. Strength*
616 *Cond. Res.* 21, 613–620. doi: 10.1519/R-20045.1
- 617 Michishita, R., Shono, N., Inoue, T., Tsuruta, T., Node, K. (2010). Effect of exercise
618 therapy on monocyte and neutrophil counts in overweight women. *Am. J. Med. Sci.* 339,
619 152–156. doi: 10.1097/MAJ.0b013e3181c6a980
- 620 O’Toole, M. L., Hiller, W. D., Roalstad, M. S., Douglas, P. S. (1988). Hemolysis during
621 triathlon races: its relation to race distance. *Med. Sci. Sports Exerc.* 20, 272–275.
- 622 Paavolainen, L., Nummela, A., and Rusko, H. (1999). Neuromuscular characteristics
623 and muscle power as determinants of 5km running performance. *Med. Sci. Sports Exerc.*
624 31, 124–130.
- 625 Poehlman, E. T., and Copeland, K. C. (1990). Influence of physical activity on insulin-
626 like growth factor-I in healthy younger and older men. *J. Clin. Endocrinol. Metab.* 71,
627 1468–1473. doi: 10.1210/jcem-71-6-1468
- 628 Poehlman, E. T., Rosen, C. J., and Copeland, K. C. (1994). The influence of endurance
629 training on insulin-like growth factor-1 in older individuals. *Metabolism.* 43, 1401–
630 1405.
- 631 Quinn, M. D. (2003). The effects of wind and altitude in the 200-m sprint. *J. Appl.*
632 *Biomech.* 19, 49-59.
- 633 Ray, C. A., Cureton, K. J., Ouzts, H. G. (1990). Postural specificity of cardiovascular
634 adaptations to exercise training. *J. Appl. Physiol.* 69, 2202–2208.
- 635 Rietjens, G. J., W. M., Kuipers, H., Hartgens, F., and Keizer, H. A. (2002). Red blood
636 cell profile of elite Olympic distance triathletes. A three-year follow-up. *Int. J. Sports*
637 *Med.* 23, 391-396.
- 638
- 639 Rojas-Vega, S., Hollmann, W., Strüder, H. K. (2011). Influences of exercise and
640 training on the circulating concentration of prolactin in humans. *J Neuroendocrinol.* 24,
641 395-402. doi: 10.1111/j.1365-2826.2011.02266.x
- 642 Ronnestad, B. R. and Mujika, I. (2014). Optimizing strength training for running and
643 cycling endurance performance: A review. *Scand. J. Med. Sci. Sports.* 24, 603-612. doi:
644 10.1111/sms.12104.
- 645 Sánchez-Medina, L., Pérez, C., and González-Badillo, J. (2010). Importance of the

- 646 propulsive phase in strength assessment. *Int. J. Sports Med.* 31, 123-129. doi:
647 10.1055/s-0029-1242815
- 648 Saunders, P. U., Pyne, D. B., Telford, R. D., and Hawley, J. A. (2004). Factors affecting
649 running economy in trained distance runners. *Sports Med.* 34, 465-485.
- 650 Sawka, M. N., Convertino, V. A., Eichner, E. R., Schnieder, S. M., and Young, A. J.
651 (2000). Blood volume: importance and adaptations to exercise training, environmental
652 stresses, and trauma/sickness. *Med. Sci. Sports Exerc.* 32, 332-348. doi:
653 10.1097/00005768-200002000-00012
- 654 Schmidt, W., and Prommer, N. (2008). Effects of various straining modalities on blood
655 volume. *Scand. J. Med. Sci. Sports.* 18, 57-69. doi: 10.1111/j.1600-0838.2008.00833.x
- 656 Schmidt, W., and Prommer, N. (2010). Impact of alterations in total hemoglobin mass
657 on VO₂max. *Exerc. Sport Sci. Rev.* 38, 68-75. doi: 10.1097/JES.0b013e3181d4957a
- 658 Schumacher, Y. O., Grathwohl, D., Barturen, J. M., Wollenweber, M., Heinrich, L.,
659 Schmid, A., Huber, G., Keul, J. (2000). Haemoglobin, haematocrit and red blood cell
660 indices in elite cyclists. Are the control values for blood testing valid? *Int. J. Sports Med.*
661 21, 380-385. doi: 10.1055/s-2000-3785
- 662 Smallridge, R. C., Whorton, N. E., Burman, K. D., Fergusson, E. W. (1985). Effects of
663 exercise and physical fitness on the pituitary-thyroid axis and on prolactin secretion in
664 male runners. *Metabolism.* 34, 949-954.
- 665 Spurrs, R. W., Murphy, A. J., and Watsford, M. L. (2003). The effect of plyometric
666 training on distance running performance. *Eur. J. Appl. Physiol.* 89, 1-7. doi:
667 10.1007/s00421-002-0741-y
- 668 Taipale, R., Mikkola, J., Nummela, A., Vesterinen, V., Capostagno, B., Walker, S.,
669 Gitonga, D., Kraemer, W., and Häkkinen, K. (2010). Strength training in endurance
670 runners. *Int. J. Sports Med.* 31, 468-476. doi: 10.1055/s-0029-1243639
- 671 Taipale, R. S., Mikkola, J., Salo, T., Hokka, L., Vesterinen, V., Kraemer, W. J.,
672 Nummela, A., and Häkkinen, K. (2014). Mixed maximal and explosive strength training
673 in recreational endurance runners. *J. Strength Cond. Res.* 28, 689-699. doi:
674 10.1519/JSC.0b013e3182a16d73
- 675 Vincent, W. J. (1999). *Statistics in kinesiology*. Champaign (IL): Human Kinetics.
- 676 Vleck, V., Millet, G. P., and Alves, F. B. (2014). The impact of triathlon training and
677 racing on athletes' general health. *Sports Med.* 44, 1659-1692. doi:10.1007/s40279-
678 014-0244-0
- 679 Whittaker, J. P., Linden, M. D., Coffey, V. G. (2013). Effect of aerobic interval training
680 and caffeine on blood platelet function. *Med. Sci. Sports. Exerc.* 45, 342-350. doi:
681 10.1249/MSS.0b013e31827039db

682

683 **TABLE 1. Changes in strength and running variables during a complete athletics**
 684 **season in 800 m high-level athletes.**

Strength and sprint variables	T1	T2	T3	T4	T5
CMJ (cm)	40.0 ± 6.2 ^{##}	40.0 ± 6.6	40.9 ± 7.4	41.9 ± 5.9	43.0 ± 6.4 ^{aa,bb,c}
JS (cm)	21.3 ± 2.7	21.9 ± 2.9	22.6 ± 3.8	22.9 ± 3.4	23.0 ± 4.2
SQ (m·s ⁻¹)	1.19 ± 0.07 ^{##}	1.23 ± 0.09	1.26 ± 0.10	1.32 ± 0.05 ^{aaa,b}	1.28 ± 0.05 ^a
20 m (s)	2.93 ± 0.10	2.92 ± 0.11	2.92 ± 0.10	2.91 ± 0.08	2.88 ± 0.06
200 m (s)	-	24.12 ± 1.13 [#]	23.89 ± 1.36	23.48 ± 0.86 ^{bb}	23.26 ± 1.03 ^{bb}
800 m (s)	-	-	115.50 ± 4.77 ^{##}	-	113.79 ± 4.14 ^{cc}

685 a: $P < 0.05$; aa: $P < 0.01$; aaa: $P < 0.001$ (significant differences respect to T1); b: $P < 0.05$; bb: $P < 0.01$; bbb: $P <$
 686 0.001 (significant differences respect to T2); c: $P < 0.05$; cc: $P < 0.01$; ccc: $P < 0.001$ (significant differences respect
 687 to T3). Time effect: #: $P < 0.05$; ##: $P < 0.01$. CMJ: countermovement jump; JS: jump squat; SQ: average velocity
 688 attained with common loads in full squat test; 20 m: time achieved in 20 m sprint; 200 m: time achieved in 200 m
 689 sprint; 800 m: time achieved in 800 m running.

690

691

692

693

694

695

696

697

698

699

700

701

702

703

704

705 **TABLE 2. Changes in hematological parameters during a complete athletics**
 706 **season in 800 m high-level athletes.**

Hematological variables	T1	T2	T3	T4	T5
RBC (mil·mm³)	5.05 ± 0.41		5.14 ± 0.29		5.09 ± 0.38
Hb (g·dl⁻¹)	15.11 ± 0.75		15.32 ± 0.64		15.46 ± 0.88
Hct (%)	43.83 ± 2.32 ^{##}		44.86 ± 1.51		42.64 ± 2.11 ^{cc}
MCV (fl)	87.04 ± 4.73 ^{###}		87.52 ± 4.21		84.02 ± 3.64 ^{aaa,ccc}
MCH (pg)	30.10 ± 1.71		30.22 ± 1.16		30.50 ± 1.78
MCHC (%)	34.49 ± 1.18 ^{###}		34.17 ± 1.36		36.26 ± 1.08 ^{aaa,ccc}
RDW (%)	12.72 ± 0.53		12.77 ± 0.41		12.81 ± 0.50
WBC (mil·uL⁻¹)	6.78 ± 1.92 [#]		6.83 ± 2.24		5.92 ± 1.65 ^c
Neutrophils (mil·uL⁻¹)	3.51 ± 1.42 [#]		3.58 ± 1.45		2.91 ± 0.92 ^c
Lymphocytes (mil·uL⁻¹)	2.48 ± 1.03		2.46 ± 0.83		2.32 ± 0.73
Monocytes (mil·uL⁻¹)	0.59 ± 0.18 [#]		0.61 ± 0.18		0.52 ± 0.13 ^c
Eosinophils (mil·uL⁻¹)	0.16 ± 0.08		0.14 ± 0.07		0.14 ± 0.07
Basophils (mil·uL⁻¹)	0.03 ± 0.05		0.03 ± 0.05		0.05 ± 0.05
Platelets (mil·mm³)	224.38 ± 56.62		225.15 ± 57.00		209.77 ± 56.83
MPV (fl)	11.34 ± 1.03 [#]		11.34 ± 1.01		11.68 ± 1.15 ^{a,c}

707 a: $P < 0.05$; aa: $P < 0.01$; aaa: $P < 0.001$ (respect to T1); b: $P < 0.05$; bb: $P < 0.01$; bbb: $P < 0.001$ (respect to T2); c:
 708 $P < 0.05$; cc: $P < 0.01$; ccc: $P < 0.001$ (respect to T3). Time effect: #: $P < 0.05$; ##: $P < 0.01$; ###: $P < 0.001$. RBC:
 709 red blood cell count; Hb: hemoglobin; Hct: hematocrit; MCV: mean corpuscular volume; MCH: mean corpuscular
 710 hemoglobin; MCHC: mean corpuscular hemoglobin content; RDW: red blood cell distribution width; WBC: white
 711 blood cells count; MPV: mean platelet volume.

712

713

714

715

716

717

718

719 **TABLE 3. Changes in biochemical and hormonal response during a complete**
 720 **athletics season in 800 m high-level athletes.**

Biochemical and Hormonal response	T1	T2	T3	T4	T5
CK (U·L ⁻¹)	234.1 ± 142.6		257.9 ± 101.6		202.0 ± 111.5
PRL (ng·ml ⁻¹)	11.1 ± 6.0		12.3 ± 6.0		12.5 ± 4.3
GH (µg·L ⁻¹)	0.75 ± 0.94		0.74 ± 1.66		0.56 ± 1.31
IGF-1 (nmol·L ⁻¹)	37.7 ± 12.5 [#]		36.4 ± 12.7		33.8 ± 3.2
C (nmol·L ⁻¹)	367.8 ± 98.5		322.8 ± 77.8		347.9 ± 88.6
T (nmol·L ⁻¹)	19.4 ± 4.4		18.3 ± 4.8		20.6 ± 6.7

721 Time effect: #: $P < 0.05$. CK: creatin kinase; PRL: prolactin; GH: human growth hormone; IGF-1: insulin-like
 722 growth factor I; C: cortisol; T: testosterone.

723

724

725

726

727

728

729

730

731

732

733

734

735

736

737

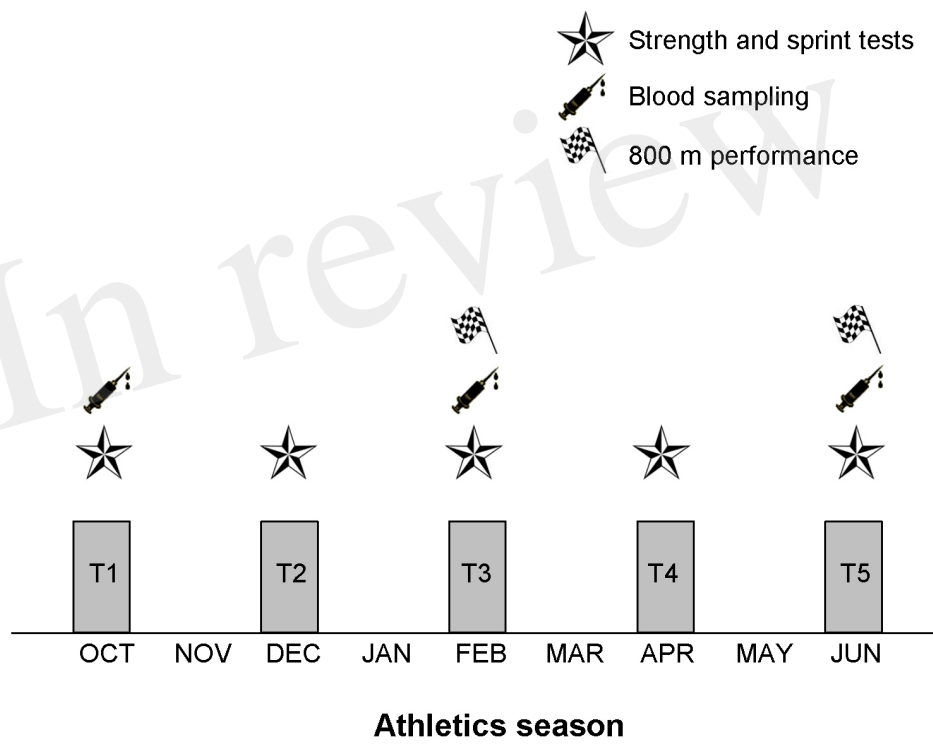
738

739 **FIGURE 1. Overview of the experimental design.** A total of five tests were
740 spread over the athletics season. Strength and sprint tests were performed in all
741 the tests. Blood samples were collected in T1, T3, and T5. Eight-hundred meter
742 performance was recorded in T3 and T5.

743

In review

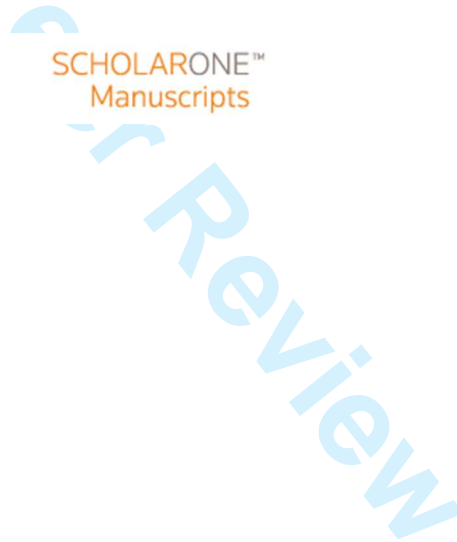
Figure 1.JPEG





**EFFECTS OF HIGH-SPEED STRENGTH TRAINING ON
PHYSICAL PERFORMANCE IN 800 METERS HIGH-LEVEL
ATHLETES**

Journal:	<i>International Journal of Sports Physiology and Performance</i>
Manuscript ID	Draft
Manuscript Type:	Original Investigation
Keywords:	Middle-distance running, countermovement jump, squat, hormonal, sprint



1 **TITLE PAGE**

2 **Title of the Article:** EFFECTS OF HIGH-SPEED STRENGTH TRAINING ON
3 PHYSICAL PERFORMANCE IN 800 METERS HIGH-LEVEL ATHLETES

4 **Submission Type:** Original Investigation

5 **Authors:** Beatriz Bachero-Mena^{1,2}, Fernando Pareja-Blanco^{1,2}, and Juan José González-
6 Badillo².

7 **Affiliations:** ¹Faculty of Sport Sciences, Pablo de Olavide University, Seville, Spain.
8 ²Physical Performance & Sports Research Center, Pablo de Olavide University, Seville,
9 Spain.

10 **Contact Details of the Corresponding Author:** Beatriz Bachero-Mena, Facultad del
11 Deporte, Universidad Pablo de Olavide, Ctra. de Utrera, km. 1, 41013, Seville, Spain.
12 E-mail: beatriz.bachero@hotmail.com

13 **Preferred Running Head:** Strength training in 800 meters high-level athletes

14 **Abstract Word Count:** 259

15 **Text-Only Word Count:** 3527

16 **Tables:** 3

17 **Figures:** 2

18

19

20

21

22

23

24

25

26

27

28

29

30

31 **ABSTRACT**

32 **Purpose:** Previously, it has been suggested that strength training could enhance
33 endurance performance. The aim of this study was to analyze the effects of a 25-week
34 strength training program in physical performance and hormonal response in 800 m
35 high-level athletes.

36
37 **Methods:** Thirteen male 800 m high-level athletes (personal best ranging from 1:43 to
38 1:58 min:ss) were divided into 2 groups: one group (n=6) followed a 25-week high-
39 speed strength training program (STG), whereas a control group (n=7) followed their
40 habitual strength training (CG). Three tests including sprint and 800 m running, strength
41 exercises and blood hormones samples were carried out during the 25-weeks.

42 **Results:** Both groups improved significantly performance in 800 m ($p \leq 0.01$), however,
43 STG showed an additional improvement in T200 ($p < 0.05$) and the strength variables:
44 CMJ ($P < 0.01$; 98/2/0%; 87/12/0%; from T1 to T3 and from T2 to T3, respectively)
45 and V_{1load} ($P < 0.05$; 91/9/0%; from T1 to T3), whereas CG did not reach significant
46 improvements in any of the strength variables analyzed. Concerning the hormonal
47 variables, only STG showed a significant ($P < 0.05$) decrease in IGF-1 from T2 to T3.
48 In addition, STG resulted in a *likely increase* in testosterone from T1 to T3, and CG
49 showed a *likely increase* in cortisol from T2 to T3.

50 **Conclusion:** The results of the study suggest that strength training characterized by
51 high-speed intensity and low volume, combined with jumps and resisted sprint training
52 produced improvements in both strength and running performance. These results were
53 accompanied by little or no changes in the hormonal response.

54 **Keywords:** Middle-distance running, countermovement jump, squat, hormonal, sprint.

55

56

57

58

59

60

61

62

63

64

65

66 **INTRODUCTION**

67 Traditionally, athletes involved in endurance running events have performed little
68 strength training to improve performance. Recently, the demonstrated benefits of
69 strength training in long and middle endurance performance^{1-4,6} have led to a growing
70 interest in assessing muscle strength in middle and long-distance athletes. It has been
71 suggested that strength training could enhance long-term endurance capacity both in
72 well-trained individuals and highly trained top-level endurance athletes.¹ Mikkola et al.⁶
73 reported that both heavy (3x4-6RM) and explosive (0-40% 1RM) resistance training
74 improved endurance in long-distance runners. Taipale et al.³ also showed a positive
75 effect of both maximal (80-85% 1RM) and explosive strength (30-40% 1RM) training
76 on running performance in endurance runners. Improvements in peak running speed
77 have also been reported after mixed maximal and explosive strength training (50-70%
78 1RM) performed concurrently with endurance training in recreational endurance
79 runners.⁴ Positive neuromuscular adaptations have been reported after heavy resistance
80 training, with improvements in both running economy and maximal strength.^{3,7,8} In
81 Sedano et al.⁹, a heavy-resistance training (3x7x70% 1RM) showed greater
82 improvements in running economy and 3-km run performance compared with a
83 strength-endurance resistance training (3x20x40% 1RM) in elite male runners. In
84 addition, Paavolainen et al.¹⁰ obtained improvements in 5-km run performance after 9
85 weeks of explosive resistance training (0-40% 1RM) in moderately trained male runners.
86 On the other hand, some studies have demonstrated benefits of plyometric training on
87 distance running performance.^{11,12} Plyometrics training is a specific form of strength
88 training aimed at enhancing the ability of muscles to generate power by increasing the
89 stiffness of the muscle-tendon system, which decreases ground contact time and
90 reduces energy expenditure.¹¹⁻¹³ Spurr et al.¹¹ obtained increased muscle tendon
91 stiffness with a coincidental increase in 3-km time performance after 6 weeks of
92 plyometric training (from 60 to 180 contacts by week) in long-distance runners.

93 Eight hundred-meter running is a middle-distance event where usually both strength and
94 endurance training are performed concurrently. Most of the investigations have studied
95 the effects of strength training up to 3-km distance essentially in endurance runners of
96 recreational or moderate level. However, to our knowledge, there are no studies on the
97 effects of strength training over shorter endurance distances such as 800 m event in
98 high-level athletes. In a recent study, Bachero-Mena et al.¹⁴ found significant
99 correlations between running performance in 800 m event and sprint times, squat
100 strength and loaded and unloaded jumps height in 800 m high-level athletes, suggesting
101 the importance of strength levels in 800-m athletes.

102 Concentrations of testosterone, growth hormone (GH), insulin-like growth factor I
103 (IGF-1) and cortisol are often considered as important indicators of biological functions
104 for tissue growth and degradation.¹⁵ Previous research has reported that concurrent
105 training may be responsible for increased cortisol levels.¹⁶⁻¹⁸ This may implicate
106 elevated endocrine responses and catabolism as a contributing factor to interference.¹⁸
107 Most of the studies concerning the hormonal adaptations to concurrent long-term
108 strength and endurance training lasted <8 weeks and involved recreational runners.^{3-6,18}
109 Long-term hormonal adaptations to endurance training have been characterized by a
110 decrease, or no change, in the basal concentrations of hormones.¹⁹ However, because of
111 the importance of both strength and endurance capacities in 800 m event, we would
112 suggest the necessity of analysing the hormonal response to concurrent long-term

113 training in 800 m athletes. Therefore, this study aimed to analyze the effects of a 25-
114 week strength training program in physical performance and hormonal response in 800
115 m high-level athletes.
116

117 **METHODS**

118 **Subjects**

119 Thirteen male athletes of national and international level in 800 m (with personal best
120 ranging from 1:43 to 1:58 min:ss) participated in this study. Two of them were
121 classified 1st and 2nd in the national championship and national ranking; they also had
122 participated in the latest Olympic Games. The subjects were divided into 2 groups: a
123 strength training group (STG, n=6, age: 22.0 ± 5.5 years; height: 178.7 ± 3.9 cm; body
124 mass: 64.8 ± 5.5 kg) and a control group (CG, n=7, age: 22.6 ± 5.9 years; height: 172.0
125 ± 5.9 cm; body mass: 62.2 ± 4.8 kg). All athletes had completed strength training
126 programs in the past and were familiarized with the testing exercises. No physical
127 limitations or musculoskeletal injuries that could affect testing were reported. All
128 participants were fully informed about procedures, potential risks and benefits of the
129 study and they all signed written informed consent prior to the tests. The study was
130 conducted in accordance with the Declaration of Helsinki II and approved by the Ethics
131 Committee of Pablo de Olavide University, Seville, Spain.

132 **Design**

133 A quasi-experimental design was undertaken to examine the effects of a 25-week
134 strength training program in performance in high-level 800 meters athletes. One group
135 (n=6) followed a 25-week strength training program (STG) divided into 2-cycles,
136 whereas a control group (n=7) followed their habitual strength training (CG), in
137 addition to their specific 800 m running training. The strength training program of the
138 STG consisted of low load (40-55% 1RM) and low volume (2-3 sets and 4-6
139 repetitions) in full squat, combined with plyometrics and sprint exercises. The CG
140 followed their habitual strength training, traditionally considered as a strength-
141 endurance training used by most endurance runners, consisting in a non-structured
142 circuit-type training. Three tests including sprint running, strength exercises and blood
143 hormones samples were carried out during the 25-weeks. The 1st test was performed in
144 October (T1), the 2nd test was performed in February (T2) during the indoor competition
145 period, and the 3rd test (T3) was performed in June during the outdoor competition
146 period.

147 **Procedures**

148 *Test Preparation.* The first testing day, after a standardized warm-up protocol, the
149 athletes performed the tests in the following order: 20 m sprint test (T20m),
150 countermovement jump (CMJ), jump squat (JS), full squat (V_{1load}), and plantar flexion
151 (RFD). The second testing day the athletes performed the 200 m test (T200m). Blood
152 samples for the hormones analysis were taken before the tests. The participants were
153 asked to rest from training the day before the sampling and the tests.

154 *Sprint testing.* Two 0–20 m trials were performed on a synthetic running track in an

155 indoor hall using 2 couples of photocells (Polifemo Radio Light; Microgate, Italy).
156 Runs were performed from static biped start position with the start line located 1 m
157 behind the start photocell. The best time of the two 0–20 m trials was scored. The rest
158 period between sets lasted 3 min.

159 *200 m running test.* One 200 m trial was performed on a synthetic running outdoor track
160 (Mondo). Wind conditions were monitored constantly by an Oregon Scientific WMR-
161 918 (Oregon Scientific, Tigard, USA) meteorological station. A mathematical model²⁰
162 was used in order to adjust the potential influence of wind in the time performances.
163 This mathematical model suggests that a head wind of -2.0 or -1.0 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ causes a time
164 lost of 0.121 and 0.059 s respectively, and that a tail wind of $+2.0$ or $+1.0$ causes a time
165 gain of 0.112 and 0.056 s respectively. The procedures were the same as the above
166 mentioned for the 20 m test.

167
168 *800 m performance.* The best 800 m time performance of the athletes (T800m) during
169 the winter competition season (T2) and the summer competition season (T3) was
170 recorded for analysis.

171 *Jump measurements (CMJ and JS).* The CMJ and JS were performed on an infrared
172 platform Optojump (Microgate, Italy). The CMJ was performed with both hands on the
173 waist, while performing a downward movement until 90° of knee flexion followed by a
174 vertical jump of maximum effort. The participants were required to do 3 trials separated
175 by 1 min rest, mean height being scored. The JS test was performed with progressive
176 loads ranging from 20 kg up to the load allowing the subject to jump up no more than
177 20 cm high or less. The JS test was performed using a Smith machine (Multipower
178 Fitness Line, Peroga, Murcia, Spain), which allows a smooth vertical displacement of
179 the bar along a fixed pathway. The athletes performed two JS separated by 2 min rest
180 with each load. The load corresponding to the JS height of 20 cm was used for the
181 subsequent statistical analysis.

182 *Full Squat test.* An incremental loading full squat test was performed on a Smith
183 machine (Multipower Fitness Line, Peroga, Spain) using a linear velocity transducer (T-
184 Force System; Ergotech, Spain). Instantaneous velocity was sampled at a frequency of
185 1,000 Hz. After a warm-up, initial load was set at 20 kg for all participants and was
186 gradually increased in 10 or 5 kg increments until the attained mean propulsive velocity
187 was <1 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. This velocity of 1 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ corresponds approximately to 60% 1RM and was
188 considered sufficient load to analyze the leg strength.²¹ The participants started from the
189 upright position with their knees and hips fully extended. Each subject descended in a
190 continuous motion until the top of the thighs got below the horizontal plane, and then
191 they immediately ascended back to the upright position. The participants were always
192 required to execute the concentric phase of the squat at maximal intended velocity. The
193 loads reported in this study correspond to the load reached at 1 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ velocity ($V_{1\text{load}}$)
194 of the propulsive phase.²²

195 *Rate of Force Development test.* This test was performed on a Smith machine
196 (Multipower Fitness Line, Peroga, Murcia, Spain) using a force plate (Isonet, JLML,
197 Spain). Subjects performed 2x5 repetitions of maximal concentric plantar flexion with
198 the 80% of their body mass. The participants started from the upright position with their
199 knees and hips fully extended, the barbell resting across their back at the level of the
200 acromion. Each subject ascended in an explosive manner raising the heels by extending

201 the ankles as high as possible and flexing the calf (with knees completely extended),
202 and then immediately reversed motion and descended back to the upright position. The
203 rate of force development was calculated from 50 ms intervals (RFD) in the force-time
204 curve. The mean value of the 10 repetitions performed was used for the analysis.

205 *Blood sampling.* Concentrations of total testosterone, cortisol, IGF-1, and GH were
206 measured using electrochemiluminescence immunoassays on the Cobas E170
207 autoanalyzer (Roche Diagnostics, Indianapolis, USA). Before blood sampling the
208 athletes rested on a bed for at least 10 minutes. Blood samples were taken from the
209 athlete in supine position from the antecubital vein by a qualified laboratory technician
210 using the Vacuette system, and collected in tubes containing no anticoagulant (5 ml). To
211 obtain the serum, the blood was centrifuged for 5 minutes at 4500 rpm.

212
213 *Strength training program.* The strength-training program in the STG consisted in full
214 squats, JS, CMJ, resisted sprints, and step phase of triple jump, with a frequency of 2
215 sessions per week, for a period of 25 weeks, divided into 2 cycles. Table 1 shows in
216 detail the characteristics of the STG program. The intensity load of the squat and JS
217 exercises were assigned according to the results in each preceding test. The relative
218 intensity of the squat exercise progressively increased from 40 to 55% 1RM in the first
219 training cycle and from 45 to 55% 1RM in the second training cycle. Training volume
220 was always low (2-3 sets and 4-6 repetitions per set) and each repetition performed at
221 maximal intended velocity. The CG followed a typical strength-endurance training with
222 a frequency of 1 session/week. This training was characterized by a high number of
223 repetitions performed at no maximal velocity and with no progression of the load
224 (<40% 1RM). The main exercises of this group were: half-squat, barbell step-ups, JS,
225 jumps, and hamstrings, quadriceps and calf exercises in machine.

226 **Statistical Analyses**

227 All of the data are reported as mean value \pm standard deviation (SD). The normal
228 distribution of the data was verified with the Shapiro-Wilk test. Data were analyzed
229 using a 2 x 3 factorial ANOVA using one between factor (STG vs. CG) and three within
230 factor (T1 vs. T2 vs. T3). A one-way analysis of covariance (ANCOVA) was performed
231 for the variable with differences between groups found at T1 (RFD). Statistical
232 significance was set at $P \leq 0.05$. In addition to this null hypothesis testing, data were
233 assessed for clinical significance using an approach based on the magnitudes of change.
234 Effect sizes (ES) were calculated using *Hedge's g* on the pooled SD. Probabilities were
235 also calculated to establish whether the true (unknown) differences were similar to,
236 lower or higher than the smallest worthwhile difference or change (0.2 x between-
237 subject SD).²³ Quantitative chances of *better* or *worse* effects were assessed
238 qualitatively as follows: <1%, almost certainly not; 1-5%, very unlikely; 5-25%,
239 unlikely; 25-75%, possible; 75-95%, likely; 95-99%, very likely; and >99%, almost
240 certain. If the chances of obtaining *beneficial/better* or *detrimental/worse* were both
241 >5%, the true difference was assessed as *unclear*.²⁴ Inferential statistics based on the
242 interpretation of magnitude of effects were calculated using a purpose-built spreadsheet
243 for the analysis of controlled trials.²⁵ The rest of the statistical analyses were performed
244 using SPSS for Mac (IBM Corporation, New York, NY, USA) (release 20.0.0).

245 **RESULTS**

246 Mean and SD data of sprint and strength tests are reported in Table 2, and hormonal
247 variables are reported in Table 3. ES intra-group and between groups for the running
248 and strength variables (T1 vs. T2, T1 vs. T3, T2 vs. T3) are reported in Figures 1 and 2.
249 No significant differences between the two groups were found at T1 for any of the
250 variables analyzed except for RFD, in favor of CG.

251

252 Running tests

253

254 There were no changes when comparing between groups for any of the running
255 variables analyzed (T20m, T200m, T800m), however a *likely positive* effect was
256 observed in T200m in favor of STG from T2 to T3 (Figure 2). On the other hand, when
257 comparing intragroup changes, training resulted in a *possibly positive* and *likely positive*
258 effect for T1 vs. T3 and T2 vs. T3 in T20m for STG and CG, respectively. STG showed
259 a significant improvement in performance in T200m ($P < 0.05$; 85/15/0%) and in
260 T800m ($P \leq 0.01$; 80/20/0%) from T2 to T3, whereas CG only improved in T800m ($P <$
261 0.01 ; 98/2/0%) (Figure 1).

262

263 Strength and jump tests

264

265 STG obtained a better effect than CG in the following variables (Figure 2): *possibly* in
266 CMJ (T1 vs. T3 and T2 vs. T3); *likely* in JS (T1 vs. T2 and T1 vs. T3); *possibly* (T1 vs.
267 T2) and *very likely* (T1 vs. T3) in V_{1load} ; and *likely* (T1 vs. T2 and T1 vs. T3) in RFD.
268 When comparing intragroup differences, STG improved CMJ ($P < 0.01$; 98/2/0%;
269 87/12/0%; from T1 to T3 and from T2 to T3, respectively) and V_{1load} ($P < 0.05$;
270 91/9/0%; from T1 to T3), whereas CG did not reach significant improvements in any of
271 the variables analyzed (Table 2). Moreover, STG showed *likely positive* effect on JS for
272 T1 vs. T2 and T1 vs. T3, whereas CG showed *unclear* effects. Furthermore, greater ES
273 on RFD were observed for STG when compared with CG (standardized differences of
274 *very likely positive/likely positive* for STG and *unclear/possibly negative* for CG in T1
275 vs. T2 and T1 vs. T3, respectively) (Figure 1).

276

277 Hormonal parameters

278

279 Concerning the hormonal parameters, only STG showed a significant ($P < 0.05$)
280 decrease in IGF-1 from T2 to T3 (Table 3). The rest of the hormonal parameters
281 remained unaltered (Table 3). STG resulted in a *likely increase* in testosterone from T1
282 to T3 and from T2 to T3. CG showed a *likely increase* in cortisol from T2 to T3. The
283 changes observed when comparing between groups showed a *possibly increase* for STG
284 in IGF-1 from T1 to T2, whereas the differences between groups in the rest of the
285 hormones analyzed remained *unclear*.

286 DISCUSSION

287 The main purpose of this study was to analyze the effects of a high-speed and low
288 volume strength-training program in 800 m high-level athletes during an athletics
289 season. The findings of the present study suggest that the strength training performed by
290 STG characterized by high-speed intensity and low volume, combined with jumps and
291 resisted sprint training produced improvements in both strength and running
292 performance. These results were accompanied by little or no changes in the hormonal
293 response.

294 Previous studies have shown that an improvement in lower limb strength could benefit
295 performance in middle and long-distance athletes.^{1-4,6} Our findings support this
296 hypothesis since significant increases in CMJ, V_{1load} in the squat exercise and T200m
297 occurred in STG, together with an improvement in 800 m performance. On the other
298 hand, all the running and strength-related variables remained unaltered in CG, except
299 for T800m. The improvement by both groups in 800 m performance was something
300 expected since they both performed specific 800 m training. The improvement in the
301 STG group of the strength (CMJ and V_{1load}) and sprint running (T200m) variables
302 analyzed shows that a specific response was induced by high-speed and low volume
303 strength training program, and suggest the importance that an appropriate strength
304 training program could have in 800 m performance, especially in 800 m races where the
305 final result is decided in the final sprint. In this line, previous studies have reported
306 improvements in both strength and endurance running performance after conducting
307 heavy or explosive resistance training programs.^{3-4,6} In agreement with our results,
308 Taipale et al.³ who compared the effects of maximal (80-85% 1RM), explosive (30-40%
309 1RM) and circuit-strength (3x40-50s, relative intensity not specified) training
310 concurrently with endurance training, suggested that maximal or explosive strength
311 training performed concurrently with endurance training were more effective in
312 improving strength (1RM and CMJ) and endurance performance in recreational
313 endurance runners than circuit-strength training. However, Mikkola et al.⁵ did not find
314 any improvement in endurance performance after concurrent endurance and explosive
315 strength training (running sprint, jumping and resistance exercises with low loads at
316 high action velocities) despite the improvements in 30 m sprint and maximal force of
317 the leg extensor muscles. On the contrary, previous studies conducting the typical
318 strength-endurance training characterized by a high number of repetitions per set
319 performed at no maximal velocity did not find significant improvements in strength
320 parameters during an athletics season in middle and long-distance athletes.²⁶ However,
321 it has been shown that a strength-training program characterized by low-moderate loads
322 and low volume always performed at maximal intended velocity combined with jumps
323 and resisted sprint training,²⁷⁻²⁸ as the one conducted by the STG group in our study,
324 could favor the neuromuscular adaptations related with performance in strength and
325 sprint. Moreover, in a previous study,²⁷ a high-speed and low volume strength training
326 program did not produce any potential negative effect on aerobic endurance, in fact, it
327 even could have entailed a substantial improvement. In addition, the improvements in
328 running performance through strength training might be the consequence of several
329 mechanisms such as: a better coordination and co-activation of muscles involved in
330 running, an increase in leg stiffness and decrease in the contact phase times,²⁹⁻³⁰ or an
331 improved biomechanical efficiency induced by positive changes in mechanical aspects
332 of running style,³¹ allowing a runner to do less work at a given running speed.

333

334 With regard to the hormonal response, no long-term changes were observed except for
335 IGF-1 in STG, which showed a significant ($P < 0.05$) decrease from T2 to T3 ($317.3 \pm$
336 125.0 to 291.7 ± 126.2 nmol·L⁻¹). Studies of the chronic effects of exercise on the
337 circulating IGF-I have yielded inconsistent results. Some studies have shown reductions
338 in immunoreactive IGF-I levels after several weeks of exercise despite an improved
339 physical performance (muscle strength and/or VO_{2max}).³²⁻³³ Previous studies have
340 indicated that concurrent training may be responsible for increased cortisol levels¹⁶⁻¹⁷
341 and either no¹⁶ or minimal changes¹⁷ in anabolic hormones. Although not significant,
342 CG showed a *likely increase* in cortisol from T2 to T3 and STG resulted in a *likely*
343 *increase* in testosterone from T1 to T3 and from T2 to T3. Guilhem et al.³⁴ found a

344 significant increase of salivary testosterone in track and field athletes of different
345 disciplines during the pre-competitive period, which could be explained by the load
346 diminution during the competition season. Similarly, Taipale et al.⁴ found a significant
347 increase in testosterone in recreational endurance runners after 12 weeks of mixed
348 maximal and explosive strength training; however, cortisol remained statistically
349 unaltered. In our study, the hormonal response to long-term training does not seem to be
350 affected by the training program performed. In general, the strength training followed
351 by STG did not alter the basal concentrations of the different hormones analyzed.

352

353 **CONCLUSIONS**

354

355 In conclusion, a high-speed and low volume strength-training program performed
356 during 25 weeks resulted in meaningful gains in running and strength-related variables.
357 The hormonal response remained in general unaltered in both STG and CG. These
358 results indicate the positive effects that a strength training program with these
359 characteristics could have in 800 m performance, especially in 800 m races where the
360 final result is decided in the final sprint, which reflects the importance of strength levels
361 in middle-distance athletes.

362

363 **PRACTICAL APPLICATIONS**

364

365 The results of the present study contribute to improve our knowledge about the effects
366 of strength training in high-level middle distance athletes. According to our results, this
367 type of strength training can increase the lower limb strength and sprinting speed and so
368 improve the 800 m specific performance while avoiding the interference with endurance
369 and the specific 800 m training sessions. Future investigations should include
370 appropriate strength programs (exercise, load and velocity-based prescription) over
371 long-term intervention periods (>6 months).

372 **ACKNOWLEDGMENTS**

373 The authors would like to thank the coaches and athletes who have participated in the
374 study. This study was partially supported by a grant from the FPU Program of the
375 Education, Culture and Sport Ministry of Spain.

376

For Peer Review

377 REFERENCES

- 378 1. Aagaard P, Andersen JL. Effects of strength training on endurance capacity in
379 top level endurance athletes. *Scand J Med Sci Sports*. 2010;20:39-47.
- 380 2. Beattie K, Kenny IC, Lyons M, Carson BP. The Effect of Strength Training on
381 Performance in Endurance Athletes. *Sports Medicine*. 2014;44:845-865.
- 382 3. Taipale R, Mikkola J, Nummela A, Vesterinen V, Capostagno B, Walker S,
383 Gitonga D, Kraemer W, Häkkinen K. Strength training in endurance runners. *Int*
384 *J Sports Med*. 2010;31:468-476.
- 385 4. Taipale RS, Mikkola J, Salo T, Hokka L, Vesterinen V, Kraemer WJ, Nummela
386 A, Häkkinen K. Mixed maximal and explosive strength training in recreational
387 endurance runners. *J Strength Cond Res*. 2014;28:689-699.
- 388 5. Mikkola J, Rusko H, Nummela A, Pollari T, Hakkinen K. Concurrent endurance
389 and explosive type strength training improves neuromuscular and anaerobic
390 characteristics in young distance runners. *Int J Sports Med*. 2007;28:602-611.
- 391 6. Mikkola J, Vesterinen V, Taipale R, Capostagno B, Häkkinen K, Nummela A.
392 Effect of resistance training regimens on treadmill running and neuromuscular
393 performance in recreational endurance runners. *J Sports Sci*. 2011;29:1359-1371.
- 394 7. Storen O, Helgerud J, Stoa EM, et al. Maximal strength training improves
395 running economy in distance runners. *Med Sci Sports Exerc*. 2008;40:1087-
396 1092.
- 397 8. Millet GP, Jaouen B, Borrani F, et al. Effects of concurrent endurance and
398 strength training on running economy and VO₂ kinetics. *Med Sci Sports Exerc*.
399 2002;34:1351-1359.
- 400 9. Sedano S, Marin PJ, Cuadrado G, et al. Concurrent training in elite male
401 runners: the influence of strength versus muscular endurance training on
402 performance outcomes. *J Strength Cond Res*. 2013;27:2433-2443.
- 403 10. Paavolainen LM, Nummela AT, Rusko HK. Neuromuscular characteristics and
404 muscle power as determinants of 5-km running performance. *Med Sci Sports*
405 *Exerc*. 1999;31:124-130.
- 406 11. Spurrs R, Murphy A, Watsford M. The effect of plyometric training on distance
407 running performance. *Eur J Appl Physiol*. 2003;89:1-7.
- 408 12. Turner AM, Owings M, Schwane JA. Improvement in running economy after 6
409 weeks of plyometric training. *J Strength Cond Res*. 2003;17:60-7.
- 410 13. Anderson T. Biomechanics and running economy. *Sports Med*. 1996;22:76-89.
- 411 14. Bachero-Mena B, Pareja-Blanco F, Rodríguez-Rosell D, Yáñez-García JM,
412 Mora-Custodio R, González-Badillo JJ. Relationships between sprint, jumping
413 and strength abilities, and 800 m performance in male athletes of national and
414 international levels. *J Hum Kinet*. 2017 "In Press"
- 415 15. Crewther BT, Keogh J, Cronin J, Cook C. Possible stimuli for strength and
416 power adaptation: acute hormonal responses. *Sports Med*. 2006;36:215-238.
- 417 16. Bell G, Syrotuik D, Socha T, Maclean I, Quinney HA. Effect of strength training
418 and concurrent strength and endurance training on strength, testosterone, and
419 cortisol. *J Strength Cond Res*. 1997;11:57-64.
- 420 17. Kraemer WJ, Patton JF, Gordon SE, Harman EA, Deschenes MR, Reynolds K,
421 Newton RU, Tripplett NT, and Dziados JE. Compatibility of high-intensity
422 strength and endurance training on hormonal and skeletal muscle adaptations. *J*
423 *Appl Physiol*. 1995;78:976-989.
- 424 18. Jones TW, Howatson G, Russell M, French DN. Performance and endocrine
425 responses to differing ratios of concurrent strength and endurance training. *J*

- 426 *Strength Cond Res.* 2016;30:693–702.
- 427 19. Consitt LA, Copeland JL, Tremblay MS. Endogenous anabolic hormone
428 responses to endurance versus resistance exercise and training in women. *Sports*
429 *Med.* 2002;32:1–22.
- 430 20. Quinn MD. The effects of wind and altitude in the 200-m sprint. *J Appl Biomech.*
431 2003;19:49-59.
- 432 21. Sánchez-Medina L, García-Pallarés J, Pérez C, González-Badillo JJ. Estimation
433 of relative load from bar velocity in the full back squat exercise. *Sports Med Int*
434 *Open.* 2017;1:E80-E87.
- 435 22. Sánchez-Medina L, Pérez C, González-Badillo J. Importance of the propulsive
436 phase in strength assessment. *Int J Sports Med.* 2010;31:123-129.
- 437 23. Cohen J. *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences.* Hillsdale, MI:
438 Lawrence Erlbaum; 1988.
- 439 24. Hopkins WG, Marshall SW, Batterham AM, Hanin J. Progressive statistics for
440 studies in sports medicine and exercise science. *Med Sci Sports Exerc.*
441 2009;41:3-13.
- 442 25. Hopkins WG. Spreadsheets for analysis of controlled trials, with adjustment for
443 a subject characteristic. *Sportscience.* 2006;10:46-50.
- 444 26. Balsalobre-Fernández C, Tejero-González CM, del Campo-Vecino J. Seasonal
445 strength performance and its relationship with training load on elite runners. *J*
446 *Sports Sci Med.* 2015;14:9-15.
- 447 27. González-Badillo JJ, Pareja-Blanco F, Rodríguez-Rosell D, Abad-Herencia JL,
448 Del Ojo-López JJ, and Sánchez-Medina L. Effects of velocity-based resistance
449 training on young soccer players of different ages. *J Strength Cond Res.*
450 2015;29:1329–1338.
- 451 28. Franco-Márquez F, Rodríguez-Rosell D, González-Suárez JM, Pareja-Blanco F,
452 Mora-Custodio R, Yáñez-García JM, González-Badillo JJ. Effects of combined
453 resistance training and plyometrics on physical performance in young soccer
454 players. *Int J Sports Med.* 2015;36:906-914.
- 455 29. Paavolainen LM, Nummela A, Rusko H, et al. Neuromuscular characteristics
456 and fatigue during 10 km running. *Int J Sports Med.* 1999;20:516–521.
- 457 30. Kyrolainen H, Belli A, Komi PV. Biomechanical factors affecting running
458 economy. *Med Sci Sports Exerc.* 2001;33:1330–1337.
- 459 31. Johnston R, Quinn T, Kertzer R, et al. Strength training in female distance
460 runners: impact on running economy. *J Strength Cond Res.* 1997;11:224–229.
- 461 32. Eliakim A, Brasel JA, Mohan S, Barstow TJ, Berman N, Cooper DM. Physical
462 fitness, endurance training, and the growth hormone-insulin-like growth factor I
463 system in adolescent females. *J Clin Endocrinol Metab.* 1996;81:3986–3992.
- 464 33. Eliakim A, Brasel JA, Mohan S, Wong WL, Cooper DM. Increased physical
465 activity and the growth hormone-IGF-I axis in adolescent males. *Am J Physiol.*
466 1998;275:R308–314.
- 467 34. Guilhem G, Hanon C, Gendreau N, Bonneau D, Guével A, Chennaoui M.
468 Salivary hormones response to preparation and pre-competitive training of
469 world-class level athletes. *Front Physiol.* 2015;6:333.
- 470
- 471
- 472
- 473

474 **FIGURE LEGENDS**

475 **Figure 1.** Intra-group changes in T20m, T200m, T800m, CMJ, JS, V_{1load} , and RFD in
476 strength training group (STG) and control group (CG). A) T1 vs. T2; B) T1 vs. T3; C)
477 T2 vs. T3. Bars indicate uncertainty in the true mean changes with 90% confidence
478 intervals. Trivial (shaded) areas were calculated from the smallest worthwhile change.
479 A reduction of time in the running variables was interpreted as a positive effect.

480 **Figure 2.** Between-group changes in T20m, T200m, T800m, CMJ, JS, V_{1load} , and
481 RFD in strength training group (STG) and control group (CG). A) T1 vs. T2; B) T1 vs.
482 T3; C) T2 vs. T3. Bars indicate uncertainty in the true mean changes with 90%
483 confidence intervals. Trivial (shaded) areas were calculated from the smallest
484 worthwhile change.

For Peer Review

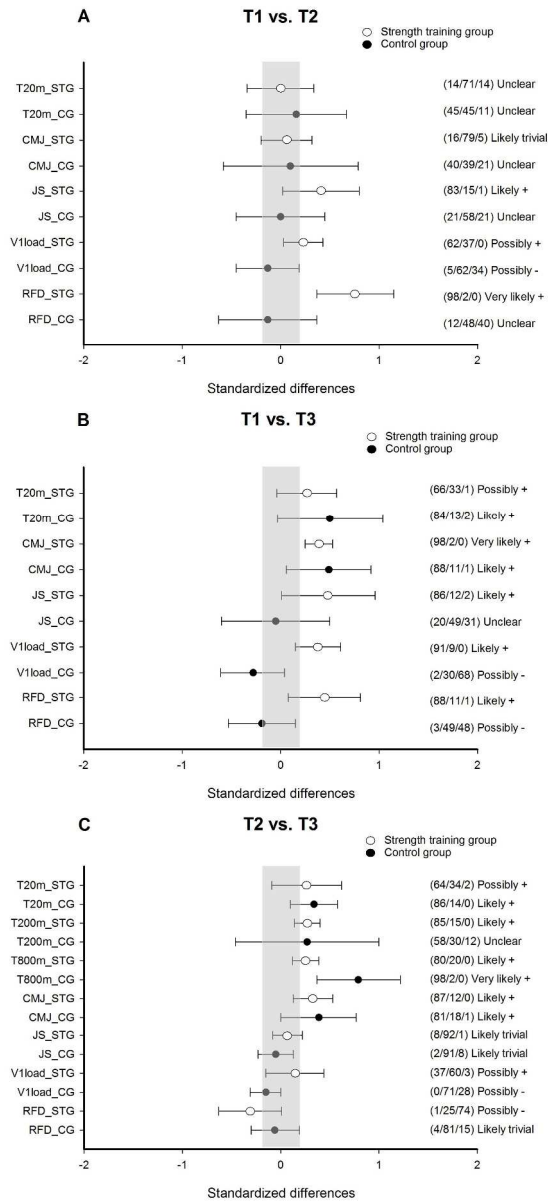


Figure 1. Intra-group changes in T20m, T200m, T800m, CMJ, JS, V1load, and RFD in strength training group (STG) and control group (CG). A) T1 vs. T2; B) T1 vs. T3; C) T2 vs. T3. Bars indicate uncertainty in the true mean changes with 90% confidence intervals. Trivial (shaded) areas were calculated from the smallest worthwhile change. A reduction of time in the running variables was interpreted as a positive effect.

178x381mm (300 x 300 DPI)

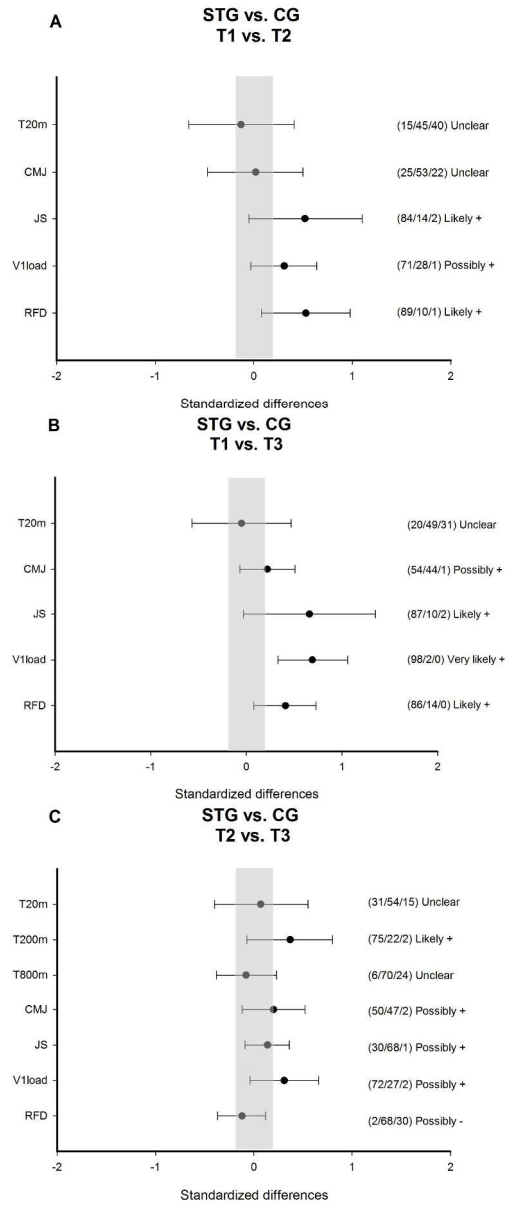


Figure 2. Between-group changes in T20m, T200m, T800m, CMJ, JS, V1load, and RFD in strength training group (STG) and control group (CG). A) T1 vs. T2; B) T1 vs. T3; C) T2 vs. T3. Bars indicate uncertainty in the true mean changes with 90% confidence intervals. Trivial (shaded) areas were calculated from the smallest worthwhile change.

160x381mm (300 x 300 DPI)

Table 1. General characteristics of the strength-training program followed by STG

		Cycle 1 (T1 to T2)	Cycle 2 (T2 to T3)
Weeks		11	14
Sessions		19-22	25-28
SQ	%1RM	40-55	45-55
	Sets	2-3	2-3
	Rep	4-6	4-6
JS	%load 20cm	50-70	50-70
	Sets	3-4	3-4
	Rep	4-5	4-5
Resisted sprint	Distance (m)	20-40	20-40
	Sets	3-5	3-5
	Load (%BM)	10	10
Step phase of triple jump	Number of steps	12-16	12-16
	Sets	3-5	3-5

STG: Strength training group; T1: test 1; T2: test 2; T3: test 3; SQ: full squat exercise; JS: Jump squat exercise; %1RM: percentage of one repetition maximum; Rep: number of repetitions; %load 20cm: percentage of the load reached at 20 cm; %BM: percentage of body mass.

Table 2. Changes in running and strength performance variables from pre- to post-training for each group.

	STG			CG		
	T1	T2	T3	T1	T2	T3
T20m (s)	2.91 ± 0.12	2.91 ± 0.14	2.87 ± 0.08	2.95 ± 0.08	2.93 ± 0.07	2.90 ± 0.06
T200m (s)		23.78 ± 1.98	22.90 ± 1.18 ^b		23.70 ± 0.44	23.48 ± 0.59
T800m (s)		112.79 ± 6.42	111.35 ± 5.79 ^{bb}		117.97 ± 1.97	116.11 ± 1.17 ^{bb}
CMJ (cm)	41.9 ± 6.9	42.4 ± 9.1	45.1 ± 7.2 ^{aa,bb}	38.3 ± 3.2	38.7 ± 4.7	40.1 ± 3.7
JS (kg)	29.2 ± 18.9	38.3 ± 18.6	40.0 ± 19.5	30.7 ± 12.4	30.7 ± 11.7	30.0 ± 10.0
V₁load (kg)	52.4 ± 15.5	56.7 ± 15.5	59.4 ± 10.4 ^a	55.2 ± 13.5	54.5 ± 11.7	53.60 ± 11.7
RFD (N·s⁻¹)	5405.7 ± 1213.5 [#]	6495.6 ± 1270.5	6049.6 ± 1128.2 [#]	8497.4 ± 1910.3	8204.5 ± 1894.0	8083.2 ± 1522.9

STG: Strength training group (n = 6); CG: Control Group (n = 7); T1: test 1; T2: test 2; T3: test 3; T20m: 20 m sprint time; T200m: 200 m sprint time; T800m: 800 m time; CMJ: Countermovement jump; JS: load of 20 cm height in the jump squat exercise; V₁load: load reached at 1 m·s⁻¹ velocity in the full squat exercise; RFD: rate of force development at 50 ms in the plantar flexion test.

Intra-group significant differences: ^a: P < 0.05; ^{aa}: P < 0.01 (respect to T1); ^b: P < 0.05; ^{bb}: P < 0.01 (respect to T2).

Inter-group significant differences in respect to control group: [#]: P < 0.05.

Table 3. Changes in hormonal variables from pre- to post-training for each group.

	STG			CG		
	T1	T2	T3	T1	T2	T3
Testosterone (nmol·L⁻¹)	5.3 ± 1.3	5.2 ± 1.1	6.0 ± 1.9	6.1 ± 1.2	5.6 ± 1.7	6.3 ± 2.0
Cortisol (nmol·L⁻¹)	12.8 ± 3.3	12.4 ± 2.8	12.6 ± 3.1	13.1 ± 3.8	11.0 ± 3.2	12.9 ± 3.9
IGF-1 (nmol·L⁻¹)	309.2 ± 117.0	317.3 ± 125.0	291.7 ± 126.2 ^b	266.0 ± 84.5	245.0 ± 59.4	239.5 ± 71.6
GH (µg·L⁻¹)	0.28 ± 0.26	0.22 ± 0.25	0.24 ± 0.20	1.27 ± 1.19	1.25 ± 2.44	0.92 ± 1.95

STG: Strength training group (n = 6); CG: Control Group (n = 7); T1: test 1; T2: test 2; T3: test 3; IGF-1: insulin-like growth factor I; GH: human growth hormone.

Intra-group significant differences: ^b: P < 0.05 (respect to T2).